

*На правах рукописи*

**Кондратенко Андрей Сергеевич**



СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОХОДКИ СКВАЖИН С  
ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБСАДКОЙ И ЦИКЛИЧНО-  
ПОТОЧНЫМ УДАЛЕНИЕМ РАЗРУШЕННОЙ ПОРОДЫ

*Специальность 2.8.1. Технология и техника  
геологоразведочных работ*

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

Санкт-Петербург — 2021

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

**Официальные оппоненты:**

***Повалихин Александр Степанович,***

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.

***Хузина Лилия Булатовна,***

доктор технических наук, профессор, государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Альметьевский государственный нефтяной институт", кафедра бурения нефтяных и газовых скважин, заведующий кафедрой.

***Поляков Андрей Вячеславович,***

доктор технических наук, профессор, общество с ограниченной ответственностью «Экспертиза промышленной безопасности», инженер-эксперт.

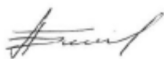
**Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.**

**Защита состоится 21 декабря 2021 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ГУ 2021.3 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](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 21 сентября 2021 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. Горизонтальное и наклонное бурение выполняется при бестраншейном строительстве и при проходке специальных выработок малого сечения в ходе ведения инженерно-геологических и геофизических работ. Вертикальная проходка в мягких и рыхлых породах осуществляется при сооружении кондукторов эксплуатационных и геологоразведочных скважин, при опробовании хвостохранилищ и техногенных полигонов, при сооружении геотермических петель и буронабивных свай, а также при бурении на воду.

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 одновременной обсадкой. Проходка с одновременной обсадкой реализуется при вибробурении, 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 заведомо 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 или вибрацией не только реализует опережающую обсадку скважины, гарантирующую устойчивость

её стенок, но при этом обеспечивает и наибольшую производительность проходки в сравнении с другими способами.

Область применения бурения с ударно-вибрационным погружением обсадной трубы распространяется от самых слабых пород до крепких грунтов с включениями из валунов при армировании забойного торца твердосплавными вставками. В мировой практике есть примеры горизонтального погружения труб диаметром до 3,6 м на длину до 122 м, а при вертикальном погружении – диаметром до 25 м на глубину до 96 м.

Наиболее значительный вклад в развитие теории и практики ударно-вибрационного бурения внесли ученые: Д. Д. Баркан, И. И. Блехман, А. И. Прудентов, В. В. Верстов, В. П. Гилета, А. А. Лука, М. Najafi, Т. Matsumoto, S. R. Gudavalli, M. Y. Fattah, X. M. Ding, M. F. Randolph, G. Kiun и другие.

Основным сдерживающим фактором более широкого применения технологий ударно-вибрационного погружения обсадной трубы является отсутствие высокомеханизированного, высокопроизводительного и мало затратного способа экскавации из её внутренней полости керна, т.е. поступившей в неё разрушенной породы. Существующие технологии промежуточного удаления керна 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 поступившего в трубу грунта 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 ударно-вибрационного бурения осадочных горных пород актуальна, а решение задачи удаления разрушенной породы (керна) из погружаемой в массив обсадной трубы представляет значительный научный и практический интерес для проходки как горизонтальных, так и вертикальных скважин.

#### **Цели и задачи**

Цель работы - создание эффективной технологии проходки горизонтальных и вертикальных скважин в осадочных горных породах, позволяющей обеспечить одновременную обсадку и циклично-

поточное удаление разрушенной породы от забоя без остановки процесса бурения.

Идея работы в использовании эффекта нарастающего к забою уплотнения осадочных горных пород внутри погружаемой в массив обсадной трубы для реализации порционного удаления разрушенной породы сжатым воздухом.

Основные задачи исследования:

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

2. Выявить на основе математического моделирования закономерности взаимодействия обсадной трубы и массива с учетом энергетических и геометрических параметров технологии ударно-вибрационного бурения.

3. Исходя из проведенных исследований разработать и испытать в производственных условиях технологию бурения скважин с одновременной обсадкой и циклично-поточным удалением разрушенной породы от забоя сжатым воздухом.

4. Оценить экономическую эффективность разработанной технологии при проходке вертикальных скважин – кондукторов в осадочных породах.

#### **Научная новизна**

1. Установлен характер изменения силы сопротивления страгиванию порции породы, поступившей в трубу, и давления, необходимого для ее отделения, при статическом воздействии сжатого воздуха на порцию и ударно-вибрационного воздействия на обсадную трубу в зависимости от содержания глинистых частиц в массиве.

2. Показано, как зависит технологический интервал между последовательными циклами удаления керна из внутренней полости трубы от давления сжатого воздуха, требуемого для отрыва очередной порции от массива.

3. На цифровой модели рассмотрены формирование ударных импульсов в вертикально погружаемой трубе и особенность их затухания при её продвижении в упруго-пластичном массиве.

4. Производственным экспериментом подтверждено, что методом ударного погружения обсадной трубы с циклично-поточным удалением из неё разрушенной породы сжатым воздухом возможна проходка вертикальных скважин в массиве осадочных пород, содержащих включения с прочностью до 33 МПа без упрочнения рабочей кромки трубы.

Объект исследования – технология проходки скважин в осадочных горных породах с одновременной обсадкой и циклично-поточным транспортированием разрушенной породы.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Обоснована технология проходки в осадочных породах вертикальных и горизонтальных скважин с циклично-поточной экскавацией разрушенной породы, позволяющая обеспечить устойчивость стенок скважины, а также снижение энергозатрат и времени на ее проходку. Обоснована перспективность создания комплекса технических средств для проходки геологоразведочных, дегазационных, нефтегазовых скважин, бестраншейного строительства и забивки трубчатых металлических свай.

2. Применительно к разработанной технологии проходки скважин в осадочных породах созданы расчетные программы, позволяющие для заданных условий определить рациональную периодичность удаления разрушенной породы и энергию удара, необходимую для продвижения в массив на требуемую глубину.

3. Экспериментально в полевых производственных условиях доказана работоспособность технологии ударно-вибрационного бурения с циклично-поточным транспортированием разрушенной породы. Её эффективность в сопоставлении с действующей технологией продемонстрирована снижением затрат на 56 % и повышением производительности на 54 %.

#### **Методология и методы исследований**

Выявление закономерностей процессов формирования, отрыва и удаления керна 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 ударным 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.

