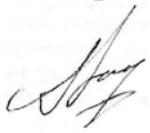
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Кондратенко Андрей Сергеевич



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

2.8.1. Технология и техника геологоразведочных работ

Диссертация на соискание ученой степени доктора
технических наук

Новосибирск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…… 6

ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОХОДКИ СКВАЖИН В ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ…… 13

1.1 Проходка горизонтальных скважин……..…... 13

1.1.1 Устройства, образующие скважины путем вдавливания породы в стенки скважины…….. 14

1.1.2 Устройства, образующие скважины путем вдавливания породы с частичным удалением……... 18

1.1.3 Устройства, образующие скважины путем удаления породы из забоя…. 23

1.1.4 Классификация способов удаления керна из трубы……. 29

1.2 Проходка вертикальных скважин в осадочных горных породах…….. 40

1.2.2 Укрепление стенок скважины в неустойчивых горных породах…… 49

1.2.3 Бурение с одновременной обсадкой…….. 51

1.3 Выбор и обоснование технологии проходки горизонтальных и вертикальных скважин в массиве осадочных горных пород……. 53

1.4 Выводы по Главе 1…….. 58

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОХОДКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН С ЦИКЛИЧНО-ПОТОЧНЫМ УДАЛЕНИЕМ КЕРНА НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ И В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ…….. 59

2.1 Исследования процессов формирования и удаления керна на физических моделях труб в естественном массиве…….. 60

2.1.1 Экспериментальная установка ……. 60

2.1.2 Проведения экспериментов…….. 66

2.1.3 Результаты экспериментов……... 67

2.2 Лабораторные исследования процессов отрыва и транспортирования керна…… 81

2.2.1 Экспериментальный стенд…… 81

2.2.2 Методика проведения эксперимента……... 85

2.2.3 Результаты лабораторных экспериментов……... 87
2.3 Исследования технологии проходки горизонтальных скважин с порционным удалением керна в производственных условиях……. 90
2.3.1 Оборудование и технические решения для реализации порционного удаления на практике……. 92
2.3.2 Последовательность технологических операций…….. 101
2. 4 Выводы по Главе 2…….. 106
ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЕ И УДАЛЕНИЯ КЕРНА ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПОГРУЖКЕНИИ ТРУБЫ В МАССИВ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД…….. 107
3.1 Приближённая теория движения открытой трубы с грунтовым керном в массиве осадочных горных пород при продольном ударном воздействии….. 109
3.1.1 Постановка задачи и вывод уравнений движения……. 111
3.1.2 Результаты численных расчетов…….. 115
3.1.3 Сравнение приближенной теории с экспериментальными результатами 123
3.2 Математическая модель процесса горизонтального погружения трубы с учетом периодического удаления керна…….. 125
3.3 Определение шага удаления керна из внутренней полости погружаемой трубы……... 139
3.4 Выводы по Главе 3…… 158
ГЛАВА 4 СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОХОДКИ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН…….. 159
4.1 Область применения вертикальных обсаженных скважин……... 159
4.2 Апробация вертикальной забивки обсадной трубы с порционным удалением керна…….. 164
4.2.1 Оснащение и последовательность работ……. 166
4.2.2 Результаты апробации…….. 170
4.3 Разработка технологических решений и промышленного образца оборудования ……... 171

4.3.1 Конструкция направляющей платформы…… 171
4.3.2 Реализация статического поджатия трубы к забою…… 173
4.3.3 Снижение сил бокового трения между наружной поверхностью трубы и массивом…….. 176
4.3.4 Разработка адаптера с разгрузочным окном…… 180
4.4 Производственные испытания……. 182
4.5 Журнал технико-экономической оценки…… 186
4.5.1 Перечень и основные технические характеристики бурового и вспомогательного оборудования технологий…….. 187
4.5.2 Время основных и вспомогательных операций…….. 188
4.5.3 Данные для определения производительности и себестоимости прямых затрат……... 192
4.5.4 Определение технико-экономических параметров оценки эффективности технологий установки кондукторов…….. 195
4.5.5 Результаты технико-экономической оценки эффективности технологий 201
4.6 Выводы по Главе 4…… 208
ГЛАВА 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА ВЕРТИКАЛЬНО ПОГРУЖАЕМОЙ ТРУБЕ……. 209
5.1 Моделирование и анализ затухания ударного импульса…….. 209
5.2 Расчетная программа для определения перемещений забойного торца трубы под действием единичного удара……. 220
5.3 Выводы по Главе 5…… 226
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…… 227
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ…….. 229
ПРИЛОЖЕНИЕ А Последовательность операций при проведении исследований на физических моделях……. 252
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о производственных испытаниях технологии и комплекта оборудования ИГД СО РАН по прокладке стальных трубных плетей бестраншейным способом в грунтовом массиве под автодорогой …….. 256

ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт производственных испытаний комплекта оборудования для сооружения скважин методом виброударного продавливания с порционной очисткой трубы от грунтового керна воздушно-водяной смесью …… 260

ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт опытно-промышленных испытаний «Технологии установки кондукторов виброударным способом с порционным удалением грунта»……... 263

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт о результатах технико-экономической оценки эффективности технологий установки стартовых кондукторов…….. 268

ВВЕДЕНИЕ

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 процессе 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 запредельно 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, M. Najafi, T. 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, желонок 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 страгивании 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 эксплуатация 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, 2017); 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, 2018); 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 цикличнопоточным 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.

ГЛАВА 1 ОБЗОР И АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОХОДКИ СКВАЖИН В ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

В данной работе акцент сделан на подземных горных выработках круглого сечения, пробуренных с поверхности земли без доступа человека к забою под любым углом к горизонту, при этом диаметр выработки намного меньше ее глубины, т. е. речь идет о скважинах. Различают вертикальные, горизонтальные и наклонные скважины. Начало скважины называется ее устьем, дно — забоем. Диаметры скважин колеблются от 25 мм до 3 м. Кроме того, в работе рассматриваются только технологии, которые применимы в осадочных горных породах — многокомпонентных динамичных системах (грунтах, почвах, наносах и техногенных образованиях), представленных как части геологической среды и изучаемых в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью человека [39].

1.1 Проходка горизонтальных скважин

С ростом объемов жилищного строительства и усложнением коммуникационных и транспортных систем более широкое распространение получают бестраншейные технологии прокладки подземных коммуникаций, которые в развитых странах стали преобладающими. В их основе лежит процесс образования приповерхностных каналов в массиве осадочных пород. При этом основные объемы работ приходятся на выполнение переходов диаметром до 600 мм [81].

В соответствии с требованиями СНиП и международными нормами Союза предпринимателей подземного строительства, скважины диаметром менее 800 мм относятся к непроходным, так как в них не допускаются ручные разработка и транспортировка породы. Способы выполнения подземных переходов непроходных сечений относятся к особо сложным, так как управление техническими средствами может осуществляться только снаружи скважины. С другой стороны, практика строительства показывает, что наблюдается устойчивая тенденция к снижению раз-

меров технологического пространства для размещения проходческого оборудования, обусловленная плотностью застройки и значительными затратами на восстановление зеленых и благоустроенных зон после завершения работ.

Кроме того, создание подземных горизонтальных скважин является неотъемлемой частью процесса транспортировки полезных ископаемых. Непрерывный рост нефтегазового потенциала страны ведет к увеличению протяженности трубопроводных магистралей в различных климатических зонах. На каждые 10 км магистральных трубопроводов приходится в среднем один переход протяженностью до 100 м под дорогами. Средняя стоимость таких переходов, выполненных открытым способом, в 2 – 2,5 раза выше стоимости бестраншейных [67].

В соответствии с отмеченными характерными тенденциями, развитие технических средств бестраншейной прокладки подземных коммуникаций идет по двум направлениям:

— совершенствование механизмов в рамках традиционных технологий;

— разработка новых технологических решений и устройств для их реализации.

Ниже кратко рассмотрены существующие способы и устройства для проходки горизонтальных скважин, нашедшие применение в современной практике подземного строительства. Их можно разделить на три группы [28].

Группа 1 — Устройства, образующие скважины путем вдавливания породы в стенки скважины.

Группа 2 — Устройства, образующие скважины путем вдавливания породы с частичным удалением (комбинированный способ).

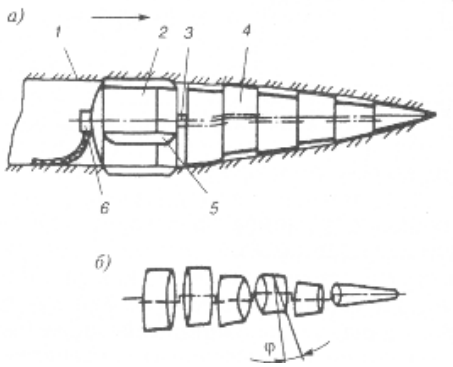
Группа 3 — Устройства, образующие скважины путем удаления породы из сечения скважины.

1.1.1 Устройства, образующие скважины путем вдавливания породы в стенки скважины

Образование скважин путем вдавливания породы в ее стенки в технической

литературе называют проколом. Он может быть статическим, вибрационным и виброударным. Применяют проходку либо непосредственно трубой-патроном, либо забойными проходческими устройствами. Так как методы прокола основаны на вдавливании и уплотнении породы, то и реализовываться могут лишь в уплотняемых грунтах. Наиболее благоприятны в этом случае глины, суглинки, супеси. Процесс прокола происходит путем радиального уплотнения прилегающего массива конусным наконечником. Это достигается за счет уплотнения – смыкания имеющихся пор и вытеснения из них воздуха и грунтовой воды. Расстояние от боковой поверхности вдавливаемой трубы до существующих коммуникаций должно быть не менее трех ее диаметров. Для предохранения асфальтового покрытия от выпучивания глубина заложения прокладываемой трубы диаметром 150 мм должна быть не менее 1,2 м, диаметром 300 мм — не менее 2,5 м [42, 67].

Известен метод раскатки скважин [22, 129]. Это процесс образования цилиндрической полости в массиве путем его деформации и уплотнения раскатывающим механизмом, представляющий собой ряд установленных последовательно друг за другом на общем валу *3* конических катков *4*, оси которых смещены относительно оси вала в стороны (рисунок 1.1). Оси катков развернуты под углом φ так, что при вращении вала они катятся по винтовой линии, осуществляя подачу раскатывающего механизма и образование скважины *1*. Трудности, связанные с надежной защитой подшипников катков, существенно препятствуют практическому применению этого метода.



а — принципиальная схема: *1* — скважина;
2 — привод; *3* — вал эксцентриковый; *4* — конические катки; *5* — ребра;
6 — кабель питания привода; *б* — схема разворота катков

Рисунок 1.1 — Машина для раскатки скважин [129]

Методы прокола могут реализоваться забойными проходческими устройствами — пневмопробойниками (рисунок 1.2) [23, 67, 122,144]. Так получают скважины диаметром не более 300 мм, поскольку увеличение диаметра требует значительно возрастающих энергозатрат, к тому же процесс может сопровождаться переуплотнением массива с осыпанием стенок скважины. Последние образуются однократной (без расширителя) или многократной (с расширителем) проходкой пневмопробойника от стартового приямка к выходному котлована [145]. В сыпучих грунтах без применения специальных мер по укреплению стенок скважины в процессе ее формирования проходка этим методом практически невозможна. Кроме того, малая длина проходчика, по сравнению с длиной скважины, увеличивает вероятность его отклонения от заданного направления в неоднородных грунтах даже при небольших длинах скважин.

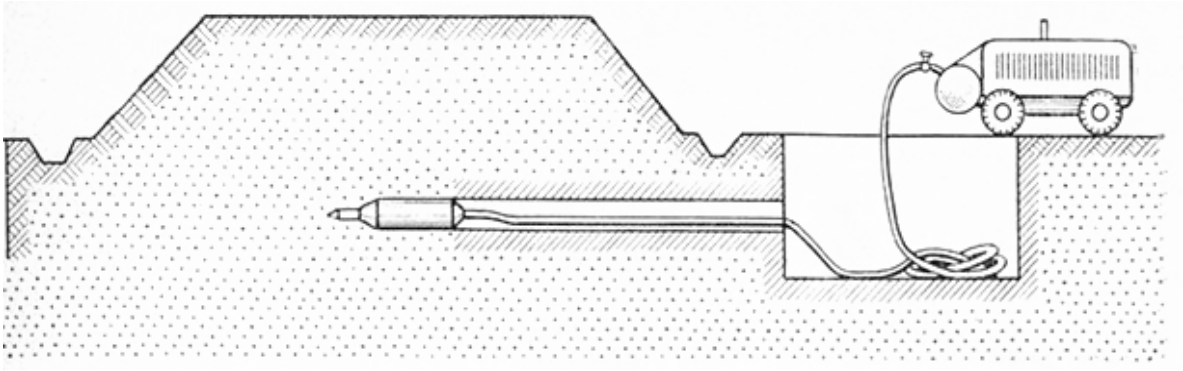


Рисунок 1.2 — Проходка скважины пневматическим проходчиком (пневмопробойником) [67]

Для прокладки трубопроводов различного назначения диаметром до 300 мм в глинах и суглинках при максимальной протяженности проходок 40 – 60 м широкое применение нашел метод статического прокола [51, 67]. В качестве продавливающих устройств при проколе обычно используют гидравлические домкратные установки, нажимные усилия от которых передаются прокладываемой трубе через ее торец (рисунок 1.3). Труба-патрон снабжена на забойном конце глухим конусным наконечником, диаметр основания которого в целях снижения сопротивления превышает диаметр трубопровода на 20 – 30 мм. При продвижении в массиве наконечник раздвигает и уплотняет его, образуя скважину [95].

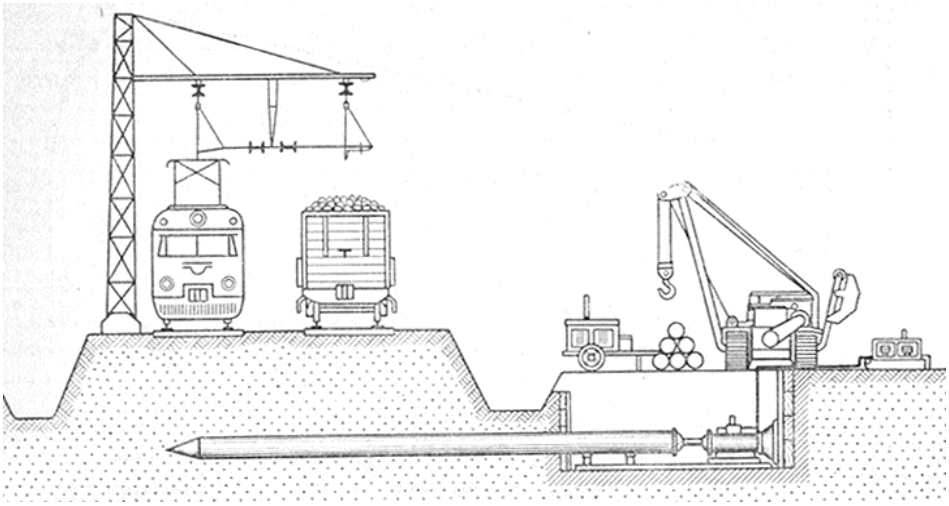
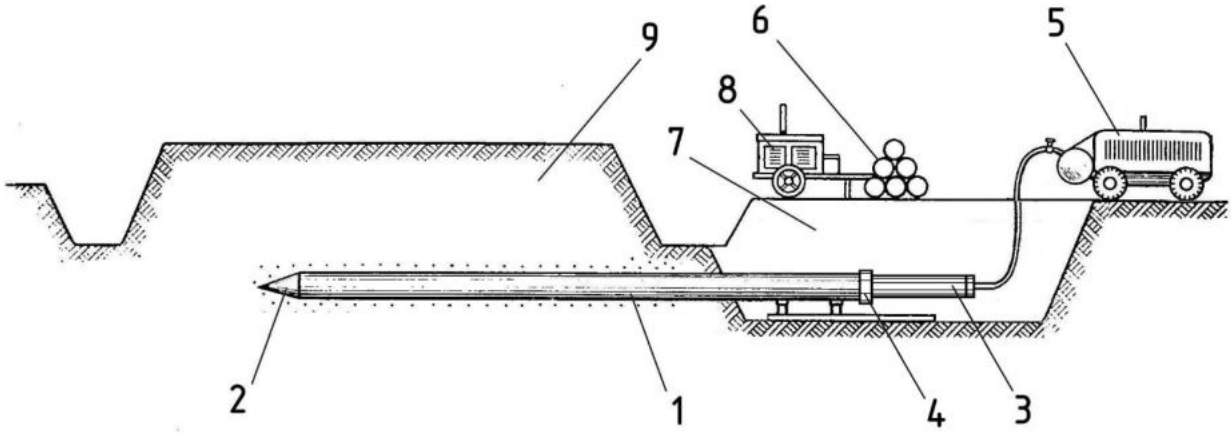


Рисунок 1.3 — Сооружение перехода статическим проколом при помощи гидродомкрата [67]

Широко используются горизонтальные копры, представляющие собой направляющую раму, на которую опираются забиваемая труба и ударное устройство. В качестве ударного устройства *3* обычно применяют пневмопробойник *3*, который закрепляют при помощи насадки *4* на задний конец трубы (рисунок 1.4) [91]. Трубная плеть *1* формируется путем посекционного наращивания труб *6* электросваркой.



1 — трубная плеть; *2* — оголовок; *3* — пневмопробойник; *4* — насадка; *5* — компрессор; *6* — трубы; *7* — рабочий приямок; *8* — сварочный агрегат; *9* — автодорога

Рисунок 1.4 — Виброударное прокалывание [67]

Главным ограничением метода прокола является глубина заложения трубной плети. В случае выхода зоны уплотнения за пределы свободной дневной поверхности

произойдут деформация и разрушение дорожного полотна. Поэтому минимальная глубина проходки должна составлять девять диаметров скважины [67, 85].

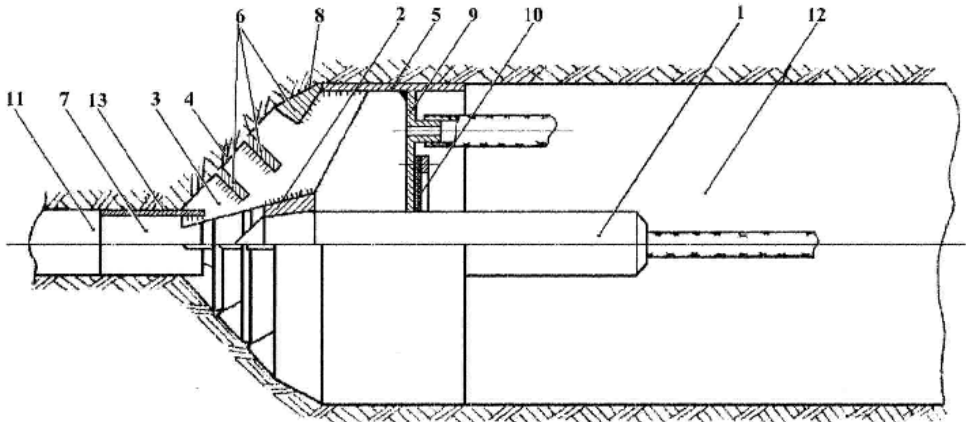
Также ограничением метода прокола являются размеры забиваемой трубной плети. С увеличением диаметра трубы, прокладываемой с закрытым концом, силы лобового сопротивления продвижению возрастают, и скорость проходки уменьшается вплоть до отказа. Для преодоления возросших сил сопротивления и повышения скорости проходки необходимо увеличивать статические усилия или энергию удара. В результате нагрузка на сварные стыки возрастает. Продолжительное воздействие удара по трубной плети при сооружении длинных переходов приводит к длительному действию знакопеременных напряжений и возникновению трещин. Далее идет разрушение сварных стыков. Нарушается волновой процесс передачи ударного импульса по трубной плети до забоя, и происходит аварийный отказ.

1.1.2 Устройства, образующие скважины путем вдавливания породы с частичным его удалением

В устройстве, показанном на рисунке 1.5, разрушение массива и уплотнение стенок скважины осуществляются энергией ударных импульсов. В качестве ударного узла использован пневмопробойник *1*, на передней части корпуса которого установлена втулка *2* с ребрами *3*. Ребра *3* являются опорой режущего рабочего органа, который включает периферийный нож с наружной конической поверхностью и кольцевые ножи *6*. В передней части рабочего органа размещена направляющая втулка *13*, обеспечивающая движение устройства по ранее сооруженной пионерной скважине. В процессе поступательного движения вперед происходят разрушение массива кольцевыми ножами и уплотнение некоторой его части в стенки формируемой скважины конической наружной поверхностью периферийного ножа. Кольцевые ножи и ребра обеспечивают разрушение поступающей внутрь породы на мелкие фракции, пригодные для транспортирования. Удаление грунта осуществляется воздушным потоком по пионерной скважине. Для транспортирования

породы используется воздух, отработанный пневмопробойником, а также дополнительно подведенный из магистрали.

Опытные образы таких устройств разработаны, изготовлены и испытаны в Институте горного дела СО РАН [143]. Результаты испытаний показали, что главной проблемой устройств этого типа является недостаточная надежность транспортирования частиц породы по пионерной скважине. Вследствие низкого аэродинамического качества пионерной скважины как транспортного канала и значительного диапазона изменений таких важных свойств массива, как удельный вес, влажность, форма и размеры частиц породы, не всегда удается избежать закупоривания пионерной скважины транспортируемым потоком. Для повышения надежности транспортирования необходимо обеспечить высокую скорость воздушного потока, что связано со значительным расходом сжатого воздуха.



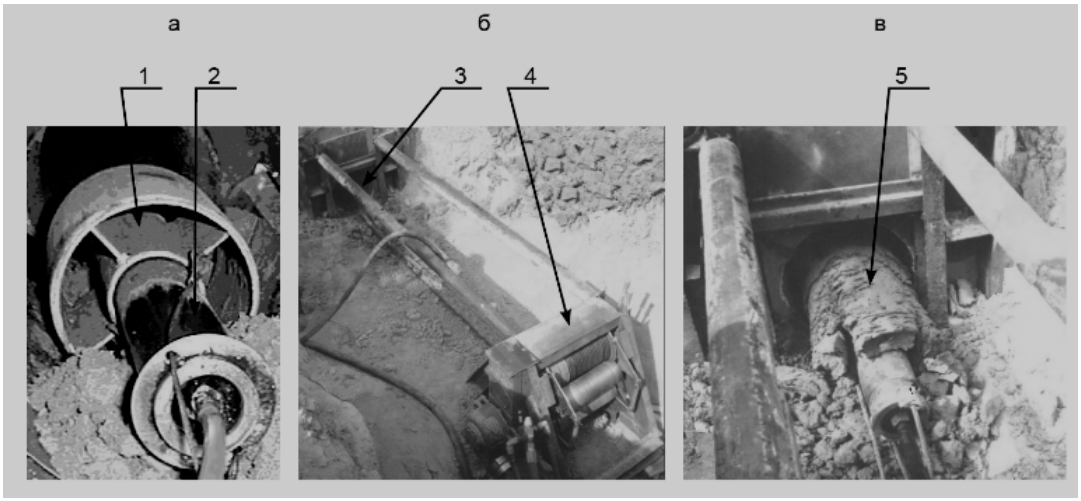
1 — пневмопробойник; *2* — втулка; *3* — ребра; *4* — рабочий орган; *5* — цилиндрическая обечайка; *6* — кольцевые ножи; *7* — сопло; *8* — периферийный нож с наружной конической поверхностью; *9* — фланец; *10* — предохранительный клапан; *11* — пионерная скважина; *12* — расширенная скважина; *13* — цилиндрическая направляющая

Рисунок 1.5 — Устройство для проходки скважин комбинированным способом с пневмотранспортированием разрушенной породы

Другой проблемой рассматриваемого типа устройств является достижение условий их самотранспортирования в различных типах осадочных пород. Поступательное движение устройства вперед возможно только при условии, что внешняя сила трения превышает величину силы отдачи пневмопробойника. Сила трения

определяется главным образом физическими свойствами массива и геометрией периферийного ножа, уплотняющего стенку скважины. В слабоуплотненных грунтах необходимо уплотнять в стенки большую часть породы, а в плотных грунтах — меньшую. Создание универсального устройства, способного работать в различных типах пород, является трудновыполнимой задачей. Вероятно, эти недостатки являются главными причинами, препятствующими внедрению таких устройств в строительную практику.

Другой тип устройств, реализующих комбинированный способ проходки [134], напоминает по принципу действия желонки для удаления породы из внутренней полости трубы, прокладываемой методом продавливания. Наиболее простое устройство показано на рисунке 1.6. Оно включает в себя пневмопробойник и режущий орган, состоящий из обечайки, ребер и втулки.



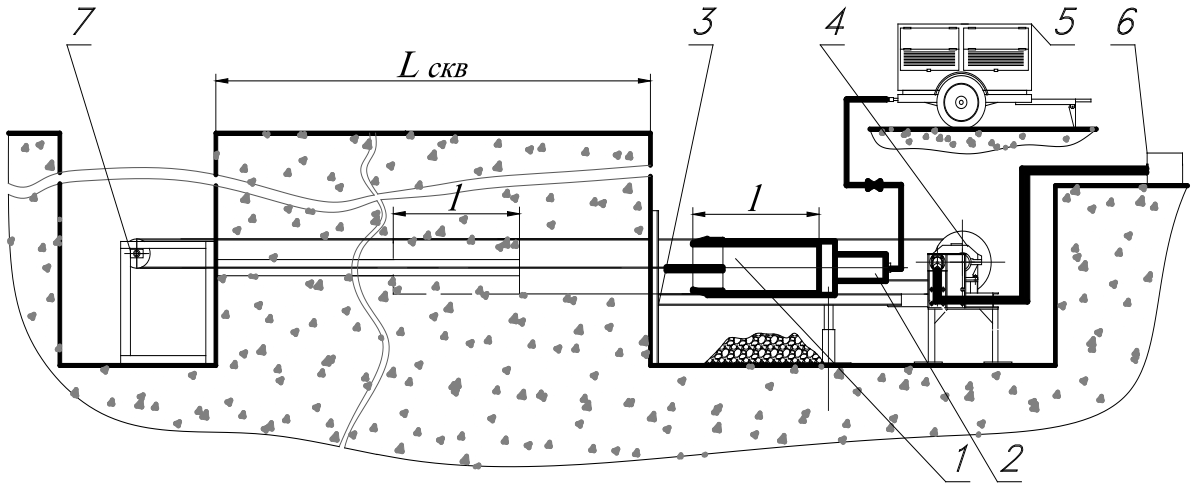
а — общий вид грунтопроходчика; *б* — разработка забоя; *в* — извлечение грунтового керна: *1* — кольцевой рабочий орган; *2* — пневмоударный привод; *3* — устье скважины; *4* — лебедка; *5* — керн

Рисунок 1.6 — Устройство для проходки скважин комбинированным способом [34]

Режущий орган установлен в средней части корпуса соосно с ним. Проходка скважин производится челночными рейсами, во время каждого из которых устройство внедряется в массив на величину, равную или немного превышающую длину обечайки. Движение устройства вперед происходит под действием ударных импульсов и статического усилия. Назад оно извлекается только статическим усилием

для предотвращения потери набранного керна. Статическое усилие создается реверсивной лебедкой, которая установлена в рабочем котловане. Для работы устройства необходимо предварительно проложить пионерную скважину, в которой затем размещаются прямая и обратная ветви каната для перемещения устройства вперед. Кроме того, пионерная скважина является направляющей для движения устройства. Количество породы, уплотняемой в стенки скважины, определяется геометрией и размерами обечайки режущего органа.

Аналогичное решение представлено на рисунке 1.7, в котором процесс проходки скважины носит циклический характер [28].



1 — грунтоприемная капсула; *2* — ударный привод грунтопроходчика; *3* — стартово-разгрузочная конструкция; *4* — тяговый привод двустороннего действия (гидравлическая или пневматическая лебедка); *5*, *6* — источник энергоносителя (компрессор, насосная станция для питания гидравлической лебедки); *7* — якорное устройство

Рисунок 1.7 — Бурение скважины грунтопроходчиком [28]

После подтяжки тяговым приводом грунтопроходчика к забою ударный привод обеспечивает забор керна в грунтоприемник, при этом грунтопроходчик продвигается на шаг *l*. Затем грунтопроходчик с керном извлекается из скважины и на стартово-разгрузочной конструкции освобождается от керна, после чего цикл повторяется. Скорость забора керна зависит от свойств породы, конструкции рабочей части грунтозаборного узла, энергетических параметров ударного привода и т. д.

Наличие статического усилия, действующего совместно с ударными импульсами, значительно расширяет диапазон предельных технических возможностей устройства [32]. Однако челночный принцип работы является препятствием для достижения высокой производительности. Многократное передвижение устройства по скважине приводит к изменению ее формы и размеров, а также провоцирует возможное обрушение. При этом наибольшей нагрузке подвергается устье скважины. Кроме того, размещение в скважине рабочих коммуникационных линий возможно только после демонтажа устройства. Это связано с необходимостью сохранения устойчивости скважины в течение длительного периода времени.

Вариант непрерывного расширения скважины с применением одновременного статического усилия и энергии ударов представлен на рисунке 1.8 [47].

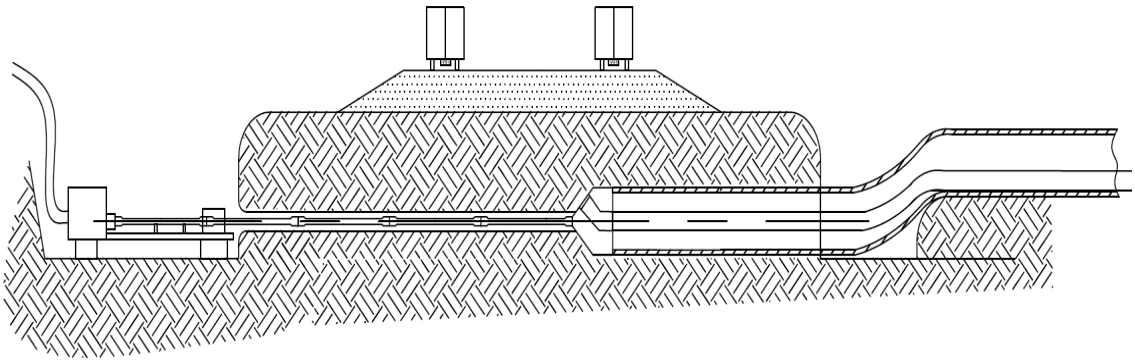


Рисунок 1.8 — Технологическая схема непрерывного расширения скважины

На первом этапе эта технология предусматривает прокладку пионерной скважины малого диаметра, а на втором — расширение скважины до проектного диаметра при обратном движении расширителя с возможностью одновременной протяжки обсадной полиэтиленовой трубы. При этом разрушение (резание) массива происходит за счет вращения кольцевого ножа. Транспортирование разрушенной при бурении породной массы воздушным потоком осуществляется по вращающемуся трубопроводу, жестко соединенному через породоразрушающий инструмент с буровыми штангами и расположенному внутри обсадной трубы. Представленная технология рассматривается как альтернатива горизонтальному направленному бу-

рению, поскольку отсутствует необходимость применения дорогостоящих буровых растворов. Основными ограничениями комбинированного способа с непрерывным расширением являются:

— необходимость пилотной скважины;

— возможность проходки только в сухих грунтах без крупных твердых включений;

— трудности при протяжке металлической обсадной трубы.

1.1.3 Устройства, образующие скважины путем удаления породы из забоя

Эти устройства можно разделить на две подгруппы. В первой разрушение массива происходит по всему сечению скважины с одновременным удалением керна (горизонтальное бурение). Во второй разрушение массива осуществляется по периметру путем внедрения в него обсадной металлической трубы с последующей ее очисткой от керна [1,51, 91].

Наиболее широко применяют метод горизонтального бурения с разработкой массива осадочных пород резцовой головкой диаметром большим, чем у трубы-кожуха, и с эвакуацией породы потоком жидкости, шнековым транспортером или желонкой совкового типа.

Ведущими фирмами по изготовлению бурового оборудования являются американские: Vermeer [16], Ditch Witch, Case и германская компания TractoTechnick [111]. Оборудование этих фирм поставляется практически во все страны мира. На российском рынке они представлены уже около 25 лет.

Указанные компании изготавливают широкий типоразмерный ряд таких установок. Для прокладки кабельных сетей в сжимаемых грунтах, в том числе гравелистых, применяются буровые головки, выполненные со скосом в передней части (рисунок 1.9) [168]. Буровая головка снабжена сменными пластинами из твердых сплавов и отверстиями для прохода буровой жидкости и соединена посредством полого корпуса с приводной штангой. В корпусе смонтирован датчик (излучатель) для передачи сигналов, фиксирующих местоположение буровой головки [99, 162].

а *б*

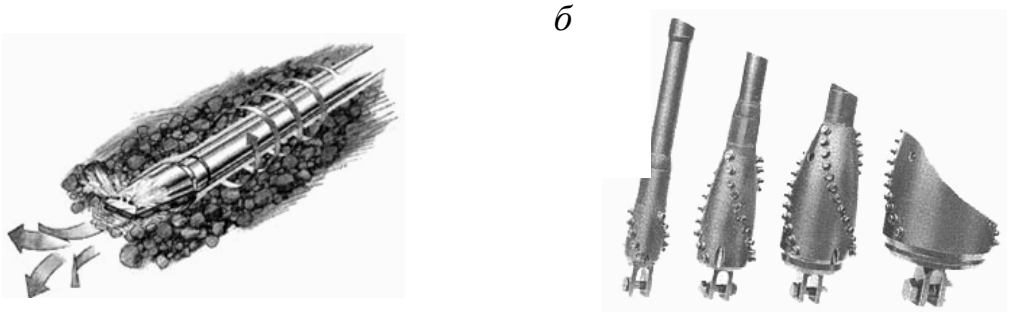
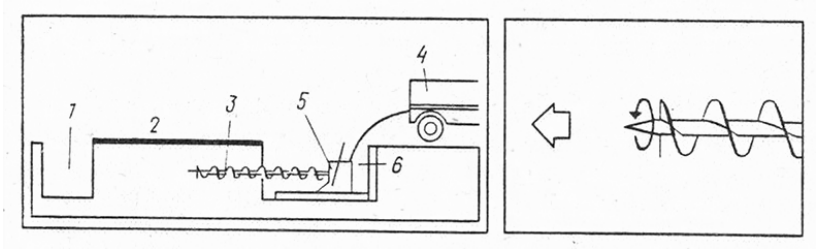


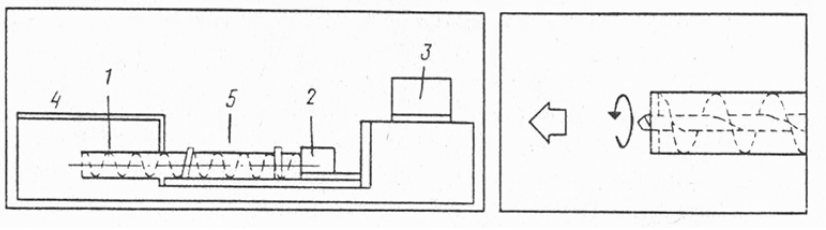
Рисунок 1.9 — Буровая головка для проходки лидерной скважины в сжимаемых грунтах (*а*) и расширения лидерной скважины в сжимаемых грунтах (*б*) [99]

На рисунках 1.10 и 1.11 представлены схемы работы буровых и прессобуровых установок.



1 — выходной котлован; *2* — препятствие; *3* — шнековый конвейер; *4* — приводной агрегат; *5* — буровая установка; *6* — входной котлован

Рисунок 1.10 — Буровая установка [16]



1 — труба с буровой головкой и шнеком; *2* — прессобуровой агрегат; *3* — гидравлический насос; *4* — проезжая часть; *5* — входной котлован

Рисунок 1.11 — Прессобуровая установка [16]

Для образования скважин диаметром свыше 300 мм широко применяются микрощиты (рисунок 1.12) [19, 82, 84, 88, 92, 101, 169,170, 194]. Ведущими фирмами по выпуску микрощитов являются Sanva Kizai Co. Ltd., Lovat, Herrenknecht, Westfalia Lunen и др.

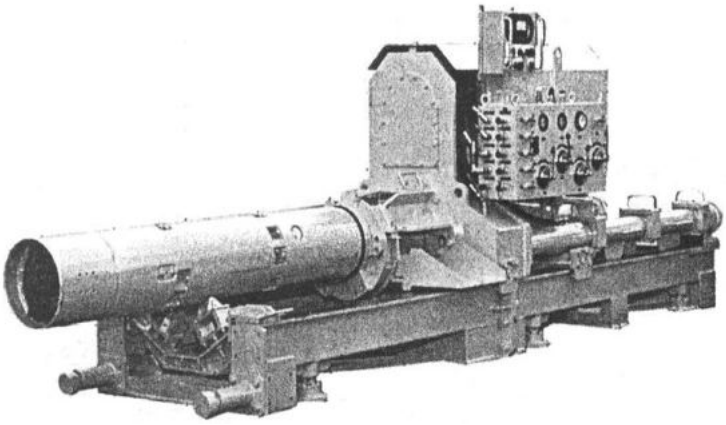


Рисунок 1.12 — Общий вид микрощита [19]

Эти устройства снабжены компьютерной лазерной системой наведения, которая обеспечивает достижение высокой точности проходки скважины, комплектуется находящимся на поверхности оборудованием, обеспечивающим приготовление и подачу бентонитового раствора в забой и удаление шлама из скважины. Щитовая проходка заключается во вдавливании в массив короткой инвентарной цилиндрической крепи (щита), под защитой которой разрабатывают и удаляют породу из забоя, возводят обделку тоннеля и производят другие работы, связанные с управлением щитом (рисунок 1.8). В процессе работы щит перемещается вперед специальными устройствами.

Несмотря на большую длину сооружаемых переходов и высокий уровень механизации, метод горизонтального бурения имеет ряд недостатков:

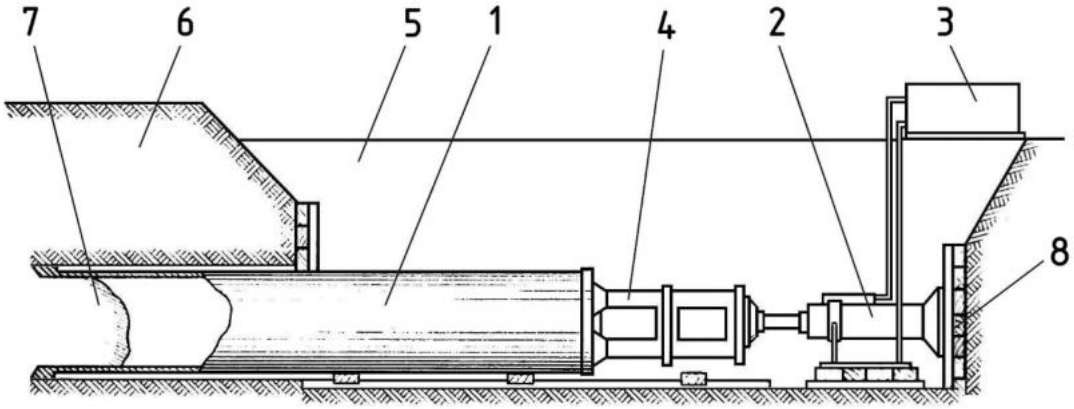
— проходка с лидирующей разработкой массива при прокладке трубопроводов под дорогами может использоваться только в связных грунтах из-за опасности образования полостей под насыпью, обрушения массива и осадки дорожного полотна;

— трудность проталкивания защитных кожухов при их обжатии массивом существенно ограничивает длину проходки в слабых и обводненных грунтах;

— ненадежность шнекового транспортера при больших диаметрах переходов и в массивах, содержащих твердые включения;

— сложность, громоздкость оборудования и большая стоимость.

Статическое погружение трубы с открытым передним торцом в массив под действием напорной силы, развиваемой гидроцилиндром *2*, представлено на рисунке 1.13. Давление в гидроцилиндре *2* создается насосной станцией *3*. После каждого цикла погружения трубы *1* шток гидроцилиндра *2* возвращают в исходное положение и увеличивают длину вставки *4* [21, 123, 151].



1 — труба; *2* — гидроцилиндр; *3* — насосная станция; *4* — вставка; *5* — рабочий котлован; *6* — земляная насыпь; *7* — керн; *8* — подпорная стенка

Рисунок 1.13 — Метод статического продавливания [123]

Поступающий внутрь трубы *1* керн *7* под действием силы трения со стороны внутренней поверхности трубы уплотняется. Вследствие этого возникают и увеличиваются силы бокового распора, что ведет к дальнейшему росту силы трения. Продвижение керна прекращается, и возникает плотная пробка. Напорная сила достигает максимума, дальнейшая проходка превращается в прокол трубой с закрытым передним торцом. Для возобновления процесса резания массива передней кромкой необходимо удалить пробку из полости трубы [15, 74].

Во время прокладки металлической трубы открытым концом в значительной мере повышается точность проходки и предельная длина при высокой скорости погружения. Кроме того, снимаются ограничения на глубину заложения трассы и ее расстояние до действующих коммуникаций [83].

Важными достоинствами способа статического погружения трубы с открытым передним торцом являются бесшумность и отсутствие вибрации.

Недостатки способа:

— необходимость вставок различной длины;

— потребность сооружения подпорной стенки для создания большого напорного усилия;

— частое образование пробок;

— область использования ограничена невозможностью проходки в грунтах с крупнообломочными включениями;

— опасность продавливания труб небольшого диаметра на значительную длину вследствие малой продольной жесткости и неустойчивости, приводящей к их разрушению.

Эти недостатки устраняются при замене статического усилия на виброударную нагрузку, прикладываемую по оси погружаемой трубы, при помощи пневмомолота, пневмопробойника, гидромолота и т. д. (рисунок 1.14). Оборудование при виброударном погружении располагается в рабочем приямке. Выходной приямок предназначен для контроля точности проходки и соединения перехода с основной магистралью. Пневмомолот соединен с забиваемой трубой через насадку и зафиксирован с помощью стяжного устройства. Направляющая необходима для установки трубы и обеспечения точного направления прокладки коммуникации.

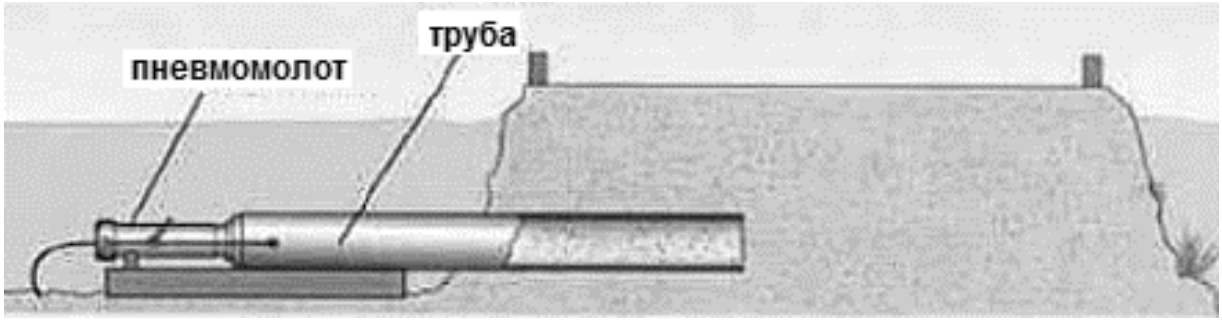


Рисунок 1.14 — Оборудование и рабочее место
для бестраншейной прокладки труб методом виброударного продавливания [123]

Метод виброударного продавливания имеет ряд недостатков, основными из которых являются: высокий уровень шума, значительные размеры рабочего приямка, необходимость усиления сварных стыков составной трубы. Однако только этот метод позволяет выполнить бестраншейные скважины под автомобильными и железнодорожными магистралями при малом заглублении, поскольку исключает два основных недостатка остальных бестраншейных методов [75, 115, 139]:

— обрушение стенок скважины в промежуток времени между разработкой массива в сечении скважины и обсадкой;

— деформация дневной поверхности вследствие вспучивания или просадки.

Способом виброударного продавливания можно прокладывать трубы диаметром от 102 до 3 600 мм на длину до 122 м. Материал трубы обычно ограничивается сталью из-за значительных сил, передаваемых трубе во время процесса ее погружения. Однако существуют примеры использования неметаллических труб из таких материалов, как стеклокерамика, железобетон и полиэтилен низкого давления (HDPE) [163, 196, 198].

Таким образом, способ виброударного продавливания имеет очень широкую область применения в сравнении с другими способами (таблица 1.1), и развитие этого направления актуально. Важной операцией в технологии продавливания обсадной трубы является очистка ее внутренней полости от керна. Достигнутый прогресс в операции забивки кожуха требует повышения эффективности работы и на этом технологическом этапе сооружения перехода.

1.1.4 Классификация способов удаления керна из трубы

При прокладке подземных коммуникаций методом продавливания металлических труб с открытым передним концом керн вырезается из массива и заполняет полость трубы. Для очистки трубы от керна в настоящее время применяются следующие способы [106 – 107, 111]:

— циклическое удаление керна при помощи желонки;

— гидроразмыв струей высокого давления;

— выбуривание и транспортировка шнеком;

— выдавливание;

— вибротранспортирование.

Таблица 1.1 — Применение способов бестраншейной проходки скважин в зависимости от грунтовых условий [188]

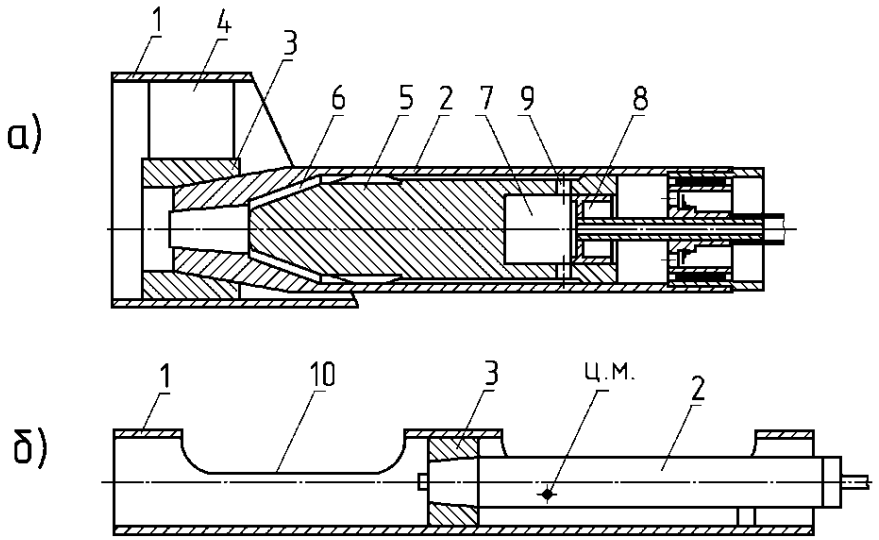
Грунтовые условия	Виброударное продавливание	Горизонтальное направленное бурение	Микротоннелирование	Шнековое бурение с одновременной обсадкой
Мягкая и очень пластичная глина или ил	+	+	+	?
Малопластичная глина или ил средней жесткости	+	+	+	+
Тяжелая глина или выветрившийся сланец	?	+	+	+
Очень рыхлый песок выше уровня грунтовых вод	+	+	+	?
Среднеплотный и плотный песок выше уровня грунтовых вод	+	+	+	—
Среднеплотный и плотный песок ниже уровня грунтовых вод	+	+	+	+
Грунт с включениями гравия и булыжников меньше 50 – 100 мм	+	?	?	+
Грунт с булыжниками, валунами и преградами до 100 – 150 мм, известковые глины, мел и твердоцементные грунты	+	?	—	?
Выветренные породы, мергели, мел и прочноцементированные грунты	+	+	+	?

«+» — обычно подходящий опытным подрядчиком с надлежащим оборудованием; «?» — могут возникнуть трудности; требуется модернизация оборудования или технологии; «—» — существенные проблемы, обычно неподходящий способ для данных условий.

Устройства для очистки полости трубы от керна циклическим способом

Циклическое удаление керна с использованием тяговой лебедки и грунтозаборного устройства с приводом от пневмопробойника предпочтительно для осуществления промежуточной очистки трубы от керна, особенно при реализации виброударного способа продавливания (рисунок 1.15). Основные достоинства способа в этом случае: общий вид энергоносителя (сжатый воздух) для пневмомолота, пневмопробойника и пневмодвигателя тяговой лебедки [163].

Варианты грунтозаборных устройств представлены на рисунке 1.15. Они могут быть выполнены с перепуском грунта и без него [2 – 7, 9, 114].



1 — корпус из отрезка трубы; *2* — корпус пневмопробойника; *3* — втулка; *4* — ребро; *5* — ударник; *6* — камера обратного хода; *7* — камера прямого хода; *8* — патрубок; *9* — отверстие; *10* — окно; ц. м. — центр масс

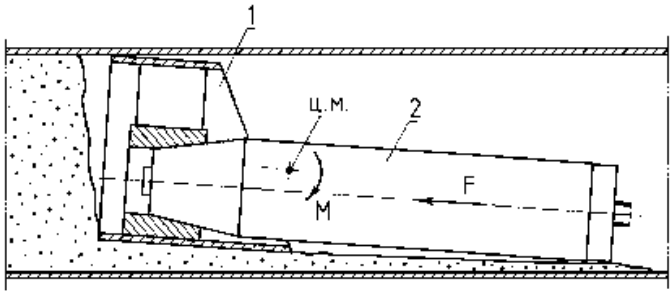
Рисунок 1.15 — Грунтозаборные устройства с приводом от пневмопробойника с перепуском грунта (*а*) и без него (*б*)

Недостатком представленных на рисунке 1.15*б* самодвижущихся грунтозаборных устройств является трудность разгрузки от породы после извлечения желонки из трубы. Грунтозаборное устройство перепускного типа частично решает эту проблему. Устройство с перепуском хорошо работает в рыхлых песчаных грунтах, так как оно самоочищается от породы при включении пневмопробойника на ход к забою. При этом порода остается перед трубой и удаляется вручную. Однако извлечение лебедкой такого устройства при волочении грунтовой призмы по всей очищенной длине трубы требует повышенных затрат энергии. Во влажных глинистых грунтах эффективность очистки грунтозаборным устройством перепускного типа резко понижается. После внедрения и отрыва отрезка трубы от забоя порция набранной породы по большей части остается на забое. К поверхности грунтозаборного устройства прилипает грунт, поэтому требуется механическое удаление путем его соскребания.