Производственные испытания в горизонтальной постановке реализованы при бестраншейной прокладке труб диаметром от 210 до 630 мм и глубине погружения от 12 до 30 м. Апробация вертикального внедрения обсадной трубы в естественный массив осадочных горных пород выполнялся в условиях горных отводов шахт им. А.Д. Рубана и им. С.М. Кирова при бурении интервалов под стартовые кондукторы диаметром 325 и 426 мм.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Ударно-вибрационное воздействие на трубу с керном, дополняющее статическое выдавливающее воздействие на керн сжатым воздухом, приводит к снижению до 85 % сил сопротивления при срагивании порции керна и до 70% давления, необходимого для ее отделения. Эффект тем сильнее, чем меньше глинистых частиц в массиве.

2. При прочих равных условиях допустимая длина части керна, подлежащей 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 не зависит от его конфигурации и пропорционально квадрату расстояния, пройденного упругой волной по забиваемой трубе.

#### **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 Всероссийском научно-техническом семинаре «Теория, создание и эксплуа-

тация горного бурового оборудования» (Новосибирск, 2017); Всероссийской научной конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Горняцкая смена» (Новосибирск, 2017); Всероссийской научной конференции «Проблемы развития горных наук и горнодобывающей промышленности» (Новосибирск, 2018); Всероссийской научной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (Новосибирск, 2019); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2018); Международной конференции «Проблемы механики современных машин» (Улан-Удэ, 2018); Международной научно-практической конференции «Подземная угледобыча XXI век» (Ленинск-Кузнецкий, 2018); International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management (Болгария, 2019); Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2018); Scientific Conference NO-DIG (Польша, 2018); Международной научно-практической конференции «Строительство и ремонт скважин» (Новороссийск, 2019).

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 циклично-поточным удалением разрушенной породы, 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 (далее – Перечень ВАК), в 6 статьях - в изданиях, которые входят в МБДиСЦ Scopus, Web of Science и в Перечень ВАК, в 6 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и 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 5 приложений. Диссертация изложена на 271 странице машинописного текста, содержит 119 рисунков и 31 таблицу.

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

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В первой главе** представлены анализ и обобщение работ Б. И. Воздвиженского, Б. М. Ребрика, В. С. Литвиненко, Н. Я. Кершенбаума, Л. Е. Маметьева, А. П. Рыбакова, Т. Meskele и др., 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 керна, рассмотрены их достоинства и недостатки. Определены условия, в которых наиболее эффективен тот или иной метод. Выявлено, что существующие технологии удаления керна не в полной мере соответствуют достигнутым возможностям производительности современных способов погружения труб и требуют дополнительных средств механизации. При этом процесс погружения необходимо прерывать на продолжительное время, что ощутимо снижает производительность проходки в целом.

Наиболее логичной и привлекательной с точки зрения обсадки и производительности проходки как при горизонтальном, так и вертикальном погружении является технология с порционным удалением керна из трубы по мере его формирования без применения дополнительных механических средств. Запатентованная схема реализации такой технологии при забивке трубы пневмомолотом представлена на рисунке 1.

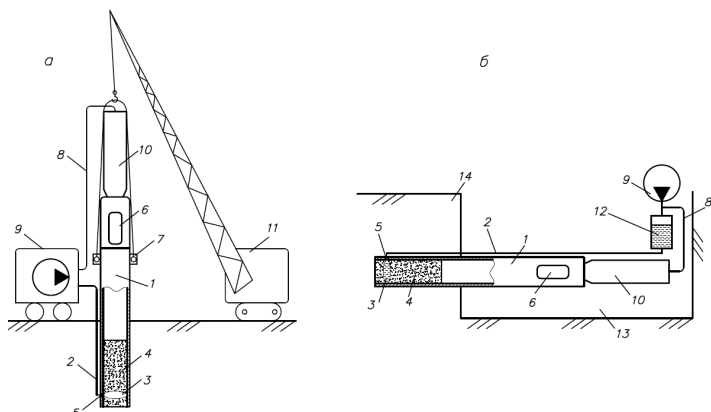


Рисунок 1 — Погружение с циклично-поточным удалением керна вертикально (а) и горизонтально (б): 1 – погружаемая труба; 2 – трубопровод; 3 – камера; 4 – kern; 5 – отверстие для подачи сжатого воздуха; 6 – разгрузочное окно; 7 – крепление; 8 – магистраль; 9 – компрессор; 10 – пневмомолот; 11 – автокран; 12 – ресивер; 13 – рабочий котлован; 14 – массив

Сущность предложенного решения заключается в подведении к забойному торцу трубы 1 по отдельному трубопроводу 2 сжатого воздуха от компрессора 9. После формирования очередной порции керна 4 сжатый воздух через отверстие 5 под давлением подается во внутреннюю полость трубы, отсекает часть керна и перемещает эту порцию по трубе 1, откуда через разгрузочное окно 6 она выдавливается наружу. Циклы отбитки продолжаются до выхода трубы в приемный котлован при горизонтальном варианте или до достижения проектной глубины в вертикальном.

Процесс порционного удаления керна можно разделить на три основных этапа: формирование порции, отделение ее от головной части и транспортирование по трубе на выход. На этапе формирования

важно обеспечить в зоне отрыва порции достаточную ее плотность и заполняемость всего поперечного сечения трубы. Это необходимое условие для создания и поддержания в зоне отрыва давления, способного стронуть и продвигать на выход отрываемую порцию. Вместе с тем ясно, что при переуплотнении головной части керна отрыв может не состояться, а в малосвязном грунте существует вероятность образования свища, что приведет к падению давления в рабочей камере 3, в результате отрыв и транспортирование будут невозможны.

Перспективность порционного удаления керна при горизонтальной проходке заключается в экономии времени на переоснащение рабочего котлована. Снимается необходимость демонтажа ударного модуля с последующей установкой очистного оборудования. Очистка известными способами (желонки, шнеки и т. д.) по продолжительности занимает в 2–3 раза больше времени, чем непосредственно ударное погружение.

При проходке вертикальных скважин в массиве осадочных пород с использованием ударного погружения обсадной трубы определяющую роль играет непрерывное обеспечение абсолютной устойчивости скважины за счет совмещения операций бурения и обсадки. Реализовать такой эффект позволяет технология с циклично-поточным удалением керна.

Своевременное удаление керна как при горизонтальном, так и вертикальном погружении помогает исключить потери энергии на переуплотнение массива в районе забойного торца и реализовать энергоэффективное резание породы кромкой обсадной трубы.

Проведенные пилотные испытания подтвердили работоспособность предложенного способа вертикального и горизонтального погружения труб с порционным удалением керна сжатым воздухом, но требуются практическая полномасштабная апробация и многофакторные лабораторные исследования с построением математических моделей протекающих процессов.