Грунтозаборное устройство с керноприемником, выполненным в виде обычной желонки [91], более универсально, так как может работать в глинистых грунтах, не оставляя набранную породу на забое (рисунок 1.15*б*). Однако во влажных глинистых грунтах резко усиливается трудность разгрузки от породы, так как выемка из наборной емкости через окно осуществляется вручную. Трудоемкость разгрузки желонки существенно увеличивает общее время очистки трубы.

Другой причиной отсутствия породы в грунтозаборном устройстве может явиться его заклинивание в трубе перед забоем при несовпадении оси симметрии пневмопробойника с центром масс грунтозаборной насадки *1* и корпуса пневмопробойника *2*, который расположен выше (рисунок 1.16). Если сила удара *F*, совпадающая с осью пневмопробойника, проходит ниже центра масс желонки, то возникает мгновенный ударный момент *M*, который пытается повернуть грунтозаборное устройство относительно ее центра масс в направлении по часовой стрелке.

После каждого удара момент *M* поворачивает и поднимает вверх носовую часть грунтозаборного устройства относительно задней точки опоры, а сила *F* перемещает ее вперед. Передняя нижняя режущая кромка желонки смещается вверх и вперед. Часть породы оказывается под желонкой и уплотняется под воздействием удара. Происходит уплотнение породы, и забой принимает вид полого откоса с малым углом подъема. По нему желонка перемещается вперед и вверх до упора в поверхность трубы.



1 — грунтозаборная насадка; *2* — пневмопробойник; *M* — мгновенный ударный момент; *F* — сила удара; ц. м. — центр масс

Рисунок 1.16 — Заклинивание грунтозаборного устройства в трубе

Уплотнение породы под желонкой при отсутствии видимого горизонтального продвижения вперед приводит к заклиниванию корпуса между верхней частью трубы и подстилающим породным слоем в ее нижней части и снижению производительности очистки. Для отрыва грунтозаборного устройства от забоя необходимо увеличить тяговое усилие лебедки, поскольку требуется большая тяга для отрыва желонки. В некоторых конструкциях желонки на этот случай предусматривается включение механизма реверсирования пневмопробойника.

Лебедки с большим тяговым усилием требуют увеличенного расхода воздуха и имеют более сложную конструкцию, большие габариты и вес, а также высокую стоимость. Реверсирование пневмопробойника для облегчения отрыва желонки от забоя приводит к самовыгрузке части породы и затратам времени на повторный его забор. Конструкция соединения корпуса с пневмопробойником реверсивного грунтозаборного устройства сложнее, а надежность работы ниже.

Таким образом, основные недостатки самодвижущихся устройств, применяемых для очистки трубы от керна, сформулированы ниже.

1. Низкая скорость транспортирования желонки к забою (удовлетворительной считается скорость около 5 м/мин).
2. Отсутствие полной механизации при разгрузке породы из желонки.
3. Трудность забора плотной породы.
4. Возможность заклинивания желонки в трубе при заборе породы и большое усилие отрыва от забоя.
5. Большое суммарное потребление сжатого воздуха пневмопробойником и пневмодвигателем тяговой лебедки приводит к высоким энергетическим затратам при низкой производительности процесса.
6. Ударные нагрузки, действующие на сварную конструкцию, снижают надежность грунтозаборного устройства.

Устройства для очистки полости трубы от керна гидроразмывом

Для очистки полости трубы от керна гидроразмывом нет специального оборудования. На практике применяются установки, предназначенные для очистки

труб разного назначения от засоров и различного рода отложений на стенках трубы (рисунок 1.17).

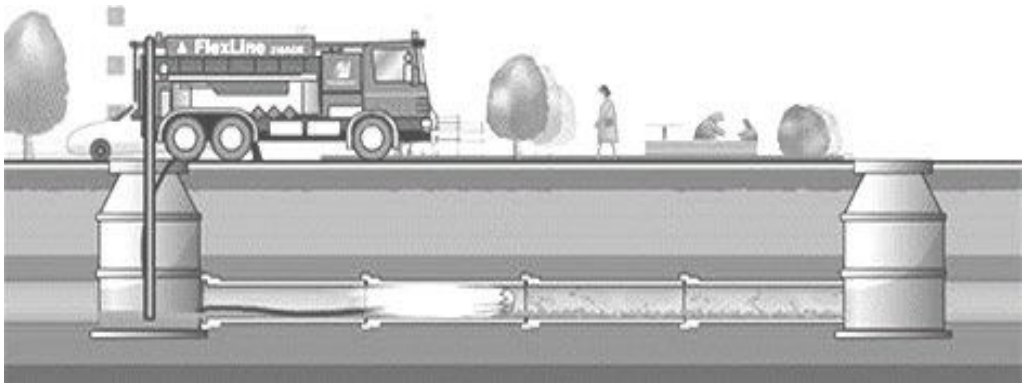


Рисунок 1.17 — Реализация гидроразмыва

Также для осуществления гидроразмыва применяется пожарная техника, позволяющая создать струю воды высокого давления [148].

Сущность гидроразмыва заключается в разрушении керна струей воды (рисунок 1.18). На конце водоподводящего шланга смонтировано сопло, представляющее собой металлический оголовок с форсунками в передней и задней части (рисунок 1.19). Передние форсунки служат для разрушения керна в трубе, а задние — для подачи форсунок на забой и транспортирования грунтового шлама потоком воды по нижней части трубной плети в рабочий приямок (рисунок 1.18) [32].

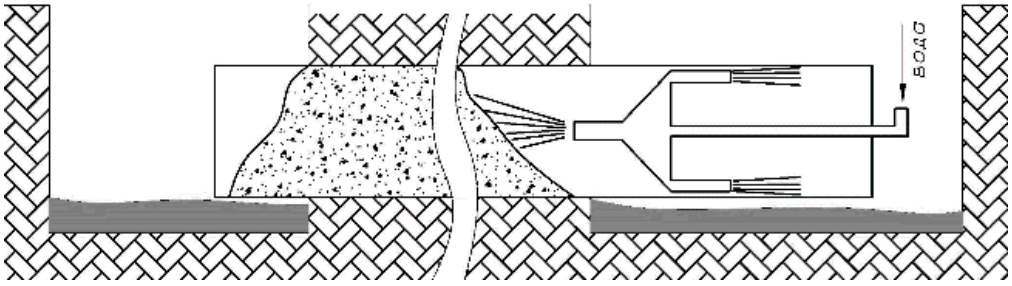


Рисунок 1.18 — Удаление керна из трубы гидроразмывом

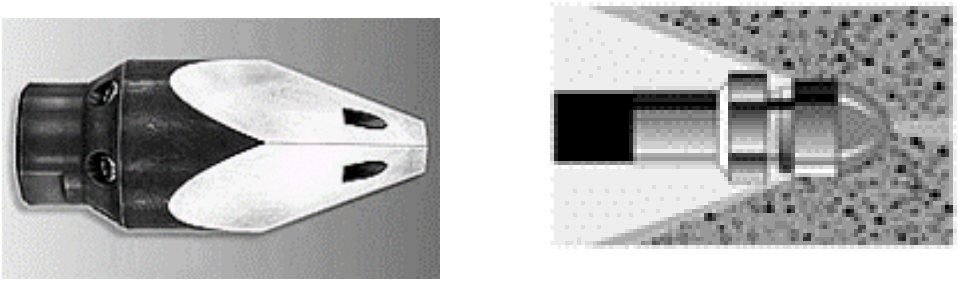


Рисунок 1.19 — Сопло для гидроразмыва

Машины для гидроразмыва имеют широкий диапазон расхода жидкости (до 100 л/мин) и напорного давления (до 3500 бар) [148].

Достоинство способа — высокая производительность.

Недостатки:

— стоимость оборудования для очистки канализаций или пожарной техники велика, и даже в случае аренды на период проведения работ затраты на очистку полости трубы от керна, по данным сайта http://kotlochist.ru, составляет 35000 руб., а это 20 – 30 % от стоимости всего объема работ по созданию подземного перехода;

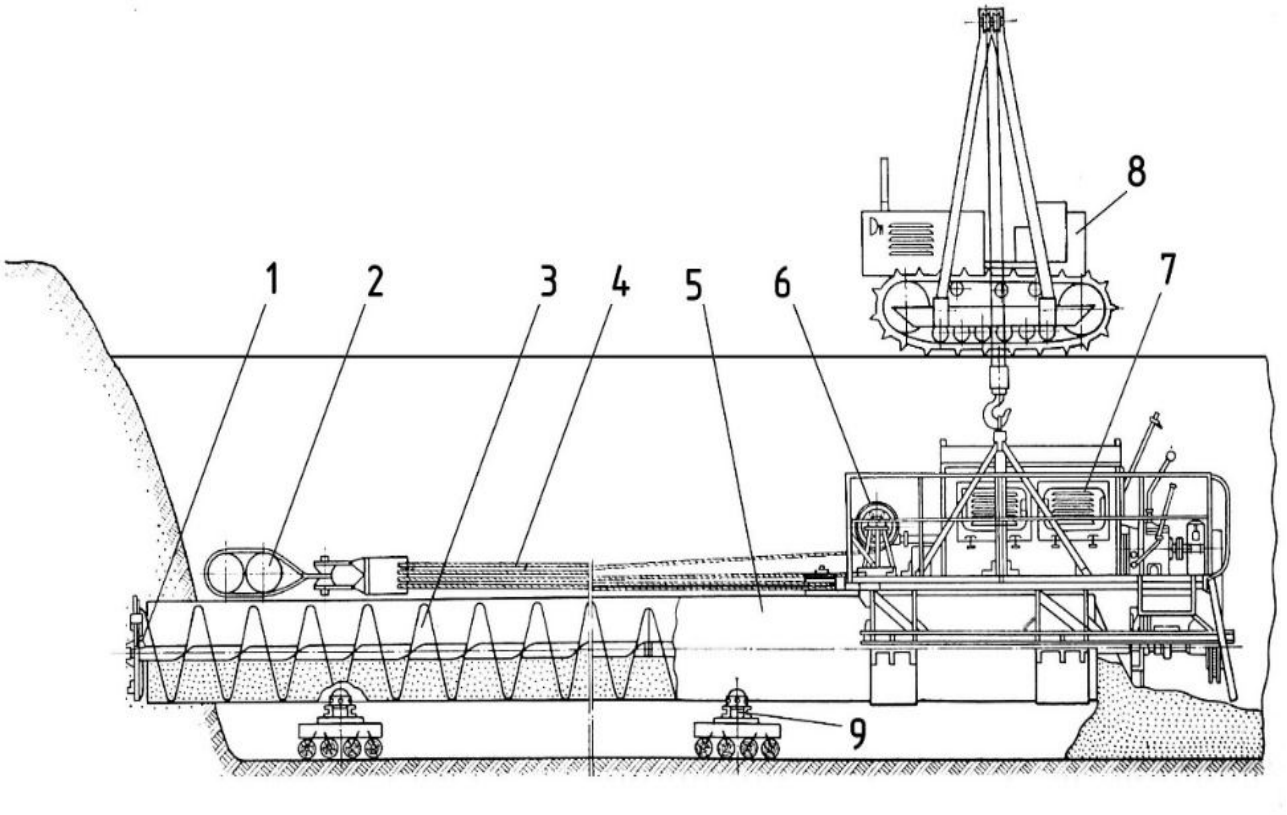
— дополнительные подготовительные операции по укреплению стенок рабочего приямка от размывания;

— мероприятия по осушению рабочего приямка и утилизации очистной воды.

Выбуривание керна из обсадной трубы с транспортировкой шнеком

Известен способ эвакуации керна шнековым транспортером, представленный на рисунке 1.20 [67].

После погружения в массив трубы-кожуха *10* установка для очистки размещается в рабочем приямке. Труба-патрон *5*, поддерживаемая на роликовых опорах *9*, направляется в трубу-кожух *10*. Создание напора и перемещение всей установки в направлении якоря происходят при помощи тяговой лебедки *6* и полиспастной системы *7*. При необходимости увеличения глубины проходки труба-патрон *5* и шнековый транспортер *3* наращиваются при помощи вставных секций [42].



1 — буровая головка; *2* — якорь; *3* — шнековый транспортер; *4* — полиспастная система подачи трубы патрона; *5* — труба-патрон; *6* — тяговая лебедка; *7* — силовая установка; *8* — трубоукладчик, поддерживающий установку; *9* — роликовая опора; *10* — труба-кожух.

Рисунок 1.20 — Установка для очистки труб с помощью шнекового транспортера [67]

Для очистки полости трубы от керна используются конструкции со свободно плавающим (безопорным) шнеком. Кроме ограниченной производительности, ему свойственен такой недостаток, как низкая жесткость. В результате этого шнек легко деформируется (отгибаются и отрываются винтовые поверхности, ломаются замковые соединения). Эти отрицательные качества сказываются при больших длинах шнекового транспортера. Также к недостаткам можно отнести сложность, громоздкость и большую стоимость оборудования. При определенном стечении обстоятельств, когда происходит заклинивание шнекового транспортера, вся установка может перевернуться. Это приведет к серьезным травмам рабочих в котловане и выведет оборудование из строя [189].

Удаление керна способом «push»

Весьма эффективным решением является устройство для очистки трубы по способу «push». Схема очистки для этого метода изображена на рисунке 1.21. Обязательное условие его осуществления — необходимость выхода переднего конца прокладываемой трубы в приемный котлован [87].

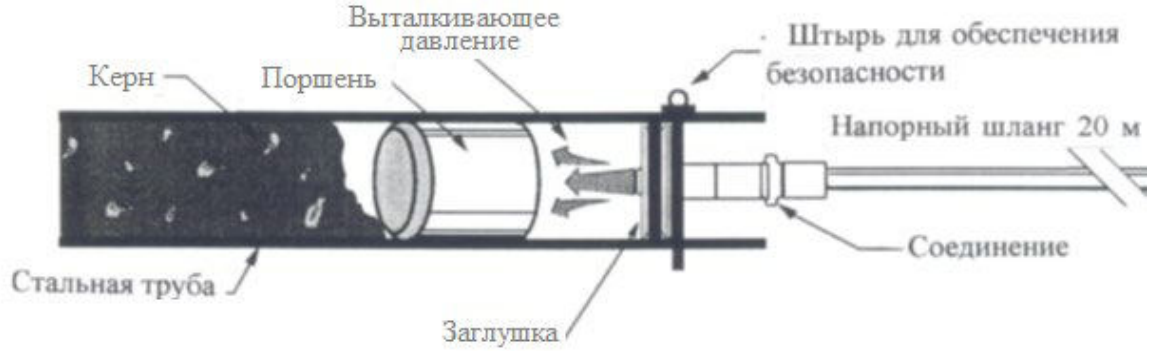


Рисунок 1.21 — Установка для очистки труб методом «push»

Очистка трубы от керна осуществляется следующим образом: со стороны переднего торца трубы, находящегося в приямке, устанавливают поршень, а за ним заглушку со штуцерами для подвода воздуха и воды. В полость между поршнем и заглушкой подается сжатый воздух и/или вода, которая служит смазкой внутренней поверхности трубы. Статическое усилие на поршень в грунтовом керне создает внутреннее давление, величина которого по мере удаления от поршня уменьшается.

Достоинства метода: простота и высокая производительность.

Недостаток: ненадежность очистки длинных труб. При увеличении длины трубы растет суммарная сила трения грунта о трубу и повышается сопротивление выдавливанию керна из трубы. Если для преодоления этого сопротивления увеличить статическое усилие к керну, то возрастет давление внутри керна, направленное перпендикулярно к внутренним стенкам трубы, что вызовет рост сил трения. В этом случае очистка трубы от керна будет невозможной. Недостатком также является повышенная опасность при проведении работ вследствие неуправляемости процесса выхода керна из трубы. Выдавливание керна давлением сжатого воздуха

из трубы малого диаметра (менее 0,3 м) затруднено, поскольку с уменьшением диаметра трубы снижается отношение силы, выталкивающей керн, к силе сопротивления, обусловленной трением керна о внутренние стенки трубы [76].

Очистка трубы от керна методом вибротранспортирования

В 1959 г. предложен и позднее реализован на практике метод виброударного продавливания, который в первоначальном варианте должен был обеспечить совместимость и одновременность двух процессов: внедрения полой трубы в массив осадочных пород и непрерывной транспортировки керна из зоны забоя без принудительной эвакуации [8, 10].

Сущность метода заключается в следующем: труба-патрон, снабженная на забойном конце кольцевым наконечником, выкладывается в траншею перед объектом проходки — насыпью автомобильной или иной дороги и т. п. К другому ее концу присоединяют вибромолот горизонтального действия. Труба-патрон в месте крепления к вибромолоту имеет специальное окно для выхода керна (рисунок 1.22) [17, 18, 66, 149].

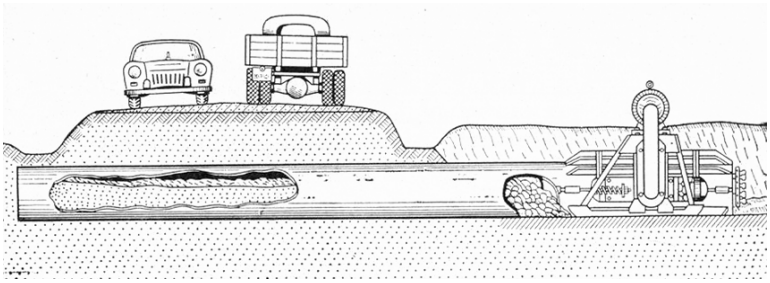


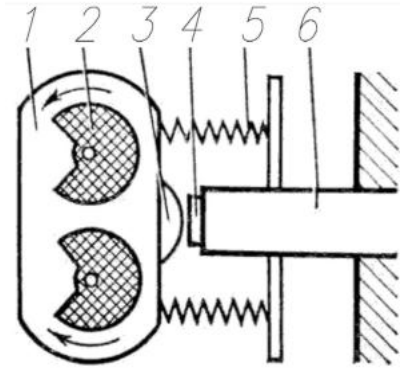
Рисунок 1.22 — Прокладка трубы методом виброударного продавливания [67]

При включении вибромолота установка самостоятельно перемещается к забою, производит заглубление и последующую проходку, как и в случае виброударного прокола. Поступающий в трубу керн перемещается по ней как по вибротранспортеру со скоростью, большей скорости проходки, и выходит через окна в задней части трубы-патрона.

В течение всего процесса продавливания эвакуация керна из внутренней полости трубы непрерывна и происходит таким образом, что к концу проходки труба-патрон свободна от керна и готова для укладки в нее рабочей трубы.

Упрощенная механика процесса виброударной проходки с транспортировкой керна осуществляется следующим образом. Нанося очередной удар по наковальне, вибромолот сообщает ударный импульс трубе-патрону, заставляя ее перемещаться вперед на некоторое расстояние *l*. В момент ударного перемещения в трубу поступает очередная порция керна длиной *l*.

После того как силы сопротивления керна (в основном силы трения о внутреннюю поверхность трубы) затормозят ударное перемещение погружаемого элемента, вибромолот, воздействуя на последний через пружины (рисунок 1.23), совместно с силами упругой деформации на внешнем контуре трубы вызовет ее обратное безударное перемещение на расстояние l_1 ($l_1 < l$, т. е. безударное перемещение меньше, чем ударное). Поскольку безударное перемещение происходит со сравнительно малыми ускорениями, керн, связанный с трубой силами сцепления и трения, переместится вместе с трубой назад на расстояние, близкое к l_1.



1 — вибровозбудитель направленных колебаний;
2 — дебаланс; *3* — боек; *4* — наковальня;
5 — пружинная подвеска; *6* — погружаемый элемент

Рисунок 1.23 — Принципиальная схема вибромолота

Следовательно, проходка под действием одного удара составит $l - l_1$. Керн, переместившись при ударе по трубе на расстояние, сопоставимое с *l*, сдвинется относительно своего начального положения на расстояние, близкое к l_1.

Таким образом, за *n* ударов труба пройдет в массиве расстояние $n(l - l_1)$, а рассматриваемый элемент керна, переместившись по трубе, сдвинется относительно своего первоначального положения в массиве назад на расстояние nl_1 [18, 20, 135].

Одновременно происходят два процесса: заглубление в массив трубы и вибротранспортирование из нее керна. Причина этих процессов — виброимпульсная

характеристика колебаний погружаемого элемента под влиянием ударного и выдергивающего действия вибромолота.

Очевидно, что если не ограничивать рост бокового сопротивления по мере проходки, то это уменьшит подвижность погружаемого элемента и снизит его транспортирующую способность в отношении керна.

Как следует из графика, без сил трения отсутствует и перемещение трубы-кожуха, и транспортировка керна (рисунок 1.24). При малых значениях этих сил погружаемый элемент перемещается в противоположную забою сторону, а находящийся внутри него керн движется в том же направлении, но с большей скоростью. Начиная с некоторого значения сил трения, погружаемый элемент заглубляется в массив, а керн перемещается от забоя и удаляется на поверхность через специальное окно в задней части трубы. С дальнейшим ростом сил бокового трения транспортировка керна прекращается, и он немного уплотняется внутри трубы.

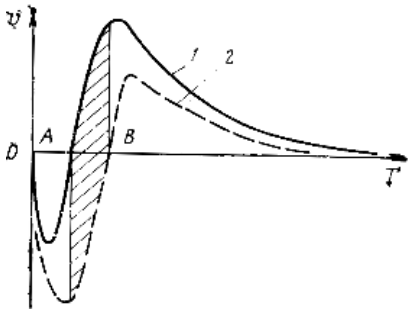


Рисунок 1.24 — Изменение скорости перемещения трубы-патрона (*1*) и скорости абсолютного перемещения керна (*2*) с ростом сил бокового трения (заштрихованный участок *AB* характеризует область самотранспортирования керна)

Очевидно, что вести продавливание при этих значениях сил трения нецелесообразно. Следовательно, при продавливании необходимо ограничить возрастание сил бокового трения, сохранив их величину в интервале *AB*. На практике это достигается использованием забойных кольцевых наконечников, превосходящих наружный диаметр трубы и обеспечивающих тем самым в процессе проходки создание зазора между стенками образуемой скважины и наружной поверхностью трубы. Сохранение этого зазора возможно только в связных грунтах. Это обстоятельство сужает границы применения такого способа. Но и при соблюдении

необходимых условий интенсивные колебания трубы, обеспечивающие транспортировку керна, могут привести к разрушению одного из стыков сварных швов, остановив таким образом проходку. Для ремонта шва придется удалять керн из трубы. В целом способ виброударного продавливания, обеспечивающий самотранспортировку керна, пока не надежен [67].

Предложенный системный анализ способов горизонтальных проходок скважин и удаления керна, а также механизмов для их реализации дает общую картину состояния вопроса в данной области, позволяет выявить особенности известных процессов и устройств, отражающих тенденции развития, их достоинства и недостатки, а также определить место создаваемых механизмов в общей системе.

1.2 Обзор и анализ способов и технических средств проходки вертикальных скважин в осадочных горных породах

Бурение массива осадочных горных пород вертикальными скважинами осуществляется следующими способами, принципиально отличающимися по своей физической природе [61].

1. **Гидродинамическое бурение**, при котором разрушение горной породы происходит высоконапорной струей жидкости путем разрушения или растворения породы забоя.

Известны две разновидности гидродинамического бурения:

а) струя полностью разрушает забой и формирует ствол скважины. При этом для разрушения пород давление струи должно составлять от 20 до 200 МПа в зависимости от крепости осадочного массива. Способность струи разрушать породу возрастает при эрозионном и гидромоторном бурении, когда в водяную струю вводят абразивный материал (стальную дробь, кварцевый песок) в концентрации от 5 до 15 % по объему;

б) водяная струя частично разрушает и размягчает породу забоя, ствол скважины формируется долотом, имеющим гидромониторные насадки, увеличивающие скорость вылета струи. Эта разновидность получила практическое применение при бескерновом бурении гидромоторными долотами в мягких и рыхлых породах.

Гидродинамическое бурение может получить распространение при скважинной гидродобыче руд благодаря относительно небольшой глубине скважин, наличию высокопроизводительного насосного оборудования и совмещению операций по бурению скважин со спуском добычного оборудования.

Сложной проблемой при гидродинамическом бурении является борьба с влиянием на величину углубления скважины противодавления столба жидкости, находящегося в скважине и увеличивающегося с глубиной, а также подъем разрушенной породы от забоя на поверхность. При скважинной гидродобыче указанные трудности снимаются, так как в состав снаряда включен гидроэлеватор, с помощью которого одновременно с углублением скважины осуществляется подъем пульпы.

Ключевым преимуществом гидродинамического способа бурения без применения долот является возможность одновременной обсадки скважины трубами. К недостаткам гидромеханического способа следует отнести необходимость большого объема жидкости, требуемой для разрушения и транспортирования породы, а также системы ее очистки для повторного применения. Это подразумевает вспомогательные операции по подготовке зумфов-отстойников и установку многоступенчатых фильтров на всасывающей магистрали в насос.

2. **Термомеханическое бурение** предусматривает ослабление прочности массива местным нагревом с последующим их разрушением обычным инструментом вращательного бурения.

Термическое бурение осуществляют либо совмещением обычного механического бурения с нагревом, либо воздействием на породу потоком твердых частиц наряду с тепловым нагревом. Сущность этого способа заключается в том, что нагрев породы вызывает значительное снижение ее прочности, а окончательное разрушение достигается механическим методом. При этом на термические напря-

жения накладываются механические, способствующие более быстрому разрушению породы. Тепловой поток создается с помощью газовой или плазменной горелки. Механическое воздействие осуществляют шарошками или фрикционной коронкой.

Устройство для бурения скважин термическим способом представлено на рисунке 1.25. Оно включает буровой орган в виде бурового става *1*, на конце которого установлены породоразрушающие элементы и огнеструйная горелка *2*, к нему присоединены магистраль *3* для подачи топлива и магистраль *4* для подачи воды, магистраль *5* для подачи воздуха через теплообменник *6* и адсорбер *7* по магистральному патрубку *8* от компрессора *9*, связанного посредством всасывающего патрубка *10* с фильтром *11*, выполненным в виде размещенного на компрессоре *9* корпуса с днищем *12* конической формы и суживающимся соплом *13*, отражателем *14*, конденсатоотводчиком *15*, внутренних камер *16* и *17*, сообщенных соответственно с всасывающим патрубком *10* и суживающимся соплом *13*, установку пылепарогазоподавления. При этом на внутренней поверхности попарно расположенных сопел огнеструйной горелки *2* выполнены криволинейные канавки *18* и *19*, продольно расположенные от входного *20* к выходному *21* отверстиям, причем кривизна образующей канавок *18* одного сопла имеет направление по часовой стрелке, а кривизна образующей канавок *19* другого парного сопла — против часовой стрелки.

Устройство работает следующим образом. Специфика эксплуатации устройств для термомеханического бурения обусловлена наличием в окружающем атмосферном воздухе значительного количества капле- и пароструйной влаги, которая при работе компрессора *9* поступает через суживающееся сопло *13* в корпус с днищем *12* конической формы фильтра *11*. На выходе из суживающегося сопла *12* поток всасываемого воздуха с технологической и атмосферной влагой внезапно расширяется в камере *16* и ударяется об отражатель *14*. В результате часть влаги падает в днище *12* конической формы для последующего удаления через конденсатоотводчик *15*, а движущийся поток огибает отражатель *14* и поступает во внутреннюю камеру *17*, далее по всасывающему патрубку *10* очищенный от каплеструйной

влаги всасываемый воздух поступает в компрессор *9*, откуда после сжатия через бак-теплообменник *6* и адсорбер *7* по нагнетательному патрубку *8* магистрали *5* направляется по буровому ставу *1* к соплам огнеструйной горелки *2*, обеспечивая наряду с поступлением туда же топлива по магистрали *3* процесс термического разрушения горных пород.

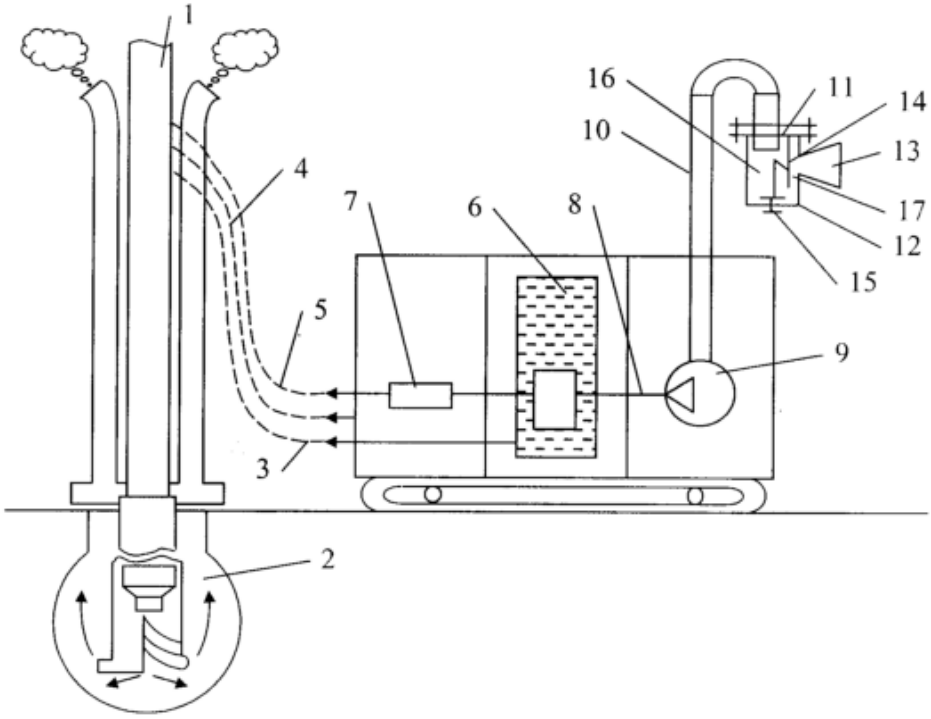


Рисунок 1.25 — Устройство для бурения скважин термическим способом

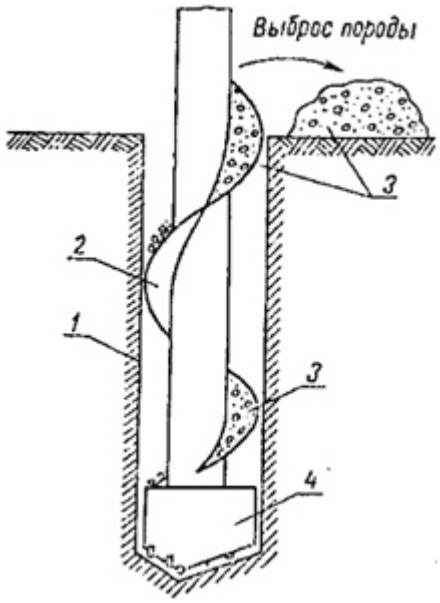
КПД термомеханических установок ниже, чем у альтернативных способов проходки скважин в осадочных горных породах. Наиболее рациональное применения — бурение мерзлых грунтов. Важное достоинство термомеханического способа заключается в том, что в процессе нагрева породы формируется укрепленный (спеченный) слой на стенках скважины как в породах с преобладанием песчаных частиц, так и глинистых [108].

2. **Механическое бурение**, при котором горная порода разрушается в результате механического воздействия породоразрушающего инструмента на породу забоя.

Механические способы бурения подразделяют на вращательные и ударные (а также вращательно-ударные и ударно-вращательные). При вращательном бурении порода разрушается за счет вращения прижатого к забою инструмента. В зави-

симости от прочности породы при вращательном бурении применяют буровой породоразрушающий инструмент режущего типа; алмазный буровой инструмент; дробовые коронки, разрушающие породу при помощи дроби.

Наиболее распространенным видом вращательного бурения является **шнековое** (рисунок 1.26). Это самый простой и рациональный способ проходки скважины глубиной до 80 м в почве низкой степени твердости. Чернозем, глина, торф, песок — все эти рыхлые породы поддаются проходке шнековым способом. Главное, чтобы на пути породоразрушающего инструмента не попались вкрапления камней или крупные обломки горных пород, так как их транспортировка на поверхность будет затруднена.



1 — скважина; *2* — реборды; *3* — разбуренная порода; *4* — долото

Рисунок 1.26 — Принцип реализации шнекового бурения

Оборудование для бурения шнековым способом включает в себя шнековую колонну и породоразрушающий инструмент (как правило, лопастное долото). В зависимости от типа грунта колонна может включать в себя несколько утяжеленных шнеков и комплектоваться колонковым долотом. Шнековый транспортер представляет собой трубу с резьбовыми или безрезьбовыми соединениями на концах. К наружной стенке трубы приварена спиралевидная лента из стали толщиной 4 – 6 мм. Шаг спирали зависит от типа транспортируемой породы и варьируется от 0,5 до 1 диаметра шнека. Проходка скважин шнековым бурением возможна только

в связных устойчивых грунтах, поскольку реализовать одновременную обсадку или упрочнение стенок буровым раствором невозможно.

Шарошечное бурение. При этом способе бурения горная порода на забое разрушается вращающимся долотом, на которое передаются осевая нагрузка и крутящий момент (рисунок 1.27). Разрушенная порода удаляется с забоя потоком жидкости, непрерывно подаваемой по колонне бурильных труб. Крутящий момент на долото передается или с поверхности от вращателя (ротора) через колонну бурильных труб (роторное бурение), или от забойного двигателя (турбобура, электробура, винтового бура), установленного непосредственно над долотом. Осевая нагрузка создается в основном частью веса находящихся над долотом утяжеленных (толстостенных) бурильных труб забойного двигателя. Используются гидравлические, гидроударные и другие способы передачи нагрузки. Крутящий момент в процессе бурения зависит от типа долота и свойств пород (твердые, мягкие, пластичные). Частота вращения долота при роторном бурении составляет 20 – 200 об/мин, при бурении винтовыми двигателями — 150 – 250 об/ мин, турбинном и электробурении без редуцирования — 250 – 800 об/мин, при проходке турбобурами и электробурами с редуктором — 200 – 300 об/мин.

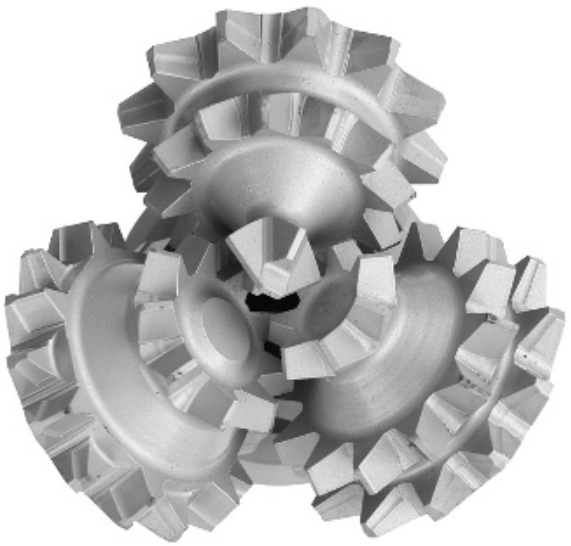


Рисунок 1.27 — Шарошечное долото

Подаваемый для очистки забоя буровой раствор совершает непрерывный кругооборот-циркуляцию: буровой насос — нагнетательная линия — вертлюг —

бурильная колонна — забойный двигатель — долото — забой — кольцевое пространство между бурильной колонной и стенками скважины — устье скважины — желоба и другие устройства очистки бурового раствора от шлама, газа — приемная емкость для очищенного раствора — подпорный насос, всасывающая линия бурового насоса. В качестве бурового раствора используются вода; естественные жидкости, образующиеся из шлама и подаваемой с поверхности воды, с добавлением химических реагентов, пластовых вод; глинистый раствор; вода, смешанная с воздухом (аэрированная); пена; воздух; утяжеленные растворы плотностью до 2400 кг/м^3 и др. [138]. Циркулирующий буровой раствор не только удаляет разбуриваемую породу и частицы осыпающихся пород, но и охлаждает долото, иногда способствует более эффективному разрушению породы. Одновременно буровой раствор создает противодавление на стенки скважины, этим предупреждается обвалообразования, также он может закупоривать и укреплять стенки за счет гидродинамического и физико-химического взаимодействия с массивом. Тем не менее опасность обрушения стенок скважины сохраняется, а реализовать одновременную обсадку при шарошечном бурении невозможно.

Ударное бурение. Ствол скважины создается периодическими ударами долота по забою под действием собственного веса и тяжелой ударной штанги (рисунок 1.28). Приподнимание долота и ударной штанги, прикрепленных к штангам (ударное штанговое бурение) или инструментальному канату (ударное канатное бурение), осуществляется балансиром бурового станка. На рисунке 1.28 изображена схема ударно-канатного бурения. Кривошипно-шатунный механизм *10*, *12* приводит в движение балансирную раму *13*, при опускании которой оттяжной ролик *14* натягивает инструментальный канат *11* и поднимает долото *1* над забоем на 0,05 – 1,5 м. При подъеме балансирной рамы долото падает и разрушает породу. Лезвия долота имеют небольшую площадь контакта с забоем, что обеспечивает их значительное углубление при каждом ударе и разрушение даже очень твердых пород. Поражение всей поверхности забоя и получение цилиндрического ствола достигаются принудительным проворачиваем инструмента после каждого удара с помощью канатного замка *6*. После углубления всей площади забоя удлиняется весь

инструмент на ту же величину. Инструментальный канат *11* сматывается с инструментального барабана. Инструмент (буровой снаряд) канатного бурения, кроме долота *1*, ударной штанги *2* массой 1000 – 2000 кг, каната и канатного замка *6* для их соединения, включает раздвижную штангу *5* (ясс, самопад) и расширитель *3*. При штанговом бурении ясс предохраняет штанги от действия динамических нагрузок, допуская некоторое свободное перемещение штанг вниз после удара долота о забой; самопады допускают свободное падение долота и ударной штанги с высоты, близкой к длине хода головки балансира (балансирной рамы) [138].

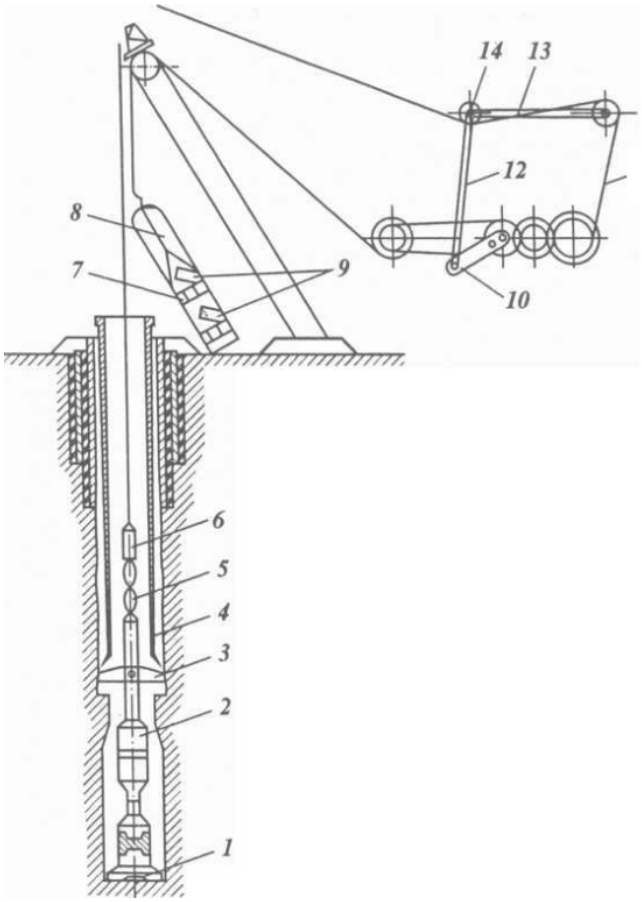


Рисунок 1.28 — Технология ударно-канатного бурения

Для удаления в процессе работы долота на забой подается вода, если она самопроизвольно не поступает из разбуриваемых или ранее вскрытых пластов. Очистка забоя скважины от шлама осуществляется по мере его накопления периодически с помощью устройства, называемого желонкой *8*. Желонка состоит из цилиндра и поршня, оборудованных обратными клапанами *7*, *9*. Она спускается на относительно легком тартальном канате с высокоскоростного барабана (тартального). При достижении желонкой забоя поршень под действием собственного веса

опускается вниз на дно колонки. При подъеме поршня его клапан закрывается, а клапан желонки остается открытым, обеспечивая поступление в желонку перемешанного с водой шлама. Нижний клапан закрывается под действием собственного веса и массы шлама в момент отрыва желонки от забоя. При ударном бурении скважина обычно не заполняется буровым раствором, поэтому для предотвращения обвалов используется (ходовая) обсадная колонна, периодически продвигающаяся к забою по мере углубления скважины.

Обсадная колонна спускается со специального барабана. Ее наращивание осуществляется трубами с резьбовыми соединениями (редко на сварке). С увеличением выхода (расстояния) башмака опускаемой колонны из-под башмака предыдущей (ранее спущенной) затрудняется и наконец становится невозможным ее проталкивание к забою даже с помощью забивных снарядов. Тогда эта колонна остается в скважине в таком положении. Далее вновь опускается следующая (ходовая) обсадная колонна, которая таким же образом продвигается к забою по мере углубления скважины. Поэтому число обсадных колонн при ударном бурении велико.

Отсутствие буровых насосов, очистных устройств, непрерывной промывки скважин облегчает буровую установку, требует сравнительно небольшой мощности привода и расхода электроэнергии или топлива. Энергоемкость бурения невелика, однако скорости проходки понижаются еще больше вследствие периодичности очистки забоя и больших перерывов в работе долота [138].

При **виброударном бурении** проходка ведется следующим образом. Обсадную трубу с закрепленным на ней ударным приводом выставляют на месте будущей скважины и включают молот, который, нанося удары по наковальне трубы, погружает ее в массив. При достижении необходимой глубины молот выключают. Впервые в мире такая установка была спроектирована и изготовлена в СКБ «Газстроймашина» в 1964 г. Во время испытаний в 1967 г. она показала отличные результаты: производительность в 5 раз большую, чем у установок вращательного бурения, и возможность работы в разборной скале [67]. По своему принципу и применяемому оборудованию виброударное бурение очень схоже с технологией гори-

зонтального виброударного продавливания, рассмотренной в пункте 1.1.3. В отличие от описанных ранее буровых установок для этой технологии свойственны следующие важные преимущества [67]:

— высокие скорости проходки, достигающие в грунтах средней и малой крепости до 6 м/мин, а в крепких — 1 м/мин;

— универсальность, т. е. способность разрабатывать массив различной прочности и состава, а также забивать вертикальные и наклонные трубы;

— минимальная энергоемкость процесса проходки ввиду минимального объема разрушаемого материала (при резании грунта — 4,5 кВт◦ч/м^3; при ударном погружении — 0,6 кВт◦ч/м^3);

— простота кинематики.

Реализация ударного погружения стальной трубы в массив также широко используется при сооружении свай, опор мостов и при креплении буровых платформ на шельфе. В [167] есть информация о глубинах проходки таким способом до отметки 103,5 м при диаметре трубы 1219 мм.

Бурение принципиально отличается от строительных технологий необходимостью удаления керна из внутренней полости. Именно с операцией очистки возникают определенные сложности. Для этих целей применима большая часть технических решений, предложенных в п. 1.1.4, но, как и в горизонтальном случае, все они не лишены существенных недостатков.

1.2.2 Укрепление стенок скважины в неустойчивых горных породах

При бурении в неустойчивых горных породах существует опасность обрушения стенок пробуренной скважины и, как следствие, невозможность ее дальнейшей эксплуатации. Кроме того, есть вероятность потери в скважине бурового инструмента без возможности его извлечения на поверхность [89]. В данном случае необходимо производить крепление стенок скважины. Крепление скважин как термин описывает процесс укрепления ее стенок, который может быть реализован и с помощью обсадных труб, и с использованием тампонажных составов. Наиболее часто применяется

технология последовательного спуска и цементирования ряда элементов: направляющей, эксплуатационной и промежуточной колонны, а также кондуктора.

Крепление скважины проводят с различными целями: закрепление стенок скважины в интервалах неустойчивых пород; изоляция зон катастрофического поглощения промывочной жидкости и зон возможных перетоков пластовой жидкости по стволу; разделение интервалов, где геологические условия требуют применения промывочной жидкости с различной плотностью; разобщение продуктивных горизонтов и изоляция их от водоносных пластов; образование надежного канала в скважине для извлечения нефти/газа или подачи закачиваемой в пласт жидкости; создание надежного основания для установки устьевого оборудования.

Процедура крепления скважин требует проведения ряда профилактических работ, в числе которых измерение размера скважины и ее объема, а также исследование поперечного сечения для определения количества и свойств раствора. Все эти данные необходимы для правильного расчета требуемого количества цементирующего состава. Кроме того, перед началом работ по креплению скважин производят замеры пластового давления, давления гидроразрыва пласта и гидростатического давления в скважине. На основе этой информации определяется количество зон крепления [166].

Обсадная колонна из соединенных между собой обсадных труб (при помощи сварки или муфтовых соединений), как правило, спускается в скважину за один прием. После спуска обсадных колонн начинается процесс цементирования скважины, для чего в трубы закачивается тампонажный состав, вытесняемый затем в заколонное пространство. Реализация данного процесса позволяет обеспечить герметичность колонны, а также исключает возможность сообщения пластов между собой и с поверхностью [160].

Цементный состав рассчитывается исходя из многих показателей, в числе которых тип грунта, контактирующего после закачки с буровым раствором. Так, например, в глинистых или солевых породах нецелесообразно применять цементные составы на основе пресной воды, поскольку, взаимодействуя с окружающей

средой, такой раствор будет образовывать негерметичный рыхлый слой в зоне контакта. В указанных условиях гораздо эффективнее использовать цементные составы на основе солевых растворов.

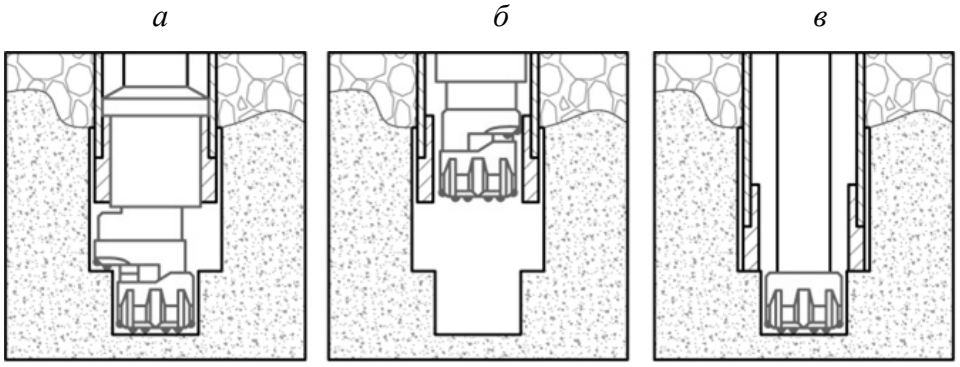
Помимо цементации, применяется электрохимический способ крепления стенок скважин. Сущность этого способа заключается в создании цементной трубы в пробуренной скважине при воздействии постоянного электрического тока и химических реагентов на цементную или цементно-глинистую пасту с наполнителем, песком и т. д., залитую в скважину. Электрохимический способ крепления, помимо экономии металла и ускорения проходки скважин, позволяет использовать для исследования все виды скважинной геофизики, что важно при разведке твердых полезных ископаемых.

1.2.3 Бурение с одновременной обсадкой

Системы бурения с одновременной обсадкой предназначены для сооружения скважин в сложных горно-геологических условиях (валунно-галечные отложения, наличие водопритока в скважину и др.). Системы для пневмоударного бурения с одновременной обсадкой применяются, когда по геологическим свойствам горной породы рационально производить бурение с использованием пневмоударника, но при этом существует необходимость одновременной обсадки скважины. Такие системы показывают хорошие результаты при фундаментных работах, они обеспечивают высокую производительность, даже если массив содержит валуны, бетонные блоки и техногенные включения [153].

Принцип работы оборудования заключается в том, что бурение осуществляется погружными пневмоударниками со специальным породоразрушающим инструментом, который за счет оригинальной конструкции обеспечивает больший диаметр бурения по отношению к размеру обсадной трубы. В процессе бурения обсадная труба погружается в скважину под действием собственного веса (рисунок 1.29*а*). Вибрация ударно-вращательного механизма способствует погружению трубы, поскольку снижается сила трения на поверхности контакта горной породы

и обсадной трубы. После завершения бурения породоразрушающий инструмент изменяет свои габаритные размеры до внутреннего диаметра обсадной трубы и может быть беспрепятственно извлечен из скважины (рисунок 1.29*б*). При необходимости дальнейшую проходку можно осуществлять инструментом для бурения сплошным забоем (рисунок 1.29*в*) [154].



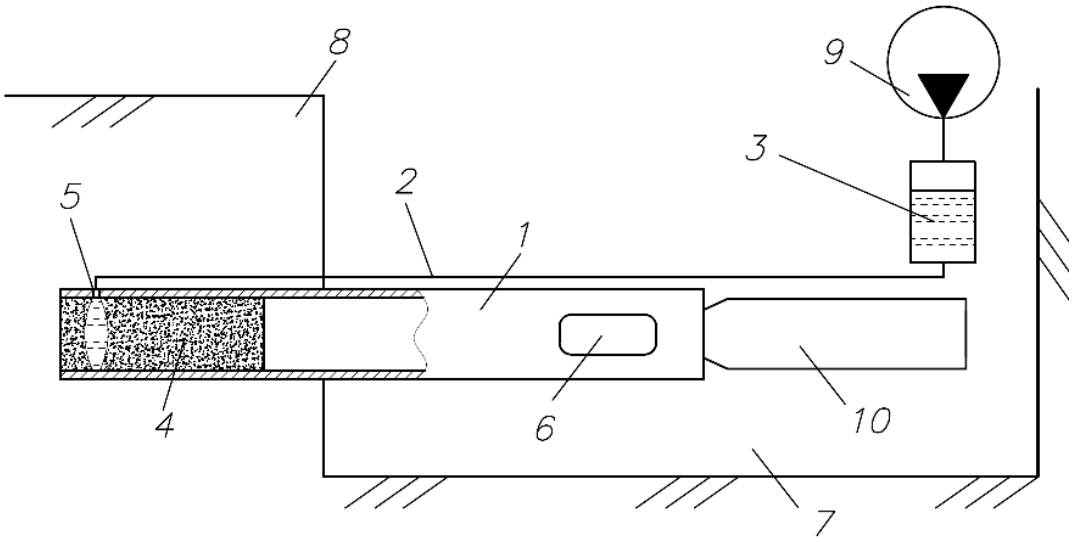
а — бурение с обсадкой; *б* — извлечение долота; *в* — бурение без обсадки

Рисунок 1.29 — Принцип работы раздвижного долота

В качестве недостатков способа бурения с одновременной обсадкой можно отметить сложность конструкции раздвижного долота. В аварийной ситуации, когда происходит подклинивание бурового долота, одним из способов предотвращения полного заклинивания является попеременное вращение става по часовой стрелки и против. Однако в случае с раздвижным долотом такой вариант неприемлем, поскольку приведет к потере контакта обсадной трубы и бурового долота, нижний торец обсадной трубы «сядет» на забой, и возобновить бурение тем же диаметром будет невозможно. Кроме того, в технологический процесс проходки скважины, как и в комплект оборудования для бурения, необходимо вносить корректировку в части синхронизации наращивания буровой колонны и секций обсадной трубы. Ввиду того что обсадная труба опирается на раздвижные сегменты бурового долота и тем самым создает на него повышенную нагрузку, переход на меньший диаметр будет происходить не только на основе горно-геологических условий, но и при достижении критического значения веса обсадкой трубы. Возможно также заклинивание обсадной трубы в процессе проходки из-за разрушений или деформаций стенок буримой скважины [177].

1.3 Выбор и обоснование технологии проходки горизонтальных и вертикальных выработок в осадочных горных породах

Наиболее логичным и привлекательным с точки зрения обсадки и производительности проходки как при горизонтальном, так вертикальном направлении представляется технология с порционным удалением породного керна из трубы по мере его формирования без применения дополнительных механических средств. Схема реализации такой технологии при забивке трубы пневмомолотом изображена на рисунке 1.30 [109].



1 — погружаемая труба; *2* — трубопровод; *3* — емкость для формирования выталкивающей среды; *4* — керн; *5* — отверстие для подачи выталкивающей среды; *6* — разгрузочное окно; *7* — рабочий котлован; *8* — породный массив; *9* — источник сжатого воздуха; *10* — пневмомолот

Рисунок 1.30 — Ударное погружение с порционным удалением керна

Сущность предложенного решения заключается в подведении к забойному торцу трубы *1* по отдельному трубопроводу *2* текучей среды *3*. После формирования очередной порции породного керна *4* текучая среда через отверстие *5* под давлением подается во внутреннюю полость трубы. Она отсекает часть керна (порцию) и перемещает ее в заднюю часть трубы *1*, откуда через разгрузочное окно *6* порода выдавливается в рабочий котлован *7*. После этого погружение трубы возобновляется до образования новой породной порции. Циклы погружения и очистки

продолжаются до выхода трубы в приемный котлован. Возможно удаление и без полного прерывания работы пневмомолота, обеспечивая подстукивание на пониженном давлении.

Процесс порционного удаления керна можно разделить на три основных этапа: формирование керна, отделение от его головной части удаляемой порции и транспортирование отделенной порции по трубе на выход. На этапе формирования важно обеспечить, чтобы в зоне отрыва грунтовая порция была достаточно плотной и заполняла все поперечное сечение трубы. Это необходимое условие для создания и поддержания давления текучей среды в зоне отрыва, способного стронуть и продвинуть на выход отрываемую порцию породы. Ясно, что при переуплотнении керна, т. е. при образовании пробки, отрыв может не состояться, а при малосвязном грунте, напротив, может получиться свищ, что приведет к падению давления текучей среды, в результате чего отрыв и удаления порции будут невозможны. Формирование условий для успешного отрыва и благополучной транспортировки отделенной части керна требует как привлечения информации по результатам исследований, выполненных ранее при решении смежных задач, так и проведения специальных дополнительных исследований [77].

В частности, вопросы формирования керна рассмотрены в [97]. По их экспериментальным данным пробка формируется при внедрении трубы в массив на величину (6 – 10) *D*. При этом чем больше глинистых частиц в массиве, тем меньшая длина погружения необходима для формирования пробки.

Из условия равновесия напряженного элементарного слоя керна в полости трубы (1.1) длина пробки L_p определяется по следующей зависимости [97]:

$$L_p = \frac{D}{4f\varepsilon}\ln\left[1+\frac{4f\varepsilon\sigma}{4c+\rho D}\right], \qquad (1.1)$$

где D — диаметр погружаемой трубы; f — коэффициент внутреннего трения грунта; ε — коэффициент бокового распора; c — сцепление грунта; ρ — плотность грунта; σ — напряжение (давление) в массиве.

Разрушение грунта потоком жидкости или газа используется на практике при инъектировании грунтовых оснований различными химическими составами [131],

создании противофильтрационных экранов в грунтах способами гидро- и пневморазрыва, а также в газоимпульсных рыхлителях [146]. Давление, необходимое для отрыва, определяется по зависимости (1.2) [27]:

$$p = \rho g h + \frac{\upsilon}{1-\upsilon}(\sigma - \rho g h) + \sigma_{\max}, \qquad (1.2)$$

где h — расстояние от поверхности земли до оси погружаемой трубы; υ — коэффициент Пуассона; σ_{max} — предел прочности грунтов на растяжение.

Во всех указанных областях давление текучей среды, используемой для разрыва естественного грунта, не превышает 0,6 МПа.

Процесс транспортирования отделенной порции керна похож на процесс доставки пневмопочты. Подобные процессы реализованы в бурении с отбором керна [56], транспортировки сельскохозяйственных и строительных материалов [79]. При определении требуемого давления и расхода сжатого воздуха необходимо принимать во внимание утечки в зоне контакта керна с внутренней поверхностью трубы, потери, связанные с фильтрацией воздуха через керн, а также ограниченное сечение воздухоподводящего трубопровода. Достаточное условие транспортирования порции описывает соотношение (1.3):

$$p = \frac{1}{K} \cdot \frac{\gamma D}{4\varepsilon f}(\exp\frac{4\pi f}{D} l - 1) + p_0, \qquad (1.3)$$

где K — пористость грунта; γ — объемный вес порции; l — ее длина; p_0 — атмосферное давление.

На этой стадии порционного удаления важно сохранить целостность отделенной части керна, что зависит от равномерности движения порции, плотности грунта и его влажности, а также неровностей, шероховатостей внутренней поверхности трубы и изменений ее поперечного сечения.

В случае виброударного погружения трубы-кожуха дополнительными факторами, влияющими на отрыв и транспортирование порции керна, могут быть колебания трубы с присоединенной частью массива и упругая деформация стенок при прохождении ударного импульса. Известны случаи снижения как внутреннего, так и внешнего трения между трубой и породой под действием знакопеременной

нагрузки [100, 158]. Однако этот процесс недостаточно изучен, а его положительное влияние на порционное удаление требует дополнительных лабораторных исследований на физических моделях. Кроме того, вибрация может негативно сказаться на целостности транспортируемой части.

Таким образом, предложенный способ ударного погружения трубы с порционным удалением поступающей во внутреннюю полость породы представляется возможным, но требует как практической апробации, так и многофакторных лабораторных экспериментов с построением математических моделей протекающих процессов.

Возможность порционного удаления керна сжатым воздухом или воздушно-жидкостной смесью экспериментально подтверждена в условиях, максимально приближенных к реальности [71]. Натурное апробирование технологии проводилось на полигоне лабораторного комплекса ИГД СО РАН «Зеленая горка». Необходимо было пройти скважину диаметром 110 мм, длиной 5 м на глубине от дневной поверхности 1,5 м и уклоном от 2 до 5°. Погружение секций трубы осуществлялось статической силой, создаваемой с помощью гидроцилиндра. Фиксировалось нарастание длины керна по мере продвижения трубы в массив. Давление для отрыва и транспортирования не превышало 0,6 МПа. Очистка осуществлялась после прекращения роста керна путем подачи сжатого воздуха или воздушно-жидкостной смеси по отдельному трубопроводу. После удаления первой порции процесс погружения возобновлялся до момента образования новой порции, которая впоследствии также удалялась. Так продолжалось до полного погружения трубы в породный массив.

Аналогично проведена проверка работоспособности технологии проходки с порционным удалением керна в вертикальном направлении. Труба наружным диаметром 168 мм погружалась в массив под действием ударных импульсов с энергией удара 500 Дж и частотой 4,2 Гц. Очистка проводилась каждые 0,5 м без остановки процесса погружения, при этом высота грунтового столба внутри трубы не превышала 1 м. В результате труба была погружена на глубину 17 м.

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность и эффективность предложенного способа проходки скважин как в вертикальном, так в горизонтальном направлении при помощи статического или динамического воздействия на трубу. Практические результаты позволили рассчитывать на создание в конечном счете эффективного способа проходки выработок с циклично-поточным удалением породы из внутренней полости трубы при сооружения протяженных горизонтальных бестраншейных переходов высокой точности, а также для проходки с одновременной обсадкой породного слоя при бурении вертикальных скважин различного назначения [70, 176].

Достоинство порционного удаление породной массы при горизонтальной проходке заключается прежде всего в экономии времени на переоснащение рабочего котлована. Снимается необходимость демонтажа ударного модуля с последующей установкой очистного оборудования. Сама процедура очистки известными способами (желонки, шнеки и т. д.) по продолжительности в 2 – 3 раза больше времени, необходимого для погружения [31].

При вертикальном ударном погружении труб в массив осадочных пород при монтаже трубчатых свай для фундаментов определяющую роль играет необходимость забивки на заданную (проектную) глубину. В случае отказа (отсутствия перемещений трубы вглубь массива) на отметке выше проектной производят трудоемкую операцию по удалению керна из внутренней полости. По сути, преждевременный отказ является результатом недостаточной энергии ударного привода, чтобы преодолеть сопротивление на перемещение трубы. Это, как и в случае горизонтального погружения, сопряжено со значительными потерями времени на вспомогательные операции. Избежать подобных проблем возможно за счет реализации циклично-поточного удаления керна из внутренней полости, которое, помимо преждевременного отказа, позволит снизить затраты энергии на погружение трубы без керна во внутренней полости как минимум на 30 % меньше, чем с переуплотненной пробкой [165], а соответствующее увеличение производительности сэкономит время и затраты на топливо для компрессора, гидронасоса или дизель-молота.

На примере погружения металлических труб для крепления буровой платформы можно понять порядок финансовых затрат на эти операции, которые составляют около 200 тыс. долл. [191]. Столь высокая стоимость обусловлена простоем всего судна, с которого ведется забивка.

1.4 Выводы по Главе 1

1. Максимальные скорость и глубина погружения обсадной трубы при заданных энергетических показателях ударного привода достигается за счет порционного удаления разрушенной породы из трубы по мере ее формирования, при этом реализуется абсолютная гарантия устойчивости стенок скважины.

2. Только метод погружения трубы-кожуха с открытым передним торцом в массив применим для сооружения подземных переходов с малым заглублением под автомобильными дорогами и железнодорожными магистралями, поскольку в этом случае исключены выпучивание и просадка дорожного полотна. Успех развития этой технологии во многом зависит не только от того, насколько прост и производителен процесс погружения обсадной трубы (стального кожуха) в массив, но и от совершенства процесса удаления керна из обсадной трубы.

3. Разработка надежного и безопасного способа очистки от керна трубной плети любого диаметра — актуальная задача. Она направлена на решение проблемы высокопроизводительной, точной и эффективной прокладки подземных коммуникаций и бурения вертикальных скважин в осадочных породах при минимальных капитальных затратах на оборудование и гарантированной устойчивости стенок скважины.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОХОДКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН С ЦИКЛИЧНО-ПОТОЧНЫМ УДАЛЕНИЕМ КЕРНА НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ И В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Как уже отмечалось в разделе 1.3, при проходке скважин с циклично-поточным удалением породы определяющее значение имеют несколько процессов. В первую очередь необходимо качественно сформировать порцию поступившей в трубу породы для ее последующего отделения от массива и удаления из трубы. При этом влияние на систему «погружаемая обсадная труба – породный массив» могут оказывать не только физико-механические свойства породы, но и параметры трубы, а также интенсивность силового воздействия на трубу, обеспечивающего процесс внедрения. На данной стадии исследования задача физического моделирования процесса формирования керна сводится к определению взаимосвязи между величиной погружения трубы в массив и длины керна, поскольку такое отношение может характеризовать степень уплотненности керна внутри трубы, что способствует разработке рекомендаций по минимальной и максимальной величине шага очистки. Следует учитывать и тот факт, что чем больше объем керна внутри трубы, тем выше энергоемкость процесса погружения, поскольку с увеличением длины керна возрастает и сила трения его о стенки трубы, препятствующая продвижению трубы в массив.

Когда керн уже сформирован, необходимо произвести отделение его части (порции). Эффективность этой операции по большей мере зависит от давления и физико-химического состава выталкивающей среды. Вместе с тем успешно отделить порцию породы возможно только при наличии представления о свойствах керна, сформированного внутри трубы.

Завершающая операция при порционном удалении — вынос отделенной части керна из внутренней полости трубы. На этой стадии решающее значение имеет полнота извлечения породы из трубы, которая, в свою очередь, зависит от целостности сформированной порции, качества внутренней поверхности трубы, соотношения диаметра трубы и длины порции, вида и интенсивности силового воздей-

ствия на трубу и т. д. Общее представление о взаимосвязях между различными параметрами и предварительную оценку степени их влияния на процесс могут дать пилотные экспериментальные исследования.

Задачи экспериментов:

1) оценить влияние на процесс формирование керна энергетических параметров системы, диаметра погружаемой трубы и свойств породного массива;

2) определить эффективность порционного удаления керна при ударном и статическом погружении трубы;

3) в лабораторных условиях определить влияние типа и интенсивности силового воздействия на систему «труба – керн» при отрыве порции и ее транспортировании;

4) на полноразмерной модели в производственных условиях оценить степень влияния порционного удаления породного керна на скорость погружения обсадной трубы в массив.

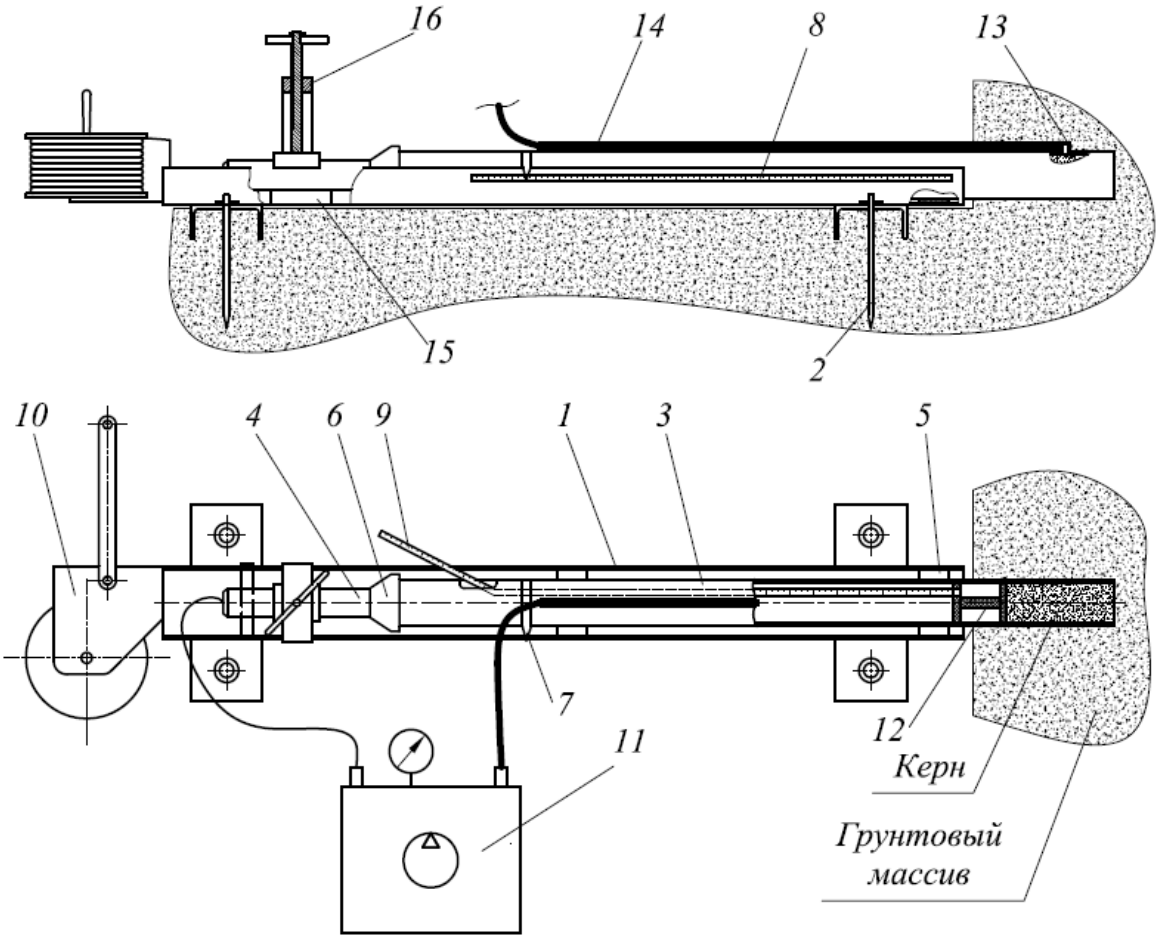
2.1 Исследования процессов формирования и удаления керна на физических моделях в естественном породном массиве

2.1.1 Экспериментальная установка

Схема установки для динамического погружения труб в породный массив показана на рисунке 2.1. Стенд предназначен для использования в полевых условиях. Он состоит из основания (ложемента) *1* выполненного из швеллера, зафиксированного при помощи анкеров *2* на дне котлована. Внутри основания располагается погружаемая труба *3* и пневматическая машина (пневмомолот), выступающая в качестве ударного привода. В экспериментах использовались трубы разных диаметров и пневмомолоты с различными значениями энергетических параметров.

Внутри ложемента труба опирается на сменные опоры *5*. Ударное воздействие от пневмомолота к трубе передается через адаптер *6*, обеспечивающий самозаклинивающееся конусное сопряжение пневмомолота с адаптером и адаптера с

трубой. При передаче удара от пневмомолота на трубу теряется определенная часть энергии, но так как углы конусного сопряжения во всех случаях выполнены одинаковыми и массы адаптеров разнятся минимально, то можно считать, что при работе с различными трубами и пневмомолотами доля потери энергии в процентном соотношении от энергии удара остается постоянной [133].



1 — основание; *2* — грунтовый анкер; *3* — труба; *4* — ударный привод; *5* — опоры; *6* — конусный адаптер; *7* — реперная точка; *8* — шкала; *9* — измерительная линейка; *10* — лебедка; *11* — пневматическая система; *12* — измерительный поршень; *13* — угловой ввод; *14* — магистраль для очистки; *15* — опора пневмомолота; *16* — прижим

Рисунок 2.1 — Экспериментальная установка для динамического погружения трубы

Данная конструкция стенда позволяет проводить испытания с номенклатурой труб диаметром от 32 до 76 мм. Для настройки системы на забивку трубы определенного диаметра необходимо установить соответствующую опору *5* и адаптер

ударного привода *6*. Положение трубы относительно массива при забивке контролируется по шкале *8*. Скорость забивки определяется по времени прохождения реперной точки *7*, закрепленной на трубе *3*, по шкале *8*. Длина керна контролируется гибкой измерительной линейкой *9*, свободный конец которой выведен из внутренней полости трубы наружу через специальное окно, а другой — закреплен на измерительном поршне *12*. Подача сжатого воздуха для отрыва и транспортирования порции керна осуществлялась по магистрали для очистки *14*, соединенной с внутренней полостью трубы *3* угловым вводом *13*.

Фрикционный прижим *16* устанавливался на бесступенчатую часть пневмомолота длиной 150 мм, которая располагалась на опоре пневмомолота *15*. Усилие прижатия подбиралось таким образом, чтобы труба *3* с пневмомолотом *4* еще до контакта забойного торца с грунтовым массивом начала поступательное движение без отдачи на участке 50 мм (толщина доски на рисунке 2.2). Затем начиналось внедрение трубы в массив, а после погружения на 100 мм прижатие убирали, откручивая винт прижима *16*. Компенсация силы отдачи пневмомолота и упругой реакции грунта необходима только на начальной фазе погружения трубы в массив, поскольку при дальнейшем внедрении эту функцию берет на себя сила трения «массив – труба». На промышленных объектах сила отдачи на старте не компенсируется, потому что труба с пневмомолотом размещена непосредственно на грунтовом основании рабочего котлована и силы трения достаточно для начала внедрения.

Для извлечения трубы на противоположном забою торце основания закреплена ручная механическая лебедка *10* марки LRT2000 с максимальным усилием 9 кН (рисунок 2.1).

Питание ударного привода осуществляется от пневматической системы *11*. Для согласования характеристик источника сжатого воздуха и пневмоударной машины в системе установлены редуктор давления и ресивер. Такая пневматическая схема позволяет проводить экспериментальные исследования при различных давлениях питания пневмомолота от 0,3 до 0,7 МПа, что дает возможность в широком диапазоне варьировать энергетические характеристики ударного привода.

Фото экспериментальной установки представлено на рисунке 2.2.

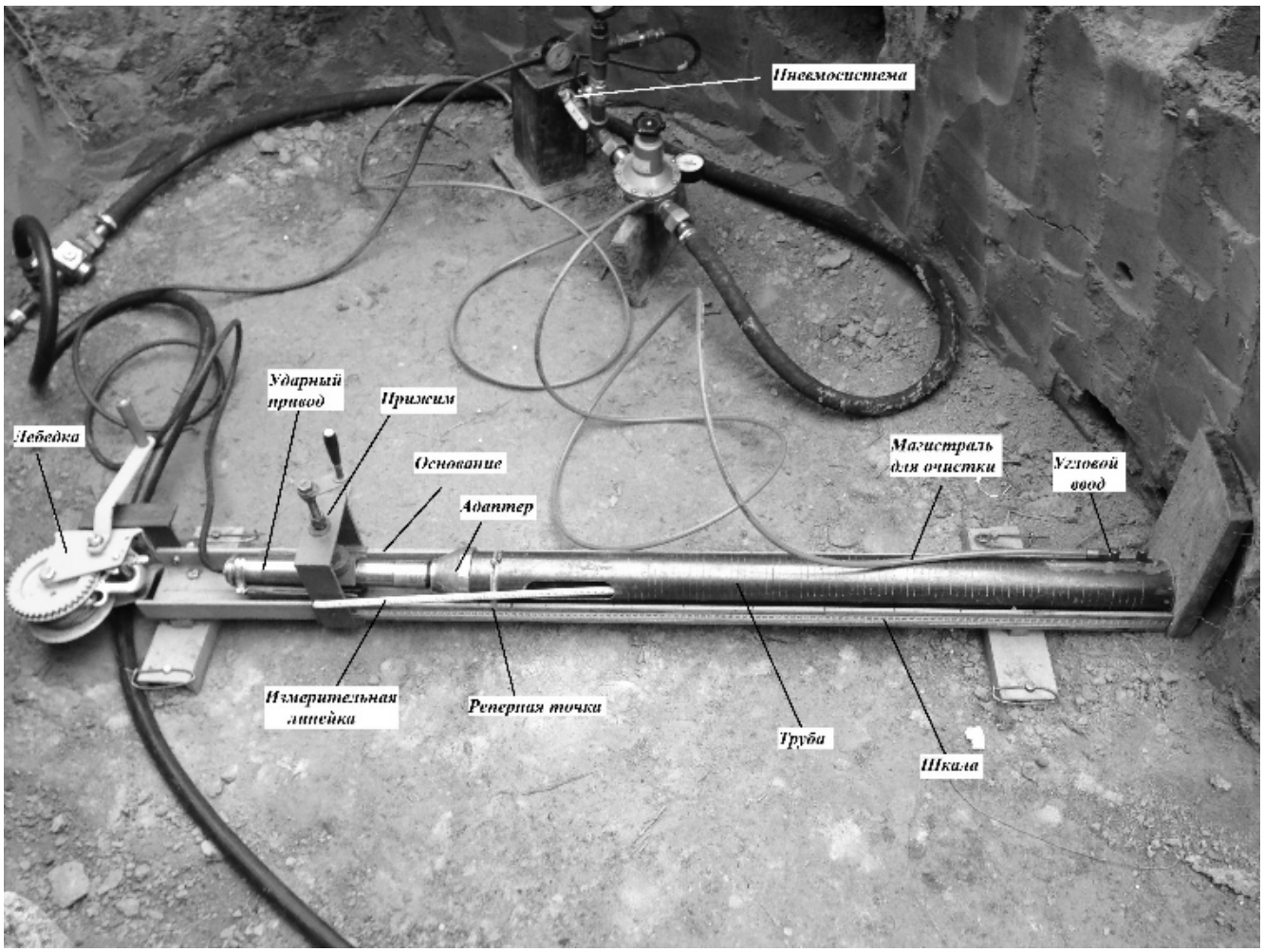
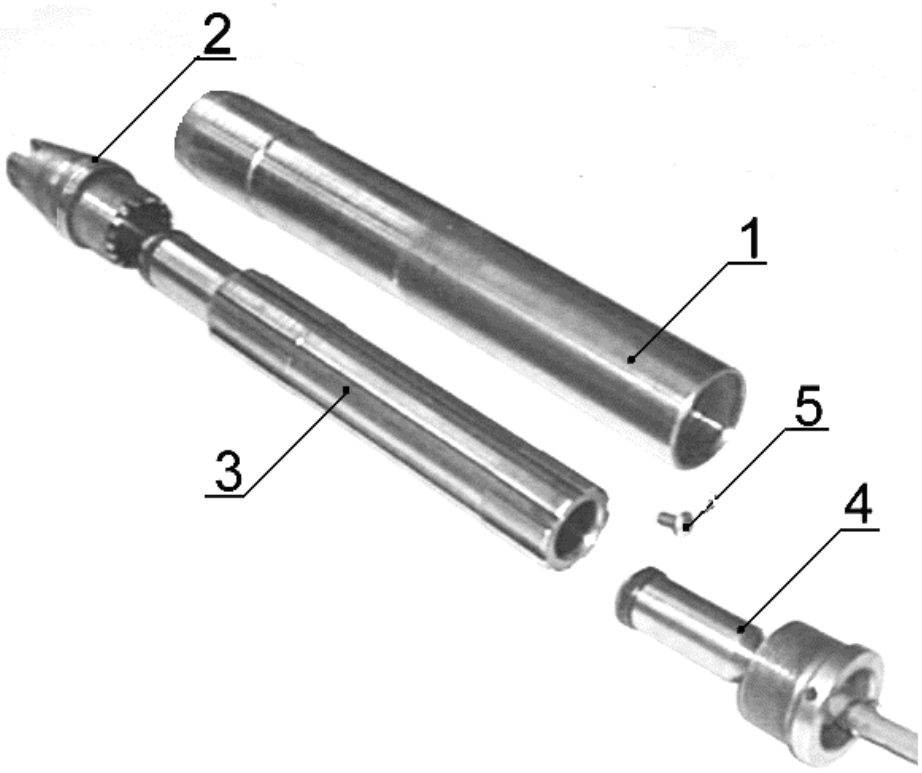


Рисунок 2.2 — Экспериментальная установка для динамического погружения

Ударный привод и пневмосистема

Генератором ударных импульсов в экспериментальной установке является пневмомолот (рисунок 2.3). Для исследования влияния структуры энергии удара созданы две модели пневмомолотов с разными массами ударника 0,5 и 1 кг, но очень близкими значениями энергии удара благодаря различным предударным скоростям. Необходимую разницу в предударных скоростях удалось получить за счет варьирования давления сжатого воздуха.



1 — корпус; *2* — наковальня; *3* — ударник; *4* — задняя гайка с патрубком; *5* — жиклер

Рисунок 2.3 — Конструкция пневмомолота

Технические характеристики экспериментальных пневмомолотов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Технические характеристики пневмомолотов

Наименование параметра	**Значение параметра**	
	Машина № 1	Машина № 2
Энергия удара, Дж	9,3	9,5
Частота ударов, мин $^{-1}$	13,5	7,6
Расход воздуха, м^3/мин	0,25	0,21
Рабочее давление воздуха, МПа	0,6	0,6
Масса ударника, кг	0,5	1,0
Масса машины, кг	1,3	2,2
Габариты машины (длина/диаметр), мм	240/48	355/48
Наибольший диаметр забиваемых труб, мм	76	76

Питание ударного привода осуществлялось от пневматической системы, принцип работы которой проиллюстрирован на рисунке 2.4.

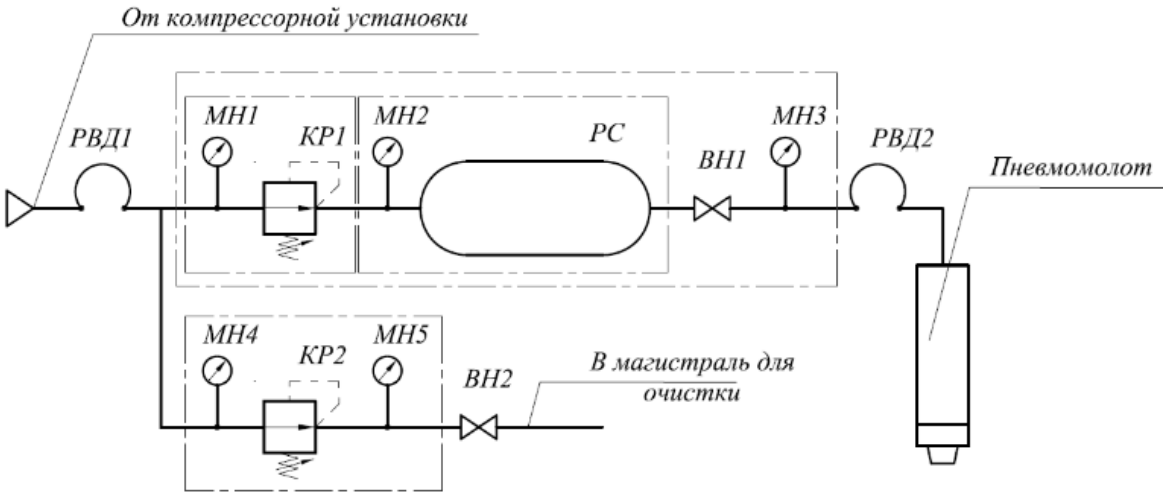


Рисунок 2.4 — Пневматическая схема экспериментальной установки

Источником сжатого воздуха может выступать любая компрессорная установка с требуемой производительность. Для соответствия параметров источника сжатого воздуха с пневмоударной машины и очистной магистралью в системе установлены редукционные клапаны *КР1* и *КР2*. Ресивер *РС* выступает промежуточным накопителем и охладителем энергоносителя. Контроль давления на каждом участке пневмосистемы осуществляется манометрами. Манометры *МН1* и *МН4* установлены на входе в систему и регистрируют давление воздуха, подаваемого в пневмосеть компрессорной установкой. Манометры *МН2* и *МН5* показывают давление настройки редукционного клапана и, как следствие, давление в ресивере и магистрали для очистки. Манометр *МН3* фиксирует текущее давление в линии питания пневмомолота. Именно его показания являются косвенным индикатором энергетических характеристик ударного привода в текущий момент испытаний. Связь между показаниями манометра сетевого давления *МН3* и значениями энергии и частоты ударов пневмомолота устанавливается при исследовании рабочего процесса ударного узла по диаграммам изменения давлений в его рабочих камерах.

Запуск и остановка пневмомолота осуществляются краном (вентилем) *ВН1*, а подача сжатого воздуха для очистки — краном *ВН2*.

Вся пневматическая система выполнена блоками. Основой (механической опорой) выступает ресивер. Подключение к компрессорной установке и пневмомолоту происходит посредством рукавов высокого давления (шлангов) *РВД1* и *РВД2* соответственно.

Для статического погружения труб в грунт использовалась та же установка, что и для динамического, только в качестве источника силового воздействия применялся гидроцилиндр двустороннего действия с полым штоком ДП30Г250. Отличительной особенностью также явилась необходимость организации подпорной стенки. В статическом исполнении процесс носит циклический характер с шагом погружения, равным ходу штока гидроцилиндра 250 мм. При каждом дальнейшем шаге погружения устанавливается соответствующий удлинитель штока (проставка), длина которого на 250 мм больше предыдущего.

2.1.2 Проведение экспериментов

Скорость внедрения трубы — одна из важнейших характеристик технологии погружения. От ее величины напрямую зависит производительность и продолжительность работ. На скорость погружения трубы влияет множество факторов, основными из которых являются диаметр трубы и толщина ее стенки, энергетические характеристики погружающего привода, физико-механические свойства породы, длина керна внутри трубы и т. д.

Описанный стенд позволяет определить зависимость скорости погружения трубы от каждого из вышеперечисленных факторов в отдельности и от их совокупного влияния. Скорость оценивалась по результатам фиксации длительности прохождения каждого из равных контрольных участков, на которые метками разделен мерный отрезок забиваемой трубы. Весь процесс записывался на видео, и замеры осуществлялись при его воспроизведении в замедленном режиме. Это существенно повысило точность и облегчило обработку данных.

Очевидно, что точность определения скорости внедрения возрастает с увеличением числа контрольных участков. Однако использование слишком коротких участков затрудняет отсчет временных промежутков и повышает погрешность измерения времени. В данной экспериментальной установке было принято делить каждую трубу на 20 равных контрольных участков, что позволяет получать 20 зна-

чений «мгновенной» скорости в процессе погружения трубы. Этих данных достаточно, чтобы выявить основные тенденции изменения скорости в зависимости от различных действующих факторов.

Наличие керна во внутренней полости погружаемой трубы — важный фактор, влияющий на скорость ее внедрения. С увеличением длины керна возрастают лобовое сопротивление и боковое сопротивление трения по внутренней стенке трубы. Прекращение роста длины керна свидетельствует об изменении режима проходки и переходе от режима «с открытым торцом» к режиму «с закрытым торцом». Это неизбежно приводит к снижению скорости погружения трубы вплоть до ее полной остановки. Достижение керном определенной длины может служить сигналом к началу очистки трубы с целью уменьшения сопротивления ее внедрению трубы в массив.

Важно оценить, в какой зависимости находятся глубина погружения трубы и длина набранного керна, а также установить, при какой длине требуется проводить очистку.

В экспериментах использована простейшая система измерения длины керна, показанная на рисунках 2.1, 2.2. Измерения производятся гибкой линейкой, вводимой во внутреннюю полость экспериментальной трубы через специальное окно. На переднем конце линейки закреплен легкий плоский упор, который своим торцом упирается непосредственно в керн. Постоянное умеренное поджатие линейки к керну осуществляется вручную. Более подробное описание проведения основных операций и оценка погрешности измерений содержатся в *Приложении 1.*

2.1.3 Результаты экспериментов

Для организаций, выполняющих работы по погружению в массив профильного металлопроката для возведения фундаментов зданий и сооружений, защитных шпунтовых стенок, кожухов для прокладки коммуникаций под землей и т. д., необходимо правильно подобрать ударный привод требуемой мощности. В качестве исходных данных для них служат размеры погружаемого элемента (для трубы это

длина, диаметр и толщина стенки) и свойства породного массива, в который такой элемент погружается. При этом максимальная глубина погружения напрямую зависит от энергии ударов и мощности ударного привода. По назначению погружение осуществляется вертикально вниз, горизонтально или наклонно. При вертикальном погружении трубы на этот процесс оказывают влияние прохождение слоев с различными физико-механическими свойствам и рост внутреннего давления в породе по мере увеличения глубины погружения. На данном этапе исследований при проведении натурных экспериментов труба погружалась горизонтально, что позволило исключить влияние на полученные результаты свойств перемежающихся пород и выполнить большее количество экспериментов благодаря более быстрым процессам погружения, извлечения и очистки трубы.

Влияние энергии удара и ее структуры на скорость погружения трубы

Известно, что чем выше энергия ударного воздействия, тем на большую глубину мы можем погрузить забиваемый элемент в грунтовый массив. Однако прочность и продольная жесткость погружаемого элемента, а также сварные соединения накладывают свои ограничения на максимальную энергию удара, воздействующую на погружаемый элемент. При проектировании машин ударного действия желательно получить большую ударную мощность при минимизации массово-габаритных параметров. Структурно ударная мощность является произведением энергии удара и частоты ударного воздействия. При этом повышать ударную мощность машин только за счет частоты ударов при реализации технологии погружения труб в породный массив неверно. Необходимое условие продвижения трубы в породе — наличие на ее забойном конце силы, достаточной для внедрения в массив. По мере увеличения глубины погружения трубы ударная волна, распространяясь по трубе, затухает с нарастающей интенсивностью из-за повышения сил трения как по наружной поверхности трубы, так и внутри нее вследствие увеличения длины керна. Очевидно, что без достаточной энергии удара на большой глубине волна затухнет и погружения не будет. Рассмотрим некоторые особенности на упрощенном примере.

На рисунке 2.5 показаны два абстрактных ударных импульса, пришедшие к забойному торцу трубы. Их энергия одинакова. Это подтверждается расчетной формулой (2.1) энергии волны напряжений

$$A = \frac{c}{E \cdot S} \cdot \int_0^T F_i^2(t)dt \,, \tag{2.1}$$

где c — скорость звука в металле, м/с; E — модуль упругости металла, Н/м^2; S — площадь поперечного сечения волновода, м^2; T — длительность ударного импульса, с.

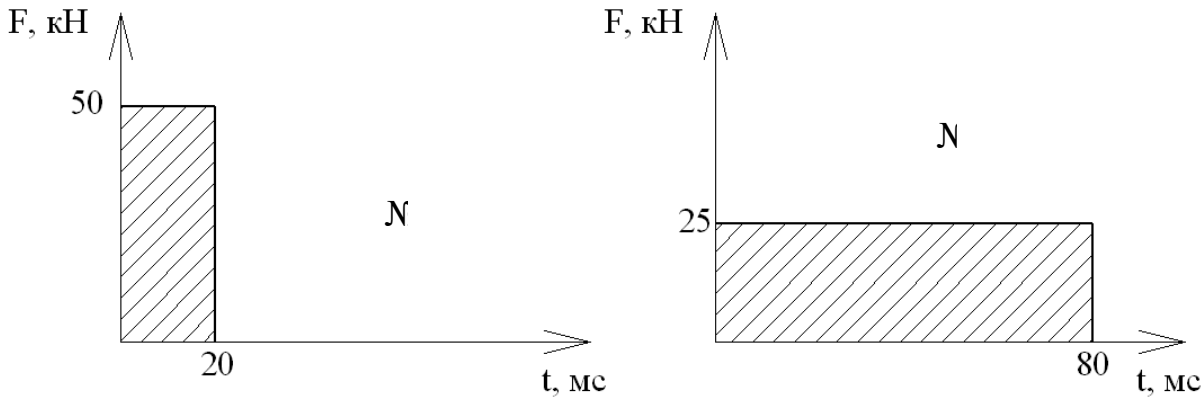


Рисунок 2.5 — Два разных ударных импульсов с одинаковой энергией

При одной и той же энергии, принесенной этими импульсами к забойному торцу трубы, возможности выполнить полезную работу внедрения в массив у них разные. Если сопротивление породы выше 25 кН, то под действием ударного импульса № 2 продвижение трубы не состоится. Между тем в такой ситуации ударный импульс № 1 с большой амплитудой силы преодолеет сопротивление и позволит продолжить забивку трубы.

Амплитуда силы в ударном импульсе пропорциональна скорости ударного воздействия машины на трубу. Большинство машин ударного действия проектируются на скорость удара в диапазоне от 5 до 8 м/с. Дальнейшее увеличение скорости удара приводит к разрушению соударяющихся деталей машины вследствие превышения в них допускаемых напряжений.

В отличие от копрового стенда, позволяющего достаточно просто изменять структуру энергии удара в широком диапазоне, в данном случае при забивке труб

горизонтально была возможность исследовать только два варианта исполнения машин ударного действия. При проведении натурных экспериментов для исследования влияния структуры энергии удара на эффективность погружения трубы в грунт изготовлены две пневматические ударные машины с очень близкими значениями энергии удара (разница не превышала 2,2 %), но разными по массе ударниками и, соответственно, различными скоростями удара. Разницу в предударных скоростях позволила получить работа машин на различных давлениях сжатого воздуха. Энергия удара вычислялась с использованием теоремы Б. В. Суднишникова по индикаторным диаграммам давления, записанным в камерах пневмоударных машин [137]. Энергия удара машин составляла 9,3 и 9,5 Дж, при массах ударника соответственно 0,5 кг (машина № 1) и 1 кг (машина № 2). Имея в виду пример на рисунке 2.5, при двукратной разнице масс ударников скорость удара машины № 2, по сравнению с машиной № 1, может быть в 1,4 раза ниже. Для корректности эксперимента частоты ударов этих машин также максимально приближены благодаря использованию сменных жиклеров, изменяющих проходное сечение канала, питающего камеру обратного хода. Разница в частотах составляла 6,7 %, что не оказывает заметного влияния на процессы погружения труб.

При выборе места проведения экспериментов принято решение остановиться на полевых натурных экспериментах, поскольку физическое моделирование грунтового массива не позволяет воссоздать природные связи между частицами грунта и получить однородный по физико-механическим свойствам массив. Все эксперименты выполнялись в двух местах: на полигоне «Зеленая горка» Института горного дела и строительном объекте г. Новосибирска в пос. Кольцово. На обоих объектах уровень грунтовых вод находился на глубине ниже уровня проведения эксперимента. Результаты лабораторного анализа грунтов представлены в таблице 2.2.

По результатам анализа грунт с полигона «Зеленая горка» можно отнести к суглинкам, а из пос. Кольцово — к супесям.

Таблица 2.2 — Физико-механические свойства грунтов

Параметр		**Полигон «Зеленая горка»**	**Пос. Кольцово**
Плотность, г/см^3		2,04	1,72
Пористость, %		38,31	54,2
Коэффициент водонасыщения, д. е.		0,67	0,36
Показатель текучести, д. е.		0,31	—
Число пластичности, д. е.		0,23	0,07
Содержание частиц, % по массе	Песчаных	23,1	58,8
	Пылеватых	24,2	31,7
	Глинистых	52,7	9,5

Для исследования влияния структуры энергии удара на скорость погружения трубы на каждом из полигонов были забиты по три металлические трубы с наружными диаметрами 32, 56 и 76 мм двумя вышеописанными ударными машинами. На рисунке 2.6 изображено шесть графиков, отражающих падение скорости по мере погружения труб в массив разными машинами. Каждая труба забивалась на глубину 70 см. При дальнейшем погружении скорость продолжала снижаться, и такая тенденция прослеживается на всех графиках.

Анализируя полученные кривые, можно сделать следующие выводы:

1) в условиях данного эксперимента независимо от диаметра трубы и варианта исполнения ударной машины скорость забивки в супесь выше, чем в суглинок;

2) в начальной фазе забивки трубы, пока сопротивление внедрению трубы в массив еще мало, машина № 2, имеющая ударник с большей массой, а также меньшую скорость удара и большую продолжительность ударного импульса, погружает трубу с большей скоростью независимо от типа породы и диаметра трубы. При этом разница в скоростях тем выше, чем больше разница в диаметрах, поскольку труба меньшего диаметра имеет меньшее лобовое сопротивление;

3) по мере продвижения трубы в массив разница в скоростях для машин № 1 и № 2 снижается с тенденцией изменения соотношения скоростей на обратное.

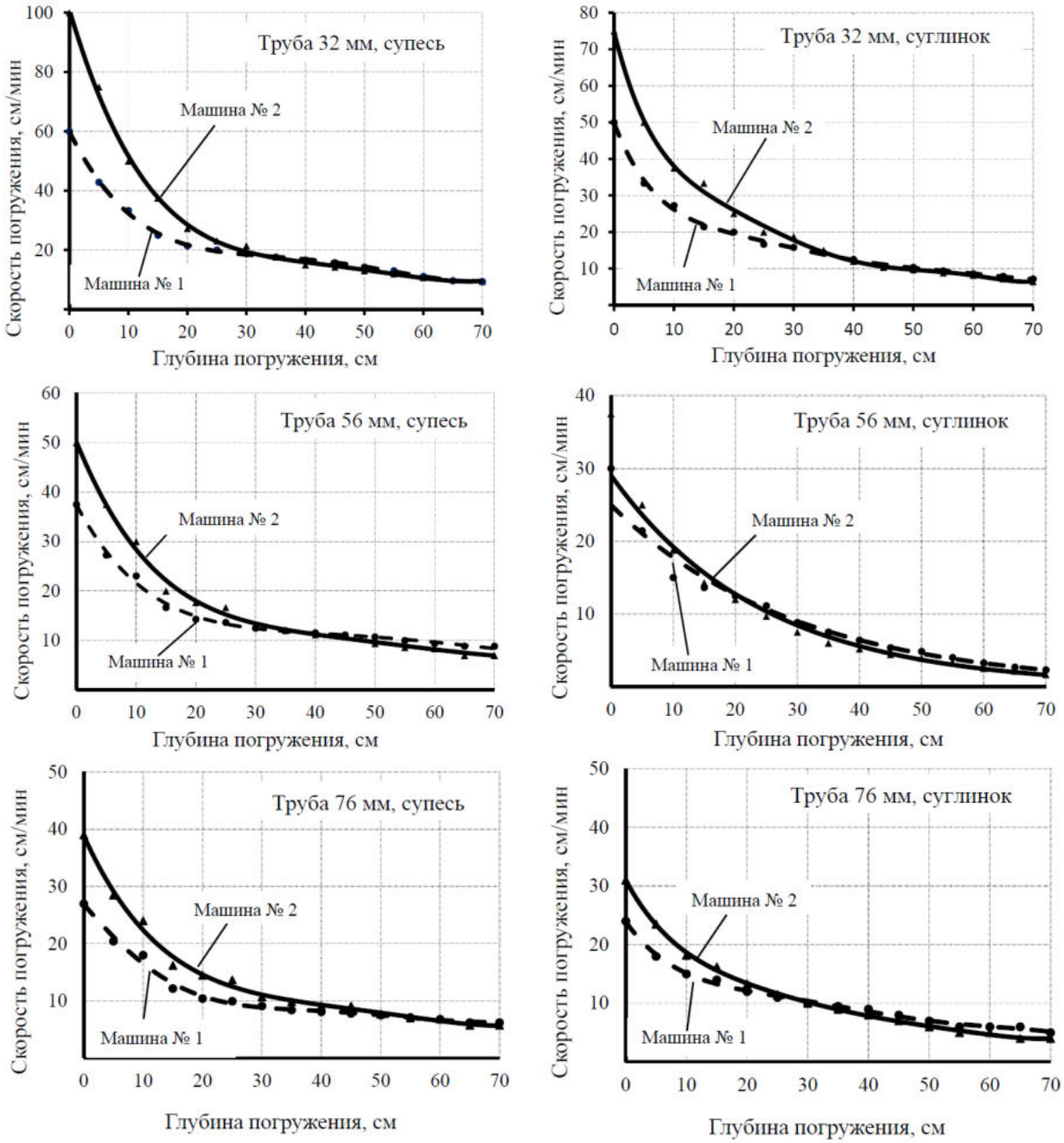


Рисунок 2.6 — Зависимости скорости забивки труб от глубины погружения

Влияние диаметра трубы и способа ее погружения на образование керна

При забивке трубы в породный массив открытым концом внутри трубы начинает формироваться керн. На начальном этапе погружения длина керна практически равна глубине погружения трубы. По мере погружения отношение длины керна к длине забитой части трубы в зависимости от различных факторов меняется, и на определенном этапе керн может настолько утрамбоваться в трубе, что образует глухую пробку, которая исключает дальнейшее попадание породы

внутрь трубы. В этом случае можно рассматривать погружение как забивку трубы с закрытым концом.

При погружении в породу труб открытым концом общее сопротивление складывается из трения по наружной поверхности трубы, торцевого сопротивления кольцевого сечения трубы, трения керна о внутреннюю поверхность трубы, а при ее закупорке — из лобового сопротивления керна. На рисунке 2.7*а* показана схема действия сил на трубу до ее закупоривания, а на рисунке 2.7*б* — труба, закупоренная пробкой.

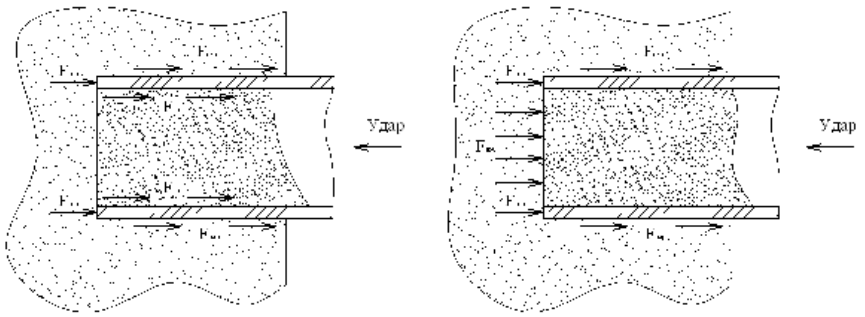


Рисунок 2.7 — Действие сил на трубу: *а* — до ее закупоривания породой; *б* — труба с пробкой

Для исследования влияния диаметра погружаемой трубы на процесс образования керна забиты три трубы с диаметрами 32, 56 и 76 мм. Забивка производилась отдельно каждой машиной (с ударником 0,5 кг машина № 1, с ударником 1 кг — № 2). Измерение длины керна проводилось через каждые 10 см погружения трубы.

Для количественной оценки степени заполнения грунтом внутренней полости трубы введен безразмерный параметр — коэффициент заполнения δ (2.2), характеризующий относительную длину керна:

$$\delta = \frac{l_к}{L_{тр}} \cdot 100\% , \qquad (2.2)$$

где $l_к$ — длина керна; $L_{тр}$ — длина участка трубы, погруженного в массив.

С момента, когда порода прекращает поступать в трубу, процесс погружения становится аналогичным забивке трубы с закрытым концом, керн образует пробку, его рост прекращается. При этом значение параметра δ соответствует предельной длине керна $\delta = \delta_{пр}$.

При прочих равных условиях в процессе статического погружения по сравнению с виброударным задавливаемые трубы испытывают большее сопротивление от сил трения, действующих как на поверхности, так и внутри трубы. Отличия в сопротивлении связаны с уменьшением приповерхностного контакта трубы с грунтом при распространении по ней ударной волны.

В настоящее время динамическое погружение труб преобладает над статическим, однако бывает, что по тем или иным причинам применять ударные устройства нельзя. Например, это может быть связано с нахождением вблизи места проведения работ исторических сооружений или зданий со слабыми фундаментными основаниями, не рассчитанными на импульсные и вибрационные нагрузки.