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

Для динамического погружения труб в полевых условиях использовалась экспериментальная установка, представленная на рисунке 2. Она состоит из основания 1, выполненного из швеллера и зафиксированного при помощи анкеров 2 на дне котлована. Внутри основания располагаются погружаемая металлическая труба 3 и пневмомолот 4, выступающий в качестве ударного привода. В экспериментах применялись трубы диаметром 32, 56 и 76 мм, а также пневмомолоты с различными энергетическими параметрами.

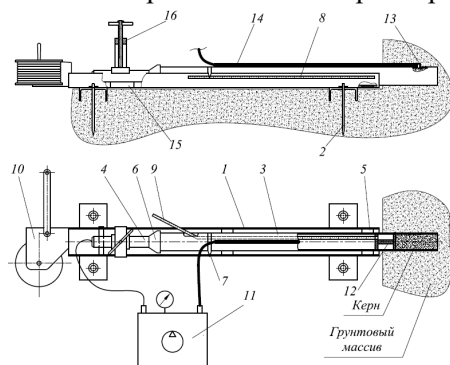


Рисунок 2 — Схема экспериментальной установки: 1 — основание; 2 — грунто-  
вый анкер; 3 — труба; 4 — ударный привод; 5 — опоры; 6 — конусный адаптер;  
7 — метка; 8 — шкала; 9 — измерительная линейка; 10 — лебедка; 11 — пневматиче-  
ская система; 12 — измерительный поршень; 13 — угловой ввод; 14 — магистраль  
для очистки; 15 — опора пневмомолота; 16 — прижим

Положение трубы относительно массива при забивке контролируется по шкале 8. Скорость забивки определяется временем прохождения метки 7 по шкале 8. Длина керна фиксируется гибкой измерительной линейкой 9, свободный конец которой выведен из внутренней полости трубы наружу через специальное окно. Подача сжатого воздуха для отрыва и транспортирования порции керна осуществлялась по магистрали для очистки 14, соединенной с внутренней полостью трубы 3 угловым вводом 13. Для извлечения трубы на противоположном забой торце основания закреплена ручная механическая лебедка 10 с максимальным усилием 9 кН. Питание ударного привода осуществляется от пневматической системы 11. Такая пневматическая схема позволяет проводить экспериментальные исследования при давлениях питания пневмомолота от 0,3 до 0,7 МПа, что

дает возможность в широком диапазоне варьировать энергетические характеристики ударного привода.

Одной из важнейших характеристик технологии погружения является скорость внедрения трубы, которая зависит от физико-механических свойств массива, размеров погружаемого элемента и структуры энергии удара.

В рамках выполняемых исследований оценивалась зависимость скорости погружения трубы от периодичности очистки керна. Каждая труба трижды погружалась в грунт на глубину 1 м, при этом первый раз она вообще не чистилась, во второй — один раз очищалась на глубине погружения 0,5 м, в третий — труба чистилась каждые 0,25 м (рисунок 3).

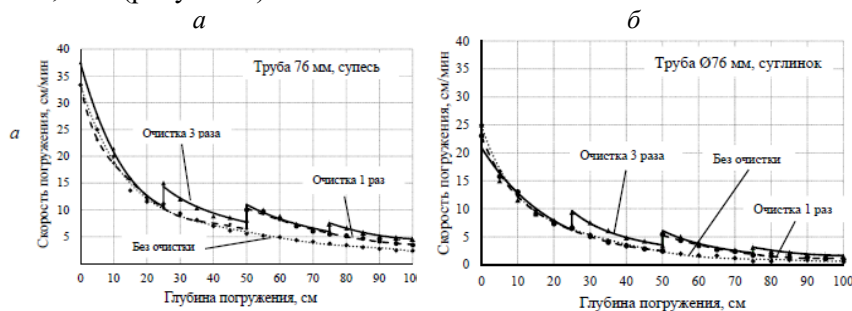


Рисунок 3 — Зависимости скорости погружения трубы от числа очисток в супеси (а) и суглинке (б)

При трехкратной очистке трубы время снижается в 1,8 раза для супеси и в 1,7 раза для суглинка по сравнению со временем погружения трубы без очистки. В зависимости от количества очисток время погружения для суглинка в  $1,28 \div 1,37$  раза ниже, чем для суглинка. На всех этапах продвижения скорость неочищенной трубы, т. е. с керном, в супеси выше, чем в суглинке.

В случае ударно-вибрационного погружения трубы – кожуха дополнительными факторами, влияющими на отрыв и транспортирование керна, 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 4).

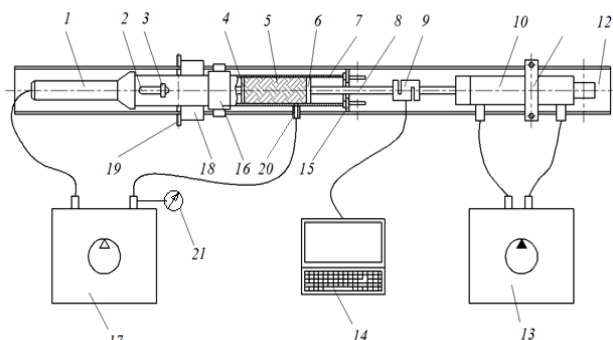


Рисунок 4 — Схема экспериментального стенда:

1 – пневмомолот; 2 – паз; 3 – ползун; 4 – измерительный поршень;  
 5 – керн; 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 грунтовой порции. На противоположном конце трубы установлен пневмомолот 1. Для визуального контроля момента начала движения грунтовой порции 5 в трубе 7 выполнен продольный паз 2, в который выведен ползун 3, жестко связанный с измерительным поршнем 4.

Для каждого эксперимента порция керна формировалась уплотнением насыпной породы осевым усилием 4 кН. Серия экспериментов по страгиванию керна проводилась на трех типах породы: глине, суглинке, супеси с процентным содержанием глинистых частиц 62, 39, 21 % соответственно. Сформированные порции с одинаковой длиной, плотностью, влажностью и расположением относительно торцов трубы выдавливались осевым усилием гидроцилиндра. При этом фиксировалось сопротивление страгиванию керна. Затем серия экспериментов повторялась уже с одновременным приложением к трубе ударно-вибрационной нагрузки, создаваемой пневмомолотом 1.

Аналогичные эксперименты проводились при выдавливании грунтовой порции сжатым воздухом, который подавался во внутреннюю полость трубы через штуцер 20, а давление сжатого воздуха контролировалось манометром 21. Результаты экспериментов представлены на диаграммах (рисунок 5).

Установлено, что ударно-вибрационное воздействие на трубу приводит к снижению на 30–85 % сил сопротивления при страгивании порции зерна и на 40–70 % давления, необходимого для отрыва порции зерна, причем эффект тем сильнее, чем меньше глинистых частиц в образце.



Рисунок 5 — Диаграммы сил страгивания порции зерна (а) и давления воздуха для ее отрыва (б)

Возможность отделения зерна и его транспортирования по трубопроводу сжатым воздухом при ударно-вибрационном способе воздействия на трубу проверена при погружении стального трубчатого кожуха диаметром 630 мм в массивы естественного сложения на реальном объекте. Процесс отделения зерна осуществлялся при одновременном действии ударной нагрузки и давления воздуха. При формировании зерна длиной от 1 до 1,5 м сжатый воздух подавался через угловой ввод по вспомогательному трубопроводу 3 при сообщении его с магистралью, питающей пневмомолот (рисунок 6).

Такое комбинированное воздействие продолжалась от 30 до 60 с. Этого времени было достаточно для отделения зерна от массива и перемещения его к разгрузочному окну 10.

Движение зерна самопроизвольно прекращалось, если в процессе перемещения по трубе порция начинала разрушаться. Это приводило к потере поршневых свойств и прорыву воздуха. Сопутствующее этому явлению падение давления в магистрали и выход воздуха через окно 10 служили сигналом к окончанию подачи воздуха во вспо-

могательный трубопровод. Давление в магистрали, питающей пневмомолот, повышалось до номинального значения, и при дальнейшем погружении трубы в ее внутреннюю полость поступала новая порция керна, которая вновь отделялась и транспортировалась. При этом происходило восстановление поршневых свойств грунта, отделенного на предыдущей стадии, и процесс его транспортирования возобновлялся до выхода керна из окна 10. В результате эксперимента труба была забита на длину 14 м без остановок на очистку от керна.

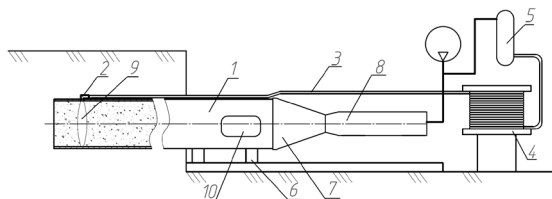


Рисунок 6 — Схема компоновки технологического оборудования:

1 – труба; 2 – угловой ввод; 3 – вспомогательный трубопровод;  
4 – вертлюг; 5 – ресивер; 6 – направляющая; 7 – насадка; 8 – пневмомолот; 9 – рабочая камера; 10 – разгрузочное окно

Критерием эффективности технологического процесса служила скорость погружения трубы, которая фиксировалась каждые 10 см погружения (рисунок 7).

Увеличение эффекта прироста скорости погружения после порционного удаления на отметке 7 м связано с тем, что отрыв порции керна выполнялся воздушно-водяной смесью. Искусственное повышение влажности керна не только способствовало снижению сил трения в паре «труба – керн», но и реализовало своего рода смазку внутренней поверхности переувлажненным глинистым раствором.

Для всестороннего изучения технологии ударного погружения трубы в массив с порционным удалением керна принято решение передать ее организациям, занимающимся бестраншейной прокладкой коммуникаций с использованием пневмомолотов. Результаты практического применения инновационной технологии представлены в виде актов «Сибмедстрой» и ПКСР «Кедр», а также наглядно продемонстрированы в видеороликах, размещенных в свободном доступе (<https://www.youtube.com/watch?v=CaJooAEAf10>, и <https://www.youtube.com/watch?v=m8fdVGm8o6o&t=13s>). Привлечение



сторонних организаций к испытаниям позволило протестировать порционное удаление в диапазоне диаметров труб от 210 до 630 мм как в вязких водонасыщенных глинах, так и в легких сухих супесях. Очистка реализовывалась не только в процессе погружения, но и во время технологического перерыва для наращивания секций погружаемой трубы после снятия насадки и пневмомолота.

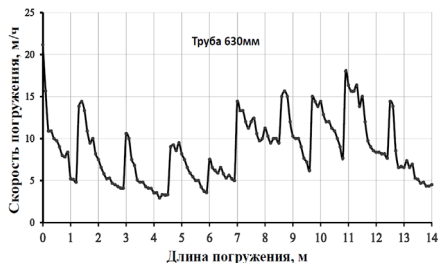


Рисунок 7 — Зависимость скорости движения трубы от длины погружения

В ходе промышленной апробации установлены случаи, когда порции керна не выходили из трубы, рассыпаясь в процессе движения. Также зафиксированы факты переуплотнения керна, при котором отделить порции магистральным давлением компрессора было невозможно. Решить эти вопросы

можно только с помощью теории процессов, протекающих при формировании керна, его отрыве и последующем транспортировании.

**Третья глава** посвящена определению закономерностей формирования керна при горизонтальном погружении в привязке к геометрическим параметрам трубы и свойствам массива. Даже на одной площадке по длине скважины грунты по своим свойствам могут значительно меняться, поэтому возникает необходимость изучения взаимодействия трубы с окружающей ее средой на математических моделях.

Модель, учитывающая особенности порционной очистки, представлена в виде квазистатической задачи горизонтального ударного погружения металлической трубы в массив осадочных горных пород с моделированием процессов формирования и поведения внутри нее керна при следующих допущениях.

I. Решается осесимметричная задача, где осевые напряжения и перемещения в керне усреднены по сечению трубы.

II. Труба рассматривается как твердое недеформируемое тело.

III. Контакт поверхностей трубы с массивом происходит по закону сухого трения.

IV. Толщина стенок трубы пренебрежимо мала.

V. КERN формируется из массива, находящегося в сжатом состоянии, под воздействием горного давления  $P_h$ .

VI. Деформирование массива на контакте с керна в процессе его формирования происходит по закону вдавливания жесткого цилиндра в упругое полупространство.

VII. В случае когда труба с керна движутся как единое недеформируемое тело, его лобовое сопротивление определяется по закону внедрения грунтового конуса в массив грунта.