Для исследования влияния способа погружения трубы на процесс образования керна забиты и задавлены по три трубы с наружными диаметрами 32, 56 и 76 мм. Погружения проводились машиной № 1 и гидродомкратом в массивы двух видов, свойства которых представлены в таблице 2.3. В данной серии экспериментов не изучалось влияние структуры энергии удара, поэтому использовалась только одна ударная машина. Длина пробки фиксировалась после погружения трубы на глубину 75 см.

На рисунке 2.8 показаны зависимости влияния диаметра трубы на предельную длину керна при статическом и динамическом погружении труб в породный массив. Относительная величина предельной длины керна в данном случае на графиках выражается значением коэффициента заполнения δ.

Из графиков видно, что независимо от вида породы предельный коэффициент заполнения при динамическом погружении трубы в массив существенно выше, чем при статическом погружении, для данных конкретных условий от 2,4 до 1,5 раз для суглинка и от 3,1 до 1,4 раза для супеси. При этом с увеличением диаметра погружаемой трубы предельный коэффициент заполнения нарастает с убывающей интенсивностью.

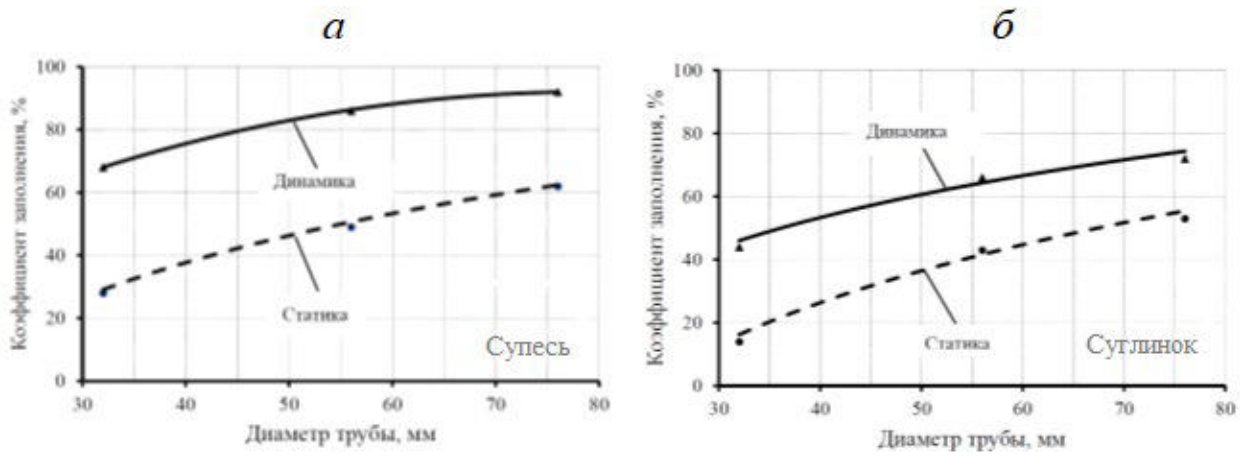


Рисунок 2.8 — Влияние диаметра трубы на предельную длину керна при статическом и динамическом погружении труб в супеси (*а*) и суглинке (*б*)

Кроме того, из сопоставления графиков для супеси и суглинка следует, что в данном случае при любых одинаковых диаметрах трубы предельный коэффициент ее заполнения в супеси выше, чем на суглинке. Это означает, что предельная длина песчаного керна больше, чем глинистого, т. е. в супеси пробка образуется позже, чем в суглинке, соответственно, длина погружения трубы в режиме сплошного стержня в суглинке больше, чем при погружении в супесь.

Влияние энергии удара на формирование керна

Для исследования влияния энергии удара на процесс образования керна забивались трубы с наружными диаметрами 32, 56 и 76 мм. Забивка производилась на обоих полигонах ударными машинами с тремя разными энергиями удара (6,7 Дж — машина № 1; 9,5 и 12,3 Дж — машина № 2). Получение таких значений энергии удара оказалось возможным за счет работы ударных машин на различных давлениях сжатого воздуха. Измерение длины грунтового керна проводилось каждые 10 см погружения трубы.

На рисунке 2.9 показаны зависимости влияния энергии удара на предельную длину керна для трех диаметров труб в супеси и суглинке.

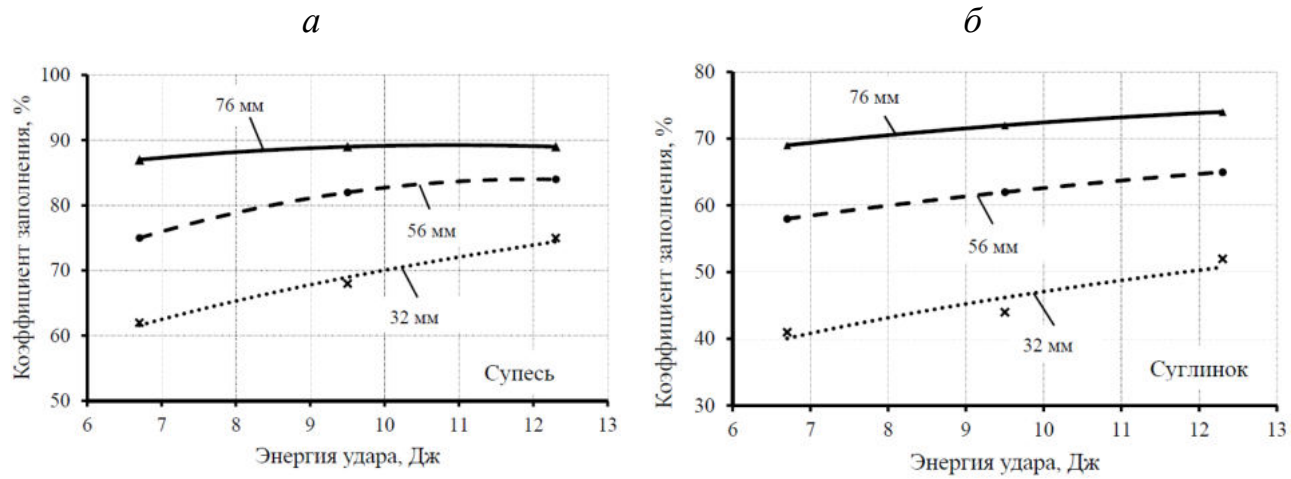


Рисунок 2.9 — Влияние энергии удара на относительную величину предельной длины керна при различных диаметрах труб для двух типов грунта: *а* — супеси; *б* — суглинка

Судя по графикам, можно сказать, что при увеличении энергии удара наблюдается тенденция к росту предельной длины керна, причем с увеличением диаметра трубы и при переходе от суглинка к супеси интенсивность приращения заметно падает. Так, для суглинка при возрастании энергии удара с 6,7 до 12,3 Дж коэффициент заполнения для трубы диаметром 32 мм возрос на 26 %, а для трубы диаметром 76 мм — всего на 7 %. Для супеси аналогичное сопоставление дает 19 и 2,5 %.

Влияние порционной очистки на скорость погружения труб и формирование керна

Как при статическом, так и при динамическом погружении труб в массив в ее внутреннюю полость поступает порода, образуя керн, который постепенно уплотняется в пробку. С образованием пробки продвижение керна внутрь трубы практически прекращается, и очередные порции породы уже не могут поступать в трубу. По мере роста керна в массиве на переднем торце трубы происходит формирование уплотненного ядра, частично вытесняющего породу в стенки скважины, что приводит к постепенному росту деформаций окружающего породного массива в радиальном направлении. При образовании пробки уже вся порода перед трубой вытесняется в массив, и скорость продвижения трубы значительно падает. Таким образом, своевременное удаление керна в процессе забивки трубы до превращения

его в пробку является важным фактором, определяющим эффективность технологии погружения в целом.

В рамках выполняемых исследований оценивалось, в какой степени скорость забивки трубы зависит от частоты очистки керна. Для этого в массив забивались трубы с наружными диаметрами 56 и 76 мм. При попытке провести данные эксперименты на трубе меньшего диаметра (32 мм) столкнулись с закупориваем трубы на самом начальном этапе погружения и безрезультатными попытками ее очистки, что сделало невозможным сравнение по скоростям погружения на разных стадиях очистки.

Забивка труб проводилась на обоих полигонах машиной № 2 с энергией удара 9,5 Дж. Труба погружалась в грунт по 3 раза на расчетную глубину 1 м, при этом первый раз она вообще не чистилась, второй раз единожды очищалась при глубине погружения 0,5 м, и в третий раз чистилась каждые 0,25 м.

На рисунке 2.10 показаны зависимости скорости погружения трубы от числа очисток при погружении трубы диаметром 76 мм в супесь и суглинок. Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что чем больше количество очисток трубы, тем дольше не снижается скорость ее погружения.

Вместе с тем при экспериментах на реальных строительных объектах установлено, что избыточно частая очистка, когда продвижение трубы между очередными очистками составляет около 5 диаметров трубы, может дать негативный эффект: керн не успеет в достаточной мере уплотниться, подаваемый сжатый воздух продует в нем канал и будет свободно выходить из трубы, не обеспечивая транспортировку керна. В первую очередь такая опасность грозит слабосвязным породам.

В данном случае из графиков видно, что и начальная скорость, и скорость продвижения трубы для супеси выше, чем для суглинка. При очистке трубы через каждые 25 см скорость продвижения по всей длине забивки заметно выше, чем при разовой очистке или забивке вообще без очистки. Более наглядно это видно на диаграмме зависимости времени продвижения в массив на 100 см от числа очисток. При трехкратной очистке время снижается в 1,8 раза для супеси и в 1,7 раза для суглинка по сравнению со временем погружения трубы без очистки. При этом

время погружения для супеси в 1,28 – 1,37 раза ниже, чем для суглинка, в зависимости от количества очисток.

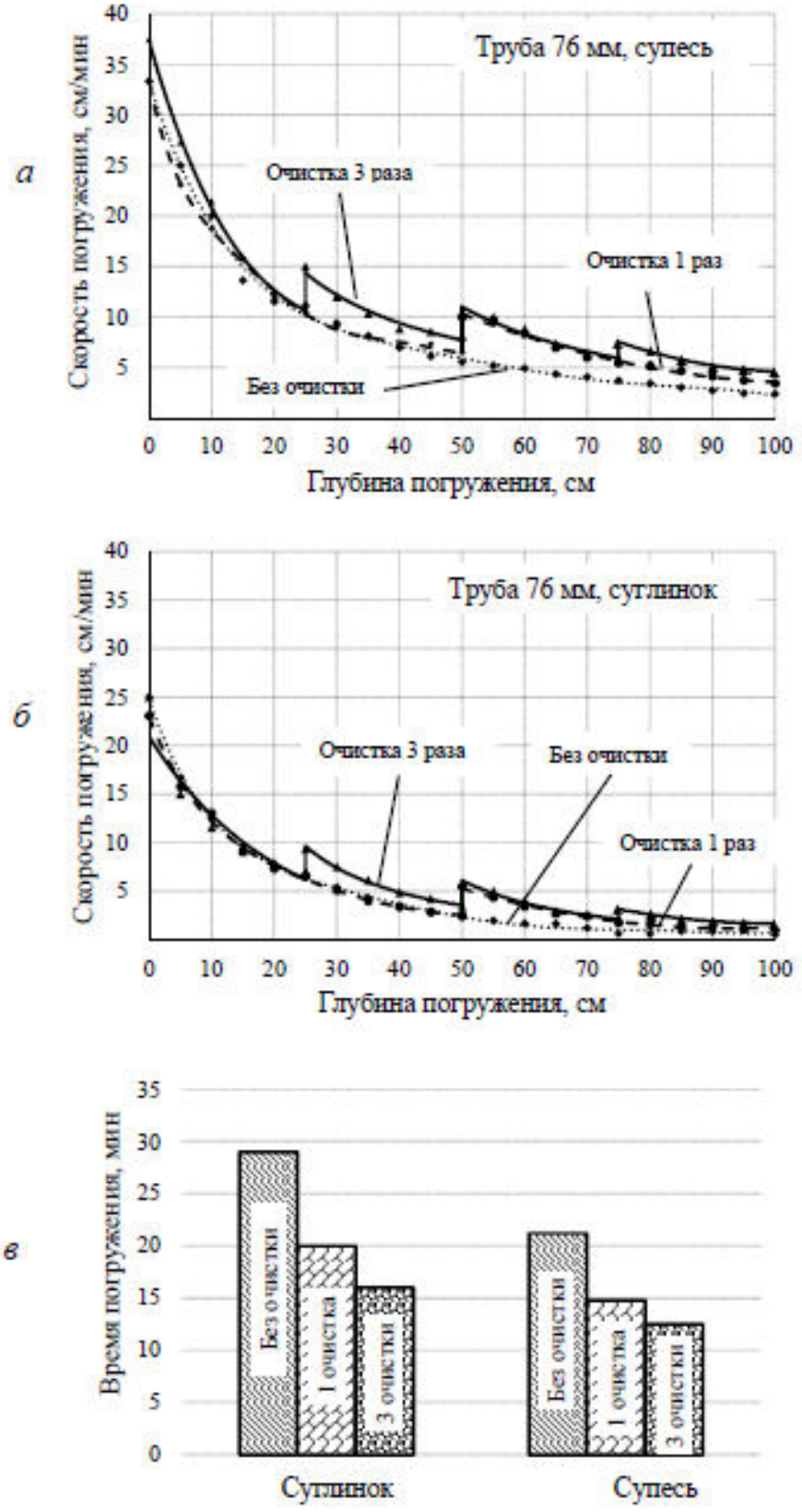


Рисунок 2.10 — Зависимости скорости (*а*, *б*) и времени погружения (*в*) трубы диаметром 76 мм от числа очисток при погружении на 100 см в супесь и суглинок

На рисунке 2.11 показаны зависимости скорости продвижения трубы диаметром 56 мм от числа очисток при погружении в суглинок и супесь. Видно, что начальные скорости погружения для данной трубы выше, чем для трубы диаметром 76 мм, при этом на глубине погружения свыше 80 см скорости практически идентичны.

Для трубы диаметров 56 мм сохраняются все тенденции, описанные ранее при погружении трубы 76 мм. В супеси положительный эффект от порционного удаления керна проявляется значительно сильнее, чем в суглинке, причем при продвижении трубы в суглинок на глубину более 50 см очистка не дает заметных результатов, и дальнейшее погружение очищенной трубы по скорости практически не отличается от неочищенной.

На всех этапах продвижения скорость неочищенной трубы, т. е. с пробкой, в супеси выше, чем в суглинке. Это коррелирует с результатами предшествовавших экспериментов, где пробка в суглинке образуется раньше, чем в супеси, и, соответственно, тормозящий эффект пробки на суглинке действует на более протяженном пути продвижения трубы в массив. Разница скоростей также объяснима свойствами породы, в которую внедрялись трубы. По данным из таблицы 2.2, видно, что песчаная порода имеет меньшую плотность и почти в 1,5 раза большую пористость. Соответственно, сопротивляемость внедрению трубы у нее существенно меньше, чем у суглинка.

Таким образом, в результате полевых экспериментов установлено, что при прочих равных условиях происходит следующее:

1) независимо от диаметра трубы и варианта исполнения ударной машины в глинистом грунте пробка образуется при меньшей глубине внедрения трубы в массив, т. е. раньше, чем в песчаном. Соответственно, скорость забивки в супесь выше, чем в суглинок;

2) большему диаметру погружаемой трубы соответствует больший коэффициент δ заполнения трубы породой. При этом интенсивность возрастания δ, обусловленного увеличением диаметра трубы, убывает;

3) использование порционной очистки при внедрении трубы в песчаный грунт увеличивает скорость погружения трубы значительно больше, чем при внедрении трубы в глинистый грунт.

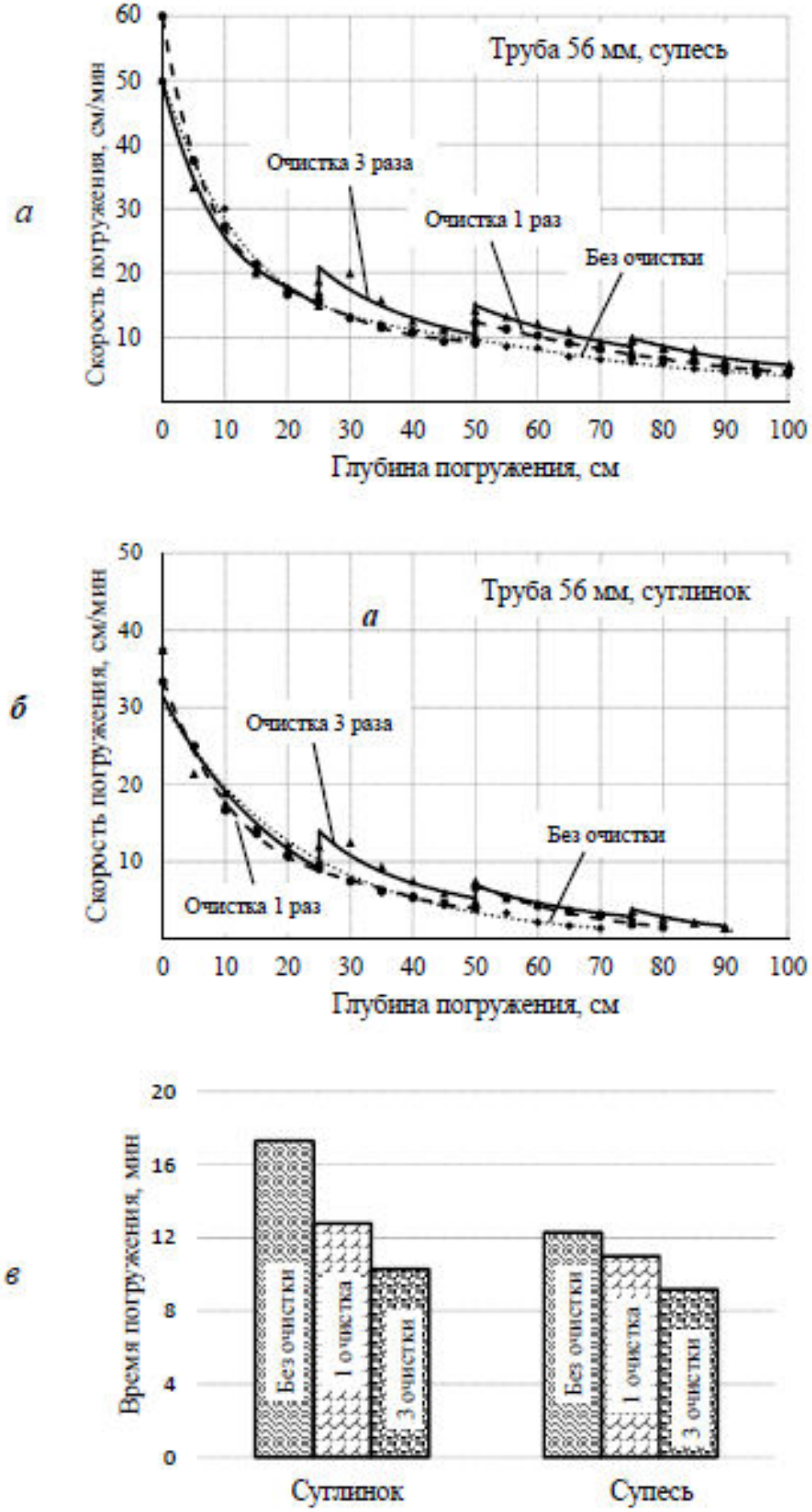


Рисунок 2.11 — Зависимости скорости (*а*, *б*) и времени погружения (*в*) трубы диаметром 56 мм от числа очисток при погружении на 100 см в суглинок и в супесь

2.2 Лабораторные исследования процессов отрыва и транспортирования керна

В случае виброударного 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 [43, 176]. Известны случаи снижения как внутреннего, так и внешнего коэффициента трения под действием знакопеременной нагрузки [12]. Однако эти процессы еще недостаточно изучены и их положительное влияние на порционное удаление требует дополнительных лабораторных исследований на физических моделях.

2.2.1 Экспериментальный стенд

Для определения влияния ударной нагрузки на эффективность транспортирования и отрыва породной порции воздушным потоком был разработан лабораторный стенд (рисунок 2.12).

Основание стенда — металлоконструкция, выполненная из двутавра № 40, на верхнем поясе которого закреплен швеллер № 14. Швеллер является ложементом для экспериментальной трубы. Внутри ложемента труба опирается на деревянные вкладыши.

Экспериментальная труба *7* фиксируется в ложементе с помощью прижима *16*, внутренняя поверхность которого выполнена из резины для создания силы трения, способной изменяться 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*. Гидроцилиндр *10* закреплен на основании *12* прижимом *11*. Датчик силы *9*, установленный на штоке, фиксирует усилие страгивания грунтовой порции относительно трубы и передает показания на ПК *14*. Масло в рабочие полости гидроцилиндра *10* подается насосной станцией *13*.

Схематично устройство стенда показано на рисунке 2.13.

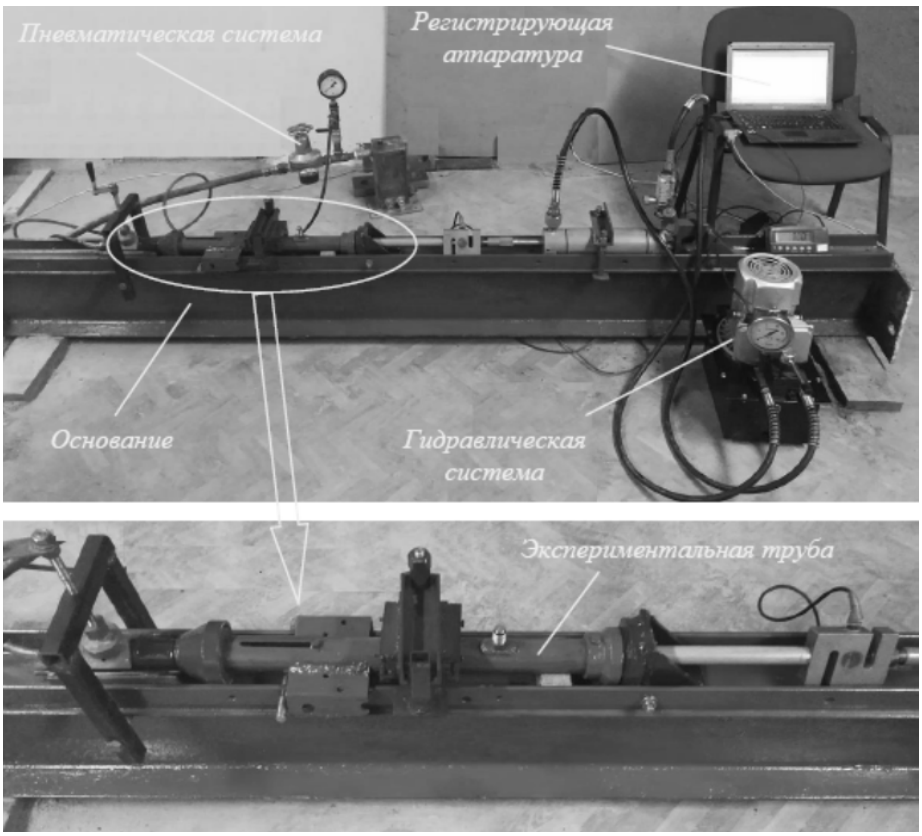
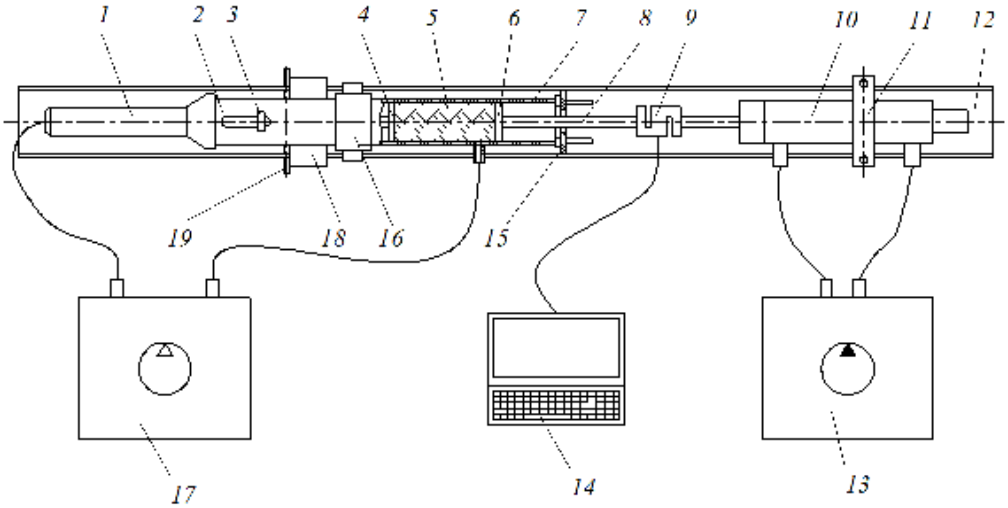


Рисунок 2.12 — Экспериментальный стенд



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

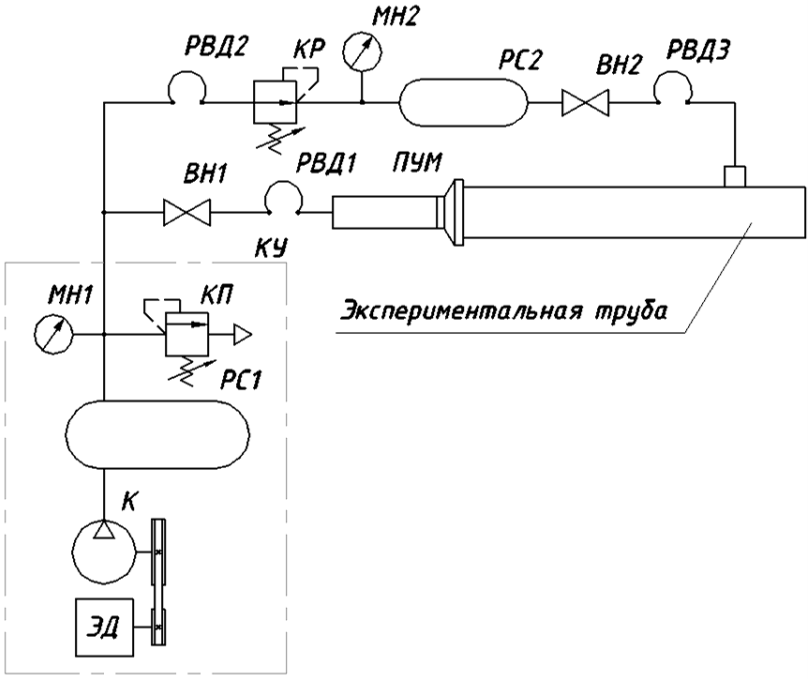
Рисунок 2.13 — Экспериментальный стенд

На противоположном конце трубы установлен пневмомолот *1*, питание которого и подача воздуха во внутреннюю полость трубы осуществляются входящей с состав стенда компрессорной установкой *17*.

При ударном воздействии пневмомолота *1* труба удерживается от осевого перемещения помимо прижима *16* кронштейном *15*, снабженным резиновым демпфером. Статическое усилие при трамбовке грунтовой порции передается на швеллер через съемный ограничительный штифт *19*, в который упираются приваренные на трубу две боковые пластины *18*.

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*.

Принципиальная пневматическая схема экспериментального стенда представлена на рисунке 2.14.



КУ — компрессорная установка; *ЭД* — электродвигатель; *К* — компрессор; *КП* — клапан предохранительный; *КР* — клапан редукционный; *МН1*, *МН2* — манометры; *РВД1 – РВД3* — рукава высокого давления; *РС1*, *РС2* — ресиверы; *ВН1*, *ВН2* — вентили

Рисунок 2.14 — Принципиальная пневматическая схема экспериментального стенда

Пневматическая система экспериментального стенда содержит компрессорную установку КУ и пневматические линии. Первая пневматическая линия предназначена для питания сжатым воздухом генератора ударных импульсов (пневмомолот), вторая — для реализации технологии пневматической очистки трубы от грунтового керна. Линии питаются энергоносителем параллельно.

Основной элемент компрессорной установки — воздушный компрессор *К* с приводом от электродвигателя *ЭД*. Для хранения запаса сжатого воздуха и исключения резкого колебания давления в напорном трубопроводе при включении потребителей в составе компрессорной установки *КУ* предусмотрен ресивер *РС1*.

Давление в ресивере *РС1* ограничивается предохранительным клапаном *КП*. При превышении давления настройки *КП* часть сжатого воздуха из ресивера *РС1* сбрасывается в атмосферу. Контроль давления осуществляется по манометру *МН1*.

Пневматическая ударная машина *ПУМ*, предназначенная для создания ударного воздействия на торец трубы, питается энергоносителем из первой пневматической линии. Подключение осуществляется гибким шлангом *РВД1*. Запуск и остановка *ПУМ* производятся переключением вентиля (крана) *ВН1*.

Вторая пневматическая линия имеет в своем составе редукционный клапан *КР*, поскольку для исследования процесса отрыва и транспортирования керна необходимо варьировать давление сжатого воздуха, подаваемого в экспериментальную трубу. Для хранения запаса сжатого воздуха при пониженном давлении установлен ресивер *РС2*. Контроль давления в ресивере *РС2* осуществляется манометром *МН2*. Подача воздуха в экспериментальную трубу и его отсечка управляются вентилем (краном) *ВН2*.

Блок подготовки воздуха пониженного давления (включающий *КР*, *МН2, РС2* и *ВН2*) подключается к основной напорной магистрали компрессорной установки *КУ* гибким шлангом *РВД2*, а к экспериментальной трубе — *РВД3*.

2.2.2 Методика проведения эксперимента

Поскольку каждый эксперимент требуется повторить несколько раз, породная порция формировалась искусственно. Для того чтобы эксперименты соответствовали реальному процессу, проведены замеры плотности и влажности керна, полученного в результате ударного погружения трубы такой же длины и диаметра в естественный массив, порода из которого впоследствии использовались для формирования искусственных породных порций (таблица 2.6).

Для каждого эксперимента порция формировалась уплотнением насыпной породы осевым усилием 4 кН. У всех типов используемых пород длина порции составляла 150 – 155 мм. Измерение силы трамбования и силы страгивания керна проводилось с помощью датчика силы S-образного типа SH3 с контроллером R320, позволяющим фиксировать изменение осевого усилия во времени, а также выводить информацию на дисплей. Характеристики датчика SH3 приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Технические характеристики датчика SH3

Наименование параметра	**Значение параметра**
Тип	Тензометрический
Диапазон измерения, кН	0 – 50
Класс точности	C3
Чувствительность, мВ/В	2
Степень защиты	IP67
Предельная нагрузка, %	150
Разрушающая нагрузка, %	300
Тип кабеля	4-жильный, экранированный
Масса, кг	2,8

Влажность породы, из которой формировались порции, контролировалась с помощью влагомера МГ-44 на основе чувствительного радиочастотного датчика (таблица 2.4). Его работа построена на использовании косвенного метода измерения, основанного на зависимости диэлектрических свойств среды от ее влажности. Увеличение диэлектрической проницаемости тестируемого образца при неизменной температуре свидетельствует о повышении содержания воды в материале. Для

получения заданного значения влажности в материал для образца керна добавлялась вода или просушенный грунт.

Таблица 2.4 — Технические характеристики влагомера МГ-44

Наименование параметра	**Значение параметра**
Тип	Цифровой
Диапазон измерения влажности, %	1 – 100
Максимальная погрешность измерения, %	1,0
Время измерения, с	3
Питание, В	9
Размеры Д х Ш х В, мм	80 х 40 х 120
Масса, кг	0,3

Серия экспериментов по страгиванию и транспортированию керна проводилась на трех типах породы (глина, суглинок, супесь), физико-механические свойства которых приведены в таблице 2.7. Сформированные порции с одинаковой длиной, плотностью, влажностью и расположением относительно торцов трубы выдавливались осевым усилием гидроцилиндра. При этом фиксировалось сопротивление страгиванию и перемещению керна.

Затем серия экспериментов повторялась уже с одновременным приложением к трубе виброударной нагрузки, создаваемой пневмомолотом. Для имитации естественных условий взаимодействия трубы с грунтовым массивом в конструкции стенда предусмотрен ограничитель осевых перемещений трубы с резиновой накладкой, моделирующей лобовое сопротивление, а сопротивление от трения о грунт внешней поверхности трубы создается двумя прижимами.

Аналогичные эксперименты проводились при выдавливании грунтовой порции сжатым воздухом, который подавался во внутреннюю полость экспериментальной трубы. Давление сжатого воздуха контролировалось манометром ДМ5002М (таблица 2.5).

Таблица 2.5 — Технические характеристики манометра ДМ5002М

Наименование параметра	**Значение параметра**
Тип	Манометр избыточного давления, цифровой
Измеряемая среда	Неагрессивные газы
Диапазон измерения, МПа	0 – 1,0
Класс точности	0,5
Диаметр корпуса, мм	100
Степень защиты	IP54
Расположение штуцера	Радиальное
Присоединительная резьба	М20 х 1,5
Масса, кг	1,2

Более подробное описание последовательности и особенностей всех этапов проведения экспериментов и точность измерений приведено в *Приложении А*.

2.2.3 Результаты экспериментов

При проведении исследований выполнена серия экспериментов, состоящая из 60 испытаний. В качестве материала использовались три типа грунтов, отличающиеся процентным содержанием глинистых частиц в своем составе. Длина порции грунтового керна и его влажность для всех исследований неизменны. Результаты экспериментов представлены в таблице 2.6 и на рисунках 2.15, 2.16 [174].

Таблица 2.6 — Результаты экспериментов

Параметр	Глина		Суглинок		Супесь	
Содержание глинистых частиц, %	62		39		21	
Длина порции, мм	150		150		150	
Плотность, кг/м3	1960		1840		1860	
Влажность, %	13		13		13	
Определение усилия страгивания порции керна, кН						
№ эксперимента	Статика	Статика с ударом	Статика	Статика с ударом	Статика	Статика с ударом
1	3,0	1,8	2,76	1,53	2,5	0,38
2	2,8	2,0	2,35	1,4	2,8	0,44
3	2,8	2,0	3	1,26	2,6	0,32
4	2,4	1,7	2,6	1,29	2,6	0,36
5	2,7	1,9	2,5	1,47	2,7	0,34
Среднее	**2,7**	**1,9**	**2,5**	**1,38**	**2,6**	**0,37**
Определение давления отрыва порции керна, атм						
1	6,3	3,1	6	2,8	5,5	2
2	6,3	4	6,1	2,5	5,8	2
3	6,1	4	5,5	2,7	5,7	1,7
4	5,9	3,7	5,8	2,6	5,6	1,6
5	6,3	4,1	5,9	2,5	5,9	1,9
Среднее	**6,2**	**3,8**	**5,9**	**2,6**	**5,7**	**1,8**

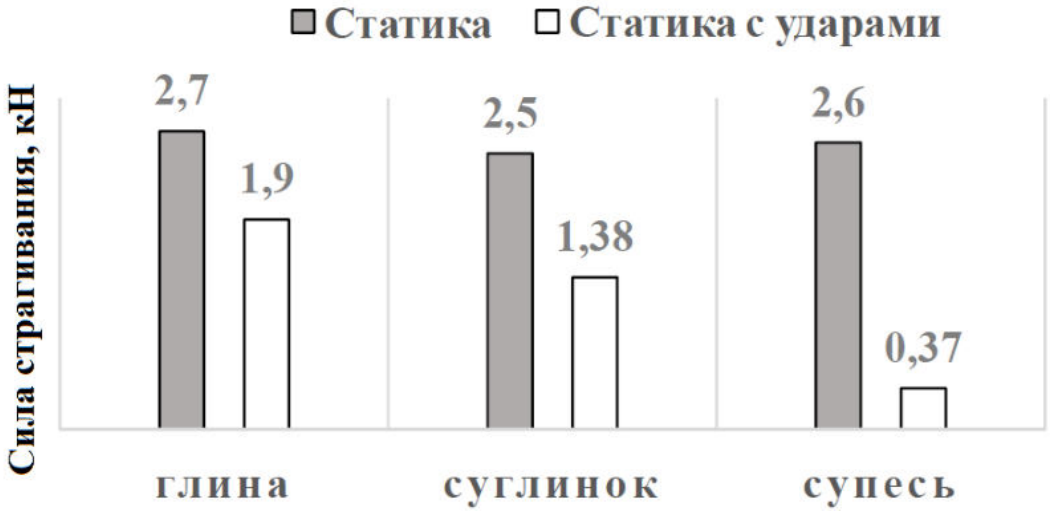


Рисунок 2.15 — Силы сопротивления страгиванию порции керна

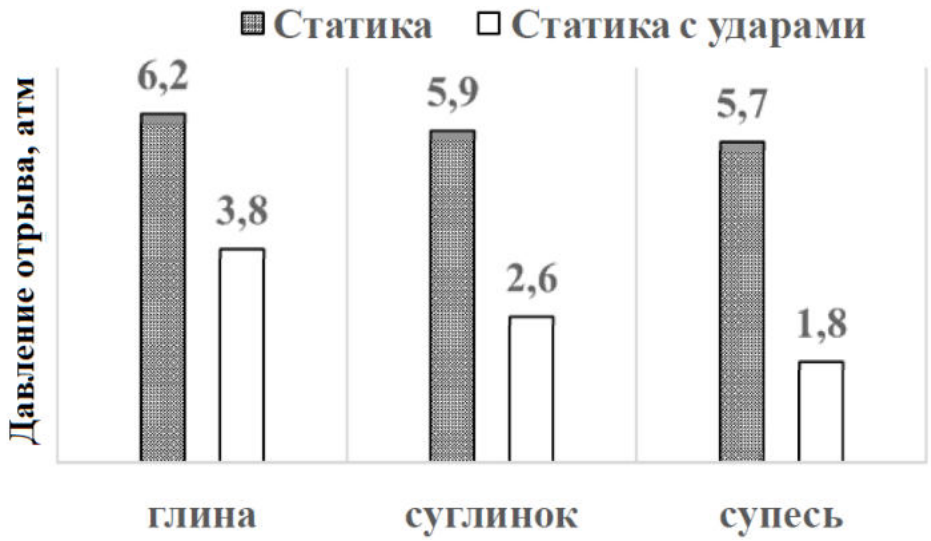


Рисунок 2.16 — Давление воздуха в момент отрыва порции керна

Следующий этап исследования — определение влияния энергетических параметров ударного привода на процесс и силу сопротивления страгиванию грунтового керна [193].

В качестве генератора виброударного воздействия выбран пневмомолот № 1. Эксперименты по определению влияния энергии удара пневмомолота проводились на суглинке. Энергия удара регулировалась изменением давления энергоносителя в питающей магистрали. В результате экспериментов установлено, что сила трения грунтовой порции о стенки трубы снижается с увеличением энергии удара. График изменения силы трения в зависимости от энергии единичного удара пневмомолота показан на рисунке 2.17.

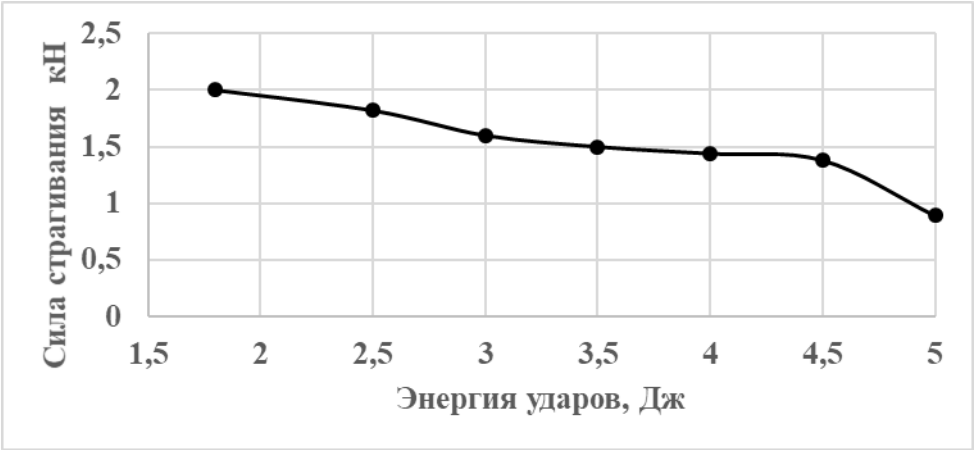


Рисунок 2.17 — Зависимость силы страгивания порции от энергии удара

Также на суглинке исследовалось влияние частоты ударов пневмомолота на силу страгивания. Эксперименты проводились при постоянной энергии ударов

4,5 Дж. Частота ударов менялась в диапазоне от 8 до 28 Гц за счет установки в канал питания камеры обратного хода жиклеров с разными проходными сечениями. В результате усреднения результатов пяти повторений каждого эксперимента очевидной зависимости сил трения от частоты ударного воздействия установлено не было. Разброс результатов находится в пределах 10 %.

Исследование влияния демпфирования проводились на этом же стенде. Поглощение энергии ударов пневмомолота регулировалось усилием затяжки прижимов *16* (рисунок 2.13), а осевое перемещение трубы под действием каждого удара менялось установкой резинового кольца различной жесткости на демпфере *15*. В результате серии экспериментов влияние параметров демпфирования на силу страгивания керна не установлен. Вместе с тем увеличение скорости транспортирования при росте амплитуды перемещений трубы под действием ударов.

Таким образом в результате лабораторных исследований **установлено**:

1) для исследуемых пород виброударная нагрузка, по сравнению со статической, приводит к снижению сил сопротивления страгиванию породной порции, причем эффект снижения тем сильнее, чем меньше глинистых частиц в грунте;

2) при увеличении энергии единичного удара виброударного привода от 1,8 до 5 Дж сила сопротивления страгиванию снижается в 2 раза;

3) изменение частоты ударов и параметров демпфирования не оказывает влияния на сопротивление грунтового керна страгиванию.

2.3 Исследования технологии проходки горизонтальных скважин с порционным удалением керна в производственных условиях

Характер и степень влияния грунтового керна на производительность виброударного продавливания можно оценить по данным хронометража процесса забивания стального кожуха диаметром 530 мм на длину 28 м в массив плотностью около $1.8-2$ г/см^3 [48]. Продавливание осуществлялось посекционно тремя отрезками длиной 10 м каждый. После внедрения каждой секции проводилась очистка полости трубы от набранного грунта с помощью желонки.

На рисунке 2.18 представлена зависимость скорости погружения трубы от длины ее части, внедренной в грунт.

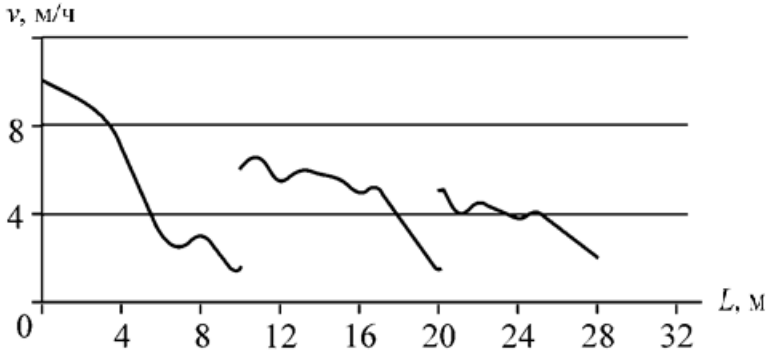


Рисунок 2.18 — Зависимость скорости погружения трубы от длины внедренной в грунт ее части

В процессе внедрения первой секции на длину до 10 м скорость ее перемещения упала в 5 раз: с 10 до 2 м/ч. После удаления грунта и наращивания следующей секции скорость выросла до 6 м/ч, а по мере дальнейшего внедрения до длины 20 м вновь уменьшилась до значения 2 м/ч. Повторное удаление грунтового керна снова привело к увеличению скорости до 5 м/ч. Характер ее дальнейшего спада по мере увеличения длины внедренной в грунт части трубы мало отличается от первых двух участков графика.

Из анализа представленной зависимости следует, что увеличение частоты операций по удалению грунта позволяет повысить среднюю скорость погружения трубы и сократить время проведения работы. Однако на практике смена технологического оборудования — процесс длительный и трудоемкий. Именно поэтому операция очистки обычно проводится после полного внедрения очередной секции трубы, когда необходимо осуществить демонтаж пневмомолота и наращивание следующей секции, что не всегда возможно. При неблагоприятных грунтовых условиях за время продавливания каждой секции трубы часто приходится удалять керн несколько раз. Иначе секцию погрузить затруднительно [46].

Именно возможность удаления грунта на любом этапе продавливания даже без прерывания процесса виброударного воздействия является одним из ключевых факторов, определяющих несомненную перспективность новой технологии виброударного погружения стальных труб с порционной очисткой, особенно в

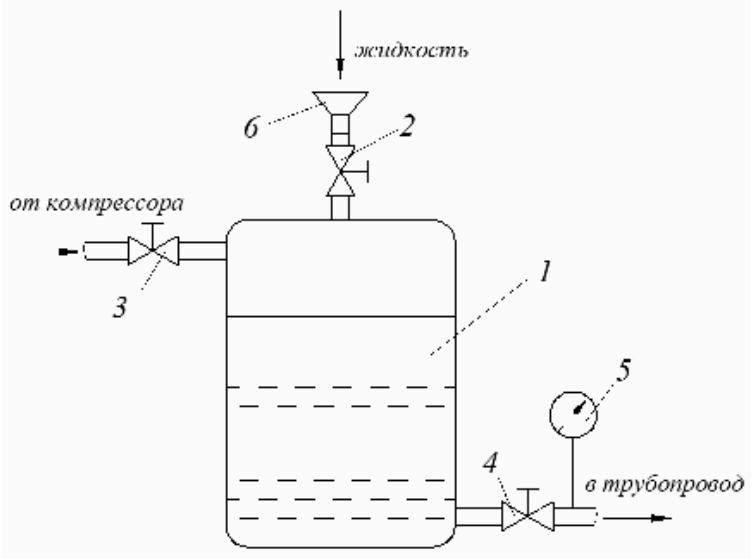
сложных грунтовых условиях. Полевые и лабораторные исследования, представленные в п.п. 2.1 и 2.2, на трубах малого диаметра позволили рассчитывать на положительный эффект от порционного удаления грунта в полномасштабных производственных условиях.

2.3.1 Оборудование и технические решения для реализации порционного удаления на практике

В первую очередь необходимо разработать технические решения для возможности применения технологии на практике [110].

Одно из главных технологических преимуществ способа порционного удаления при виброударном погружении труб пневмомолотами заключается в возможности запитать сжатым воздухом магистраль для удаления порций грунта от того же компрессора, к которому подключен пневмомолот [150]. Вместе с тем положительный эффект на процесс очистки может оказать подача жидкости одновременно со сжатым воздухом. Это может быть химический раствор, способствующий укреплению грунта, если он слабосвязаный, или, наоборот, его разупрочнению, когда воздушным потоком не удается отделить порцию от прозабойной части керна. Кроме того, простая вода в контакте с глинистыми частицами создает своего рода смазку и снижает коэффициент трения в процессе транспортирования грунтовой порции по трубе. Для реализации указанной возможности изготовлено устройство, по своей сути являющееся аналогом пневмогидроаккумулятора (рисунок 2.19).

Устройство для подачи жидкости и сжатого воздуха — это ресивер, в верхней части которого выполнено отверстие для подачи жидкости. На боковой поверхности ресивера расположено входное отверстие, подключенное к компрессору. В нижней части боковой поверхности размещено выходное отверстие, питающее трубопровод для очистки погружаемой трубы от грунта. После наполнения ресивера жидкостью в него подается сжатый воздух, который своим давлением направляет ее в трубопровод.



1 — резервуар; *2*, *3*, *4* — вентиль; *5* — манометр; *6* — воронка

Рисунок 2.19 — Устройство для подачи жидкости и сжатого воздуха

Выход грунтовых порций из трубы осуществлялся через окно, прорезанное газовой горелкой на боковой поверхности погружаемой трубы (рисунок 2.20).

Такое решение не оптимально, поскольку окно необходимо не только прорезать на каждой секции, но затем заваривать, чтобы восстановить герметичность погружаемой трубы. Альтернативой является вариант, когда разгрузочное окно выполнено в насадке, соединяющей погружаемую трубу и пневмомолот (рисунок 2.21).

Рисунок 2.20 — Окно для выхода грунта

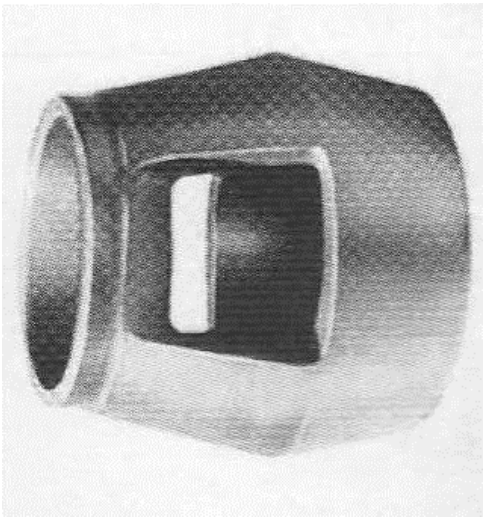


Рисунок 2.21 — Насадка с окном

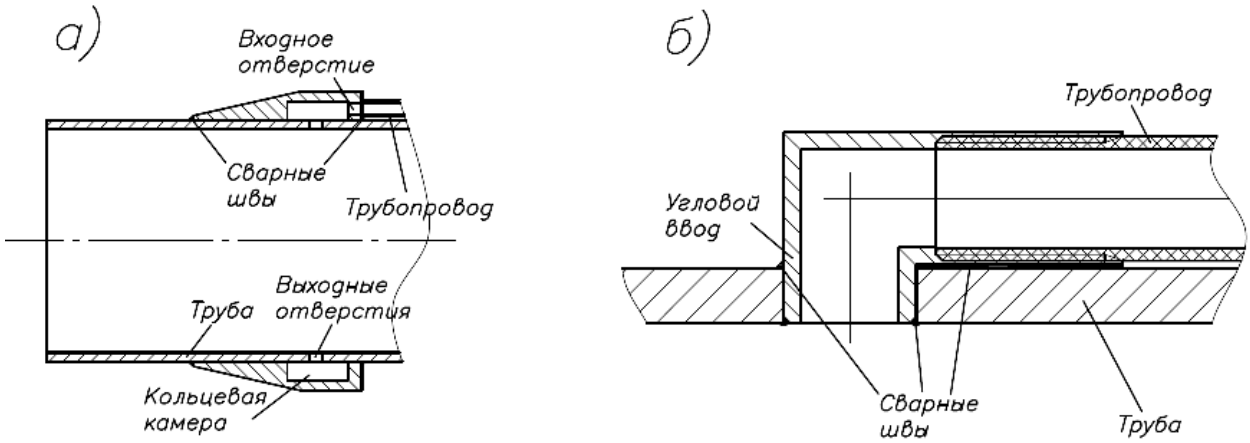
Поскольку конечный эффект от порционного удаления грунта и возможность его реализации при проектировании оборудования оставляли опасения, бы-

ло принято решение на этапе апробации пожертвовать производительностью процесса за счет дополнительных операций по прорезанию и завариванию окна и остановится на варианте, представленном на рисунке 2.20. Данное решение в некоторой степени универсально, так как подходит для любого диаметра трубы. В случае со специальной насадкой необходимо иметь комплект под каждый диаметр погружаемой трубы, что требует значительных материальных затрат.