Возможные варианты относительного движения керна и трубы можно условно разделить на два режима. В первом движение трубы и расположенного в ней керна осуществляется отдельно. Такой режим реализуется на стадии формирования керна в трубе, когда скорость движения трубы превышает скорость движения керна, в результате чего происходит интенсивное приращение его длины. Во втором совершается движение трубы и керна. Этот режим реализуется, когда упругой реакции массива недостаточно, чтобы преодолеть внутреннее трение керна в трубе. Тогда динамика системы «труба – керна» описывается уравнением движения (1)

$$(M_1 + M_2) \frac{dU^2}{dt^2} = -[F_f \cdot \text{sgn}(V) + F_e^{(2)}] \quad (1)$$

с начальными условиями  $U = U_*$ ,  $dU/dt = V_*$  при времени  $t = t_*$ , где упругая реакция массива по формуле (2)

$$F_e^{(2)} = \frac{2R_0 E_2 (U + W_0 - \Delta L_2)}{1 - \nu_2^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta L_2 = U_* - W_*$  — приращение длины керна;  $M_1$  — масса металлической трубы;  $F_f$  — сила бокового трения трубы;  $R_0$  — радиус трубы по среднему сечению;  $U$  и  $W$  — перемещения трубы и керна соответственно;  $M_2 = \pi R_0^2 \cdot \rho_2 \cdot L_2$  — масса керна, а  $U_*$  и  $W_*$  — перемещения трубы и керна соответственно к моменту начала их совместного движения в ударном цикле;  $W_0$  — остаточное перемещение керна после завершения ударного цикла.

По мере увеличения длины керна сила его трения о внутренние стенки трубы возрастает, наступает момент, когда совместное движение трубы и керна продолжается до конца ударного цикла.

В процессе накопления деформации грунта в массиве перед торцом трубы упругая реакция массива будет расти до тех пор, пока там не сформируется грунтовый конус, лобовое сопротивление которого постоянно и, согласно допущению VI, определяется выражением (3) для сопротивления грунтового конуса, сформированного перед торцом трубы:

$$F_c = \pi R_0^2 \cdot P_0 \frac{1 + \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi - \phi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}{1 - \operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{ctg} \left( \frac{\pi - \phi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}, \quad (3)$$

где  $\phi$  — угол внутреннего трения грунта;  $P_0$  — прессиометрическое давление массива на глубине забивания трубы. С точки зрения энергоэффективности процесса погружения момент, когда  $F_e^{(2)} = F_c$ , является оптимальным для реализации порционного удаления.

На рисунке 8 представлен фрагмент экспериментальных данных. Ограниченность протяженности измерения 7 м связана с тем, что на этой отметке во внутреннюю полость трубы начали подавать воду с избыточным давлением 0,2 МПа для исследования влияния принудительного увлажнения керна. Также не учитывался начальный участок погружения длиной 1,4 м, который находится в заведомо разуплотненной зоне массива вблизи откоса котлована, и на старте для снижения силы отдачи ударная машина работает на пониженном давлении.

Для сравнения: с помощью программы *PipeRamming*, реализующей вышеописанную модель, выполнен расчет скорости погружения трубы с периодической очисткой ее полости, аналогичной экспериментальной в грунтовых условиях, отражающих свойства на данном объекте. Результаты расчета представлены на рисунке 9.

Из сопоставления графиков на рисунках 8 и 9 видно, что расчетная кривая точно описывает характер изменения скорости забивания трубы в массив с порционным удалением керна. Теоретическое описание динамики такого процесса качественно иллюстрирует взаимодействие массива, трубы и керна, а расчетная программа при варьировании исходных параметров позволяет получать информацию, необходимую для предварительной оценки длительности проходки и требуемой ударной мощности молота.

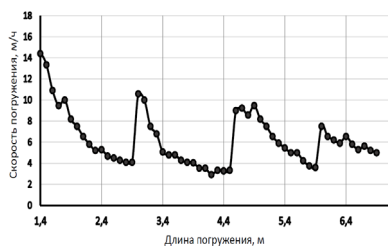


Рисунок 8 — Результаты натурных измерений скорости погружения

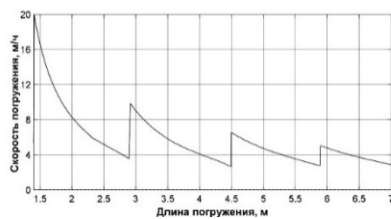


Рисунок 9 — Расчетный график скорости погружения трубы

Вместе с тем область применения предложенной расчетной программы *PipeRamming* к решению практических задач ограничена отсутствием в ней возможности установления рациональной и безаварийной периодичности удаления порций керна.

Для определения шага удаления разрушенной породы выполнены моделирование и расчеты напряженно-деформированного состояния массива осадочных горных пород в объемной (трехмерной) постановке задачи. В программном комплексе *ANSYS* построена динамическая расчетная модель взаимодействия упруго-пластичного массива с погружаемым в него полым жестким цилиндром с учетом физической нелинейности поведения среды и нелинейного характера взаимодействия на контакте цилиндрического элемента и массива на основе метода конечных элементов.

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

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

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 керна.

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

Таблица 1 — 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 1, 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.

**В четвертой главе** представлены результаты апробации технологии вертикального ударно-вибрационного погружения обсадных труб в ненарушенный массив 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».

Место заложения скважины на поверхности выбирается так, чтобы к моменту окончания бурения ее проекция на разрабатываемый пласт находилась на расстоянии не менее 30 м впереди очистного забоя. Размер сетки дегазационных скважин составляет от 50 до 120 м. Для сооружения дегазационных скважин используют современные самоходные буровые установки, реализующие шарошечный способ разрушения при проходке осадочных горных пород и ударно-вращательный — по крепким горным породам. Бурение производится в несколько этапов в соответствии с количеством обсадных труб. Каждая ступень включает три операции: бурение скважины, ее обсадку и бетонирование затрубного пространства на заданную высоту. Глубина и переход на меньший диаметр скважины каждой ступени определяются по результатам геологоразведки. Как правило, переход на меньший диаметр выполняется после прохождения слоя осадочных горных пород или отработанного угольного пласта.

Телескопическая ступенчатая конструкция скважины обусловлена опасностью заклинивания обсадной трубы при ее монтаже в пробуренное отверстие после подъема бурового инструмента. Тем не менее полностью избежать аварийных ситуаций не удастся. Несмотря на то что мощность толщи осадочных пород обычно не пре-

вышает 10 % от общей глубины бурения, качество проходки вскрышного слоя во многом определяет конечный результат. Недообсадка или значительное отклонение от вертикали на начальном этапе сооружения скважины неизбежно ведет к ее потере.

Наиболее часто проблемы при бурении слоя осадочных пород шарошечным долотом возникают в случаях, представленных ниже.

1. Пересечение водоносных горизонтов, при котором происходит потеря бурового раствора и, как следствие, требуются дополнительные расходы на его восполнение, а также затраты времени на затирание глиной зоны поглощения раствора с помощью возвратно-поступательных перемещений шарошечного долота и центриатора в проблемном интервале.

2. При бурении через слабоуплотненные песчано-галечные прослойки резко увеличивается вероятность обрушения стенок скважины, которое может привести как к заклиниванию бурового инструмента в скважине, так и к ситуации, в которой невозможно опустить под собственным весом обсадную трубу на проектную глубину. Кроме того, крупные твердые включения способны отклонить ось бурения скважины от проектной.

3. Проходка водонасыщенных пльвунов, как правило, сопряжена с налипанием глины на породоразрушающие элементы бурового долота, что ощутимо снижает производительность проходки. Также происходит закупоривание глиной промывочных каналов на инструменте. Кроме того, водонасыщенная глина чрезмерно диффундирует в буровой раствор, снижая его очистную функцию. В результате густеющий буровой раствор может формировать пробку из глины вокруг буровых штанг, что приведет к прекращению циркуляции бурового раствора и потребует подъема буровой колонны до места ее образования. Проблемы на стадии обсадки также вероятны, поскольку устойчивость стенок скважины в водонасыщенной глине очень низкая и кроме обрушения возможно обжатие обсадной трубы вследствие сужения диаметра скважины.

Перечисленных проблем можно избежать за счет применения технологии проходки скважин с одновременной ее обсадкой, которая уже опробована на горизонтальных скважинах при бестраншейном

строительстве и пилотных экспериментах в вертикальной постановке.

Для промышленной апробации предложенного решения разработана соответствующая оснастка, позволяющая удовлетворить технические требования, предъявляемые к стартовым кондукторам.

Для обеспечения строгой вертикальности погружаемой трубы спроектирована и изготовлена платформа, имеющая два регулировочных пояса, один из которых расположен непосредственно на основании платформы, а второй вынесен на 2 м вверх с помощью четырех опор. Регулировочными винтами можно компенсировать перекося платформы, связанный с неровностями поверхности грунта, на которой она установлена.

Направляющая платформа сконструирована разборной для возможности ее транспортирования на дальние расстояния. В пределах шахтного поля эта платформа перемещается в собранном состоянии. Для интенсификации процесса погружения трубы в состав вспомогательного оборудования входит тяговая лебедка. Ее применение направлено на решение сразу двух задач: компенсация силы отдачи пневмомолота; преодоление упругой составляющей массива под забойным торцом трубы.

Ударно-вибрационное погружение обсадной трубы проводилось рядом с работающей установкой *Prakla RB50*. Мощность осадочных пород была известна и составляла около 15 м. Подача сжатого воздуха для работы пневмомолота и удаления керна из трубы осуществлялась от компрессора *Sullair Combo 900XHH-1150XH* с давлением  $P = 2,5$  МПа и расходом  $Q = 32,6$  м<sup>3</sup>/мин. Погружаемая труба длиной 9 м и диаметром 426 мм с уже смонтированным на ней пневмомолотом и трубопроводом для очистки ее от керна устанавливалась строго вертикально на стартовой платформе. При погружении выполнялось периодическое порционное удаление породы из внутренней полости обсадной трубы (рисунок 10 и <https://www.youtube.com/watch?v=bB1-ExaMumI>).

На глубине 8 м буровой процесс прерывался на вспомогательные операции по демонтажу пневмомолота и установку следующей секции обсадной трубы. Нарращивание погружаемой трубы и трубопровода для очистки производилось с помощью сварного соединения. Далее ударно-вибрационное погружение возобновлялось до глубины в



15 м. По мере погружения породный состав менялся. До глубины 8 м бурение велось по желтой глине, а в интервале 8÷14,5 м — по серо-голубой. С отметки 14,5 м из разгрузочного окна начали выходить крупные обломки алевролита, свидетельствующие о внедрении забойного торца трубы в коренные породы (рисунок 11). Во избежание замятия кромки обсадной трубы на глубине 15 м бурение остановили, поскольку поставленная технологическая задача уже была выполнена.



Рисунок 10 — Процесс погружения трубы и выхода породы



Рисунок 11 — Эволюция породы по глубине погружения: А – желтая глина; В – серо-голубая глина; С – алевролит

С указанной последовательностью пробурено две скважины глубиной 14,5 и 15 м. Скорость погружения трубы варьировалась от 30 м/час на первой секции обсадной трубы до 15 м/час на второй. Чистое время ударно-вибрационного воздействия для первой скважины составило 46,5 мин, для второй — 59,2 мин. После завершения проходки объем разрушенной породы, оставшийся внутри трубы керн, не превышал по высоте 1,5 м. На установленных кондукторах 426 мм впоследствии базировалась буровая установка *Prakla RB50*; бурение скважины диаметром 390 мм было продолжено с помощью погружного пневмоударника. Оставшийся в трубе керн удален в режиме штатной шламоочистки. Вспомогательных операций по зачистке кондуктора не потребовалось.

Важной задачей проведенных исследований было определение возможности и энергии ударно-вибрационного воздействия на погружаемую трубу для ее вхождения в коренные породы (алевролиты). С технологической точки зрения данная задача обусловлена необходимостью гарантированного перекрытия слоя осадочных пород кондуктором, чтобы слабые породы не поступали в скважину на следующих этапах бурения меньшим диаметром. Параллельно определялась возможность отрыва и выноса алевролитового керна через разгрузочное окно. В ходе экспериментов установлено, что энергии в 2570 Дж, передаваемой на верхний ударный торец трубы площадью 0,012 м<sup>2</sup>, достаточно для внедрения обсадной трубы в алевролит с прочностью на сжатие 32,87 МПа, а давление сжатого воздуха 2,5 МПа при расходе 32,6 м<sup>3</sup>/мин, подаваемого в призабойную зону кондуктора, обеспечивает вскрытие трещин в породе и вынос керна на поверхность.

Скорость прохождения скважины с ее одновременным обсаживанием трубным ставом зависит от физико-механических свойств массива, а ее спад происходит при снижении пластичности. Изменение механической скорости бурения, протекает умеренно, что свидетельствует о возможности применения ударно-вибрационного погружения на объектах с более мощными слоями осадочных пород.

На основании проведенных полевых испытаний установлено, что предложенная технология позволяет исключить из действующего технологического цикла операции по бурению шарошечными долотами, обсадке и бетонированию затрубного пространства.

Установка кондуктора может проводиться в непосредственной близости к действующим буровым установками с использованием их компрессорного оборудования и имеет потенциал монтажа до восьми кондукторов за время проходки дегазационной скважины на всю глубину. При этом работы по установке кондукторов могут выполняться без снижения производительности буровых работ, т. е. в период ремонтных простоев, сервисного обслуживания буровых установок, во время продолжительных операций по обсадке скважин на глубоких горизонтах или подъема бурового става. На момент завершения работ по сооружению одной дегазационной скважины буровая установка обеспечена готовыми стартовыми участками скважин.