Система крепления вспомогательного трубопровода к погружаемой трубе

В предложенной технологии необходима надежная связь источника сжатого воздуха с внутренней полостью трубы в месте отрыва.

Наиболее надежно и эффективно решение, в котором на некотором удалении от переднего торца трубы на ее наружной поверхности устанавливается кольцевая насадка, формирующая вокруг участка трубы кольцевую полость, которая соединена с внутренней полостью трубы выходными отверстиями (рисунок 2.22*а*). Это позволяет создавать несколько точек ввода текучей выталкивающей среды, что дает возможность эффективнее отрезать порцию грунтового керна и повышает надежность этого процесса. Через распределенные по периметру отверстия можно проводить равномерную подачу специализированных растворов для снижения трения или укрепления грунтовой массы, находящейся внутри трубы. Однако такое техническое решение приводит к значительному увеличению площади лобового сопротивления погружаемой трубы. Для труб диаметром до 1 м площадь лобового сечения с насадкой возрастет более чем в 3 раза, что, в свою очередь, требует соответствующего увеличения затрат энергии на погружение. Насадка достаточно металлоемкая, а ее повторное использование маловероятно из-за сварного соединения с погружаемой трубой и приводит к ощутимым дополнительным финансовым затратам на каждом объекте бестраншейного строительства.



а — насадка; *б* — угловой ввод

Рисунок 2.22 — Варианты подачи выталкивающей среды

Альтернативным вариантом подвода текучей выталкивающей среды может быть угловой ввод, вваренный в стенку трубы (рисунок 2.22*б*). В случае лобовое сечение увеличивается не более чем на 17 % и применяется стандартная водопроводная арматура 1 ¼″, однако распределение специализированных растворов для снижения трения или укрепления керна происходит неравномерно. Вместе с тем при ударном погружении труба «дышит», что способствует распространению жидкости по всей зоне контакта «внутренняя поверхность трубы – керн». Надежность отрыва порции керна при использовании одного углового ввода будет ниже, но дать аргументированную сравнительную оценку предложенным вариантам сложно, поскольку этот процесс скоротечен и протекает в недоступном для наблюдения пространстве. Количество угловых штуцеров может быть более одного, но это потребует большего количества подводящих трубопроводов и создания дополнительной системы воздухораспределения на выходе из резервуара.

Учитывая экономические и энергетические аспекты технологии бестраншейной проходки скважин с порционным удалением керна, предпочтительным представляется способ соединения внутренней полости погружаемой трубы и вспомогательного трубопровода угловым вводом.

Во всех случаях вспомогательный трубопровод должен быть надежно прикреплен к точке ввода во внутреннюю полость трубы. Когда вспомогательный трубопровод — это секции металлической трубы небольшого сечения, оптималь-

ное соединение их с угловым вводом сварное. Оно обеспечивает и прочность, и герметичность вспомогательного трубопровода. Однако его наращивание по мере внедрения трубы в массив — сложная и трудоемкая дополнительная операция, которую приходится выполнять в стесненных условиях рабочего котлована. Кроме того, потребуется на каждой секции реализовывать возможность быстроразъемного соединения вспомогательного трубопровода и резервуара.

В случае применения вспомогательного трубопровода из полиэтилена низкого давления (ПНД) на первый план выходит вопрос соединения его с металлическим вводом. Важно, чтобы диаметральные размеры этого соединения не выходили за габариты ввода, а внутреннее сечение вспомогательного трубопровода в месте крепления, если и сокращалось, то незначительно.

В технике существует несколько вариантов соединений «полиэтилен – металл», но все они нацелены на обеспечение герметичности, а возможность соединения воспринимать осевую нагрузку не изучена. В тоже время в процессе погружения основной трубы грунт обжимает вспомогательный трубопровод и формирует растущую в зависимости от глубины погружения осевую нагрузку, выдергивающую трубопровод из места крепления. Вместе с тем полная герметичность указанного соединения также необходима.

Для выбора способа соединения полиэтиленового трубопровода со штуцером проведены исследования по определению максимальной осевой нагрузки трех различных вариантов крепления, каждый из которых обеспечивал 100 % герметичность. Испытательный стенд представляет собой гидроцилиндр, закрепленный на раме (рисунок 2.23). Исследуемые образцы соединений фиксировались между неподвижной опорой и штоком гидроцилиндра, снабженным осевым динамометром.

На стенде были исследованы три варианта крепления ПНД трубки (рисунок 2.24).

Первый вариант представляет собой стандартный цанговый захват, в котором гайка *4* своей внутренней конической поверхностью вдавливает цангу *5* в материал трубы *1*, а резьбой притягивается к штуцеру *2*. Этот вариант имеет

наибольшие габариты. Снаружи он во всех исполнениях выступает за габариты штуцера, а внутри «съедает» сечение трубы.

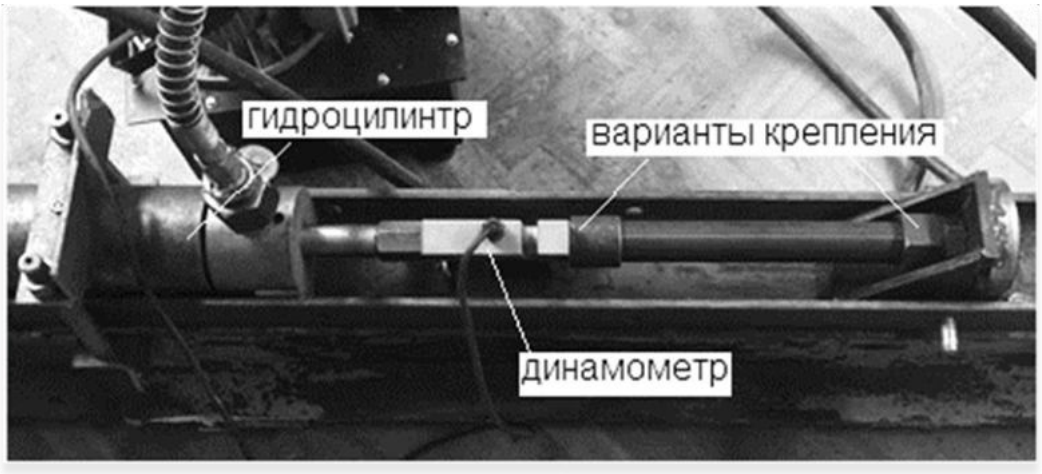
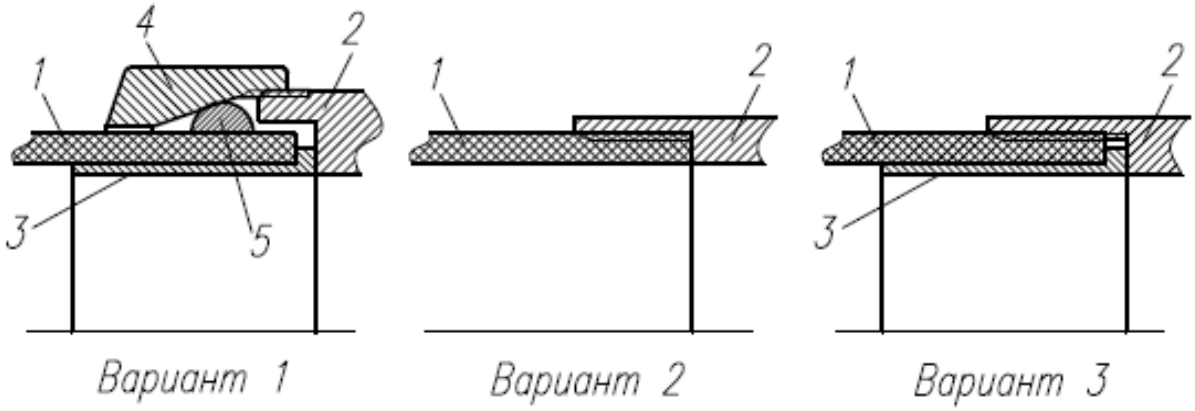


Рисунок 2.23 — Стенд для исследования соединений

Второй вариант — это простое резьбовое соединение трубки *1* и штуцера *2*. Для надежного стягивания резьба на трубке нарезается не на всю длину соединения для того, чтобы последние витки резались в процессе закручивания. Это позволяет избежать концентратора напряжений на последнем витке резьбы. В таком исполнении внутреннее сечение не уменьшается и габариты не выходят за пределы штуцера.



1 — ПНД труба; *2* — штуцер; *3* — втулка; *4* — гайка; *5* — цанга

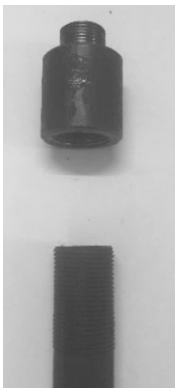
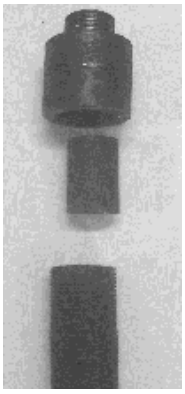
Рисунок 2.24 — Варианты крепления трубки

Третий вариант является некоторой комбинацией первых двух, поскольку включает в себя резьбовое соединение трубки *1* со штуцером *2* и имеет внутреннюю втулку *3*, которая исключает смятие трубы *1* в процессе нарезания резьбы и

закручивания. Тем самым втулка обеспечивает работу резьбы на отрыв трубки *1* всей глубиной резьбы.

Эксперименты с каждым видом крепления повторялись пять раз. В таблице 2.7 приведены средние значения, полученные на стенде.

Таблица 2.7 — Результаты испытаний

Вариант крепления	1	2 	3 
Max. осевое усилие *F*, кН	4,2	2,4	4,5

Результаты испытаний выявили, что наиболее надежным соединением является резьбовое с внутренней втулкой, которое по прочности превосходит саму полиэтиленовую трубу на растяжение.

Полученную на стенде прочность σ_m можно проверить по известной зависимости, взяв в качестве исходных данных справочные значения предела текучести материала ПНД трубы $[\sigma_m] = 20 - 30$ МПа и ее размеров [40, 49]:

$$\sigma_m = \frac{4F}{\pi \cdot (D^2 - d^2)} \le [\sigma_m] \quad \frac{4 \cdot 4{,}5 \cdot 10^3}{3{,}14 \cdot (0{,}032^2 - 0{,}028^2)} = 24 МПА \le [\sigma_m].$$

В результате установлено:

1) для подачи текучей выталкивающей среды целесообразно применять угловой штуцер, который незначительно увеличивает общее лобовое сечение и в то же время обеспечивает требуемый расход указанной среды;

2) для надежного соединения углового штуцера с ПНД трубой в наибольшей степени подходит резьбовое соединение с внутренней втулкой.

Полевые испытания показали, что вариант резьбового крепления с внутренней втулкой обеспечивает герметичность. Однако при большой глубине погружения (более 10 м) такого крепления недостаточно, происходит отрыв ПНД трубы по резьбе. Следовательно, конструктивно должна быть возможность организовать промежуточные крепления ПНД к погружаемой трубе. Такое распределение нагрузки может быть реализовано несколькими вариантами.

В первом варианте промежуточное крепление представляет собой арку, приваренную к погружаемой трубе (рисунок 2.25). Забойный торец арки имеет большее сечение, чем противоположный. Это позволяет в процессе погружения обеспечить «грунтовый замок», т. е. грунт, поступающий через забойное сечение, уплотняется и обжимает ПНД трубу, тем самым обеспечивается промежуточное крепление к погружаемой трубе и разгрузка соединений, уже находящихся в грунте. Основная сложность в реализации предложенной схемы заключается в том, что производить сварку необходимо при отсутствии ПНД трубы во внутреннем сечении арки, поскольку нагрев свариваемых деталей приведет к плавлению ПНД трубы. Это обстоятельство создает некоторые сложности, так как свободный конец ПНД трубы необходимо протаскивать через каждую приваренную арку, а ПНД труба имеет определенную жесткость, особенно с понижением температуры окружающей среды. При реализации указанной схемы можно использовать цельную плеть ПНД трубы на всю длину перехода.

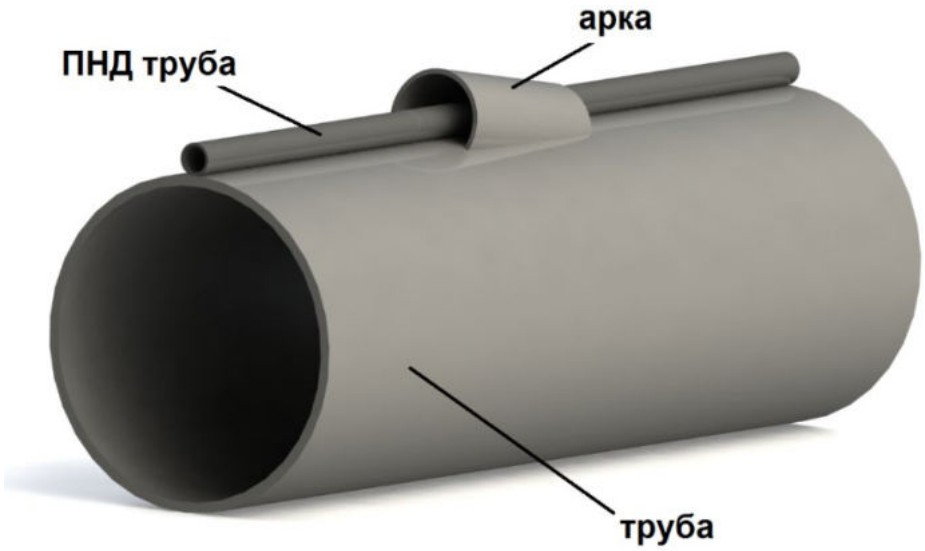


Рисунок 2.25 — Крепление ПНД трубы аркой

Второй вариант предусматривает работу с наращиваемой ПНД трубой, секции которой соединяются между собой металлическими муфтами, фиксируемыми от осевого перемещения на погружаемой трубе парами пластин (рисунок 2.26). Забойная часть муфты имеет упорный бурт и может соединяться с ПНД трубой по цилиндрической поверхности с использованием уплотнительного кольца. В другой конец муфты ввинчивается очередной отрезок ПНД трубы. После соединения муфты с секциями ПНД трубы на погружаемой трубе делается отметка местоположения бурта. Затем ПНД труба отводится в сторону. Фиксацию от осевого перемещения обеспечивают две параллельные металлические пластины, которые привариваются к погружаемой труб так, чтобы после остывания места сварки соединительная муфта вкладывалась между ними, а их передние кромки упирались в бурт муфты. Тем самым осуществляется передача осевого перемещения от погружаемой трубы через бурт на ПНД трубу. Таким образом, обеспечивается защита от осевой перегрузки всех секций ПНД трубы. Чем тяжелее грунтовые условия, тем чаще необходимо устанавливать промежуточное крепление.

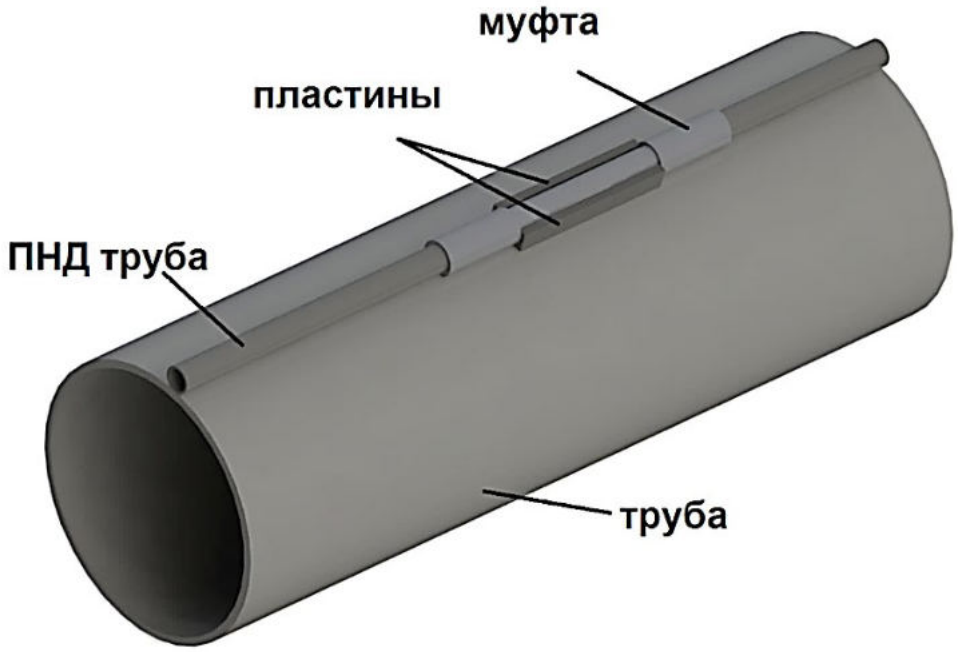
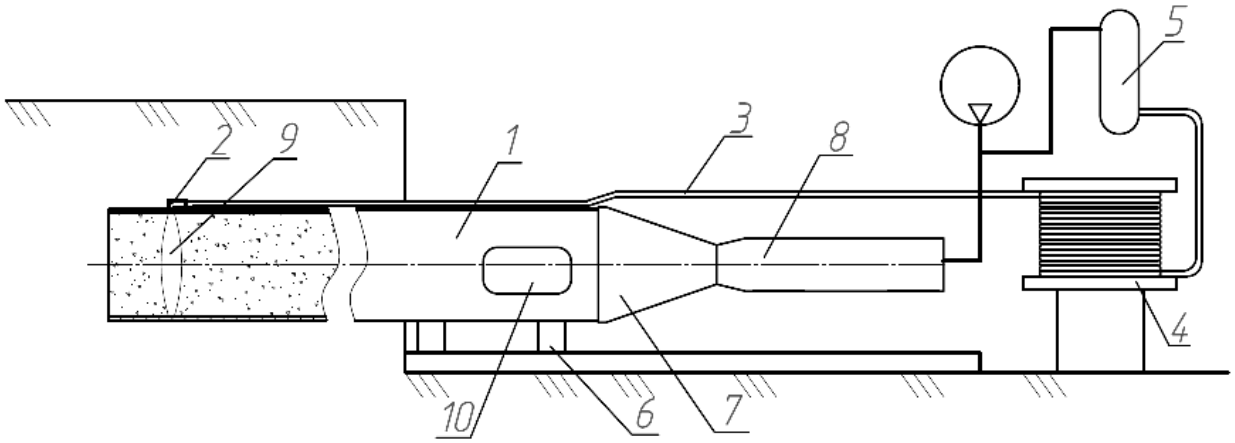


Рисунок 2.26 — Крепление ПНД трубы муфтой

2.3.2 Последовательность технологических операций

Технологическая схема порционного удаления керна при погружении в грунт трубы методом виброударного продавливания представлена на рисунке 2.27.



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

Рисунок 2.27 — Компоновка технологического оборудования для ударного погружения трубы с порционным удалением грунтового керна

Для удаления грунта из трубы осуществляют следующие операции:

— на первой секции обсадной трубы *1* монтируется угловой ввод;

— к входному штуцеру углового ввода подключается вспомогательный трубопровод *3*, намотанный на специальный вертлюг *4*, который подключен к пневматическому ресиверу *5*;

— на направляющие *6* устанавливают первую секцию забиваемой трубы, на заднем части которой вырезано окно *10* для выхода грунта;

— с помощью пневмомолота *8* трубу забивают в грунтовый массив на глубину не менее 5 – 8 диаметров трубы;

— резким открытием пневматического крана сжатый воздух подают в грунтовый керн по вспомогательному трубопроводу *3*, не останавливая работу пневмомолота. Если первая порция грунта не вышла из трубы (вследствие ее

разрушения при транспортировании), то с большой вероятностью это произойдет после отделения второй или третьей порции грунта;

— последние две операции повторяют до выхода переднего торца обсадной трубы в приемный котлован.

Возможность отделения керна и его транспортирования по трубопроводу сжатым воздухом при виброударном способе воздействия на трубу проверена на втором этапе экспериментов в процессе продавливания стальных трубчатых кожухов диаметром 630 мм в грунтовые массивы естественного сложения на реальном объекте. Процесс отделения керна осуществлялся при одновременном действии ударной нагрузки и давления воздуха. При формировании керна длиной от 1 до 1,5 м сжатый воздух подавался к насадке по вспомогательному трубопроводу *3* при сообщении его с магистралью, питающей пневмомолот. Давление воздуха в трубопроводе *3* и магистрали устанавливалось на уровне 0,3 – 0,4 МПа, что вызывало снижение ударной мощности и уменьшение скорости внедрения трубы. Такое комбинированное воздействие продолжалась от 30 до 60 с. Этого времени было достаточно для отделения керна от массива и перемещения его на некоторое расстояние, величина которого зависела от физико-механических свойств грунта. Движение керна самопроизвольно прекращалось, когда он в процессе движения по трубе начинал разрушаться. Это приводило к потере им 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 вспомогательный трубопровод. Давление в магистрали, питающей пневмомолот, повышалось до номинального значения, и при дальнейшем погружении трубы в ее внутреннюю полость поступала новая порция грунта, 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 окон *10*.

Характерная особенность транспортирования керна при внедрении трубы в слабосвязный грунт (легкая супесь) — быстрое разрушение. Однако транспортирование

керна при этом не прекращалось, а приобретало иной характер, аналогичный процессу пневмотранспортирования сыпучих материалов. Таким образом, значительная часть керна выбрасывалась наружу через окно в задней части трубы. В результате эксперимента труба была забита на длину 14 м без остановок на очистку от керна.

Критерием эффективности технологического процесса служила скорость погружения трубы, которая фиксировалась на каждые 10 см на протяжении всего погружения трубы. Результаты опытов отражены на рисунке 2.28.

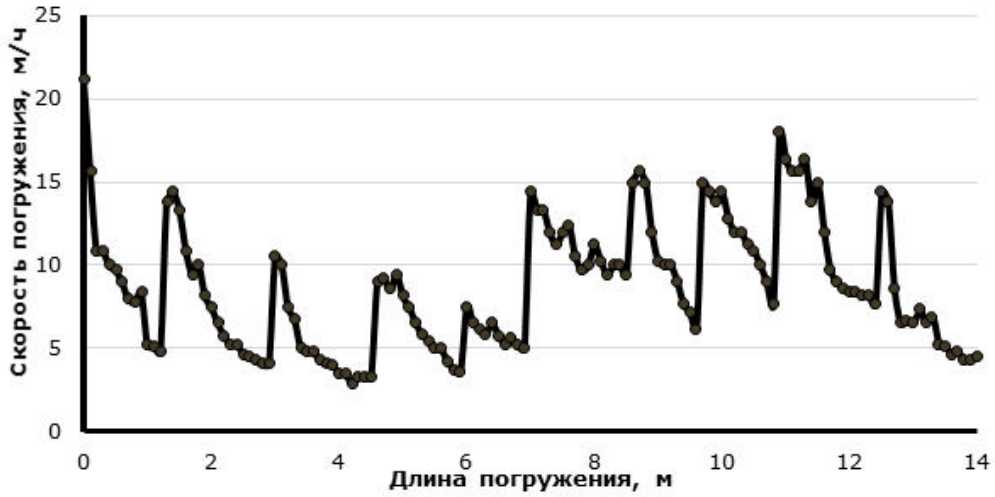


Рисунок 2.28 — Зависимость скорости погружения трубы диаметром 630 мм от длины внедрения в массив

Положительный эффект в виде увеличения скорости погружения после воздействия на керн сжатым воздухом, его отделения от массива и транспортирования наблюдался во всех случаях. Возрастание скорости и длительность сохранения этого эффекта изменялись в зависимости от физико-механических свойств грунтового массива.

Увеличение эффекта прироста скорости погружения после порционного удаления на отметке 7 м связано с тем, что отрыв порции керна выполнялся воздушно-водяной смесью. Искусственное увеличение влажности керна способствовало не только снижению сил трения в паре «труба – керн», но и реализовало смазку внутренней поверхности переувлажненным глинистым раствором. В результате следующие порции перемещались внутри трубы с меньшим сопротивлением и сохраняли свою целостность до выхода из разгрузочного окна. Следует также принимать во внимание,

что свойства массива, такие как естественная влажность, плотность и гранулометрический состав, могут меняться в широком диапазоне по длине бестраншейного перехода, а в техногенных грунтах не исключены негрунтовые включения в виде крупных камней или кусков металла, которые труба в случае попадания на них своим забойным концом вдавливает либо во внутреннюю полость трубы, либо во вмещающий массив. Эти факторы значительно усложняют анализ результатов исследования.

Для всестороннего изучения технологии ударного погружения трубы в массив с порционным удалением керна принято решение передать ее ряду организаций, занимающихся бестраншейной прокладкой коммуникаций с использованием пневмомолотов. Результаты практического применения инновационной технологии представлены в виде актов по нескольким объектам (*Приложения Б* и *В*), а также наглядно продемонстрированы в видеороликах, размещенных в свободном доступе в сети «интернет» (https://www.youtube.com/watch?v=CaJooAEAfI0, 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 в грунтах с различными влажностью и содержанием глиняных частиц. На рисунке 2.29 представлены стоп-кадры выхода грунта из внутренней полости трубы, наглядно иллюстрирующие применимость данной технологии в вязких водонасыщенных глинах и легких сухих супесях. Очистка реализовывалась в процессе погружения и во время технологического перерыва для наращивания секций погружаемой трубы после снятия насадки и пневмомолота.

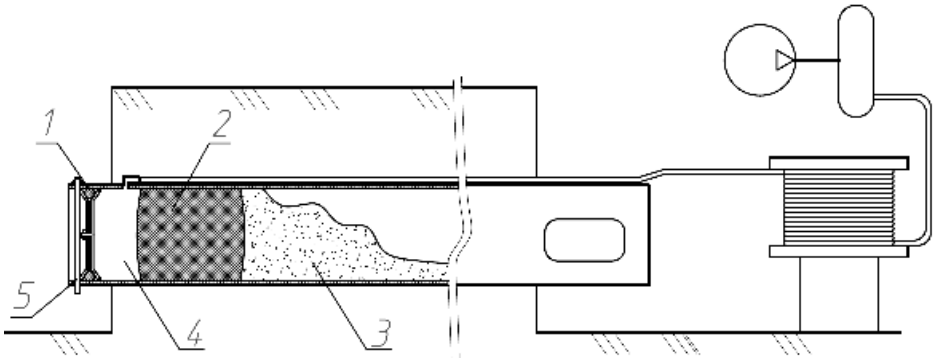
а *б*

а — водонасыщенная глина; *б* — сухая супесь

Рисунок 2.29 — Процесс выхода грунтового керна из погружаемой трубы

Помимо положительных результатов относительно области применения в различных массивах и роста скорости внедрения трубы после каждой операции очистки выявлены факторы, затрудняющие работу и требующие дальнейших исследований. Прежде всего сложности вызывает выбор рационального шага очистки при известных размерах погружаемой трубы и энергии единичного удара пневмомолота. Известны случаи когда порции керна не выходили из трубы, рассыпаясь в процессе движения. Также зафиксированы случаи переуплотнения керна, при которых отделить порции магистральным давлением компрессора было невозможно. Решению этих вопросов может помочь разработка приближенной теории процессов, протекающих при формировании керна, его отрыве и последующем транспортировании.

С технологической точки зрения важно, чтобы после проходки скважины на всю длину и выхода забойного конца трубы в приемный котлован ее внутренняя полость была полностью освобождена от керна. Если остатки керна невозможно удалить вручную, то можно применить известный способ, предусматривающий использования заглушки *1* и поршня *2*, как это изображено на рисунке 2.30 [73].



1 — заглушка; *2* — поршень; *3* — остатки грунта; *4* — рабочая камера; *5* — штифт для фиксации заглушки

Рисунок 2.30 — Удаление остатков керна из внутренней полости трубы

При этом подача сжатого воздуха может осуществляться по вспомогательному трубопроводу без необходимости соединения рабочего и приемного котлована шлангами по дневной поверхности.

2.4 Выводы по Главе 2

В рамках проведенных лабораторных, полигонных и производственных экспериментов установлено:

1) независимо от диаметра трубы и варианта исполнения ударной машины скорость забивки в супесь выше, чем в суглинок;

2) промежуточная чистка от порции песчаного керна заметнее влияет на дальнейшую скорость погружения трубы, чем при очистке от глинистой порции;

3) виброударная нагрузка, в отличие от статической, приводит к снижению сил сопротивления страгиванию порции керна, причем эффект тем сильнее, чем меньше глинистых частиц в породе;

4) предложенная технологическая схема порционного удаления породного керна в процессе виброударного погружения трубы в массив жизнеспособна и перспективна, поскольку не требует дорогостоящего оборудования, ускоряет процесс удаления керна и позволяет выполнять эту операцию без прерывания процесса погружения трубы.

ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И УДАЛЕНИЯ КЕРНА ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ПОГРУЖЕНИИ ТРУБЫ В МАССИВ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

При внедрении трубы в массив осадочных горных пород ее открытый торец, как кольцевой нож, вырезает из массива цилиндр, который попадает внутрь трубы. При продвижении трубы вглубь массива силы трения, действующие между попавшим в трубу керном и внутренними стенками трубы, стремятся сдвинуть этот цилиндр обратно к забою, что приводит к постепенному уплотнению породы внутри трубы. Одновременно с увеличением плотности происходит рост давления породы на внутреннюю поверхность трубы, что, в свою очередь, увеличивает силу сопротивления перемещению керна по трубе и в конечном счете приводит к формированию пробки [35, 86].

Образование пробки является результатом совместного действия многих факторов: исходное состояние породного массива; глубина погружения и диаметра трубы; конструкция ножа, которым снабжается ее передний торец; способ погружения и др.

Экспериментальные исследования, проведенные в различных условиях, свидетельствуют о том, что в глинистых грунтах полутвердой и тугопластичной консистенции длина керна во внутренней полости трубы значительно меньше глубины ее погружения [30, 118].

Влияние способа погружения на свойства керна в различных условиях рассмотрено в [121, 124]. Специфическая особенность глинистых грунтов ― их способность при механическом воздействии, например, вибрации, разупрочняться и приобретать свойства вязкой жидкости. В период вибропогружения труба все время обволакивается свободной водой, появляющейся в результате трансформации физически связанной воды, находящейся в глине. За счет этого снимается трение по поверхности контакта трубы с массивом. После прекращении вибрационного воздействия сразу же начинается тиксотропное упрочнение массива, т. е. он возвращается к своим исходным свойствам [124]. Иные условия будут при погру-

жении труб молотами и другими более низкочастотными механизмами, производящими в минуту 5 – 15 ударов. В этом случае массив менее подвержен тиксотропному разупрочнению. Поэтому при вибропогружении труб в массив, обладающих значительной тиксотропией, длина керна может оказаться больше, чем при забивке, так как массив осадочных пород при вибрационных воздействиях, разжижаясь, без сопротивления будет входить во внутреннюю полость трубы.

В [35, 86] исследовалась плотности керна. Ценные эксперименты в этой области проведены К. Сечи [130]. Исследовалось образование пробки при погружении трубчатых моделей в мелкозернистые пески. При этом измерялась пористость песка в различных сечениях керна, а полученные данные сравнивались с первоначальным значением пористости массива. Опыты показали, что при больших диаметрах в дальней от забоя части происходит уменьшение пористости не более чем на 6 %, а в призабойной зоне — более 7 %. При малых диаметрах снижение пористости достигает 25 %.

А. И. Прудентовым на основании натурных экспериментов, проведенных в супесях, получены результаты, соответствующие данным К. Сечи, а именно: средняя плотность керна с увеличением диаметра падает [118, 130].

Плотность и степень сформированности керна зависит и от глубины погружения трубы. При погружении трубы с меньшим диаметром глубина погружения может быть достаточной для формирования пробки с, а большим диаметром та же глубина — недостаточна. Как показали экспериментальные исследования, глубина погружения трубы, при которой образуется пробка, зависит от исходных условий массива [124]. Так, например, при забивке моделей труб в лоток с мелкозернистым песком эта глубина равна 40d, а в экспериментах, проведенных в лотках с глинистой пастой мягкопластичной консистенции, она составила лишь 24d [118]. В [121] показано, что при вибропогружении моделей труб в лоток с глиной тугопластичной консистенции пробка образуется при глубине погружения от 2,2 до 10d.

Как видно из вышеизложенного, процесс формирования керна является результатом влияния многих факторов, что затрудняет создание достоверного математического описания этого процесса.

Впервые расчетная модель процесса формирования керна была предложена в [86], где рассматривается равновесие элементарного слоя породы внутри трубы под действием приложенных к ней сил, определена длина керна внутри трубы, которая зависит от напряжения в массиве, диаметра трубы и трения между массивом и внутренней поверхностью трубы.

В дальнейшем этот вопрос рассматривался в [30], были получены формулы для высоты керна с учетом конструкций ножа и толщины стенок.

На основании работ, посвященных изучению формирования керна, можно сказать, что большинство исследований носит экспериментальный характер. Результаты излагаются в описательной форме, фиксируются как факт. Математическая обработка результатов, как правило, отсутствует. Использование их для построения расчетных моделей затруднено из-за отсутствия подробных сведений о массиве. При описании массива обычно ограничиваются качественной характеристикой, например, песок мелко- и среднезернистый, глина тугопластичная, мягкопластичная и т. п. В редких случаях приводятся физико-механические характеристики исходного массива.

Определение закономерностей формирования керна в привязке к геометрическим параметрам трубы и свойствам массива в натурных испытаниях осложнено многообразием грунтовых условий. Даже на одной площадке по длине прокладки трубы грунты по своим свойствам могут значительно отличаться друг от друга, что создает трудности для систематизации опытных данных и составления расчетных схем. Поэтому возникает необходимость изучения взаимодействия трубы с окружающей ее средой на математических моделях.

3.1 Теория движения открытой трубы с керном в массиве осадочных горных пород при продольном ударном воздействии

Вопросам внедрения полой цилиндрической трубы с открытым торцом в массив посвящены многие публикации [69, 130, 190]. Наличие керна внутри трубы со-

здает проблемы при оценке статического и динамического поведения трубы. Многие исследования в этой области сосредоточены на разработке модели динамического взаимодействия керна с трубой. Одной из первых была модель эквивалентной массы, в которой вес сегмента керна добавляется к весу соответствующего сегмента трубы [178]. Эта модель может учитывать влияние веса керна на динамическую реакцию трубы, но игнорирует динамическое взаимодействие между керном и трубой. В [181 – 183] керн моделируется как последовательность масс и пружин. В [195] керн рассматривается как серия горизонтальных дисков. Причем на каждый диск действуют вертикальные напряжения сверху и снизу и напряжение сдвига на стенке трубы, пропорциональное вертикальному напряжению в керне. В результате в [195] получено и решено уравнение вертикального равновесия слоя керна, в котором учтен эффективный удельный вес керна. Модель Фойгта используется в [164]. Эта модель имитирует контактное взаимодействие керна и трубы, применяя линейную пружину и демпфер, соединенные параллельно. Модель Фойгта может учитывать динамическое взаимодействие керна и трубы, но не может отражать влияние веса керна на динамический отклик трубы. Кроме того, эта модель не описывает демпфирующий эффект волны напряжения, распространяющейся в керне. В [200] предлагается модель динамического взаимодействия керна и трубы, в которой движение каждого слоя керна описывается как движение дополнительной массы, связанной пружиной и демпфером с соответствующим сечением трубы. В [201] представлен аналитический метод для вычисления трехмерной реакции трубных свай большого диаметра, содержащих внутри разрушенную породу и подвергнутых динамической точечной нагрузке. В [201] распространением продольных возмущений в керне пренебрегается, а движение керна описывается как перемещение бесконечно тонких слоев, контактирующих с трубой. В [11, 13] использованы различные модели трубы и керна. Их взаимодействие описывается законом сухого трения Кулона. Показано, что можно использовать более простую модель для описания движения керна, в которой не учитывается распространение радиальных волн. Влия-

ние продольных волн в трубе и керне можно также не рассматривать, если длительность импульса существенно меньше времени пробега продольной волны в трубе туда и обратно.

В этом параграфе для теоретического исследования горизонтального процесса ударного погружения в массив осадочных горных пород открытой трубы, содержащей керн, используются одномерные волновые уравнения, описывающие продольное движение трубы и керна. Сопротивление массива, находящегося перед трубой, учитывается вязкими условиями на торце трубы. Для решения волновых уравнений применяется конечно-разностный метод.

3.1.1 Постановка задачи и вывод уравнений движения

Рассматривается погружение в массив открытой трубы L_1. Процесс предполагается осесимметричным. Внутри трубы содержится керн L_2. Труба погружена в массив на глубину L_0. Схема постановки задачи представлена на рисунке 3.1.

По торцу трубы в сечении $z = 0$ производятся множественные продольные удары массой M_0, движущейся со скоростью V_0.

Движение трубы описано линейными уравнениями (3.1) классической теории тонких оболочек Кирхгофа – Лява [102]:

$$\begin{aligned}
&\rho_1 S_1 \ddot{w} = \frac{E_1 S_1}{1-\nu_1^2}\left[-\frac{w}{R^2} - \frac{\nu_1}{R}\frac{\partial u}{\partial z}\right] - 2\pi R_2 P_2 + 2\pi R_1 P_1,\\
&\rho_1 S_1 \ddot{u} = \frac{E_1 S_1}{1-\nu_1^2}\left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\nu_1}{R}\frac{\partial w}{\partial z}\right] + 2\pi R_2 \eta_2 \mu P_2 - 2\pi R_1 \eta_1 \mu P_1,\\
&\eta_2 = \operatorname{sign}(\dot{u} - \dot{\mathrm{v}}_z), \quad \eta_1 = \operatorname{sign}(\dot{u}).
\end{aligned} \tag{3.1}$$

где u, w — продольные и радиальные перемещения трубы; z — продольная координата; ρ_1, E_1 и ν_1 — плотность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона трубы; S_1 — площадь поперечного сечения трубы; $R = (R_1 + R_2)/2$, R_1, R_2 — наружный и внутренний радиусы трубы; P_1 — радиальное давление вмещающего

массива на трубу; P_2 — радиальное давление керна на внутреннюю поверхность трубы; v_z — продольное перемещение керна. Взаимодействие трубы и керна описывается законом сухого трения Кулона: сила трения пропорциональна знаку относительной скорости трубы и керна, коэффициенту трения μ и радиальному напряжению керна P_2. Аналогично описывается взаимодействие трубы и вмещающего массива: сила трения пропорциональна знаку скорости трубы, коэффициенту трения μ и радиальному напряжению вмещающего массива P_1. Предполагается, что вмещающий массив недеформируемый.

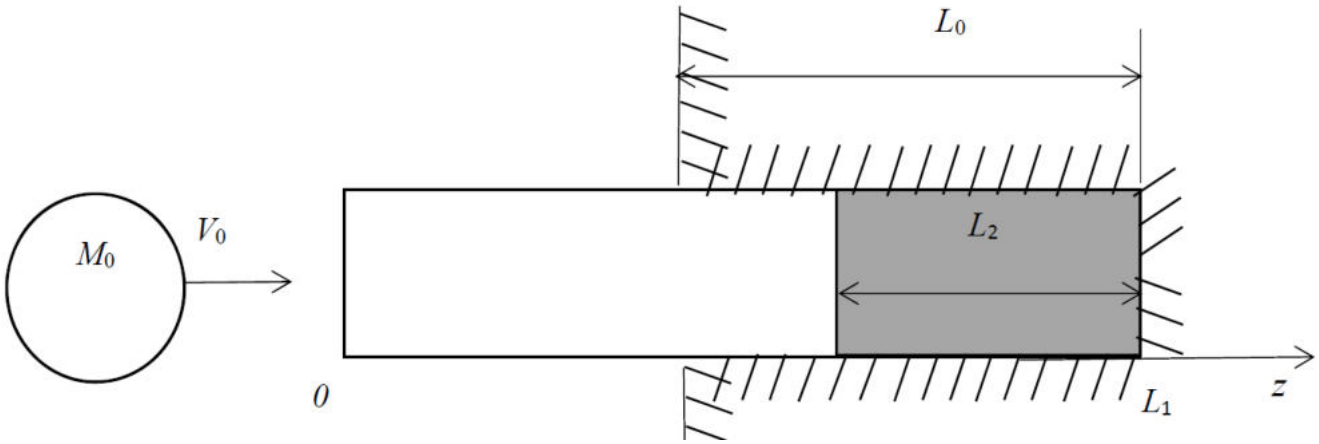


Рисунок 3.1 — Постановка задачи

Осесимметричное движение керна описывается двумерными волновыми уравнениями (3.2), которые в цилиндрической системе координат (r, z) относительно перемещений имеют вид [120]

$$\begin{aligned}\rho_2 \ddot{\mathrm{v}}_r &= (\lambda_2 + 2G_2)\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\partial (r\mathrm{v}_r)}{r\partial r}\right] + G_2\frac{\partial^2 \mathrm{v}_r}{\partial z^2} + (\lambda_2 + G_2)\frac{\partial^2 \mathrm{v}_z}{\partial z \partial r},\\ \rho_2 \ddot{\mathrm{v}}_z &= (\lambda_2 + 2G_2)\frac{\partial^2 \mathrm{v}_z}{\partial z^2} + (\lambda_2 + G_2)\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\partial (r\mathrm{v}_r)}{r\partial r}\right] + G_2\frac{\partial}{r\partial r}\left[r\frac{\partial \mathrm{v}_z}{\partial r}\right],\end{aligned} \tag{3.2}$$

где v_r — радиальное перемещение керна; λ_2, G_2 — константы Ламе для керна; ρ_2 — плотность керна. Предполагаем, что на границе контакта трубы и керна выполняется условие равенства (3.3) радиальных перемещений трубы и керна:

$$\mathrm{v}_r\big|_{r=R_2} = w. \tag{3.3}$$

Первая гипотеза (3.4): предположим, что радиальные перемещения в керне пропорциональны радиусу

$$\mathrm{v}_r \approx \frac{r}{R_2} w\,. \tag{3.4}$$

Вторая гипотеза (3.5): предположим, что продольные перемещения в керне не зависят от радиуса. С учетом (3.4)

$$\rho_2 \ddot{\mathrm{v}}_z = (\lambda_2 + 2G_2)\frac{\partial^2 \mathrm{v}_z}{\partial z^2} + (\lambda_2 + G_2)\frac{2}{R_2}\frac{\partial w}{\partial z}\,. \tag{3.5}$$

Третья гипотеза (3.6): предположим, что для радиальных перемещений трубы реализуются статические уравнения равновесия

$$\frac{E_1 S_1}{1-\nu_1^2}\left[-\frac{w}{R_2^2} - \frac{\nu_1}{R_2}\frac{\partial u}{\partial z}\right] - 2\pi R_2 P_2 + 2\pi R_1 P_1 = 0\,. \tag{3.6}$$

С учетом (3.4) вычислим радиальное давление керна на трубу по (3.7):

$$P_2 = \sigma_{rr}\big|_{r=R_2} - \sigma_r^0 = \left[\lambda_2\left(\frac{\mathrm{v}_r}{r} + \frac{\partial \mathrm{v}_z}{\partial z}\right) + (\lambda_2 + 2G_2)\frac{\partial \mathrm{v}_r}{\partial r}\right]\Bigg|_{r=R_2} - \sigma_r^0 = \lambda_2\frac{\partial \mathrm{v}_z}{\partial z} + 2(G_2 + \lambda_2)\frac{w}{R_2} - \sigma_r^0. \tag{3.7}$$

где $\sigma_r^0 > 0$ — начальное радиальное напряжение в керне. Подставляя (3.7) в (3.6), определяются радиальное перемещение трубы из зависимости (3.8):

$$\frac{w}{R_2} = \frac{R_2(1-\nu_1^2)}{E_1 h_1 (1+\beta)}\left[-\frac{\nu_1}{R_2}\frac{\partial u}{\partial z}\frac{E_1 h_1}{1-\nu_1^2} - \lambda_2\frac{\partial v_z}{\partial z} + \sigma_r^0\right], \tag{3.8}$$

где $\beta = \dfrac{2(G_2 + \lambda_2)(1-\nu_1^2)R_2}{E_1 h_1}$; $h_1 = R_1 - R_2$ — толщина стенки трубы.

Подставляя (3.8) в (3.7), определяется давление керна на трубу по (3.9):

$$P_2 = \frac{1}{(1+\beta)}\left\{\frac{\rho_2 c_2^2}{(1-\nu_2)}\left(\nu_2\frac{\partial \mathrm{v}_z}{\partial z} - \nu_1\frac{\partial u}{\partial z}\right) - \sigma_r^0\right\}. \tag{3.9}$$

где ν_2 — коэффициент Пуассона керна.

Из (3.1), (3.5), (3.8) и (3.9), предполагая β малым, получаем уравнения движения трубы и керна (3.10), в которых учитывается изменение радиального напряжения в результате бокового взаимодействия трубы и керна при продольном нагружении:

$$\ddot{u} = c_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{2\pi R_2 \eta\mu}{\rho_1 S_1} P_2 H(L_1 - \mathrm{z}) H(\mathrm{z} - L_1 + L_2) - \frac{2\pi R_1 \eta\mu}{\rho_1 S_1} P_1 H(L_1 - \mathrm{z}) H(\mathrm{z} - L_1 + L_0),$$
$$\ddot{\mathrm{v}}_z = c_2^2 \frac{\partial^2 \mathrm{v}_z}{\partial z^2} + \frac{2\pi R_2 \eta\mu}{\rho_2 S_2} P_2 H(L_1 - \mathrm{z}) H(\mathrm{z} - L_1 + L_2), \tag{3.10}$$

$$P_2 = \frac{\rho_2 c_2^2}{(1-\nu_2)} \left(\nu_2 \frac{\partial \mathrm{v}_z}{\partial z} - \nu_1 \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \sigma_r^0,$$

где c_1, c_2 — продольные скорости волн в трубе и керне соответственно; S_2 — площадь поперечного сечения керна. В уравнение для продольных колебаний керна добавлена сила трения, действующая между трубой и керном на интервале $L_1 - L_2 \le z \le L_1$. В уравнение для продольных колебаний трубы добавлена сила трения, действующая на внешней стороне трубы на интервале $L_1 - L_0 \le \mathrm{z} \le L_1$.

Начальные условия для трубы (3.11) соответствуют процессу соударения жесткого тела массой M_0, движущегося со скоростью V_0, и неподвижной трубы:

$$u(z,0) = 0, \quad \dot{u}(z,0) = \begin{cases} V_0 & \text{при} \quad z = 0, \\ 0 & \text{при} \quad z > 0. \end{cases} \tag{3.11}$$

Начальные условия для керна (3.12) нулевые:

$$\mathrm{v}_z(z,0) = 0, \quad \dot{\mathrm{v}}_z(z,0) = 0. \tag{3.12}$$

Изменение граничных условий для трубы в ударном сечении $z = 0$ обусловлено наличием неудерживающей связи между ударником и трубой. До тех пор, пока продольные напряжения в трубе являются сжимающими (3.13), сила, действующая со стороны ударной массы, равна усилию, возникающему на торце трубы:

$$E_1 S_1 \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = M_0 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial z^2}, \quad \text{если} \quad \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} < 0. \tag{3.13}$$

Как только продольные напряжения в сечении $z = 0$ становятся растягивающими, полагаем, что начиная с этого момента времени на торце трубы $z = 0$ граничные условия (3.14) соответствуют свободной границе:

$$E_1 S_1 \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = 0. \tag{3.14}$$

На левом торце керна ($z = L_1 - L_2$) граничные условия (3.15) также соответствуют свободной границе:

$$E_2 S_2 \frac{\partial \mathrm{v}_z(L_1 - L_2, t)}{\partial z} = 0, \tag{3.15}$$

где E_2 — модуль Юнга керна.

Граничные условия для трубы в сечении $z = L_1$ по формуле (3.16):

$$E_1(S_1 + S_2)\frac{\partial u_1(L_1, t)}{\partial z} + K u_1(L_1, t) + \frac{E_2(S_1 + S_2)}{c_2}\frac{\partial \mathrm{v}_z(L_1, t)}{\partial t} = 0, \quad K = \alpha \frac{4G_2 R_1}{1 - \nu_2}, \tag{3.16}$$

где K — статический коэффициент жесткости кольцевого основания радиуса R_1, опирающегося на полупространство; α — безразмерный коэффициент, который зависит от отношения ширины кольца к его внешнему радиусу [197].

Для керна в сечении $z = L_1$ предполагается наличие вязкой неотражающей границы по (3.17):

$$\frac{\partial \mathrm{v}_z(L_1, t)}{\partial z} + \frac{1}{c_2}\frac{\partial \mathrm{v}_z(L_1, t)}{\partial t} = 0. \tag{3.17}$$

3.1.2 Результаты численных расчетов

Система уравнений (3.10) с начальными условиями (3.11), (3.12) и граничными условиями (3.13)–(3.17) решалась численно методом конечных разностей по явной схеме типа «крест». Особенности конечно-разностной аппроксимации сухого взаимодействия трубы и керна описаны в [12, 13].

На рисунках 3.2–3.7 представлены результаты численных расчетов перемещения трубы и скорости перемещения трубы при единичном воздействии ударника массой $M_0 = 500$ кг, движущегося со скоростью $V_0 = 0.004$ м/мс. Параметры трубы и грунта следующие: $L_0 = 1$ м, $L_1 = 14$ м, $L_2 = 1$ м, $\rho_1 = 7800$ кг/м^3, $\rho_2 = 1800$ кг/м^3, $E_1 = 195000$ МПа, $E_2 = 600$ МПа, $\nu_1 = 0{,}3$, $\nu_2 = 0{,}2$, $h_1 = 0{,}01$ м, $\mu = 0{,}33$, $R_2 = 0{,}305$ м, $\sigma_r^1 = 0{,}1$ МПа, $\sigma_r^0 = 0{,}1$ МПа, $\Delta t = 0{,}002$ мс. Здесь Δt — шаг разностной схемы по времени. Шаг по пространству определялся по формуле $\Delta z = c_1 \Delta t$. Эти параметры в дальнейшем приняты в качестве базовых.

На рисунке 3.2 приведены результаты численных расчетов в сечении $z = 0$

по уравнениям (3.9), в которых не учитывалось изменение радиального напряжения в результате бокового взаимодействия трубы и керна, т. е. $P_2 = -\sigma_r^0$. На рисунке 3.2*а* представлены перемещения трубы, рассчитанные при различных значениях α. Скорости перемещения трубы приведены на рисунках 3.2*б* ($\alpha = 0$) и 3.2*в* ($\alpha = 0{,}3$). Остальные параметры взяты из базовых. На рисунке 3.2 видны отражения волн от торца оболочки, приходящие в сечение $z = 0$ через интервал времени, равный $2L_1/c_1$. Анализ показывает, что с ростом коэффициента α (увеличением сопротивления массива, находящегося перед трубой) амплитуды перемещений и скорости перемещений трубы падают, а при $\alpha > 0{,}1$ труба движется в обратную сторону.

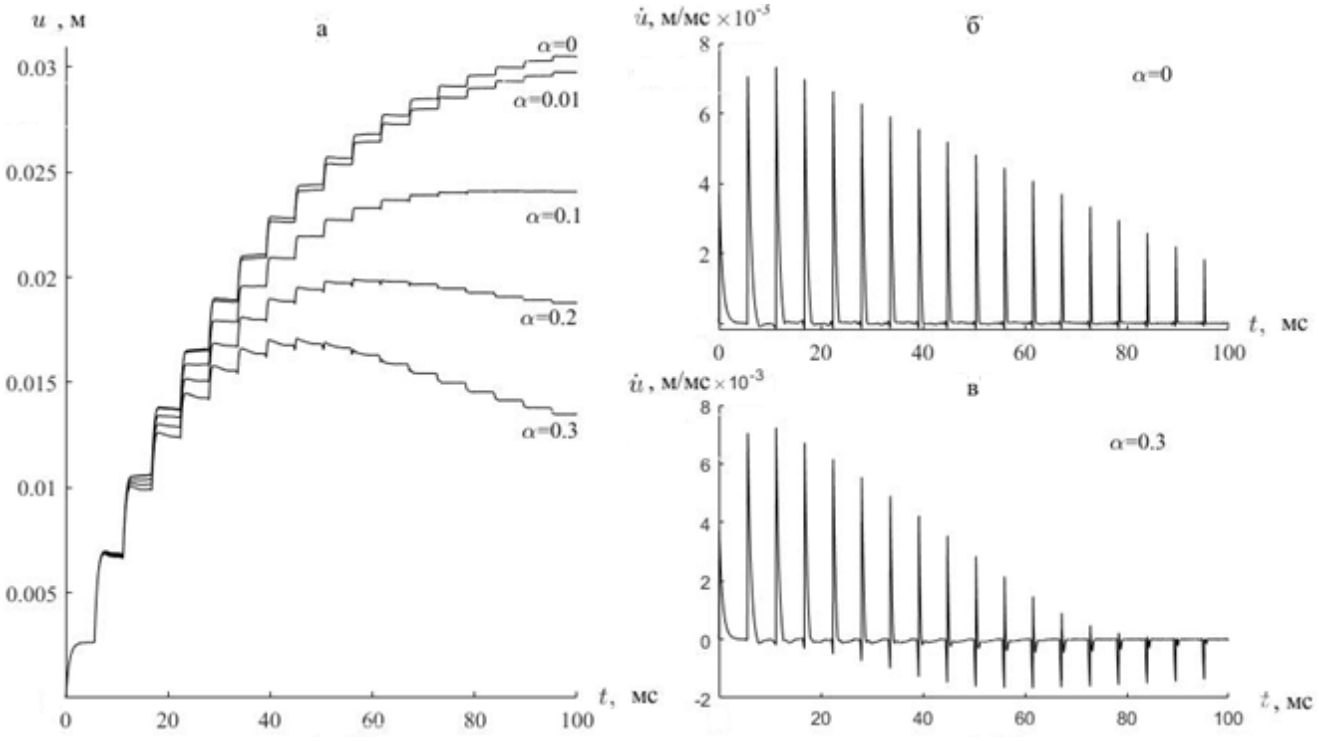


Рисунок 3.2 — Перемещения трубы и скорости перемещений, рассчитанные в сечении $z = 0$ при $P_2 = -\sigma_r^0$ и различных значениях коэффициента α:

а — перемещения трубы; *б* — скорость трубы при α = 0;

в — скорость трубы при α = 0,3

На рисунках 3.3 – 3.8 представлены результаты численных расчетов, в которых учитывалось изменение радиального напряжения в результате бокового взаимодействия трубы и керна по (3.10).

На рисунке 3.3 изображены перемещения трубы, рассчитанные при базовых параметрах задачи. Сравнение рисунков 3.2 и 3.3 показывает, что учет изменения радиального напряжения в результате бокового взаимодействия трубы и керна приводит к тому, что перемещение трубы уменьшается почти вдвое, кроме того, снижается отскок трубы в обратную сторону, что больше соответствует физическому смыслу исследуемой задачи. На рисунках 3.2 и 3.3 видно, что учет сухого трения между трубой и внешним и внутренним грунтом приводит к эффекту демпфирования волны напряжения, распространяющейся в трубе и керне.

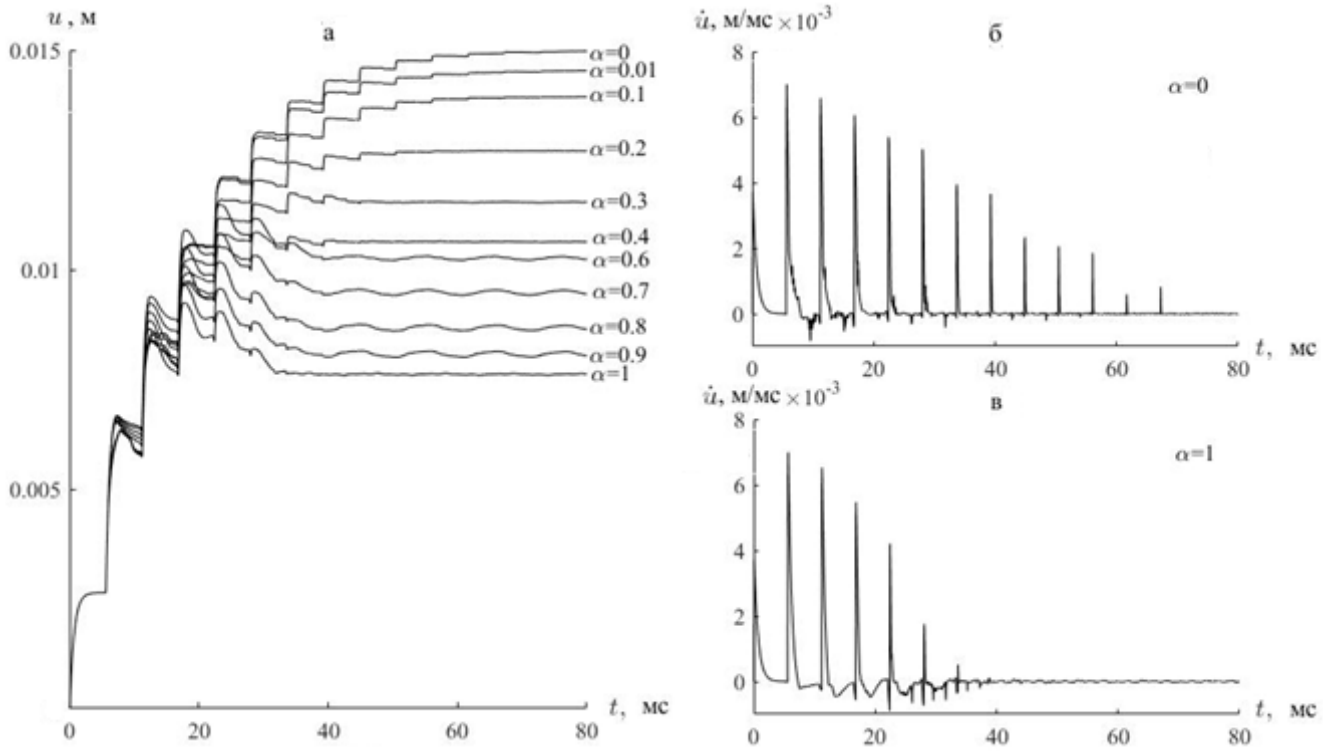


Рисунок 3.3 — Перемещения трубы и скорости перемещений, рассчитанные в сечении $z = 0$ при $P_2 \neq -\sigma_r^0$ и различных значениях коэффициента α:

а — перемещения трубы; *б* — скорость трубы при $\alpha = 0$;

в — скорость трубы при $\alpha = 1$

На рисунке 3.4 представлены результаты численных расчетов, проведенных при различных значениях радиального начального напряжения массива на внутренней и внешней поверхности трубы: $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0$ — *кривые 1*; $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}1$ МПа — *кривые 2*; $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}2$ МПа — *кривые 3*; $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}3$ МПа — *кривые 4*; $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}4$ МПа — *кривые 5*; $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}5$ МПа — *кривые 6*;

$\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 1$ МПа — *кривые 7*; $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 2$ МПа — *кривые 8*. Остальные параметры базовые. Штриховые кривые соответствует значению $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0$, сплошные кривые — $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 \neq 0$. Анализ графиков показывает, что нет монотонной зависимости остаточного перемещения трубы от амплитуды σ_r^0, σ_r^1. С ростом начальных радиальных напряжений массива до некоторого значения, своего для каждого значения α, наблюдается рост остаточных перемещений, а с ростом величины $\sigma_r^0 = \sigma_r^1$ перемещения трубы падают. При больших значениях начальных радиальных напряжений ($\sigma_r^0 = \sigma_r^1 \geq 1$) амплитуда перемещений трубы практически не зависит от коэффициента α при действии одиночного удара и малых значениях времени.

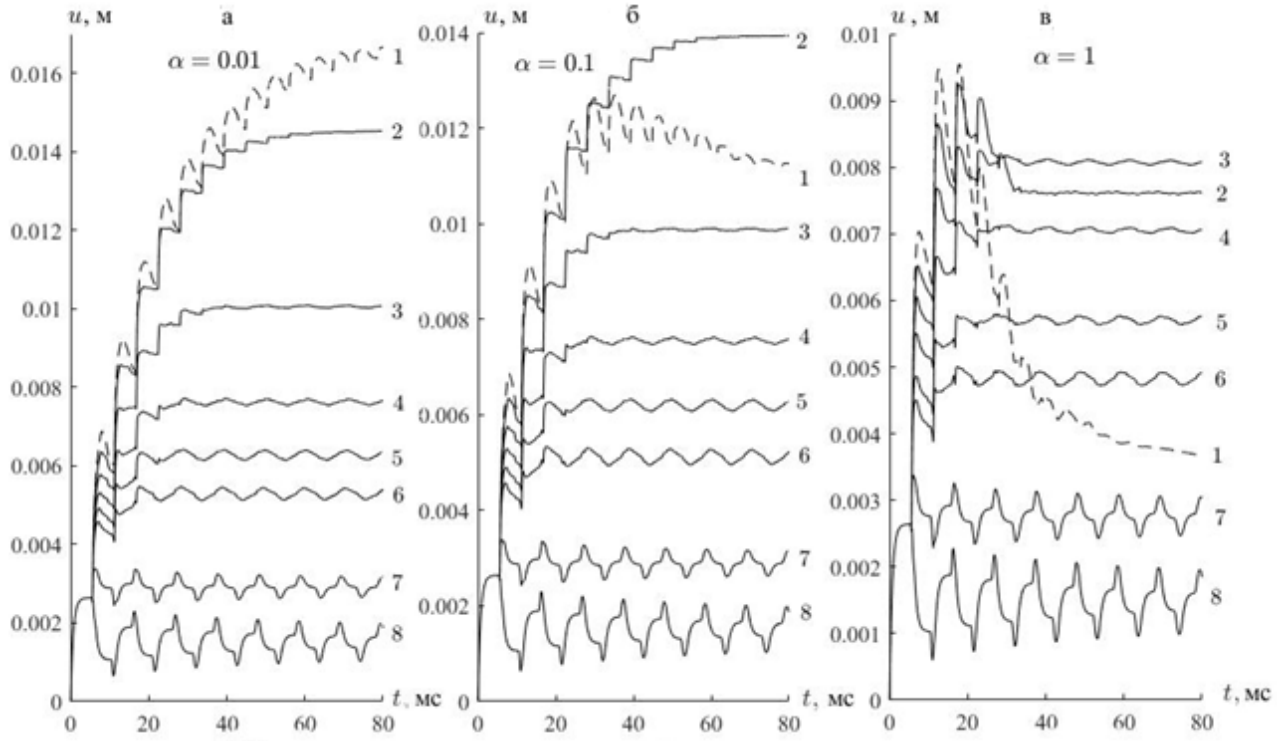


Рисунок 3.4 — Перемещения трубы, рассчитанные в сечении $z = 0$ при различных значениях коэффициента α и различных значениях σ_r^0, σ_r^1:
а — $\alpha = 0{,}01$; *б* — $\alpha = 0{,}1$; *в* — $\alpha = 1$

На рисунке 3.5 представлены результаты численных расчетов перемещения трубы, проведенных при $\alpha = 1$ и различных значениях длины керна L_2. Глубина погружения трубы во внешний массив полагалась равной длине керна: $L_0 = L_2$. Начальные радиальные напряжения имели значения: $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}5$ МПа. Остальные параметры базовые. Видно, что ударяемый торец трубы осциллирует

относительно некоторого среднего значения, которое уменьшается с ростом длины керна. Перемещение противоположного торца трубы достаточно быстро выходит на постоянное значение, которое также уменьшается с ростом длины керна. Частота осцилляций среднего сечения трубы выше, чем для сечения $z = 0$.

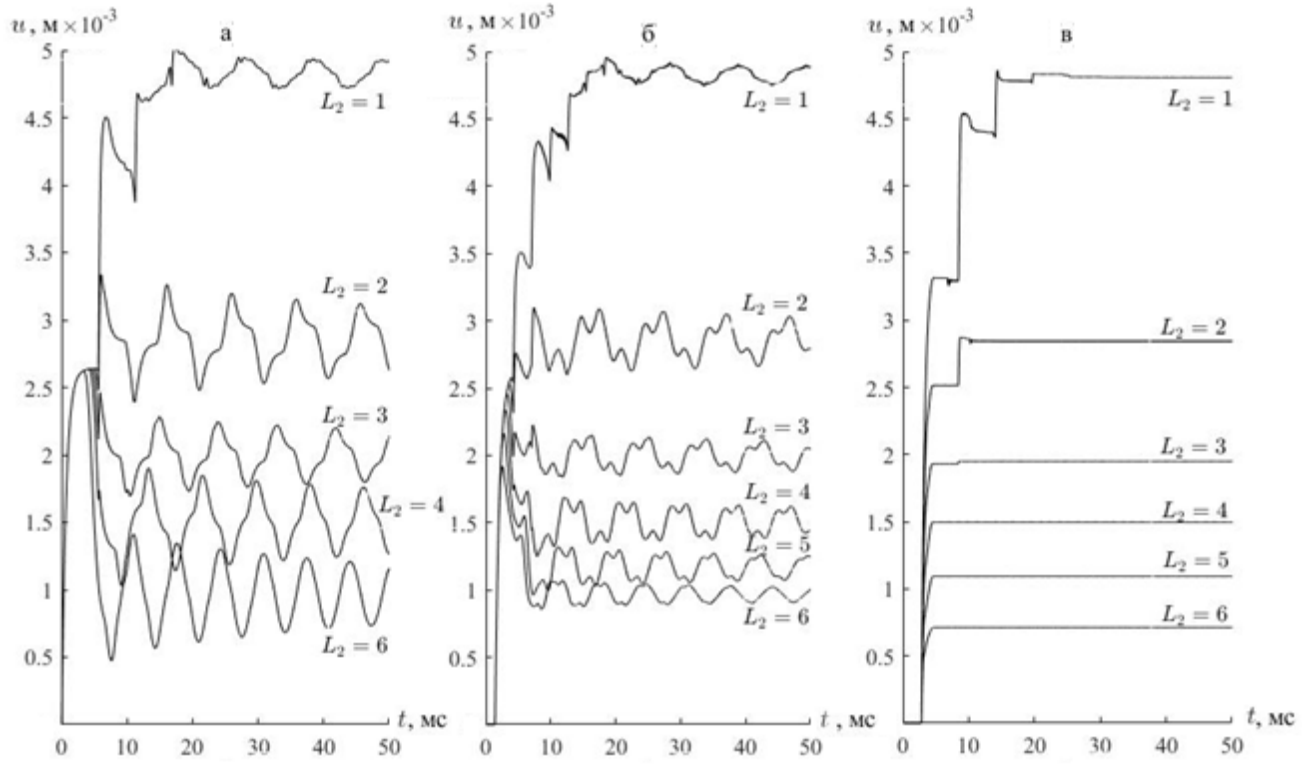


Рисунок 3.5 — Перемещения трубы, рассчитанные в трех сечениях трубы при различных значениях длины керна и $L_0 = L_2$: *а* — $z = 0$; *б* — $z = 7$ м; *в* — $z = 14$ м

На рисунке 3.6 представлены результаты численных расчетов перемещения трубы в сечении $z = 0$, проведенных при $\alpha = 0{,}1$, $\sigma_r^1 = 0$ и различных значениях начального радиального напряжения массива на внутренней поверхности трубы: $\sigma_r^0 = 0$ — *кривая 1*; $\sigma_r^0 = 0{,}1$ МПа — *кривая 2*; $\sigma_r^0 = 0{,}2$ МПа — *кривая 3*; $\sigma_r^0 = 0{,}3$ МПа — *кривая 4*; $\sigma_r^0 = 0{,}4$ МПа — *кривая 5*; $\sigma_r^0 = 0{,}5$ МПа — *кривая 6*; $\sigma_r^0 = 1$ МПа — *кривая 7*; $\sigma_r^0 = 2$ МПа — *кривая 8*. Остальные параметры базовые. Штриховые кривые соответствует значению $\sigma_r^0 = 0$, сплошные кривые — $\sigma_r^0 \neq 0$. Сравнение кривых на рисунках 3.4*б* и 3.6 показывает, что учет сухого трения внешней среды и трубы приводит к понижению остаточных перемещений трубы. В остальном качественное поведение перемещений трубы при различных значениях начального радиального напряжения внутри керна такое же, как и при учете сухого трения на внешней стороне трубы.

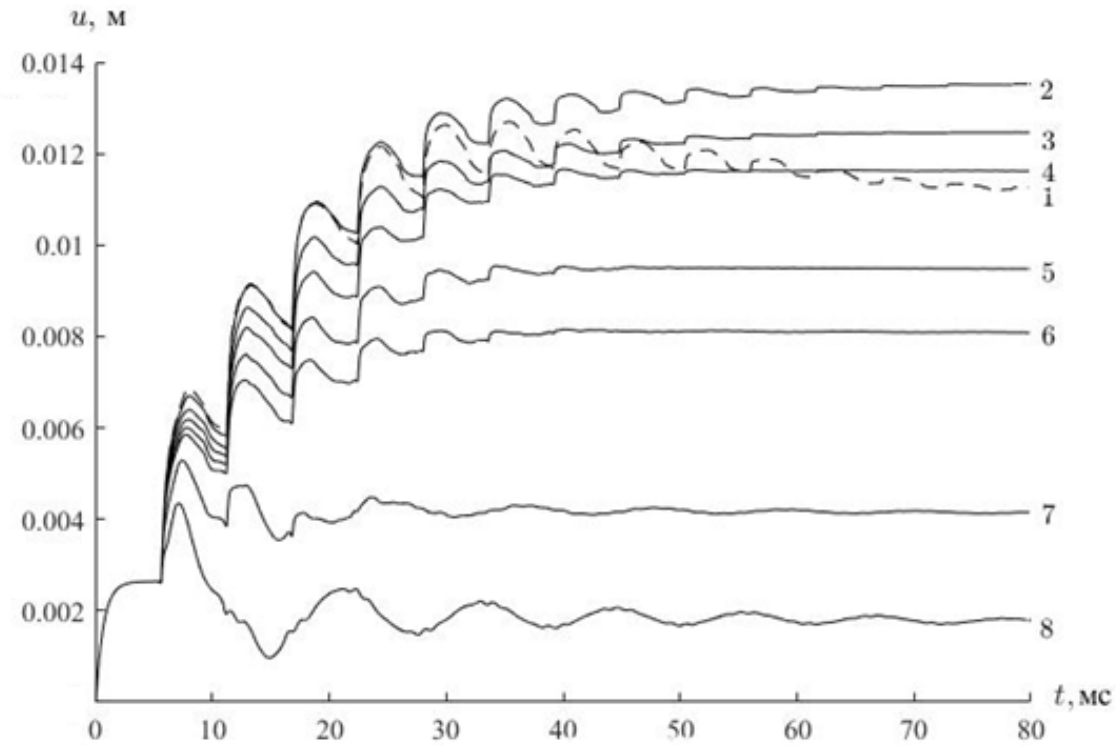


Рисунок 3.6 — Перемещение трубы, рассчитанное при $\alpha = 0{,}1$, $\sigma_r^1 = 0$ и различных значениях σ_r^0

На рисунке 3.7 представлены результаты численных расчетов перемещения трубы в сечении $z = 0$, проведенных при $\alpha = 0{,}1$, $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}5$ МПа и различных значениях модуля Юнга керна: $E_2 = 600$ МПа — *кривые 1*; $E_2 = 500$ МПа — *кривые 2*; $E_2 = 400$ МПа — *кривые 3*; $E_2 = 100$ МПа — *кривые 4*. Остальные параметры взяты из базовых. Сравнение кривых на рисунке 3.7 показывает, что рост модуля Юнга керна ведет к понижению остаточных перемещений трубы.

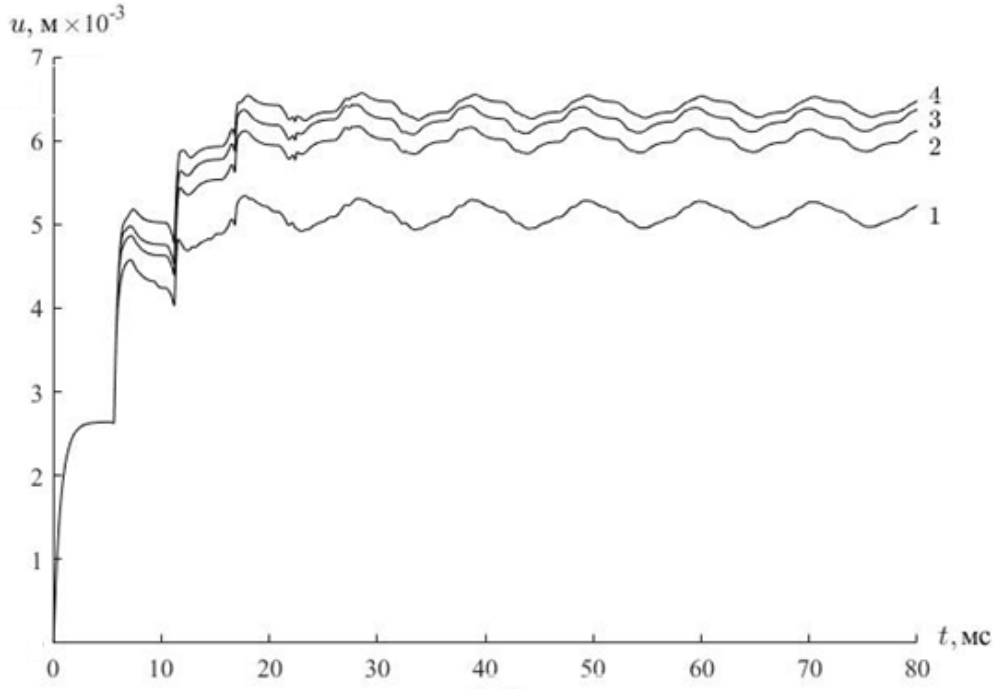


Рисунок 3.7 — Перемещение трубы, рассчитанное при $\alpha = 0{,}1$, $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}5$ МПа и различных значениях модуля Юнга керна

На рисунке 3.8 представлены результаты численных расчетов перемещения трубы в сечении $z = 0$ при множественном воздействии ударника массой $M_0 = 500$ кг, движущегося со скоростью $V_0 = 0{,}004$ м/мс. Частота ударов 2.8 Гц, что соответствует интервалу между ударами: $t_* = 357$ мс. Кривые перемещения рассчитаны при различных значениях параметра α и вариации значений радиального начального напряжения массива на внутренней и внешней поверхности трубы: рисунок 3.8*а* — $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}1$ МПа ($\alpha = 0{,}0016$ — *кривая 1*; $\alpha = 0{,}004$ — *кривая 2*; $\alpha = 0{,}01$ — *кривая 3*; $\alpha = 0{,}02$ — *кривая 4*); рисунок 3.8*б* — $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}5$ МПа ($\alpha = 0{,}004$ — *кривая 1*; $\alpha = 0{,}01$ — *кривая 2*; $\alpha = 0{,}02$ — *кривая 3*; $\alpha = 0{,}04$ — *кривая 4*); рисунок 3.8*в* — $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 2$ МПа ($\alpha = 0{,}01$ — *кривая 1*; $\alpha = 0{,}02$ — *кривая 2*; $\alpha = 0{,}03$ — *кривая 3*; $\alpha = 0{,}04$ — *кривая 4*). Остальные параметры базовые.

Анализ графиков показывает, что с увеличением жесткости основания массива *K* и радиального начального напряжения массива на внутренней и внешней поверхности трубы амплитуда остаточных перемещений трубы падает.

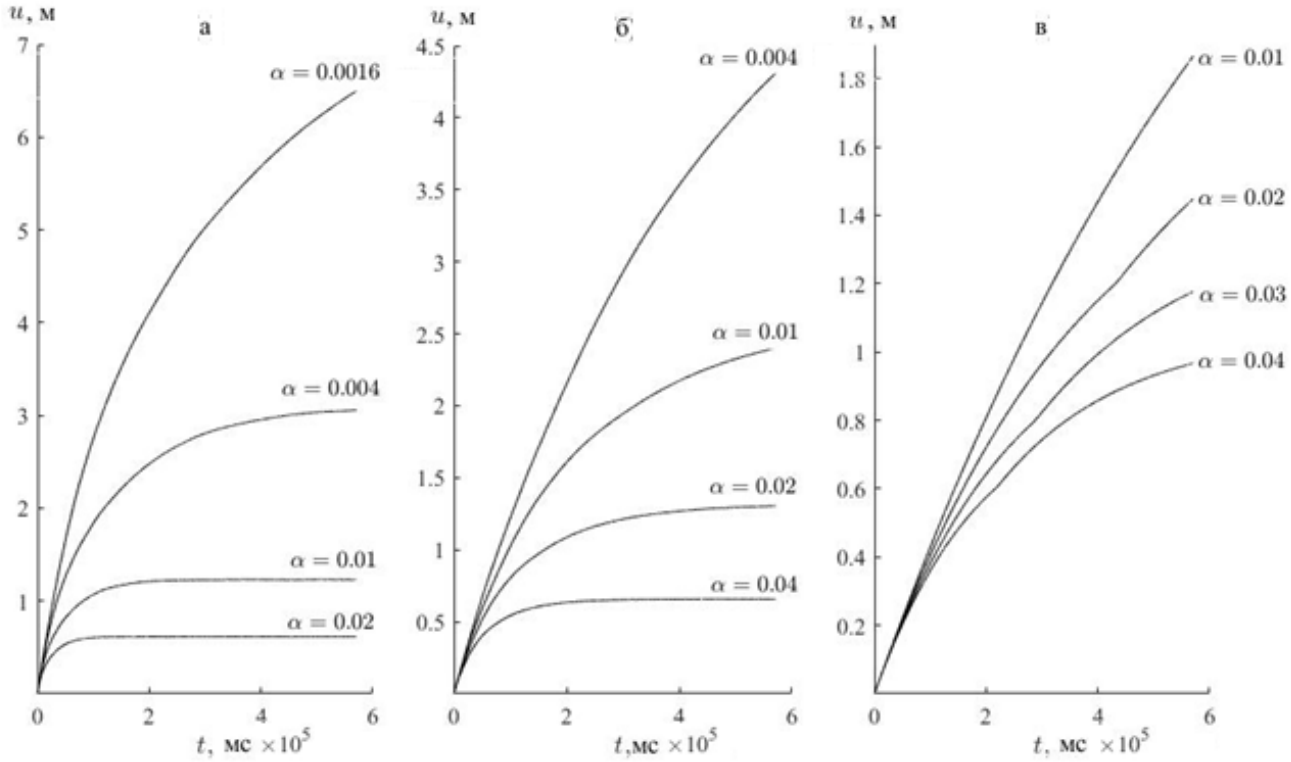


Рисунок 3.8 — Перемещение трубы при различных значениях коэффициента α:
а — $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}1$ МПа; *б* — $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 0{,}5$ МПа; *в* — $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 2$ Мпа

На рисунке 3.9 представлены результаты численных расчетов перемещения трубы, реализующегося при действии множественных ударов. Расчеты проведены при частоте ударов 2,8 Гц, $\alpha = 0{,}025$, $\sigma_r^2 = \sigma_r^1 = 2$ МПа и различных значениях M_0, V_0: рис. 3.9*а* — $V_0 = 0{,}004$ м/мс, $M_0 = 1000$ кг — *кривая 1*; $M_0 = 500$ кг — *кривая 2*; $M_0 = 250$ кг — *кривая 3*; $M_0 = 125$ кг — *кривая 4*; рис. 3.9*б* — $M_0 = 500$ кг, $V_0 = 0{,}008$ м/мс — *кривая 1*, $V_0 = 0{,}004$ м/мс — *кривая 2*, $V_0 = 0{,}00283$ м/мс — *кривая 3*; рис. 3.9*в* — $M_0 = 125$ кг, $V_0 = 0{,}008$ м/мс — *кривая 1*; $M_0 = 500$ кг, $V_0 = 0{,}004$ м/мс — *кривая 2*, $M_0 = 1000$ кг, $V_0 = 0{,}00283$ м/мс — *кривая 3*. Остальные параметры базовые. Параметры ударной нагрузки M_0, V_0 на рисунке 3.9*в* выбраны так, что для всех трех кривых энергия ударов одна и та же.

Анализ кривых на рисунке 3.9 показывает, что результирующее перемещение существенным образом зависит от соотношения параметров M_0, V_0. При постоянной массе ударника чем больше скорость удара, тем больше перемещение трубы. При постоянной скорости ударника чем больше масса ударника, тем больше перемещение трубы. Если энергия множественных ударов

одна и та же, а параметры M_0, V_0 варьируются, то с ростом скорости ударника растет перемещение трубы.

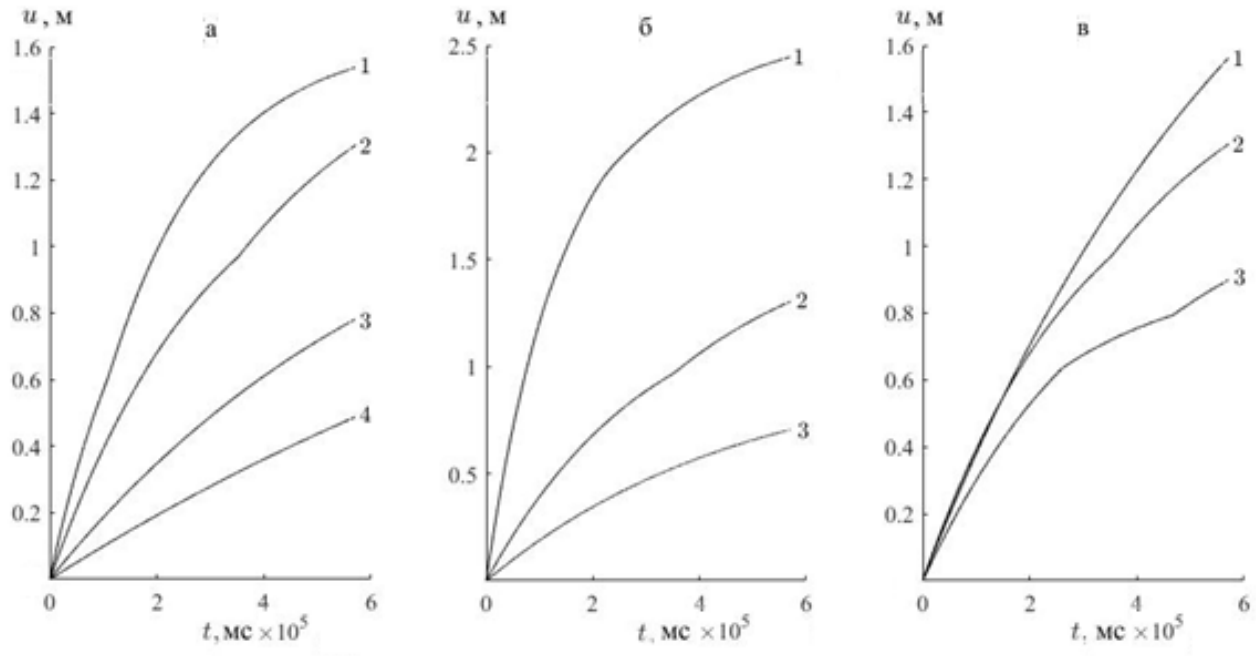


Рисунок 3.9 — Перемещение трубы при различных значениях параметров ударника M_0, V_0: *а* — переменная масса ударника; *б* — переменная предударная скорость; *в* — постоянное значение энергии ударов

3.1.3 Сравнение приближенной теории с экспериментальными результатами

Эксперимент проводился в условиях плотной городской застройки [105]. Необходимо было соединить подземный теплораспределительный узел, расположенный посредине проезжей части, с вновь возведенным зданием. Длина бестраншейной прокладки стальной обсадной трубы-кожуха диметром 630 мм составила 14 м при заглублении от дневной поверхности оси трубы на 2 м. Грунтовые условия: естественная супесь плотностью 1800 кг/м^3 и влажностью 14 %. В качестве источника ударных импульсов использовался пневмомолот с энергией единичного удара 4000 Дж, частотой 2,8 Гц, массой ударной части 500 кг. На трубе были поставлены метки через каждые 0,1 м. В эксперименте фиксировалось время погружения трубы на каждые 0,1 м. Результаты измерений до первой очистки трубы от керна представлены на рисунке 3.10 штриховой линией

со «звездочками». Сплошная кривая на рисунке 3.10 соответствует численному расчету перемещения трубы, полученному при $\alpha = 0{,}025$, $\sigma_r^0 = \sigma_r^1 = 2$ МПа, $t_* = 357$ мс и остальных базовых параметрах. Сравнение теоретических и экспериментальных данных на рисунке 3.10 показывает их хорошее соответствие.

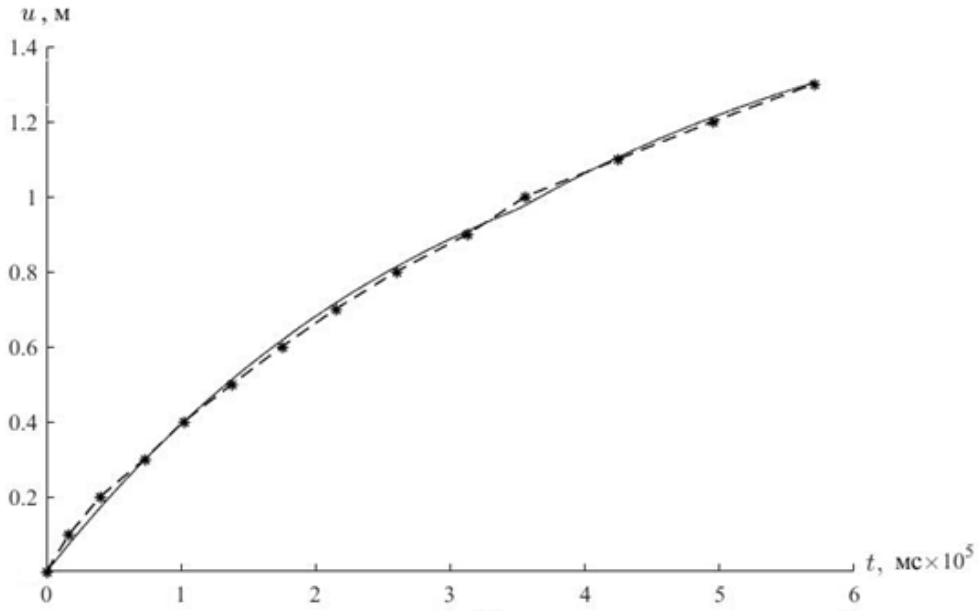


Рисунок 3.10 — Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Численное исследование горизонтального процесса ударного погружения в массив открытой трубы, содержащей керн, при действии одиночного удара и множественных ударов продемонстрировало качественное и количественное соответствие теоретических и экспериментальных данных для перемещения трубы. Установлено, что перемещение трубы, вызываемое ударным воздействием, становится меньше при следующих условиях [157]:

— определяется изменение радиального напряжения в керне в результате бокового взаимодействия трубы и керна;

— увеличивается длина керна;

— учитывается сила сухого трения между внешней средой и трубой;

— растет модуль Юнга керна и/или жесткость основания массива перед трубой;

— увеличивается начальное радиальное напряжение на внешней и внутренней поверхности трубы;

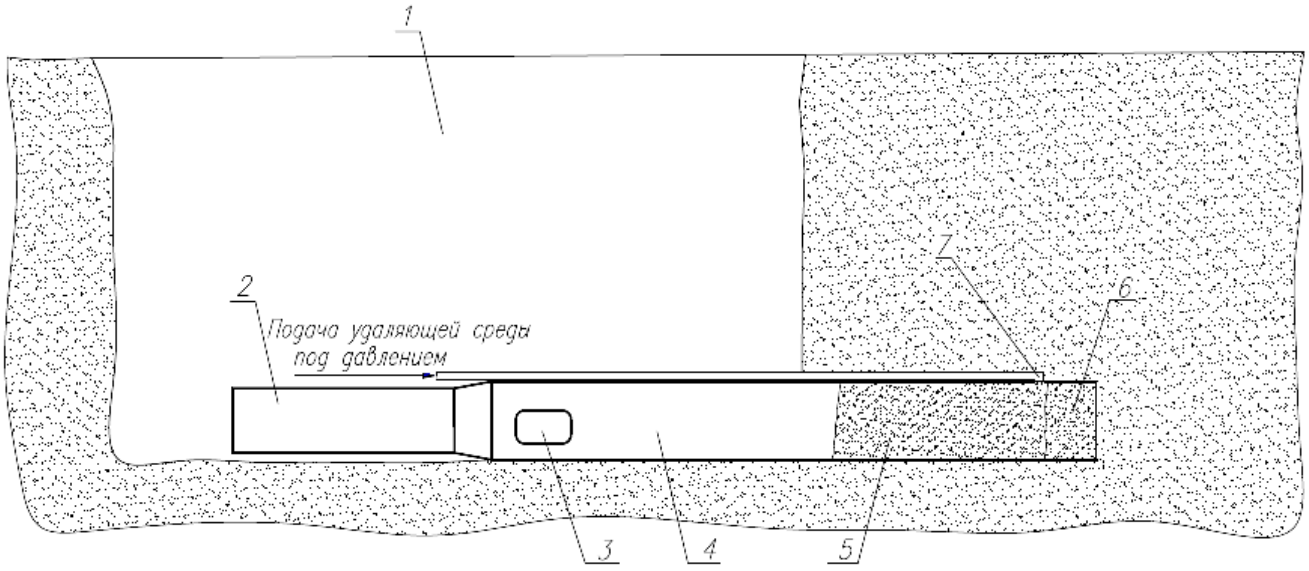
— уменьшается скорость удара, а энергия ударов остается одна и та же.

Предложенное теоретическое описание в полной мере отражает влияние основных параметров процесса ударного погружения стальной трубы в массив осадочных горных пород. Вместе с тем возможность определения перемещения трубы ограничена одним ударным циклом и требует большого количества исходных данных прежде всего по свойствам массива. Кроме того, сам процесс вычисления достаточно трудоемкий, а предложенный алгоритм не позволяет моделировать периодическое удаление керна из внутренней полости трубы.

3.2 Математическая модель процесса горизонтального погружения трубы с учетом периодического удаления керна

Можно полагать, что изначально массив осадочных пород однородный. Все его частицы находятся под действием гравитационного поля и имеют единообразные параметры внутренних структурных связей. Это вязкоэластичные водно-коллоидные связи, а также жесткие кристаллические связи, обусловленные выпадением из поровой воды солей железа, карбоната кальция, магния и т. п. Жесткие связи, в отличие от вязкоэластичных, после их нарушения длительный период не восстанавливаются.

Исходное состояние массива нарушается сооружением стартового котлована для размещения первой секции трубы и ударного привода (рисунок 3.11). При этом массив обнажается на глубину заложения трассы. Гравитационный подпор со стороны котлована исчезает, и откос удерживается за счет изменения ранее существовавшего напряженного состояния в прилегающей к откосу части массива. Область существенного изменения напряженного состояния зависит от состава массива, глубины котлована и т. д. Ударное продвижение трубы в массив начинают при сниженных значениях энергии ударов и, соответственно, силы отдачи, оттягивающей назад ударный привод вместе с трубой. Штатный режим включается только после внедрения трубы на величину, при которой обжатие трубы массивом снаружи будет достаточным, чтобы удержать ее от обратного смещения силой отдачи ударного привода. В штатном режиме ведется основная проходка [142].



1 — стартовый котлован; *2* — ударный привод; *3* — окно для выхода удаляемого керна; *4* — погружаемая труба; *5* — удаляемая порция керна; *6* — пробка; *7* — питающий канал

Рисунок 3.11 — Бестраншейная прокладка трубопровода с порционным удалением керна

При использовании технологии порционной очистки поступающий в трубу керн делится на две части (рисунок 3.11). Раздел проходит в зоне ввода в трубу питающего канала. Передняя часть керна — пробка — имеет постоянную длину и препятствует прорыву текучей среды через передний торец трубы. Задняя часть (за входом питающего канала) — удаляемая порция. Ее длина определяется перемещением трубы после предшествовавшей очистки и может управляться оператором путем изменения продолжительности забивки трубы до очередной очистки. После удаления очередной порции пробка остается в трубе. Если принять, что толщина стенок трубы пренебрежимо мала по сравнению с ее диаметром, то можно считать, что пробка вырезается из массива тонким кольцевым ножом и радиальное воздействие окружавшего ее массива замещается по контуру реакцией стенок трубы. Это привнесенное из массива упругое радиальное взаимодействие пробки с трубой создает на внутренней поверхности трубы силу трения. При продвижении трубы в массив сила трения между трубой и керном активно поджимает керн к массиву, а пробка становится головной частью очередной удаляемой порции. Чем

больше длина керна, тем больше суммарная сила трения и сильнее керн поддавливает массив. Величина силы трения «труба – керн» меняется по длине керна от минимальной на открытом его конце до наибольшего значения у переднего торца трубы [159].

После отделения и удаления порции торец пробки освобождается. Подпор со стороны удаленной части керна исчезает. Напряженное состояние оставшейся части грунта меняется, радиальное давление пробки на стенки трубы и сила трения снижаются. Данное обстоятельство позволяет при создании упрощенной расчетной модели системы «труба – керн» условно считать, что после удаления порции параметры состояния породы в пробке выходят на уровень исходного состояния в массиве. Очевидно, что отрыв и удаление порции не сказывается на силе трения массива по наружной поверхности трубы, которая непрерывно возрастает по мере продвижения трубы вглубь массива.

Такая картина может соответствовать ситуации, когда кроме трения о стенки трубы, гравитации и давления на торец со стороны массива иные внешние воздействия на керн отсутствуют. Естественно, на эту базовую часть представления о формировании керна могут накладываться влияния дополнительных факторов. Так, при ударном погружении трубы в течение всего времени перемещения по ней ударной волны керн в трубе и массив снаружи подвержены радиально направленному вибрационному воздействию, исходящему от трубы, возбужденной ударными импульсами ударного привода. Обычно частота ударов находится в диапазоне $1-10$ Гц при продолжительности ударных воздействий между очередными очистками $5-20$ мин и более [33]. Каждый удар возбуждает в трубе прямые и отраженные волны сжатия и растяжения. При прохождении волны сжатия диаметр трубы увеличивается пропорционально амплитуде силы в ударном импульсе и, наоборот, уменьшается в волне растяжения, т. е. труба постоянно «дышит» [13]. Кроме того, вследствие неизбежной нецентральности удара и кривизны трубы возникают поперечные колебания. Все это способствует ослаблению внутренних связей, уменьшению плотности керна и снижению коэффициента трения «труба – керн».

Глубина заложения приповерхностных коммуникаций в большинстве случаев находится в пределах $2-15$ м [187]. Поэтому исходная плотность массива, обусловленная гравитацией, не велика. Это увеличивает относительное влияние различия величин гравитационного давления и, соответственно, сил трения в верхних и нижних слоях находящегося в трубе керна, особенно в трубах большого диаметра. При удалении керна сжатым воздухом верхние слои порции вследствие меньшего сопротивления трения могут легче выдуваться, образуя значительный канал утечки, приводящий к падению выталкивающего давления и прекращению движения порции керна на выход. Такая опасность характерна для сыпучих пород. Наличие питающего канала дает возможность подать в порцию текучую среду для повышения сцепления и ее связности. Возможность использования такого приема позволяет при создании расчетной модели представлять керн связным.

Принимая во внимание отмеченные особенности порционной очистки, рассмотрим квазистатическую задачу об горизонтальном ударном погружении 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 считается пренебрежимо малой.

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

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

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

Прежде чем переходить к математическому описанию процесса внедрения металлической трубы в массив, определим силы, действующие на исследуемый объект. Согласно допущению V, на начальной стадии формирования керна поступающая в трубу порода, наряду с лобовой нагрузкой, испытывает боковые напряжения сжатия, равные p_h, как это показано на рисунке 3.12.

Рисунок 3.12 — Начальная стадия формирования керна в трубе

Соответственно, уравнение равновесия сформированного в трубе керна (3.18) можно представить в следующем виде:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2p \cdot k_f \cdot k}{R_0} + \frac{2p_h \cdot k_f}{R_0}, \tag{3.18}$$

где p — усредненные по сечению трубы осевые напряжения в керне; $p_h = \rho g h$ — горное давление на глубине забивания трубы h; ρ — плотность грунта в массиве; R_0 — радиус трубы по среднему сечению; k_f — коэффициент трения грунта о стенки трубы; k — коэффициент бокового распора грунта в трубе.

Решение (3.18) с граничным условием $p(x) = 0$ при $x = 0$ дает зависимость (3.19)

$$p(x) = \frac{p_h}{k}\left[e^{2\bar{x} \cdot k_f \cdot k} - 1\right], \tag{3.19}$$

где $\bar{x} = \frac{x}{R_0}$.

Принимая во внимание допущение V и используя (3.19), нормальное давление керна на внутреннюю поверхность трубы P_H (3.20) как функцию от x можно представить в виде

$$P_н(x) = k \cdot p(x) + p_h\,. \tag{3.20}$$

Тогда суммарная сила трения керна о стенки трубы (3.21), вызываемая боковым распором

$$F_f^{\text{к}} = 2\pi R_0 \cdot k_f \int_0^{L_{\text{к}}} P_{\text{н}} dx = \frac{\pi R_0^2 \cdot p_h}{k}\left[e^{2\bar{L}_{\text{к}} \cdot k_f \cdot k} - 1\right], \quad (3.21)$$

где $\bar{L}_{\text{к}} = \frac{L_{\text{к}}}{R_0}$, L_K — длина керна.

Сила бокового трения трубы (3.22), погруженной в массив

$$F_f = 2\pi R_0 \cdot L \cdot p_h \cdot k_f, \quad (3.22)$$

где L — длина части трубы, погруженной в массив. Схема размещения керна в трубе представлена на рисунке 3.13, где F_e – упругая реакция массива.

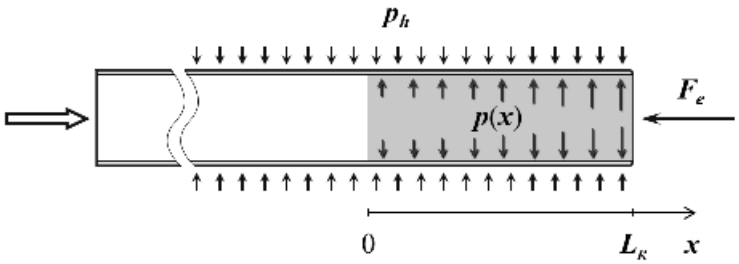


Рисунок 3.13 — Размещение керна в трубе

Постановка задачи

В начальный момент времени металлической трубе массой M и радиусом R_0, находящейся на глубине h от свободной поверхности и погруженной в массив на длину L с размещенным в ней керном длиной L_K, передается импульс, генерируемый ударной машиной с энергией удара A_0. Требуется определить динамику системы «труба – керн» в рамках одного ударного цикла.

В соответствии с допущением II, труба как твердое недеформируемое тело в результате воздействия на нее ударного импульса приобретает начальную скорость V_0, определяемую из условия передачи ей кинетической энергии A. Коэффициент передачи трубе кинетической энергии (3.23), генерируемой пневмоударной машиной

$$k_A = \frac{A}{A_0}, \quad (3.23)$$

определяется в соответствии с [57] при помощи алгоритма, реализованного в программе *ShockPulse* [126]. Таким образом, зная энергию удара пневмоударной машины A_0 и коэффициент k_A в соответствии с (3.23), скорость, приобретаемая трубой в начале каждого ударного цикла, будет определятся по зависимости (3.24)

$$V_0 = \sqrt{\frac{2A}{M}}. \tag{3.24}$$

Рассмотрим два возможных режима, определяющих динамику системы «труба – керн».