В ходе промышленных испытаний проведена сравнительная оценка действующей технологии, состоящей из операций вращательного бурения скважины шарошечным долотом и ее последующей обсадки, с технологией ударно-вибрационного погружения обсадной трубы и циклично-поточным транспортированием керна.

Производительность технологии ударно-вибрационного погружения кондуктора на 54 % выше, чем у технологии с применением шарошечного бурения. Учитывая, что очистные операции при погружении кондуктора не требуют специальных знаний и длительного обучения, целесообразно вместо бурильщика (оператора) ввести в штат специализированной буровой бригады сварщика. Это организационное мероприятие позволит снизить время сварочных работ в 2 раза без повышения затрат на заработную плату. В этом случае сокращение времени вспомогательных операций для установки кондуктора длиной 15 м снизится на 38,5 мин, а дополнительный прирост производительности увеличится на 18 % и составит 45 м в смену. Следовательно, сменная норма выработки будет уже на 82 % выше, чем при использовании технологии шарошечного бурения.

Технология установки кондуктора с применением шарошечного бурения включает цементирование. В приведенных расчетах эти операции не учитывались, как и время технологического простоя, необходимого для затвердевания цемента, которое составляет 24 ч (2 смены). За время технологического простоя способом ударно-вибрационного погружения кондуктора можно обеспечить установку пяти кондукторов при сменной производительности 38,1 м, а при включении в штат буровой бригады второго сварщика — шесть кондукторов длиной 15 м.

Установлено, что по удельной себестоимости прямых затрат технология погружения кондуктора ударно-вибрационным способом обходится дешевле на 56 %, чем при использовании действующей технологии, при этом удельные денежные средства, затрачиваемые на буровое оборудование, при эксплуатации новой технологии ниже на 54,7 %, затраты на оплату труда буровой бригады — на 47,4 %, а затраты на расходуемые энергоносители — на 81,5 %, что также свидетельствует о более высокой энергоэффективности технологии ударно-вибрационного погружения в сравнении с действующей.

Для увеличения производительности установки кондукторов технология ударно-вибрационного погружения имеет задел дополнительного снижения вспомогательных операций за счет использования труб длиной 11,5 м, что при переходе на большие глубины снизит количество сварных соединений и поспособствует снижению энергетических потерь при ударно-вибрационном погружении. На глубинах установки около 20 м процесс погружения кондукторов целесообразно осуществлять единым отрезком трубы, состоящим из предварительно сваренных секций.

Дополнительным и важным резервом снижения вспомогательных операций на начальном и завершающем этапах установки кондуктора является мобильное исполнение технологического комплекта. По предварительной оценке, технологический комплект — это прицепная гидрофицированная платформа с аутригерами, на которой размещены: газосварочное оборудование, генератор для электроснабжения, емкость для воды, воздухораспределительный узел, бухты с рукавами высокого давления для подачи сжатого воздуха в пневмомолот и очистную магистраль. Гидравлические аутригеры позволяют оперативно выставить платформу в строго горизонтальное положение. Создание специализированной платформы, которая работает в паре с автокраном, имеющим вылет стрелы более 30 м и грузоподъемность 32–40 т, снизит время вспомогательных операций на этих этапах в 2 раза, поскольку будет реализовано погружение предварительно сваренных между собой двухсекционных труб длиной до 23 м.

Капитальные вложения в комплект оборудования, состоящий из автокрана, прицепной платформы и пневмомолота, не превышают 20 млн руб. (в ценах 2019 г.). Для сравнения: стоимость буровой установки *Prakla RB50* составляет 88 млн руб. (в ценах 2018 г.). При этом можно задействовать автокран в логистической цепочке и осуществлять погрузочно-разгрузочные работы для нужд всех буровых участков.

**В пятой главе** выполнено математическое моделирование процесса погружения металлических труб в массив осадочных горных пород с применением машин ударно-вибрационного действия, который можно охарактеризовать тремя основными параметрами: длина забиваемой 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 керна.

Система координат выбрана таким образом, что ее начало совпадает с верхним торцом забиваемой трубы, а ось  $Ox$  направлена вдоль оси трубы вглубь массива (рисунок 12). Тогда граничные условия задачи (4) будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma(0, t) &= \Phi(t) \\ \sigma(H, t) &= -P_d, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Phi(t)$  — функция напряжений, получаемая из решения задачи о взаимодействии генератора ударных импульсов с трубой на ее верхнем торце;  $P_d$  — 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 (5):

$$P_{бок} = k_{бок} \cdot \rho_2 \cdot g \cdot x, \quad (5)$$

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

Система дифференциальных уравнений (6), описывающих движение одномерного упругого стержня в массиве, имеет вид

$$\begin{cases} \rho_1 \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} + f(x, v) \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} = E_1 \frac{\partial v}{\partial x}, \end{cases} \quad (6)$$

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 (7), отнесенная к площади ее поперечного сечения  $S$ :

$$f(x, v) = \begin{cases} -\frac{\pi D_1}{S_1} \tau(u) & \text{при } |u| < \frac{\tilde{F}_{mp}}{G} \\ -\text{sign}(v) \tilde{F}_{mp} & \text{при } |u| \geq \frac{\tilde{F}_{mp}}{G}, \end{cases} \quad (7)$$

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;  $\mu$  — коэффициент трения трубы о массив.

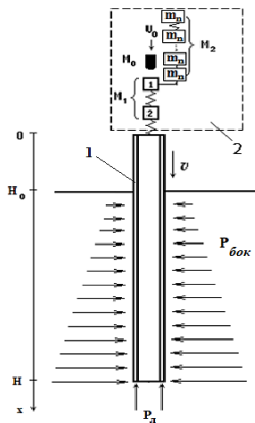


Рисунок 12 — Постановка задачи о забивании металлической трубы (1) в осадочный массив с использованием генератора ударных импульсов (2)

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 13 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 (3), в этом случае имеет вид (8)

$$\Phi(t) = \begin{cases} -\sigma_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{t_m}\right), & \text{при } 0 \leq t \leq t_m \\ 0, & \text{при } t > t_m, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\sigma_0$  — 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.