Первый режим. Движение трубы и расположенного в ней керна происходит раздельно. 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. В этом случае динамика системы «труба – керн» описывается следующей системой уравнений (3.25):

$$\begin{cases} M\dfrac{d^2U}{dt^2} = -\left(F_f^{\kappa} + F_f\right) \\ M_{\kappa}\dfrac{d^2W}{dt^2} = F_f^{\kappa} + F_e \end{cases} \tag{3.25}$$

с начальными условиями: $U = W = 0$, $\dfrac{dW}{dt} = 0$ и $\dfrac{dU}{dt} = V_0$ при $t = 0$, где U и W — перемещения трубы и керна соответственно; $M_{\kappa} = \pi R_0^2 \cdot \rho \cdot L_{\kappa}$ — масса керна, а упругая реакция массива при данном режиме определяется выражением (3.26) [141]

$$F_e^{(1)} = \frac{2R_0E(W + W_0)}{1 - \nu^2}, \tag{3.26}$$

взятом с учетом ранее принятого допущения VI о деформировании упругого массива перед торцом трубы. Здесь E, ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона грунта; W — текущее перемещение керна; W_0 — остаточное перемещение керна после завершения ударного цикла, определяемое выражением (3.27)

$$W_0 = \min\left\{\frac{F_f^{\kappa}(1-\nu^2)}{2R_0E}; \frac{F_f(1-\nu^2)}{2R_0E}\right\}. \tag{3.27}$$

Выражение (3.26) описывает упругую реакцию массива на перемещение керна до тех пор, пока в процессе ударного цикла остается проскальзывание керна вдоль трубы.

Динамика системы «труба – массив» для этого режима реализована в алгоритме компьютерной программы *PipeRamming* [127]. В качестве примера было рассчитано погружение трубы диаметром 630 мм с помощью пневмоударной машины с энергией удара 4000 Дж и частотой 2,8 Гц. На рисунке 3.14 представлены графики скоростей трубы и керна при их раздельном движении на начальной стадии погружения, описываемой системой уравнений (3.25).

На этой стадии формирования керна, когда силы его трения о внутреннюю поверхность трубы пренебрежимо малы по сравнению с силами трения трубы по наружной поверхности, его влияние на движение трубы в массиве пренебрежимо мало. Этим объясняется возвратно-поступательное движение керна в трубе, подверженного влиянию упругой реакции массива. При этом труба движется равнозамедленно.

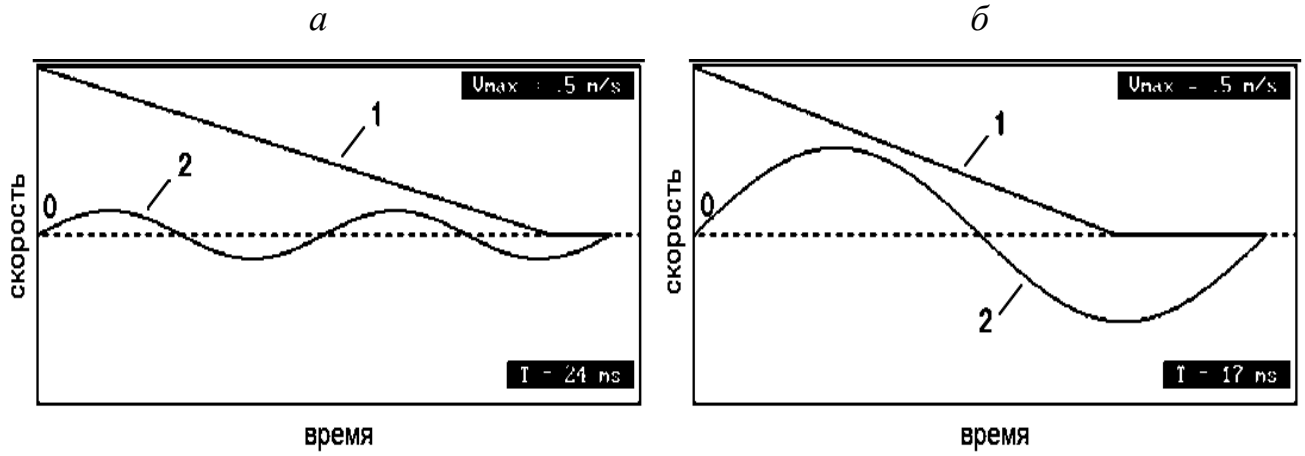


Рисунок 3.14 — Скорости трубы (*1*) и керна (*2*) в ударном цикле:
а — L = 1,2 м, L_K = 0,38 м; *б* — L = 1,55 м, L_K = 0,75 м

Второй режим. Движение трубы и керна происходит совместно, как единого твердого тела. Этот режим реализуется, когда упругой реакции массива недостаточно, чтобы преодолеть внутреннее трение керна в трубе. Тогда для описания динамики системы «труба – керн» достаточно одного уравнения движения (3.28)

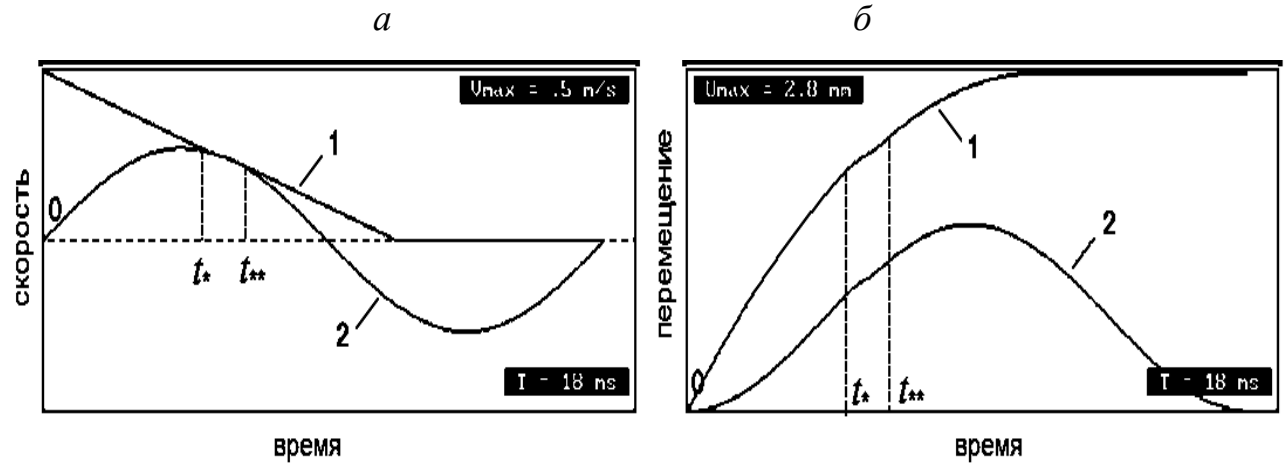
$$\left(M + M_к\right)\frac{dU^2}{dt^2} = -\left[F_f \cdot \operatorname{sgn}\left(V\right) + F_e^{(2)}\right] \tag{3.28}$$

с начальными условиями $U = U*$, $\frac{dU}{dt} = V*$ при $t = t*$, где упругая реакция массива определяется уже по (3.29)

$$F_e^{(2)} = \frac{2R_0E(U + W_0 - \Delta L_к)}{1-\nu^2}\ , \qquad (3.29)$$

$\Delta L_к = U_* - W_*$ — приращение длины керна, а U_* и W_* — перемещения трубы и керна к моменту начала их совместного движения в ударном цикле.

Критерием включения второго режима является равенство скоростей движения трубы и керна. На стадии формирования керна при его незначительной длине включение второго режима может происходить на непродолжительное время $\Delta t = t_{**} - t_*$, где t_* — время начала второго режима; t_{**}— время его окончания (рисунок 3.15).

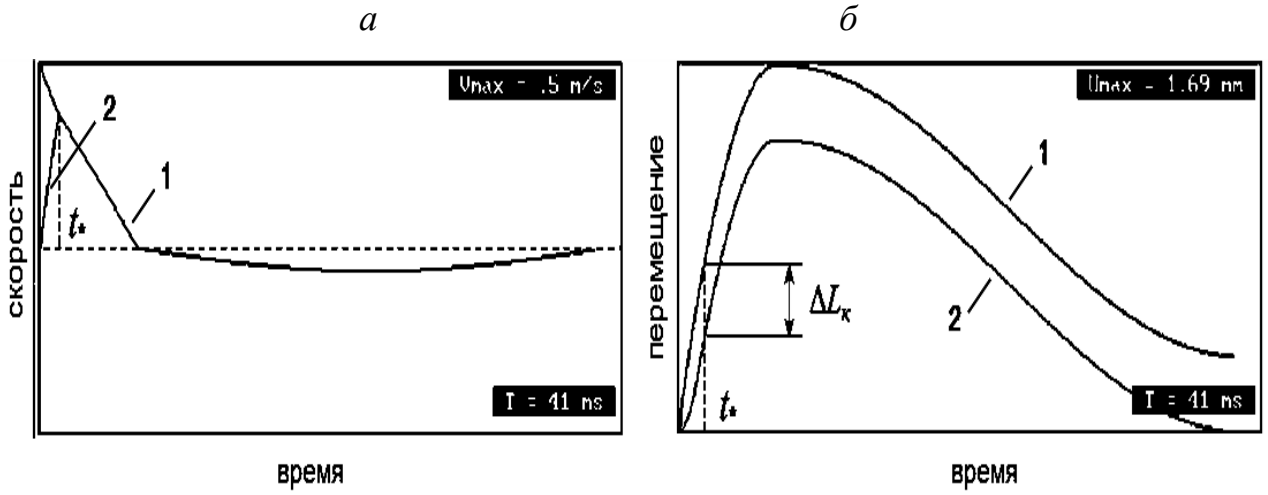


$L = 1{,}7$ м, $L_к = 0{,}82$ м

Рисунок 3.15 — Ударный цикл с участком совместного движения: *а* — скорости трубы *1* и керна *2*; *б* — перемещения трубы *1* и керна *2*

По мере увеличения длины керна, сила его трения о внутренние стенки трубы возрастает, и наступает момент, когда совместное движение трубы и керна продолжается до конца ударного цикла (рисунок 3.16).

На рисунке 3.16 видно, что «разгон» керна, начиная с нулевой скорости, заканчивается в момент времени, когда скорости трубы и керна сравниваются. Дальнейшее движение трубы и керна происходит совместно, как единого тела. Приращение длины керна заканчивается при $t = t_*$, как видно на рисунке 3.16 *б*.



$L = 2{,}5$ м, $L_к = 1{,}4$ м

Рисунок 3.16 — Ударный цикл с совместным движением: *а* — скорости трубы *1* и керна *2*; *б* — перемещения трубы *1* и керна *2*

По мере накопления деформации грунта в массиве перед торцом трубы, упругая реакция массива $F_e^{(2)}$ будет расти до тех пор, пока там не сформируется грунтовый конус, лобовое сопротивление которого F_c по (3.30) постоянно и, согласно допущению VI, определяется выражением для сопротивления грунтового конуса, сформированного перед торцом трубы [59, 125]:

$$F_c = \pi R_0^2 \cdot P_0 \frac{1 + \mathrm{tg}\phi \cdot \mathrm{ctg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)}{1 - \mathrm{tg}\phi \cdot \mathrm{ctg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)}, \tag{3.30}$$

где φ — угол внутреннего трения грунта; P_0 — прессиометрическое давление массива на глубине забивания трубы.

При выполнении неравенства (3.31)

$$F_{\mathrm{e}}^{(2)} > F_c \tag{3.31}$$

в уравнении (3.28) необходимо сделать замену $F_e^{(2)}$ на F_c.

В качестве иллюстрации возможностей изложенной математической модели процесса забивания металлической трубы в массив с открытым концом на рисунке 3.17 приведен пример расчета скорости забивания трубы длиной 14 м и диаметром 630 мм на глубине от поверхности земли 3 м пневмоударной машиной с

энергией 4000 Дж и частотой ударов 2,8 Гц, выполненный с помощью программы *PipeRamming* [127].

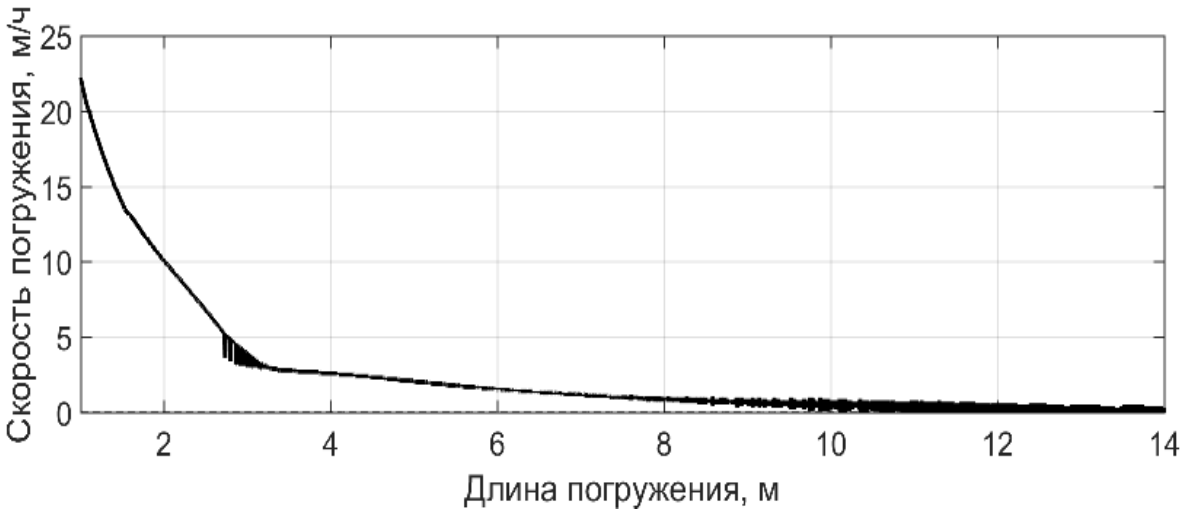


Рисунок 3.17 — Скорость забивания трубы в массив

Скорость продвижения трубы на первых 2,3 м снижается до значения 5 м/ч. При внедрении на расстояние около 9 м сила лобового сопротивления F_e увеличивается до значения, равного F_c, и дальнейшее продвижение трубы происходит аналогично забиванию с закрытым передним торцом. При этом скорость продвижения монотонно снижается до полной остановки погружения. Такой режим малопроизводителен и вследствие вытеснения керном грунта в массив приводит к значительным радиальным деформациям окружающего массива. Кроме того, возрастает нагрузка на сварные соединения секций трубы, что может привести к ее разрушению. Чтобы исключить вероятность развития подобного сценария, необходимо проводить своевременную очистку внутренней полости трубы от керна.

На рисунке 3.18 представлен график изменения скорости погружения трубы при работе на реальном объекте с использованием технологии порционного удаления керна без демонтажа пневмоударной машины и прерывания процесса погружения [46, 110]. 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 нахо-

дится в заведомо разуплотненной зоне массива вблизи откоса стартового котлована, на старте для снижения силы отдачи ударная машина работает на пониженном давлении.

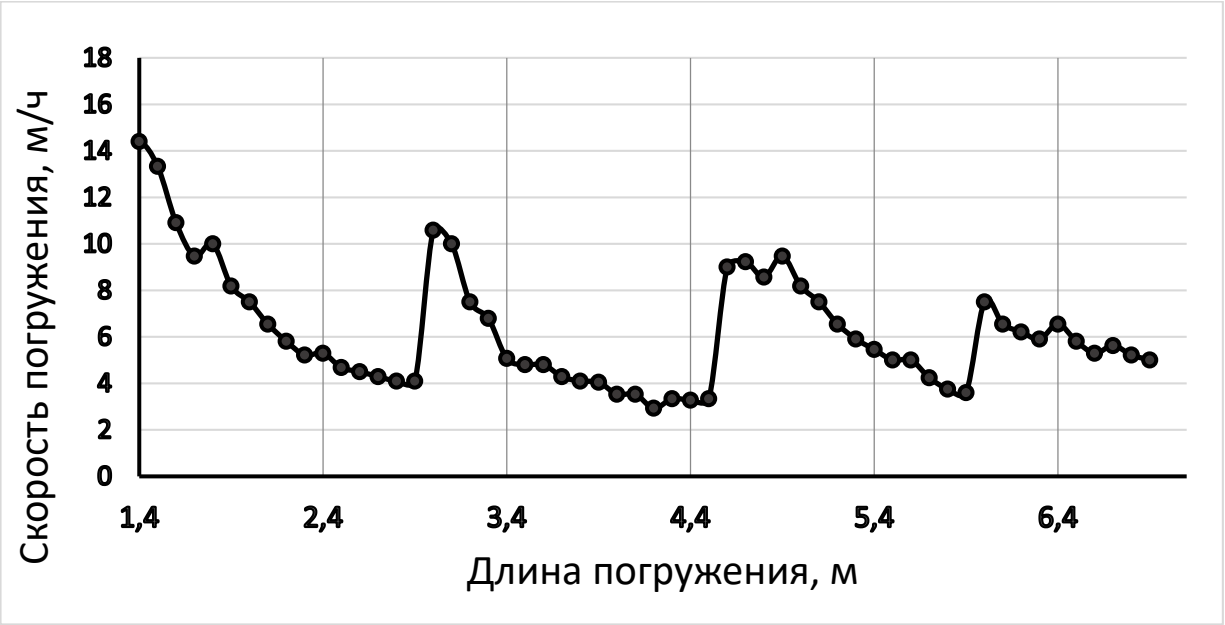


Рисунок 3.18 — Результаты измерения скорости продвижения трубы в массиве, полученные на строительной площадке

Для сравнения с помощью программы *PipeRamming* выполнен расчет скорости погружения трубы с периодической очисткой ее полости, аналогичной экспериментальной в массиве со свойствами, примерно отражающими условия на данном объекте. Результаты расчета представлены на рисунке 3.19.

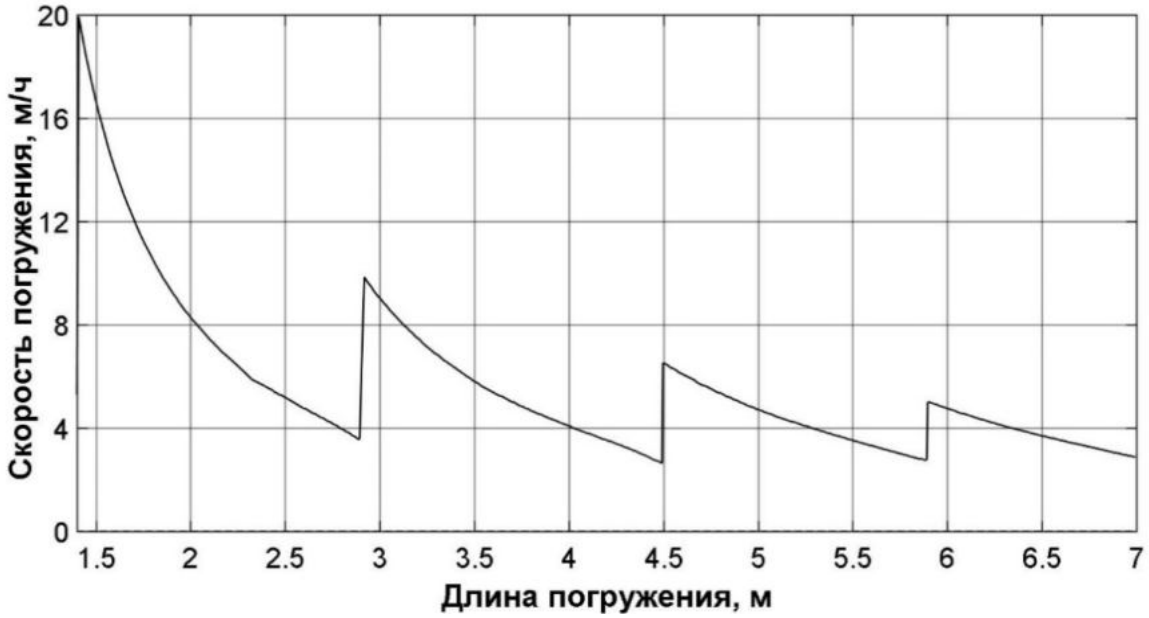
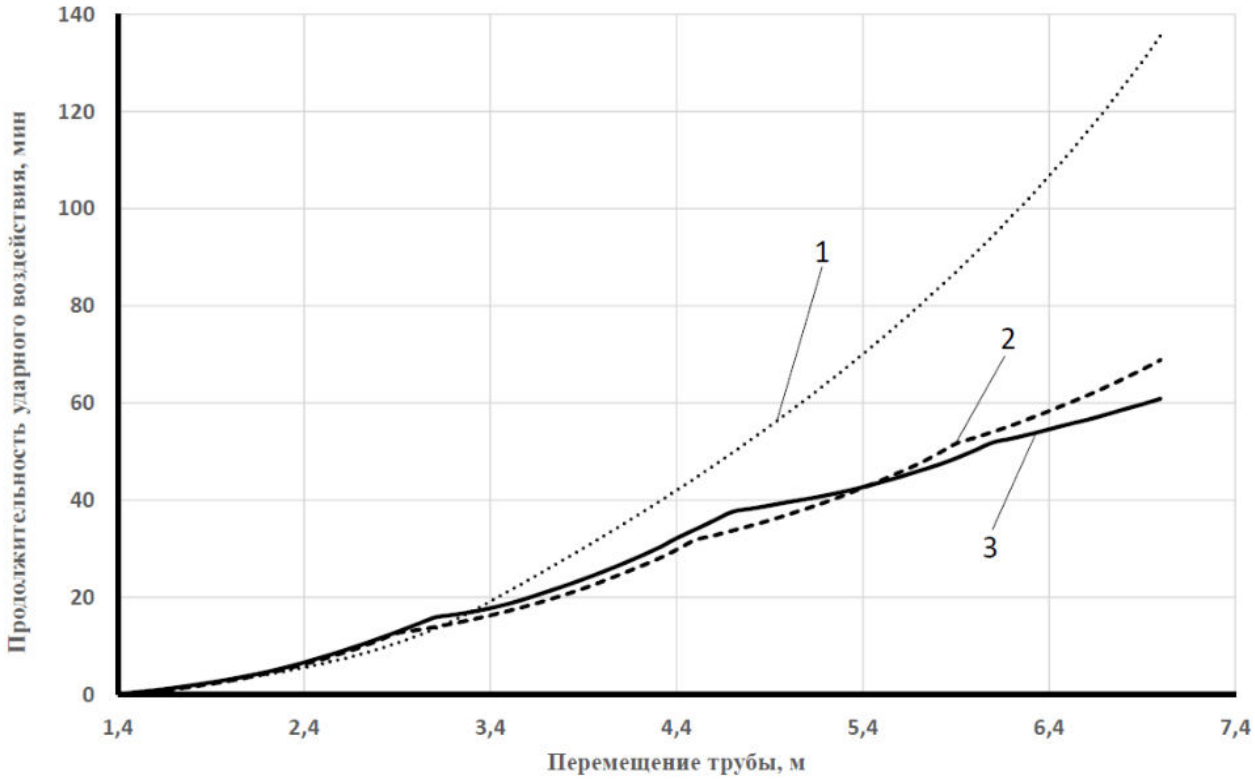


Рисунок 3.19 — Расчетный график скорости погружения трубы

Из сопоставления графиков на рисунках 3.18 и 3.19 видно, что расчетная кривая качественно описывает характер изменения скорости забивания трубы в массив с порционным удалением керна. Теоретическое описание динамики такого процесса 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 ударного привода. В качестве примера на рисунке 3.20 представлены графики продвижения забиваемой трубы для двух вариантов проходки: с порционной очисткой и без нее при одинаковых исходных данных, соответствующих вышеописанному эксперименту. Результаты расчета и эксперимента являются наглядной иллюстрацией возможностей разработанного программного продукта и явных достоинств нового метода очистки трубы при ее забивании в массив с открытым торцом [60].



1 — расчет без промежуточного удаления; *2* — расчет с порционной очисткой керна; *3* — результаты эксперимента

Рисунок 3.20 — Расчетные графики длительности погружения трубы

Из сопоставления графиков на рисунке 3.20 видно, что в пределах отрезка от 1,4 до 7 м, фигурирующего в примерах на рисунках 3.18 и 3.19, длительность процесса при порционной очистке керна сокращается в 2 раза и по мере дальнейшего продвижения забиваемой трубы эффект возрастает. На отметке 14 м затраты чистого времени продвижения трубы при использовании новой технологии сокращаются уже в 7 раз. В заключение следует отметить, что предложенная математическая модель забивания трубы в массив с порционным удалением керна не включает описание механизма дробления керна и его транспортирования. Дальнейшее развитие модели будет возможно с получением новой информации в процессе практического применения новой технологии.

Результаты

1. Приведенное сравнение экспериментальных и расчетных данных свидетельствует об адекватности предложенной математической модели взаимодействия керна с забиваемой в массив трубой.

2. Программа *PipeRamming*, реализующая предложенную математическую модель, позволяет описывать скоростной режим погружения трубы с учетом периодического удаления керна из внутренней полости трубы, а также осуществлять подбор требуемых параметров ударной машины, исходя из известных размеров трубопровода и грунтовых условий.

3. Периодическое удаление керна из внутренней полости трубы по методу из [106] позволяет в несколько раз сократить время погружения трубы за счет периодического снятия трения в паре «труба – керн» в процессе погружения и пренебрежимо малой (относительно времени продвижения между очередными очистками) продолжительности процесса очистки.

4. Всесторонняя привязка предложенной расчетной программы *PipeRamming* к решению практических задач ограничена отсутствием рекомендаций по рациональному и безаварийному шагу удаления порций керна.

3.3 Определение шага удаления керна из внутренней полости погружаемой трубы

Моделирование и расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) массива осадочных горных пород для определения шага удаления разрушенной породы выполнены в объемной (трехмерной) постановке задачи. В программном комплексе ANSYS построена динамическая расчетная модель взаимодействия упругопластичного 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. Выполнен структурно-временной анализ, основанный на решателе ANSYS Mechanical APDL.

Рассматривалась задача погружения трубы открытым концом в массив [44]. Для построения геометрии исследуемой области и формирования сетки используется приложение ANSYS DesignModeler. Параметры решения поставленной задачи задаются в ANSYS Mechanical (решение производится на локальной машине Intel Core i9-7980XE, 64 Гб RAM ECC, NVidia Quadro K620 без применения параллельных вычислений). Упругие характеристики грунтов могут меняться в широком диапазоне в зависимости от гранулометрического состава, плотности, влажности, пористости, наличия примесей и др., при этом модуль упругости меняется также в зависимости от вида нагрузки (таблица 3.1) [25, 37, 50, 55,93, 104, 147].

Для описания поведения массива использовались усредненные показатели для супеси и суглинка, как наиболее распространенных грунтов в приповерхностном слое: плотность — 1980 кг/м^3, модуль упругости Юнга — 40 МПа, коэффициент Пуассона — 0,3, параметры модели Ментери — Вилама [52, 179, 185, 186]: прочность на одноосное сжатие — 9850 Па, прочность на одноосное растяжение — 2250 Па, прочность на двуосное сжатие — 10 кПа, угол дилатансии — 0,25 рад. Для описания трубы используется следующие показатели: плотность — 7850 кг/м^3, модуль упругости Юнга — 200 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,3, предел текучести

при растяжении — 250 МПа, предел текучести при сжатии — 250 МПа, предел прочности при растяжении — 460 МПа.

Таблица 3.1 — Свойства грунтов

Тип грунтов	Статическое испытание $E_{ст}$, кгс/см^2	Динамическое испытание $E_д$, кгс/см^2	Угол внутреннего трения °	Плотность, кг/м^3	Число пластичности	Сцепление, т/м^2
Супеси	400	800 – 1500	20 – 35	1700 – 1900	1 – 7	0,03 – 0,15
Суглинки	310 – 2950	165 – 5100	26 – 35	1500 – 1800	7 – 17	0,13 – 2
Глины	до 2000	480 – 1630	15 – 45	1500 – 2100	17 – 27	0,1 – 20

В качестве модели материала применялась модель Ментери – Вилама (Menetrey – Willam), основанная на использовании теории пластического течения.

Подход в модели Ментери – Вилама заключается в том, что образование трещин описывается функциями состояния материала, а именно пластических деформаций.

Модель Ментери – Вилама основывается на поверхности текучести, описанной в модели Вилама – Варнке, включая зависимость от трех инвариантов тензора напряжений [199]. Эта поверхность текучести схожа с поверхностью, применяемой в модели Мора – Кулона, но в отличие от последней является гладкой, что позволяет избежать сложностей, возникающих при получении решений на основе модели Мора – Кулона [141]. Для построения первоначальной поверхности текучести в модели Ментери – Вилама используются три основных параметра: предел прочности материала на одноосное растяжение, предел прочности материала на одноосное сжатие и предел прочности материала при двуосном сжатии.

Далее при моделировании НДС в случае возникновения пластических деформаций поверхность текучести начинает изменяться и наступает разупрочнение материала. Этот процесс описывается функциями разупрочнения, которые могут быть заданы как в линейной, так и в экспоненциальной форме.

Для учета дилатансии в модели Ментери – Вилама используется неассоциированный закон пластического течения. Это приводит к тому, что матрица жесткости становится несимметричной. Для получения решений наиболее подходящим является несимметричный решатель на основе метода Ньютона – Рафсона.

Параметрами материала, определяющими функцию, описывающую поверхность текучести, в модели Ментери – Виллама являются:

— предел текучести при одноосном растяжении (R_t);

— прочность на одноосное сжатие (R_c);

— прочность на двуосное сжатие (R_b).

Параметры упрочнения и разупрочнения определяются выражениями (3.32):

$$\begin{gathered}\bar{R}_t = R_t \Omega_{tc}, \\ \bar{R}_c = R_c \Omega_c, \\ \bar{R}_b = R_b \Omega_c, \\ \Omega_{tc} = \begin{cases} \Omega_t & k_c \le k_{cm} \\ \Omega_t \Omega_c & k_c > k_{cm,} \end{cases}\end{gathered} \tag{3.32}$$

где k_{cm} — это параметр материала, а Ω_t и Ω_c — функции упрочнения/разупрочнения при растяжении и сжатии соответственно, которые зависят от переменных упрочнения при растяжении и сжатии k_t и k_c соответственно.

Поверхность текучести в координатах Хай – Вестергаарда имеет вид (3.33)

$$f_{MW} = \frac{c_2}{c_3}\left[\sqrt{2}\xi + r\rho\right] + \rho^2 - \frac{1}{c_3}, \tag{3.33}$$

где c_2 и c_3 — функции параметров материала и упрочнения/разупрочнения, которые описываются выражениями $c_2 = \frac{1}{\sqrt{6}}\left(\frac{1}{\bar{R}_c} - \frac{1}{\bar{R}_b} + \frac{\bar{R}_b - \bar{R}_t}{\bar{R}_c^2}\right)$ и $c_3 = \frac{3}{2}\frac{1}{\bar{R}_c^2}$, а параметр r определяется по (3.34)

$$r = \frac{4\left(1-e^2\right)cos^2\theta + (2e-1)^2}{2(1-e^2)\cos\theta + (2e-1)\sqrt{4(1-e^2)cos^2\theta + 5e^2 - 4e}}, \tag{3.34}$$

где $e = \frac{1+\epsilon}{2-\epsilon}$, $\epsilon = \frac{\bar{R}_t}{\bar{R}_b}\frac{\bar{R}_b^2 - \bar{R}_c^2}{\bar{R}_c^2 - \bar{R}_t^2}$.

Напряжения, представленные в координатах Хай – Вестергаарда, имеют вид (3.35)

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1,$$
$$\rho = \sqrt{2J_2}, \tag{3.35}$$
$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\sqrt{J_2^3}},$$

где I_1 — первый главный инвариант тензора напряжений, а J_2 и J_3 — второй и третий главные инварианты девиатора.

Выражения для I_1, J_2 и J_3 имеют вид (3.36)

$$I_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33},$$
$$J_2 = \frac{1}{6}((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2) + \sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2, \tag{3.36}$$
$$J_3 = det(\sigma - I\sigma_m).$$

Потенциал течения определяется следующим соотношением (3.37):

$$Q_{MW} = \rho^2 + B_g \rho + C_g \xi, \tag{3.37}$$

где $B_g = \frac{2\bar{R}_c \tan\psi - \sqrt{2}\bar{R}_t}{\sqrt{3}(1 - \sqrt{2}\tan\psi)}$ и $C_g = \frac{B_g}{\sqrt{2}} + \frac{2\bar{R}_t}{\sqrt{3}}$, а ψ — угол дилатансии.

На рисунке 3.21 представлена поверхность текучести для модели Ментери – Виллама в координатах главных напряжений.

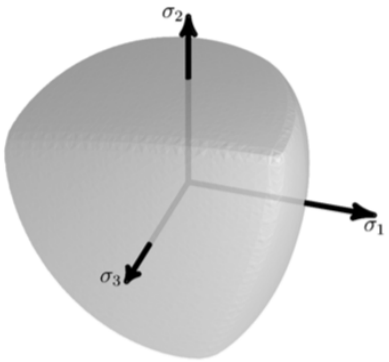


Рисунок 3.21 — Поверхность текучести для модели Ментери – Виллама:
σ_1, σ_2, σ_3 — главные напряжения

Поведение поверхности текучести при упрочнении и разупрочнении описывается функциями упрочнения/разупрочнения Ω_t и Ω_c, которые, в свою очередь, зависят от переменных упрочнения при растяжении и сжатии k_t и k_c соответственно. Выражения для этих переменных выводятся (3.38) в соответствии соотношением, описывающим работу по упрочнению:

$$\dot{k}_c = \frac{\alpha_c}{\bar{R}_c}\sigma \cdot \dot{\varepsilon}^{pl},$$
$$\dot{k}_t = \frac{\alpha_t}{\bar{R}_t}\sigma \cdot \dot{\varepsilon}^{pl}, \tag{3.38}$$

где α_c и α_t — весовые функции при сжатии и растяжении соответственно, представленные следующим образом:

$$\alpha_c = 1 - \alpha_t,$$
$$\alpha_t = \begin{cases} 0 & \tan\alpha < -2 \\ \frac{1}{1+\exp(-10\tan\alpha)} & -2 \le \tan\alpha \le 2, \\ 1 & \tan\alpha > 2 \end{cases} \tag{3.39}$$
$$\tan\alpha = \sqrt{6}\frac{\xi}{\rho}.$$

Описание поведения модели при упрочнении/разупрочнении необязательно.

Для преодоления сложностей, связанных с определением поведения модели при разупрочнении, зависящем от применяемой сетки, модель энергии разрушения является нормированной относительно эффективной длины элемента L_i:

3D-элементы — кубический корень из объема точки интегрирования;

2D-элементы — квадратный корень из объема точки интегрирования;

1D-элементы — объем точки интегрирования.

Используя такую модель энергии разрушения, общая рассеиваемая энергия в локализованном нарушении или трещине стремится к энергии разрушения, определяемой площадью.

При сжатии функция течения Ω_c представляется нелинейной функцией упрочнения и линейной функцией разупрочнения. Функция текучести при упрочнении имеет вид (3.40)

$$\Omega_c = \Omega_{ci} + (1 - \Omega_{ci})\sqrt{2\frac{k}{k_{cm}} - \frac{k^2}{k_{cm}^2}}, \tag{3.40}$$

где Ω_{ci} — относительный уровень напряжений в начале нелинейного упрочнения.

При $k = k_{cm}$ достигается максимальное значение прочности на сжатие, и начинается процесс разупрочнения по закономерности (3.41):

$$\Omega_c = 1 - \frac{1-\Omega_{cr}}{k_{cr}-k_{cm}}(k - k_{cm}). \tag{3.41}$$

При $k > k_{cr}$ относительный уровень напряжений имеет остаточное значение Ω_{cr}.

В случае растяжения функция текучести Ω_t описывается линейной функцией разупрочнения.

Функция текучести при упрочнении в условиях сжатия Ω_c для $k < k_{cm}$ определяется функцией энергии упрочнения из выражения (3.40).

Функция текучести при разупрочнении, когда коэффициент k находится в диапазоне $k_{cm} < k < k_{cu}$, имеет вид (3.42)

$$\Omega_c = 1 - (1 - \Omega_{cu}) \left(\frac{k - k_{cm}}{k_{cu} - k_{cm}}\right)^2, \tag{3.42}$$

а для $k > k_{cu}$ уже по формуле (3.42):

$$\Omega_c = \Omega_{cr} - (\Omega_{cu} - \Omega_{cr}) \exp\left(2 \frac{\Omega_{cu} - 1}{k_{cu} - k_{cm}} \cdot \frac{k - k_{cu}}{\Omega_{cu} - \Omega_{cr}}\right). \tag{3.43}$$

Функция текучести при растяжении Ω_t представлена экспоненциальной функцией разупрочнения (3.44), где объемная энергия, рассеиваемая при разупрочнении, пропорциональна I моде площади, определяемой энергией разрушения при растяжении G_{tf}:

$$\Omega_t = \mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{k}}{\alpha_\mathrm{t}}}, \tag{3.44}$$

где $\alpha_\mathrm{t} = \frac{g_{ft}}{R_t}$, $g_{ft} = \max\left(\frac{G_{ft}}{L_i}, \frac{R_t^2}{E}\right)$,

где L_i — эффективная длина элемента, а E — модуль Юнга, что определяет следующую взаимосвязь между энергией, рассеиваемой в процессе разупрочнения, и функцией текучести при растяжении (3.45):

$$\int_0^\infty \Omega_t dk = \frac{g_{ft}}{R_t}. \tag{3.45}$$

Для ограничения разупрочнения устанавливают уровень остаточных напряжений Ω_{tr}, чтобы обеспечить условия идеальной пластичности, когда функция текучести меньше, чем Ω_{tr}.

Грунты проявляют нелинейные упругие свойства, что вызвано влиянием пустот на объемный модуль упругости материала при гидростатическом сжатии [24, 184, 191]. В сравнении с твердыми составляющими материала пустоты являются относительно сжимаемыми, и изменение величины объемного модуля упругости

определяется соотношением объема твердых частиц и пустот. В процессе гидростатического нагружения пустоты уменьшаются или увеличиваются в объеме в зависимости от условий нагружения, в то время как объем твердых включений материала остается сравнительно неизменным, если не учитывать малые объемные деформации. Так как соотношение пустот и твердых включений материала изменяется, то трансформируется и объемный модуль упругости. Нормированная форма представления упругого НДС имеет вид (3.46)

$$d\sigma^{el} = Cd\varepsilon^{el}, \tag{3.46}$$

где C — линеаризованный тензор упругой жесткости по (3.47), представленный как функция модулей среза и объемного сжатия:

$$\mathrm{C} = k_b I \otimes I + 2\mu I_{dev}, \tag{3.47}$$

где k_b — модуль объемного сжатия; μ — модуль среза; I — второй инвариант тензора напряжений; I_{dev} — четвертый инвариант девиатора напряжений.

В соотношении (3.46) и далее показатель *el* соответствует упругим свойствам материала.

При упругом нагружении изменения коэффициента пустотности (3.48) прямо пропорциональны логарифму давления:

$$de^{el} = -kd(\ln p), \tag{3.48}$$

где k — коэффициент набухания; e^{el}— коэффициент пустотности; p — давление. Если материал характеризуется ненулевым пределом упругости на растяжение, выражение (3.48) примет вид (3.49)

$$de^{el} = -kd(\ln(p + p_t^{el})). \tag{3.49}$$

Упругая объемная деформация связана с коэффициентом пустотности следующим соотношением (3.50):

$$\varepsilon_{vol}^{el} = \ln(J^{el}) = \ln\left[\frac{1+e^{el}}{1+e_0}\right], \tag{3.50}$$

где J^{el} — объемный коэффициент упругости.

Проинтегрировав выражение (3.49), подставив его в (3.50) и проведя перегруппировку результирующего выражения, получим выражение для давления (3.51) как функцию упругой объемной деформации:

$$p = -p_t^{el} + (p_0 + p_t^{el})e^{(\frac{1+e_0}{k}(1-e^{\varepsilon_{vol}^{el}}))}, \quad (3.51)$$

где p_0 — начальное давление. Если начальное давление равно нулю, то в модели должен указываться ненулевой предел прочности на растяжение в упругости.

Объемный модуль упругости (3.52) является функцией давления и упругой объемной деформации:

$$k_b = \left(p + p_t^{el}\right)\left(\frac{1+e_0}{k}e^{\varepsilon_{vol}^{el}}\right). \quad (3.52)$$

При ведении расчетов в программном комплексе ANSYS с пошаговым увеличением напряжений для исключения существенных ошибок в определении объемного модуля упругости следует задавать малые приращения объемных деформаций. Такое ограничение может быть особенно важным при установке начального значения напряжения, что приводит к большим объемным деформациям на первом шаге решения [161, 172].

Модуль среза (3.53) напрямую не зависит от коэффициента пустотности или давления, при этом коэффициент Пуассона является постоянной величиной, что приводит к следующему выражению для модуля среза [141, 155]:

$$\mu_c = \frac{3k_b(1-2\nu)}{2(1+\nu)}, \quad (3.53)$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Расчет выполнен для труб диаметром 325 – 730 мм, энергии удара 2 – 6 кДж и усредненных физико-механических свойств массива [175]. Во всех расчетах для исключения малозначительных факторов толщина стенки прията 8 мм, а частота ударов 100 уд/мин. Расчетная схема и разбиение модели на конечные элементы показаны на рисунке 3.22.

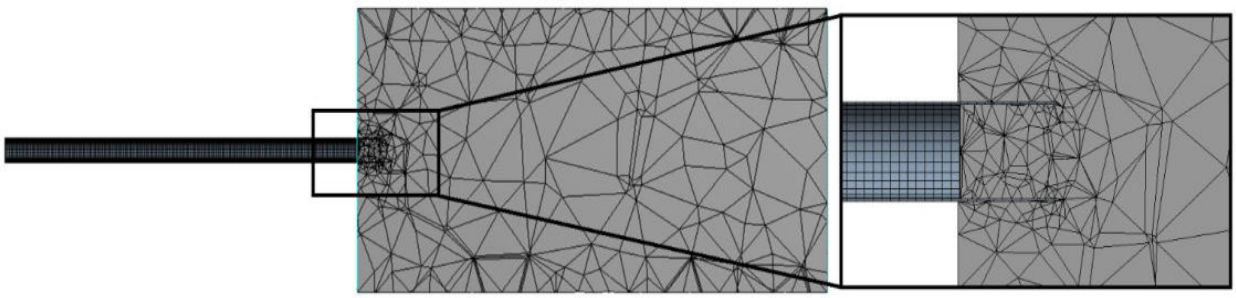


Рисунок 3.22 — Расчетная схема с разбиением модели на конечные элементы для горизонтального погружения трубы в массив

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. При разбиении расчетной области использовались 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 применяется адаптивное перестроение сетки для обеспечения баланса между временем расчета и точностью решения в процессе продвижения кольцевого цилиндрического элемента и формирования керна.

Для перестраивания сетки используются четыре критерия: Energy Based (энергетический), Position Based (критерий положения), Mesh – Quality Based (Skewness) (качество сетки), Contact Based (контактный).

Энергетический критерий применяется, если энергия деформирования элемента на подшаге превышает среднюю энергию деформирования компонента (тела), при этом элемент разделяется и сетка перестраивается. Критерий улучшает сетку для получения более точных результатов в областях высоких концентраций напряжений и сильно вытянутых элементов.

Критерий положения используется, если на подшаге все узлы элемента находятся внутри определенной области, элемент в этом случае делится и переразбивается, повышая качество сетки в области, где сложно заранее узнать, какие именно элементы будут находиться в ходе решения.

Применяя критерий качества сетки элемента, определяют его скошенность *Sk* по (3.54):

$$Sk = \frac{V_{reg} - V_{el}}{V_{reg}}, \tag{3.54}$$

где V_{el} — объем элемента в момент расчета; V_{reg} — объем стандартного тетраэдрического элемента, вписанного в сферу.

Идеальная форма: $Sk = 0$, так как $V_{el} = V_{reg}$ (стандартный тетраэдрический элемент). Наихудшая форма: $Sk = 1$, так как $V_{el} = 0$ (плоский элемент).

Контактный критерий контролирует число контактных элементов. Если количество контактных элементов в контакте с целевыми становится меньше определенного значения, то элементы делятся и сетка перестраивается. Контактные элементы на поверхности также перестраиваются. Если контактные элементы сдвигаются с целевых, деление не происходит. Этот критерий используется для того, чтобы позволить контактной области лучше подстраиваться под изменение.

Когда условие критерия выполняется, сетка изменяется в результате деления и последующего перестроения исходной: в результате деления исходные элементы делятся на элементы со сторонами, равными половине исходного размера. Для 3D тетраэдрических элементов изменения топологии и формы элементов происходят уже на этапе разбиения исходной сетки.

Физически контактирующие тела не проникают друг в друга, поэтому расчетный алгоритм должен обеспечивать установку взаимоотношений между двумя поверхностями для предотвращения проникновения в расчете. Для конечной контактной силы $F_{\text{норм}}$ (3.55) вводится понятие контактной жесткости $k_{\text{норм}}$. Чем выше контактная жесткость, тем ниже величина проникновения $x_{\text{прон}}$. В расчете применяется расширенный метод Лагранжа (Augmented Lagrange) — это метод, «расширяющий» вычисление при помощи дополнительного члена λ:

$$F_{\text{норм}} = k_{\text{норм}} x_{\text{прон}} + \lambda. \tag{3.55}$$

Благодаря дополнительному члену λ расширенный метод Лагранжа менее чувствителен к колебаниям контактной жесткости $k_{\text{норм}}$.

Нормальная контактная жесткость $k_{\text{норм}}$ — наиболее важный параметр, влияющий и на точность, и сходимость решения. Большая жесткость дает лучшую точность, однако могут возникнуть проблемы со сходимостью. Если контактная жесткость слишком велика, модель будет колебаться, а контактные поверхности — отскакивать друг от друга.

Контактные и целевые поверхности определяют, какие две группы поверхностей входят в контакт. На границе раздела сред «грунт – сталь» применяется несимметричное поведение (Asymmetric Behavior): контактным поверхностям (Contact, массив) запрещены проникновения в целевые (Target, сталь). Контактные элементы создаются на одной поверхности, а соответствующие целевые элементы — на другой, образуя одну «пару».

Система дифференциальных уравнений (3.56) для определения вектора перемещений узловых точек имеет вид (при выполнении статического расчета соответствующие компоненты полагались равными 0)

$$[M](\ddot{u})+[C](\dot{u})+[K](u)=(F(t)), \tag{3.56}$$

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.

При моделировании предполагалось, что демпфирование в системе происходит по Рэлею. Матрица демпфирования (3.57) определяется с использованием матрицы масс и матрицы жесткости:

$$[C]=\varepsilon\cdot[M]+\chi\cdot[K]. \tag{3.57}$$

Коэффициенты вязкого демпфирования ε, χ являются действительными константами.

Коэффициент рассеивания энергии представляет собой отношение работы, проделанной силами стабилизации, к потенциальной энергии элемента и принимает значения от 0 до 1. Система ANSYS допускает ввод значения этого коэффициента, превышающего 1, потому что оно используется с величинами энергии, получаемыми в результате предсказания. Чем больше значение энергетического соотношения или коэффициента демпфирования, тем больше сила стабилизации (при условии, что указанное количество подшагов и время остаются неизменными), так что система имеет более жесткую реакцию.

Указанное значение должно быть достаточно большим для исключения дивергенцию, но при этом достаточно малым, чтобы избежать чрезмерной жесткости. Наилучшее значение полностью зависит от конкретной проблемы, времени шага нагружения и количества подшагов.

В общем случае при работе с локальной неустойчивостью следует использовать меньшее значение этого коэффициента, а при рассмотрении глобальной нестабильности — большее значение коэффициента рассеивания энергии. Меньшее значение должно применяться для твердых элементов, а большее — для элементов оболочки, балочных элементов и связанных элементов. Следует использовать меньшее значение коэффициента, если указанное время для шага нагружения мало, и большее в противоположном случае.

С помощью метода рассеивания энергии вычисляется коэффициент демпфирования, основываясь на введенном коэффициенте рассеивание энергии, в течение первого подшага после запуска счета. Программа использует вычисленный коэффициент демпфирования путем предсказывания потенциальной энергии и энергии стабилизации элемента в конце шага нагружения, основываясь на данных текущего подшага, после чего устанавливает коэффициент рассеивания энергии меньше либо равным указанному значению. В случае высокой нелинейности решаемой задачи предсказывание может быть неточным. По окончании расчетов рекомендуется проверять, выполняется ли закон сохранения энергии, так как коэффициент рассеивания энергии в решении может принимать большие значения, чем заданные в начале расчетов.

Численный коэффициент демпфирования представляет собой значение, которое используется для вычисления сил стабилизации на всех последующих подшагах. Коэффициент демпфирования сильно зависит от размера элемента, формы, материала и других факторов, включая размер шага нагружения и времени, применяемого в шаге нагружения. Следовательно, коэффициент демпфирования варьируется от элемента к элементу.

Во время прогона с помощью метода рассеивания энергии вычисляется коэффициент демпфирования и определяется средневзвешенное значение объема элемента. Это значение является справочным для определения необходимости использования коэффициента демпфирования для управления устойчивостью решения в последующем прогоне. При вводе коэффициента демпфирования для управ-

ления устойчивостью решения он будет применяться для всех возможных элементов; следовательно, результаты могут отличаться от тех прогонов, где используется исключительно метод рассеивания энергии.

Значение коэффициент демпфирования, может изменяться в большем диапазоне, чем значение, используемое для коэффициента рассеивания энергии, которое может принимать значения от 0 до 1 в большинстве случаев. Если расчет слишком чувствителен к значению коэффициента рассеивания энергии, следует применять коэффициент демпфирования.

Для описания взаимодействия трубы с массивом использовались контактные элементы. Когда две разделенные поверхности касаются друг друга таким образом, что становятся взаимно соприкасающимися, говорят, что они находятся в контакте. В общем физическом смысле контактирующие поверхности обладают следующими характеристиками: не проникают друг в друга, передают сжимающие нормальные силы и касательные силы трения, но не растягивающие нормальные силы, а поверхности свободны отделяться и удаляться друг от друга. Жесткость системы в этом случае зависит от статуса контакта: соприкасаются разделенные части или нет. В рассматриваемой модели применяется контакт с трением (Frictional): он допускает скольжение с пропорциональным сопротивлением, определяемым пользовательским коэффициентом трения, и с возможностью свободного разделения без сопротивления.

В расчете принимается, что в начальный момент времени кольцевой элемент заглублен в массив на глубину около 2 диаметров трубы, при этом поверхность массива внутри совпадает с внешней поверхностью.

Величина единичного ударного импульса зависит от расчетной энергии удара и определяется индивидуально для каждой задачи. Высокие значения единичного ударного импульса приводят к расхождению решения при длительном расчете. Обеспечение сходимости решения требует временного снижения динамической нагрузки, наилучшая сходимость решения получается при величине ударной нагрузки, не превышающей 30 – 35 кН (рисунок 3.23).