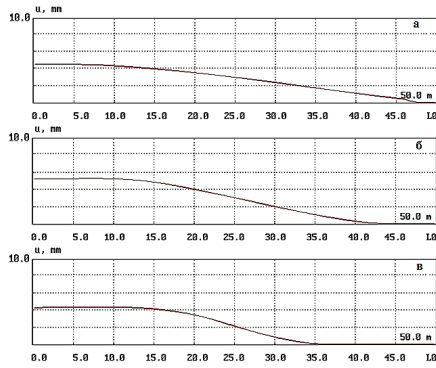


Рисунок 13 — Эпюры остаточных перемещений поперечных сечений забиваемой в массив трубы, вызванных синусоидальным импульсом напряжений с параметрами: а —  $\sigma_o = 232$  МПа,  $t_m = 1,25$  мс; б —  $\sigma_o = 164$  МПа,  $t_m = 2,5$  мс; в —  $\sigma_o = 116$  МПа,  $t_m = 5,0$  мс

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 14 приведена расчетная эпюра перемещений 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 13а 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 13а и 14).

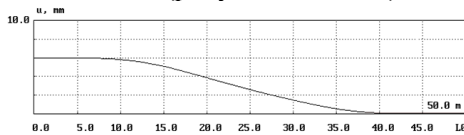


Рисунок 14 — Эпюра остаточных перемещений поперечных сечений забиваемой в вязкий грунт трубы, вызванных синусоидальным импульсом



напряжений с параметрами  $\sigma_o = 232$  МПа,  $t_m = 1,25$  мс при

$$\tilde{G} = 100 \text{ МПа/м}$$

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  $\Delta x$ , который за время  $t_l$  «пробегает» расстояние  $l = C_p \cdot t_l$ , где  $C_p$  — скорость распространения импульса (упругой волны) вдоль трубы (рисунок 15).

В процессе движения выделенного элементарного импульса вдоль трубы в зоне его действия изменение массовой скорости трубы описывается уравнением (9)

$$dv = a dt, \quad (9)$$

где  $a$  — ускорение, вызываемое трением боковой поверхности трубы о массив. Ускорение может быть найдено из второго закона Ньютона (10), выписанного для элементарного кольца трубы с массой  $\Delta m$ :

$$F_{тр} = \Delta m \cdot a, \quad (10)$$

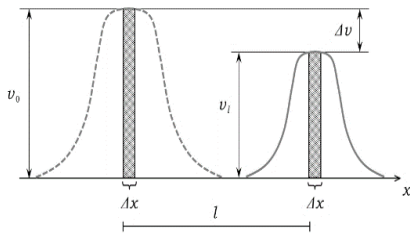


Рисунок 15 — Распространении упругой волны по трубе, взаимодействующей с массивом по закону сухого трения

где  $\Delta m = S_1 \cdot \Delta x \cdot \rho$ ;

$$F_{тр} = \pi D_1 \cdot \Delta x \cdot P_{бок} \cdot \mu \quad \text{—}$$

сила бокового трения;

$$P_{бок} = \rho_2 \cdot g \cdot x \cdot k_{бок} \quad \text{—}$$

бок. давление массива на глубине  $x$ ;

$k_{бок}$  — коэффициент бокового давления массива.

Тогда, интегрируя уравнение (9) по времени от  $t=0$  до  $t = t_l = l / C_p$ , с учетом

(10) получаем (11)

$$v_0 - v_l = \int_0^{t_l} a dt = k_v \cdot l^2, \quad (11)$$

где  $k_v$  — коэффициент затухания, определяется по формуле (12)

$$k_v = \frac{1}{2} \frac{\pi D}{S} k_{mp} \cdot k_{бок} \cdot \frac{\rho_{зр} \cdot g}{\rho \cdot C_p}. \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) позволяют записать закон затухания амплитуды массовых скоростей импульса (13) произвольной конфигурации, распространяющегося вдоль упругого стержня (трубы) с условием внешнего трения, вплоть до прекращения проскальзывания отдельных участков стержня относительно массива:

$$\Delta v = k_v \cdot l^2, \quad (13)$$

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, и не зависит от его конфигурации. 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, предупредительную 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 16).

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.

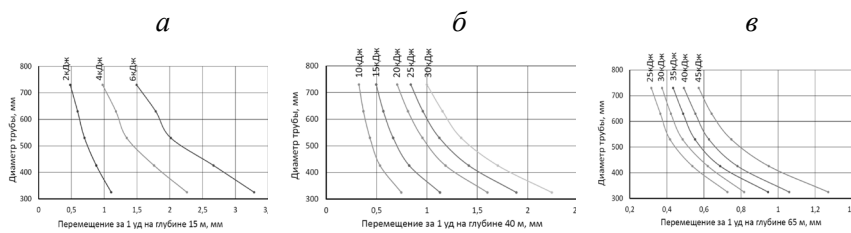


Рисунок 16 — Результаты расчетов в программе *Pipe-vert* для глубин 15 м (а), 40 м (б) и 65 м (в)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические и технологические решения, заключающиеся в разработке технологии ударно-вибрационного погружения обсадных труб в массиве осадочных горных пород с циклично-поточным транспортированием керна сжатым воздухом на основе полученных зависимостей изменения напряженно-деформируемого состояния керна 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 ударно-вибрационного бурения в массиве осадочных пород вертикальных и горизонтальных скважин с их одновременной обсадкой и порционным удалением керна сжатым воздухом. За счет совмещения операций бурения и обсадки 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 забивке трубы в породный массив формирующийся в ней kern превращается в пробку раньше в глинистом массиве, чем в супеси;
- ударно-вибрационное воздействие на трубу приводит к снижению до 85 % сил сопротивления страгиванию порции керна и

до 70 % давления, необходимого для ее 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, и не зависит от его конфигурации, 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 и метода конечных элементов в системе *ANSYS*. При соответствующем задании параметров породного массива созданный математический инструмент позволяет расчетным путем определить:

— перемещение трубы в породе под действием ударного импульса;

— скорость проходки трубы 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 порции, не превышает номинального давления компрессора.

5. Установлена возможность циклично-поточного транспортирования породной массы при ударно-вибрационной 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 с одновременной обсадкой к бурению с отбором цельных грунтовых кернов и в углубленном изучении влияния волновых процессов на взаимодействие погружаемой трубы с керном 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 Scopus и Web of Science:*

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. (Web of Science)

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. (Web of Science)

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. (Web of Science)

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. (Web of Science)

13. **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. (Web of Science)

14. **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. (Web of Science)

15. **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. (Web of Science)

16. **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)

17. 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. (Web of Science)

18. 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:*

19. **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.

20. **Кондратенко, А. С.** Порционная очистка как направление модернизации бестраншейной технологии продавливания / А. С. Кондратенко // Сборник научно-технической конференции «Креативные подходы в образовательной, научной и производственной деятельности». — Омск : СибАДИ, 2010. — С. 258–262.

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. Конурич // Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2016. — 342 с.

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

**Патенты и свидетельства регистрации программ для ЭВМ:**

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.