Процесс погружения стальной трубы открытым торцом в массив осадочных горных пород и формирования керна подразумевает наличие больших деформаций. В этом случае применение стандартного подхода к моделированию методом конечных элементов по Лагранжу не представляется возможным из-за высокой степени искажения сетки. Для преодоления проблемы используется специальный подход — сопряженный численный метод Эйлера – Лагранжа (Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL). Такой метод эффективен при решении геотехнических задач, подразумевающих большие перемещения. Метод CEL сочетает преимущества методов Лагранжа и Эйлера: граница смещения распространяется во внутреннее пространство сеточного объема, при этом малые и пристеночные элементы деформируются меньше. Это обеспечивает хорошее разрешение пограничного слоя и позволяет работать с большими деформациями сетки.

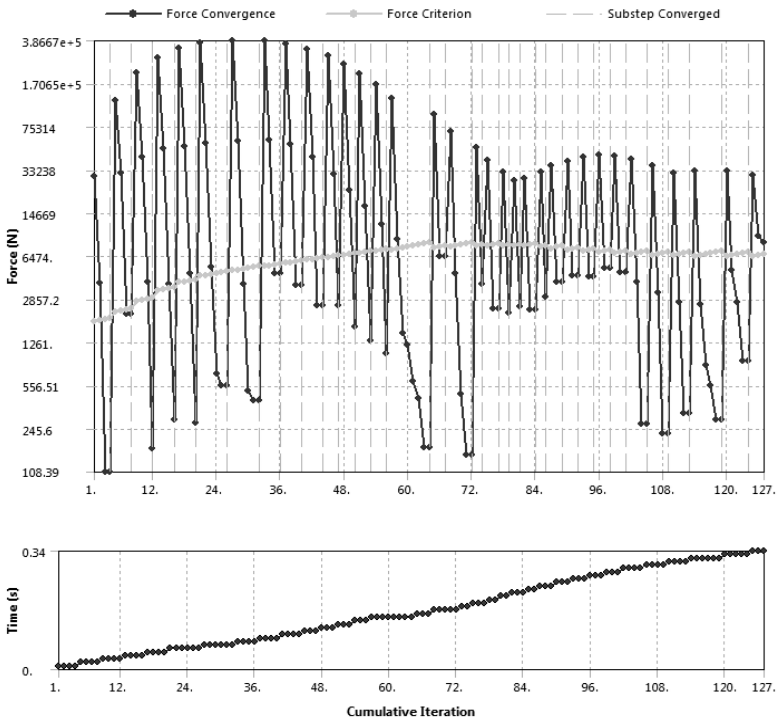


Рисунок 3.23 — Сходимость решения на различных этапах расчета при погружении кольцевого цилиндрического элемента в массив

Рассматриваемая модель нелинейна, поскольку нагрузка вызывает значительные изменения в жесткости. Основным источником нелинейностей являются нелинейные соотношения между напряжениями и деформациями, такие как пластичность грунта.

Нелинейное решение с помощью линейных решателей

Результаты в нелинейном анализе нельзя получить напрямую из набора линейных уравнений. Однако нелинейную конструкцию можно рассчитать с помощью итеративных серий линейных аппроксимаций с поправками. В расчете используется итерационный процесс, называемый методом Ньютона – Рафсона. Каждая итерация является равновесной. Действительное соотношение между нагрузкой и перемещениями неизвестно заранее. Следовательно, применяются серии линейных аппроксимаций с поправками (рисунок 3.24).

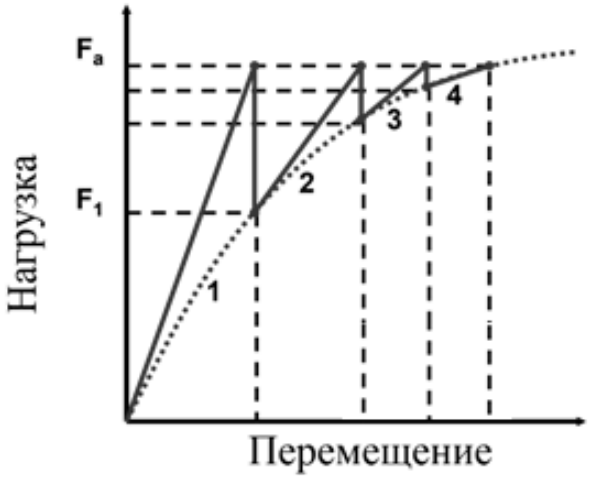


Рисунок 3.24 — Полный итеративный расчет по методу Ньютона – Рафсона для одного приращения нагрузки (показано четыре итерации)

В методе Ньютона – Рафсона полная нагрузка F_a прикладывается на 1-й итерации. Образуются перемещения x_1, из которых можно получить инерционную силу F_1. Если $F_a \neq F_1$, тогда система находится не в равновесии и на основе текущих условий вычисляется новая матрица жесткости (наклон пунктирной линии). Разность $F_a - F_1$ — это остаточные силы, которые должны быть достаточно «малы», чтобы задача сходилась. Процесс повторяется, пока не выполнится $F_a = F_i$. В данном примере система достигает равновесия после 4-й итерации, и можно сказать, что задача сошлась.

На рисунке 3.25 показан расчет серии ударных импульсов, в результате которых напряжения в грунте в месте подачи сжатого воздуха (расстояние от торца в 1 диаметр трубы) равны 0,6 МПа для энергии единичного импульса 2, 4 и 6 кДж.

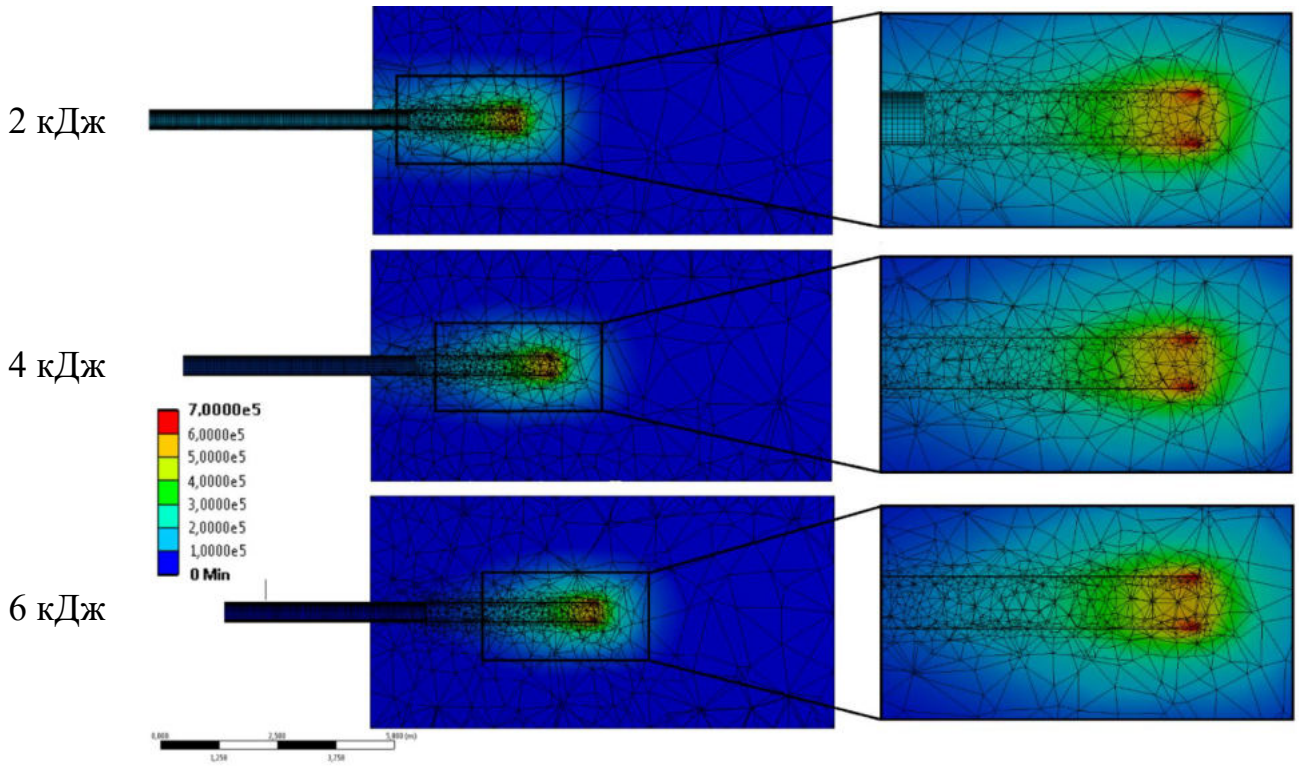


Рисунок 3.25 — Напряжения в массиве после воздействия серии ударных импульсов

Под действием ударов кольцевой цилиндрический элемент внедряется в массив, обратному перемещению препятствуют силы трения между его внутренней и внешней поверхностями и грунтом. Под действием ударного импульса элемент продвигается вперед на величину x_1, при этом кинетическая энергия удара расходуется на преодоление сил трения между поверхностями элемента и массивом, а также упругую и пластическую деформацию разрушаемого грунта. Упругие силы «отбрасываются» кольцевой элемент в обратном направлении на величину $x_1 - x_0$ и остается неподвижным до очередного удара (рисунок 3.26).

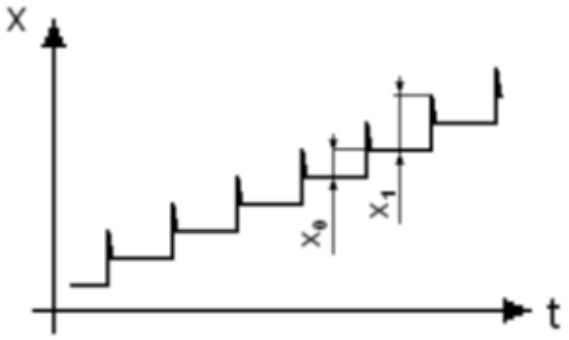


Рисунок 3.26 — График перемещения кольцевого цилиндрического элемента в массиве

В более прочных упругих массивах перемещение частиц вперед больше, чем в менее прочных. Радиальное смещение частиц определяется при одинаковых диаметрах кольцевого цилиндрического элемента свойствами массива: чем выше показатель прочности массива, тем больше размеры зоны деформаций. Зона заметных деформаций массива около скважины ограничивается окружностью диаметром, равным 3 – 4 диаметра скважины.

В таблице 3.2 представлены длины шага погружения трубы, при которых напряжения в керне в месте подачи сжатого воздуха на расстоянии от торца в 1 диаметр трубы равно 0,6 МПа. Указанное значение напряжений в керне выбрано исходя из энергетических возможностей большинства компрессорных установок, номинальное давление которых равно 6 атм.

Таблица 3.2 — Длины шага очистки трубы [78]

Диаметр трубы, мм	Энергия ударов		
	2 кДж	4 кДж	6 кДж
	Шаг очистки, м		
325	2,233	2,572	3,253
426	3,117	3,922	4,841
530	4,344	5,287	6,649
630	7,418	8,539	9,228
730	10,647	12,242	12,628

Данные из таблицы 3.2 проиллюстрированы на рисунке 3.27. Видно, что трехкратное увеличение энергии приводит к незначительному приросту шага погружения. Следовательно, соотношение энергии удара и размеров погружаемой трубы необходимо выбирать только с позиции гарантированного погружения обсадной трубы на заданную глубину.

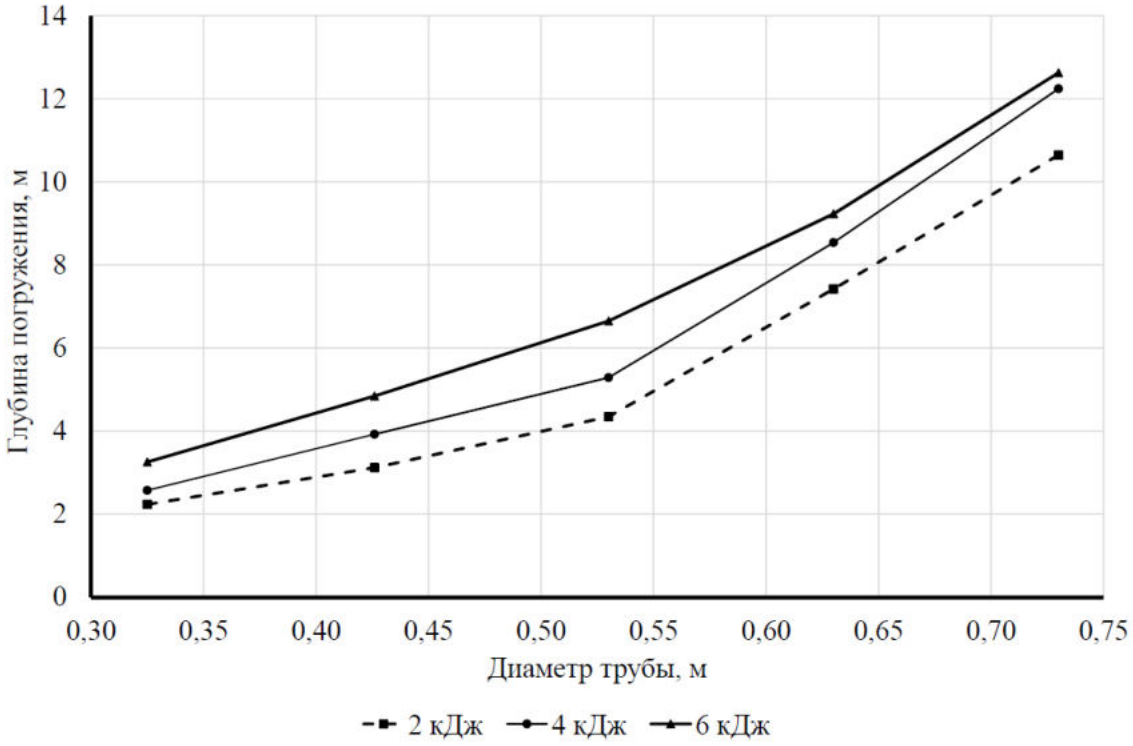


Рисунок 3.27 — Зависимость длины шага погружения от диаметра трубы при различных значения энергии ударов [78]

Рост диаметра трубы в исследуемом диапазоне энергий удара приводит к увеличению длины керна внутри погружаемой трубы. Данная тенденция наблюдалась при полевых испытаниях на трубках малого диаметра, что в некоторой степени подтверждает адекватность проведенных расчетов.

Для удобства практического использования расчетных зависимостей в таблице 3.3 и на рисунке 3.28 данные приведены в формате отношения длины шага погружения к диаметру трубы.

Таблица 3.3 — Отношение шага очистки к диаметру трубы [78]

Диаметр трубы, мм	Энергия ударов		
	2 кДж	4 кДж	6 кДж
	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

Применяя результаты из таблицы 3.3, следует учитывать, что они получены для усредненного по свойства массива. Проводить множество вычислений нецелесообразно, поскольку многообразие свойств и типов грунтов огромно, а свойства могут сильно изменяться даже по длине одного бестраншейного перехода. При подготовке стартового и приемного котлованов можно определить экспресс-методом, к какому типу относится разрабатываемый грунт, и при необходимости внести корректировку: если преобладают песчаные частицы, то шаг очистки увеличивают на 1 – 2 диаметра трубы; если больше глинистых частиц, то шаг уменьшают [41].

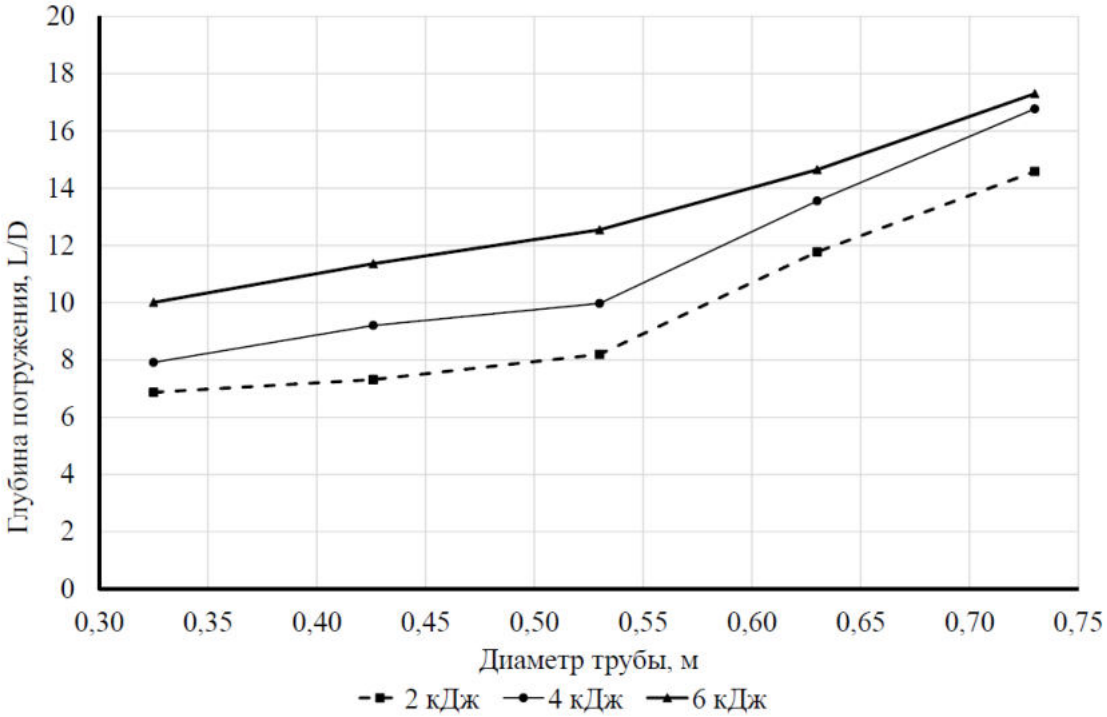


Рисунок 3.28 — Отношение длины погружения к диаметру трубы при различных энергиях удара [78]

Расчеты на рисунках 3.27 и 3.28 отражают максимально допустимые границы шага очистки. Нижняя граница не установлена, но, принимая во внимание принцип поршневого перемещения порции керна, при реализации технологии циклично-поточного удаления следует стремиться к формированию как можно более протяженной порции.

3.4 Выводы по Главе 3

1. Аналитическое численное исследование горизонтального процесса ударного погружения в массив осадочных горных пород открытой трубы, содержащей керн, при действии одиночного удара и множественных ударов продемонстрировало качественное и количественное соответствие теоретических и экспериментальных данных для перемещения трубы.

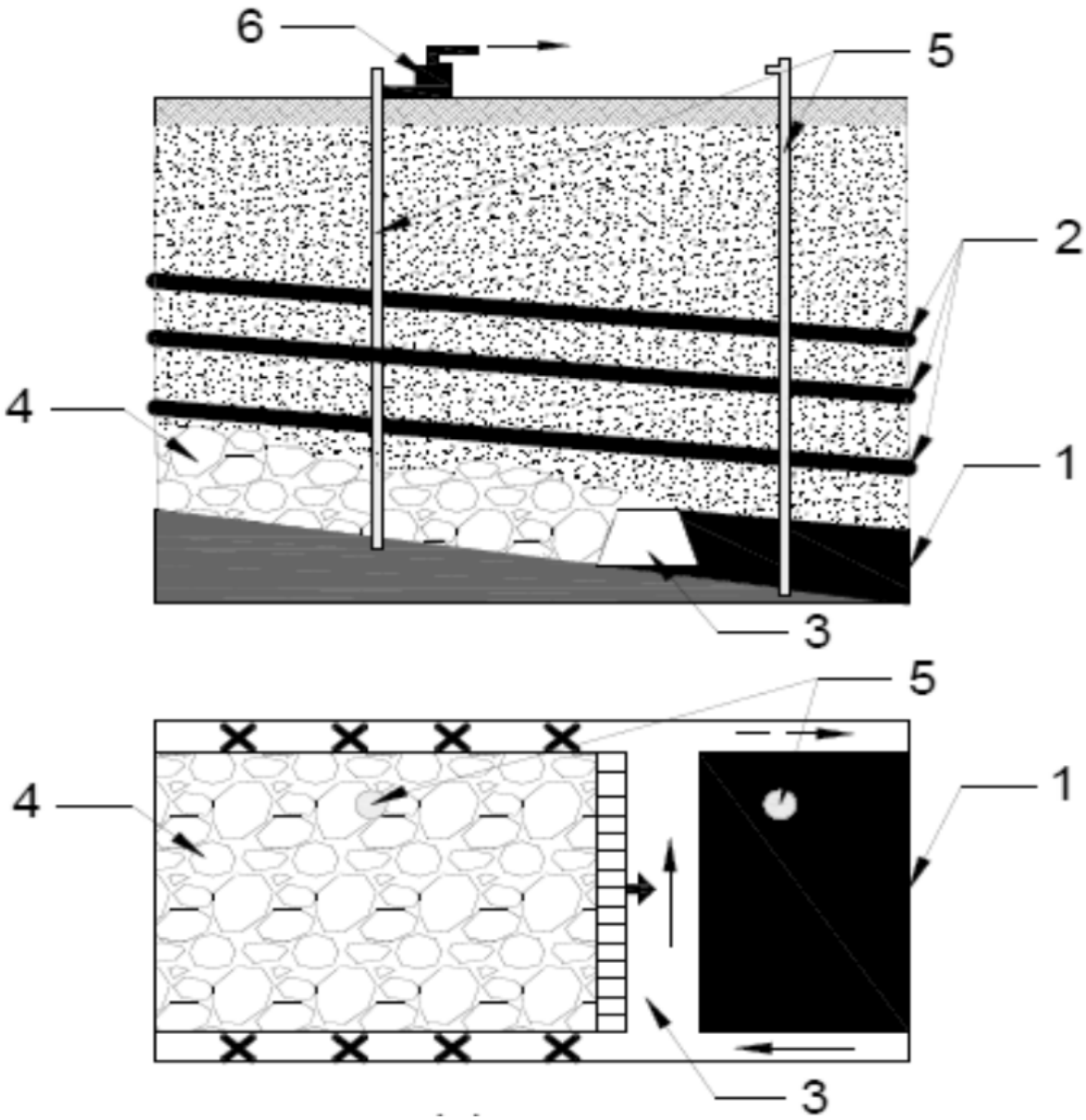
2. Программа *PipeRamming*, реализующая упрощенную математическую модель, позволяет описывать скоростной режим погружения трубы с учетом периодического удаления керна из внутренней полости трубы, а также осуществлять подбор требуемых параметров ударной машины, исходя из известных размеров трубопровода и грунтовых условий.

3. Математическая модель взаимодействия погружаемой трубы с массивом, построенная на основе метода конечных элементов, позволяет описать процесс кернообразования и определить периодичность очистки, при которой давление сжатого воздуха, необходимое для отрыва порции, не превышает 0,6 МПа.

ГЛАВА 4 СОЗДАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОХОДКИ ОСАДОЧНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН

4.1 Область применения вертикальных обсаженных скважин

Эффективным и технологичным способом извлечения метана в широком диапазоне горно-геологических условий является применение вертикальных скважин, пробуренных в массиве горных пород с поверхности (рисунок 4.1). Он обеспечивает извлечение метана из всех источников (сближенные пласты, газоносные породы и выработанные пространства) и позволяет разграничить работы по добыче угля и дегазации очистных забоев угольных шахт [80]. Разгруженный массив шахт представляет собой газовый аккумулятор с повышенной на $2-4$ порядка газопроницаемостью по сравнению с нетронутым массивом. Параметры извлечения метана из этого объема зависят от распределения концентрации метана и давления газа в пространстве разгруженного массива, местоположения фильтрующей скважины и характера ее воздействия на газодинамическое состояние массива [180]. Место заложения скважины на поверхности выбирается так, чтобы к моменту окончания бурения проекция ее забоя на разрабатываемый пласт находилась на расстоянии не менее 30 м впереди очистного фронта. При отработке участков пласта, имеющих с обеих сторон выработанные пространства, вертикальные скважины целесообразно располагать в ряд посредине выемочного столба. Расстояние между вертикальными скважинами, пробуренными с земной поверхности для дегазации подрабатываемых пластов и выработанных пространств действующих лав, и эффективность этой схемы дегазации устанавливаются опытным путем с условием залегания и отработки угольных пластов, что затем учитывается при составлении проекта на наземную дегазацию подрабатываемых пластов угля и выработанного пространства (рисунок 4.1) [119]. Сетка дегазационных скважин бурится с шагом от 50 до 120 м.



1 — разрабатываемый пласт; *2* — сближенные пласты; *3* — очистной забой; *4* — выработанное пространство; *5* — скважина; *6* — передвижная дегазационная установка (ПДУ)

Рисунок 4.1 — Дегазации скважинами, пробуренными с поверхности

Применение такого способа дегазации обеспечивает повышение взрывобезопасности угольных шахт, снижение простоев и, как следствие, уменьшение затрат на добычу угля.

Для сооружения дегазационных скважин в АО «СУЭК-Кузбасс» используют современные самоходные буровые установки *Sandvik* DE-880 (Швеция) и *Prakla* RB-50 (Германия). Они обеспечивают высокопроизводительное бурение скважин

на глубину свыше 500 м с конечным диаметром скважины до 244 мм. На рисунке 4.2 представлена буровая установка при выполнении работ на горном отводе шахты «Полысаевская».

Данная модель служит основной бурового парка компании и обеспечивает проходку скважин шарошечным и пневмоударным методами бурения. Эксплуатационная гибкость машин имеет важное значение при проходке дегазационных скважин в условиях слоистых и перемежающихся пород различной твердости. На рисунке 4.3 представлены варианты породоразрушающего инструмента буровой установки для прохождения осадочных (рисунок 4.3*а*) и крепких горных пород (рисунок 4.3*б*). Важно, что ударно-вращательный способ бурения погружными пневмоударниками при проходке коренных пород является основным, поскольку как минимум 90 % протяженности скважины выполняется именно таким способом. Пневмоударное бурение обеспечивает высокую скорость проходки, точность и технико-экономическую эффективность при сооружении глубоких дегазационных скважин в сравнении с альтернативными вариантами проходки крепких пород.

Рисунок 4.2 — Буровая установка *Prakla* RB-50

а *б*

Рисунок 4.3 — Породоразрушающий инструмент для осадочных (*а*) и крепких (*б*) пород

Параметры скважин и конструкция обсадной колонны выбираются в зависимости от конкретных горно-геологических условий в соответствии с РД–15-09-2006 [119].

Бурение производится в несколько этапов согласно количеству обсадных труб (рисунок 4.4). Каждая ступень включает три операции: бурение скважины, ее обсадку

и бетонирование затрубного пространства на заданную высоту. Протяженность участков и переход на меньший диаметр скважины каждой ступени определяется по результатам геологоразведки. Как правило, переход на меньший диаметр выполняется после прохождения слоя осадочных горных пород или отработанного пласта.

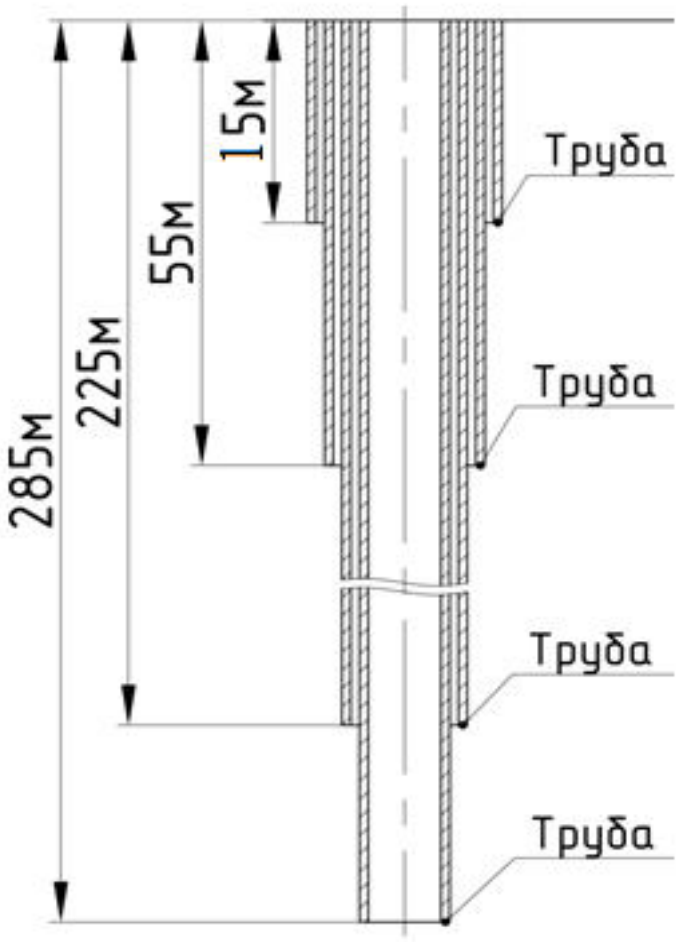


Рисунок 4.4 — Конструкция скважины

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

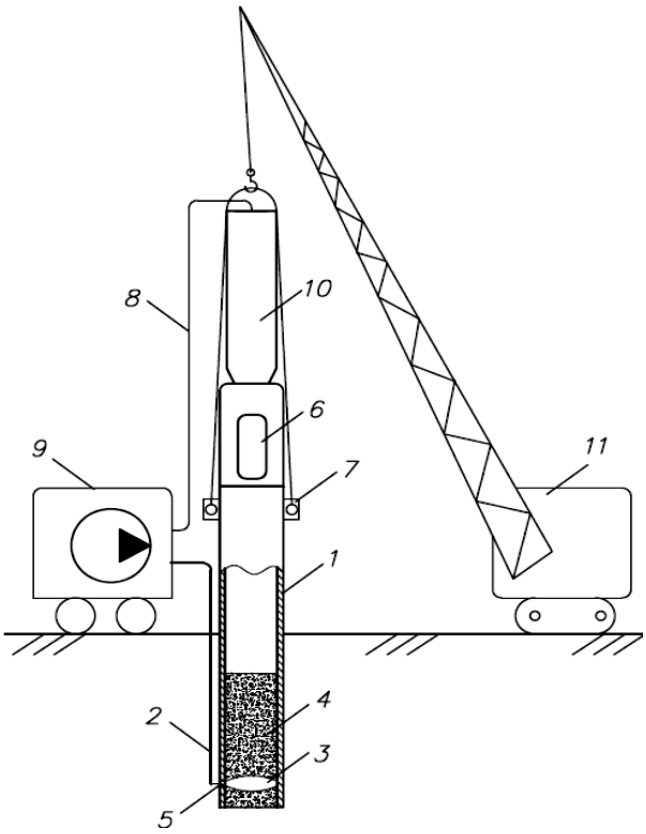
1. Пересечение водоносных горизонтов, при котором происходит потеря бурового раствора и, как следствие, требуются дополнительные расходы на его восполнение, а также затраты времени на затирание глиной зоны поглощения раствора с помощью возвратно-поступательных перемещений шарошечного долота и центратора 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 в состоянии отклонить ось бурения скважины от проектной.

3. Проходка водонасыщенных плывунов, как правило, сопряжена с налипанием глины на породоразрушающий элементы бурового долота, что ощутимо снижает производительность проходки. Также происходит закупоривание глиной промывочных каналов на инструменте. Кроме того, водонасыщенная глина чрезмерно диффундирует с буровым раствором, снижая его очистную функцию. В результате густеющий буровой раствор может сформировывать 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.

Несмотря на то что мощность толщи осадочных пород обычно не превышает 10 % от общей глубины бурения, качество проходки вскрышной толщи во многом определяет конечный результат. Недообсадка или значительное отклонение от вертикали на начальном этапе сооружения скважины неизбежно ведут к ее потере.

Перечисленных проблем можно избежать за счет применения технологии проходки скважин с одновременной ее обсадкой, которая уже опробована на горизонтальных скважинах при бестраншейном строительстве [110]. Суть решения сводится к погружению в массив обсадной трубы при помощи ударов пневмомолота [70, 78]. Схема вертикальной реализации такой технологии при забивке трубы пневмомолотом представлена на рисунке 4.5 [94].



1 — погружаемая труба; *2* — трубопровод; *3* — воздушная камера; *4* — керн; *5* — отверстие для подачи сжатого воздуха; *6* — адаптер с разгрузочным окном; *7* — стяжное устройство; *8* — воздухоподводящий шланг; *9* — компрессор; *10* — пневмомолот; *11* — подъемный кран

Рисунок 4.5 — Погружение трубы с порционным удалением керна

4.2 Апробация вертикальной забивки обсадной трубы с порционным удалением керна

В рамках совершенствования технологии бурения вертикальных дегазационных скважин в шахтном поле шахты им. А. Д. Рубана в период с 26.11.2018 г. по 01.12.2018 г. проводилась апробация приема погружения обсадной трубы при проходке верхнего пласта из наносов выветренных пород, покрывающих твердую коренную породу горного массива. По данным геологической службы толщина пласта четвертичных отложений составляла около 50 м (рисунок 4.6).

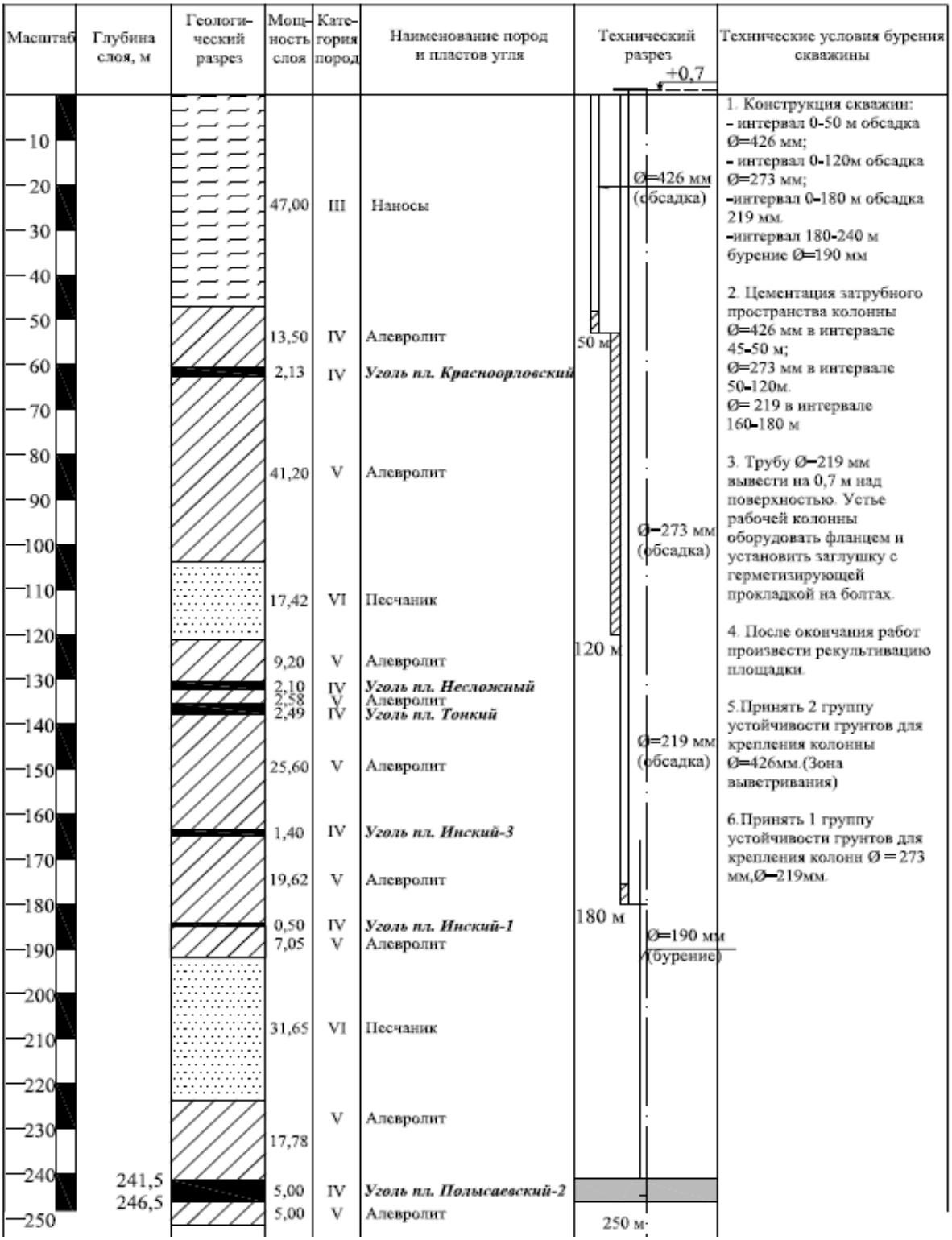


Рисунок 4.6 — Геологический разрез из паспорта бурения и обсадки

По всей толщине размещаются уплотняемые породы с различным соотношением песчаных и глинистых частиц, перемежающихся с включениями осколков и прослоек твердых пород. Влажность массива составляет от 12 % на поверхности до очень обводненных глин на глубине. В таких условиях проходка верхнего пласта

методом вращательного или ударно-вращательного бурения, эффективном на основной проходке по твердым коренным породам, связана с большими трудозатратами, которые обусловлены низкой устойчивостью и частыми обрушениями стенок буримой скважины.

4.2.1 Оснащение и последовательность работ

Организационная особенность проведения промышленных испытаний заключалась в том, что подача сжатого воздуха осуществлялась от одной компрессорной установки *Sollair* сразу на две точки бурения (таблица 4.1). Шаг дегазационных скважин на поверхности составил 100 м в каждом направлении. В связи с этим в полевых условиях был смонтирован временный воздухопровод из металлической трубы диаметром 57 мм. Таким образом, в качестве базового энергоносителя использовался сжатый воздух P = 2,5 МПа, Q = 32,6 м^3/мин.

Таблица 4.1 — Технические характеристики компрессора

Модель компрессора	Sullair Combo 900XHH-1150XH
Производительность, м^3/мин	32,6/25,5
Давление, атм. (max), бар	24/34.5
Марка двигателя	Cat15ATAAC
Мощность, кВт	403
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	4547x2235x2108
Вес, кг	6777

В распоряжении экспериментальной группы была ударная машина «Тайфун-500», разработанная под руководством д.т.н. В. В. Червова в ИГД СО РАН (таблица 4.2). Поскольку рабочее давление на входе в этот пневмомолот не должно превышать 6 атм., потребовалось смонтировать редуцирующий распределительный модуль с ресивером на 150 л (рисунок 4.7). По известным параметрам рабочего давления пневмомолота и давления в магистрали в качестве редукционного крана выбран *Europress* 143 с диапазоном регулировки давления от 0,3 до 2,5 МПа и условным проходом 40 мм.

Таблица 4.2 — Технические характеристики пневмомолота «Тайфун-500»

Энергия удара, Дж (верт.)	4000 (5000)
Частота ударов, мин$^{-1}$ (верт.)	70 – 115 (60 – 90)
Расход воздуха, м^3/мин	6 – 11
Рабочее давление воздуха, МПа	0,6
Масса ударника, кг	50
Масса машины, кг	1300
Габариты машины, мм: длина (диаметр)	1910 (410)
Наибольший диаметр забиваемых труб, мм	820

Представленная на рисунке 4.7 схема позволила запитать пневмоударный привод давлением 0,6 МПа согласно его техническим характеристикам, а магистраль для очистки внутренней полости трубы от керна сжатым воздухом с давлением 2,5 МПа и расходом до 32,6 м^3/мин. Эти энергетические показатели значительно превосходят ранее применявшиеся при горизонтальной проходке скважин [48]. Следовательно, в данном случае процесс очистки должен быть более интенсивным и стабильным.

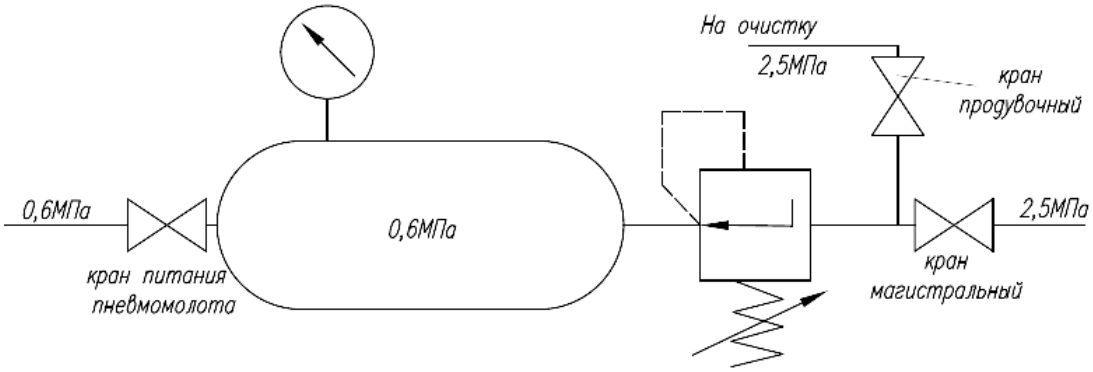


Рисунок 4.7 — Принципиальная схема редуцирующего распределительного модуля

В качестве погружаемой обсадной трубы использовалась стальная сварная труба наружным диаметром 325 мм с толщиной стенки 7 мм по ГОСТ 10704-91. Для подачи сжатого воздуха во внутреннюю полость трубы на удалении 300 мм от забойного торца вварен крутоизогнутый на 90° ввод с условным проходом 40 мм. Продувочный трубопровод, соответствующий длине первой забиваемой секции 5 м, приварен к свободному концу углового ввода и с шагом 1 – 1,5 м прихвачен сваркой к забиваемой трубе. С краном, размещенным на воздухораспределительном модуле, продувочный трубопровод соединен при помощи шланга высокого давления с условным проходом 40 мм (рисунок 4.7).

При закреплении продувочного трубопровода на погружаемой трубе важно было соблюдать параллельность осей погружаемой трубы и внешнего трубопровода, поскольку отклонение от параллельности может при продвижении трубы в глубь массива создавать на ней крутящий момент.

На удалении в 200 мм от заднего торца трубы вырезано разгрузочное окно площадью, равной поперечному сечению трубы.

Пневмомолот «Тайфун-500» монтировался на трубе через адаптер, имеющий конические посадочные поверхности под углом 8° для трубы и пневмомолота. На вертикально установленную тубу пневмомолот с закрепленным на нем адаптером монтировался с помощью автокрана. Первоначальное заглубление трубы в массив, как обычно, осуществлялось при сниженной подаче сжатого воздуха с контролем и корректировкой направления.

Погружение осуществлялось с порционным удалением разрушенной породы из внутренней полости трубы с шагом в 0,5 м. После погружения первой 5-метровой секции до уровня нижней границы разгрузочного окна производился демонтаж пневмомолота и насадки. Скорость погружения первых 5 м была очень высокой: от 60 до 20 м/час. Затем к трубе приварись три накладки, равномерно разнесенные по периметру трубы. В продольном направлении они размещались так, чтобы верхняя половина каждой из них выступала за срез забитой трубы, формируя лепестковый венец для центрирования следующей секции, которая с прорезанным разгрузочным окном размещалась в пространстве между накладками и приваривалась к уже забитой в массив трубе. Отработавшее разгрузочное окно заваривалось для сохранения герметичности полости. После наращивания обсадной трубы стыковалась и секция трубопровода очистной магистрали.

Затем подвешенный на стреле автокрана «Тайфун» с заклиненным на нем адаптером вновь монтировался на свободный конец трубы. В пневмомолот подавался сжатый воздух с уменьшенным расходом, что обеспечивало работу с небольшой отдачей для заклинивания конусной поверхности адаптера на погружаемой трубе. После заклинивания подача сжатого воздуха открывалась полностью, и

ударная машина начинала работать на всю мощность. Скорость погружения второй 6-метровой секции по мере заглубления падала с 20 до 12 м/час.

Далее все операции повторялись в той же последовательности для каждой секции погружаемой трубы. На рисунке 4.8 запечатлен момент выброса очередной порции керна из забиваемой трубы.

Рисунок 4.8 — Общий вид процесса погружения и очистки

На третьей 5-метровой секции трубы скорость снизилась с 12 до 2,5 м/час. К началу забивки четвертой секции трубы климатические условия существенно ухудшились. Температура, державшаяся в начале работ около 0 ºС, опустилась до

– 25º С. По мере снижения температуры работа данного пневмомолота становилась менее стабильной, и на четвертой секции он вообще перестал запускаться. По этой причине эксперимент был завершен в связи с неблагоприятным климатическим прогнозом.

4.2.2 Результаты апробации

За короткий период полевых испытаний, несмотря на ограниченность пройденного метража, удалось убедиться в главном: предложенный метод в этих условиях успешно работает и способен обеспечить эффективную проходку и обсадку проблемных скважин большого диаметра в верхнем уплотняемом слое пород, покрывающих горный массив.

Помимо этого, полученный опыт позволил оценить степень потребности в дополнительных элементах технического оснащения для сокращения времени на подготовку и выполнение технологических операций.

В первую очередь необходимо обеспечить сокращение времени и трудозатрат при установке первой секции трубы и на поддержание ее вертикальности в процессе забивки, особенно на начальном этапе внедрения. Пока единственным вариантом корректировки оси погружения была подтяжка тубы в ту или иную сторону с помощью стрелы автокрана, требующая его постоянного перебазирования по рабочей площадке. Такой процесс трудно управляем и требует много времени.

Отклонению трубы в процессе забивки существенно способствовал конусный тип сопряжения адаптера с трубой. Самозаклинивающиеся конические поверхности не позволяют соблюсти соосность трубы и пневмомолота, тем более в условиях посадки пневмомолота с адаптером на торец трубы на высоте 5 м и более с помощью стрелы автокрана (рисунок 4.8). Возможность тонкой корректировки здесь отсутствует. Вследствие даже малого перекоса пневмомолота неизбежна боковая составляющая ударной силы, которая в процессе забивки приводит к отклонению трубы от оси погружения.

Также много времени занимали сварные работы. Помимо обязательных затрат на стыковку секций (1 – 1,5 ч), необходимо перед завершением погружения каждой секции герметично заварить разгрузочное окно, на что уходило время, соизмеримое со стыковкой.

Для устранения этих «узких мест» к следующему этапу производственных испытаний необходимо создать:

1) стартовое направляющее устройство, обеспечивающее четкую вертикальную ориентацию секций трубы на всех этапах ее погружения;

2) адаптер, приспособленный для этих работ, т. е. исключающий возможность перекоса пневмомолота на трубе. Кроме того, он должен иметь разгрузочное окно для выхода керна из трубы. Это второе качество избавит от необходимости на каждой секции вырезать окно и потом его заваривать.

4.3 Разработка технологических решений и промышленного образца оборудования

4.3.1 Конструкция направляющей платформы

Как отмечалось ранее, пилотный эксперимент выявил ряд негативных моментов в технических и технологических аспектах предложенного способа сооружения вертикальных скважин в массиве осадочных горных пород с порционным удалением керна.

В первую очередь необходимо обеспечить вертикальность погружения. Данную задачу можно решить созданием направляющей, имеющей возможность корректировать пространственное положение трубы на первых метрах погружения. Разработанный вариант направляющей платформы изображен на рисунке 4.9.

Основание представляет собой металлический лист толщиной 10 мм с решетчатой рамой из квадратной трубы 100 х 100 мм для обеспечения поперечной жесткости платформы, которая имеет 4 проушины для ее горизонтального монтажа на точке бурения. Опоры выполнены из квадратной трубы 80 х 80 мм и максимально

разнесены по ширине основания для обеспечения большей устойчивости к горизонтальной реактивной силе, возникающей при смещении трубы. Высота опор в 2,5 м выбрана из возможности регулирования положения трубы вытянутой рукой. Нижний регулировочный пояс служит для точной установки забойного торца трубы (рисунок 4.10). Регулировка осуществляется четырьмя винтами.

1 — основание; *2* — опоры; *3* — верхний регулировочный пояс;
4 — нижний регулировочный пояс; *5* — лебедка

Рисунок 4.9 — Направляющая платформа

Верхний регулировочный пояс необходим для строго вертикального позиционирования трубы перед началом погружения (рисунок 4.10). Кроме того, с помощью регулировочных винтов можно компенсировать перекос платформы, связанный с неровностями поверхности грунта, на которой она установлена.

а *б*

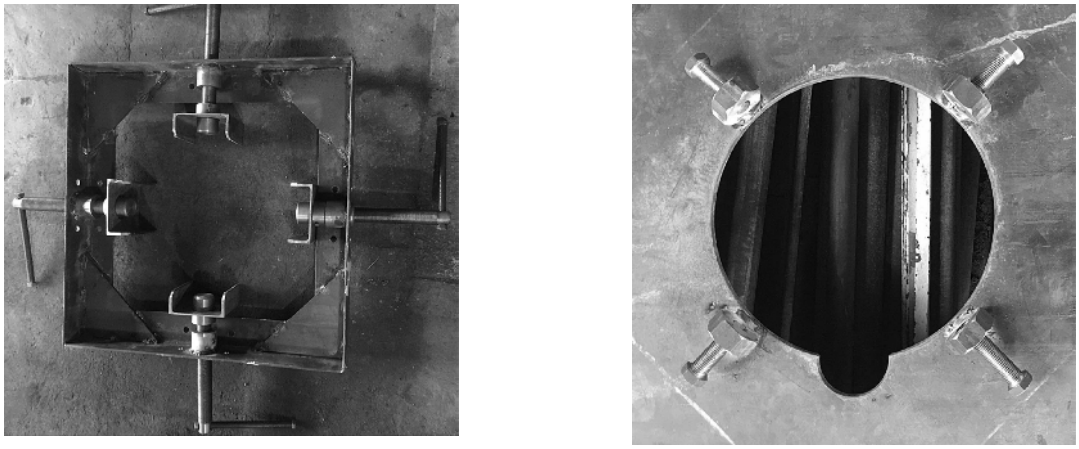


Рисунок 4.10 — Регулировочный пояс: *а* — верхний; *б* — нижний

Направляющая платформа сконструирована разборной для возможности транспортирования на дальние расстояния. В пределах шахтного поля эта платформа может перемещаться в собранном состоянии.

4.3.2 Реализация статического поджатия трубы к забою

Для интенсификации процесса погружения трубы в состав вспомогательного оборудования входит тяговая лебедка. Ее применение направлено на решение сразу двух задач. В первую очередь она своим тяговым усилием должна компенсировать силу отдачи пневмомолота. Сила отдачи $F_{от}$ определяется по зависимости (4.1)

$$F_{от} = p_{м} \frac{\pi \cdot {d_{р}}^{2}}{4}, \quad (4.1)$$

где $d_{р}$ — площадь поперечного сечения камеры прямого хода (для «Тайфун-500» $d_{р}$ = 0,22 м); $p_{м}$ — рабочее давление в этой камере, МПа (в соответствии с паспортными характеристиками $p_{м}$ ограничено 0,8 МПа).

Таким образом, лебедка должна компенсировать силу отдачи пневмомолота в 30 кН.

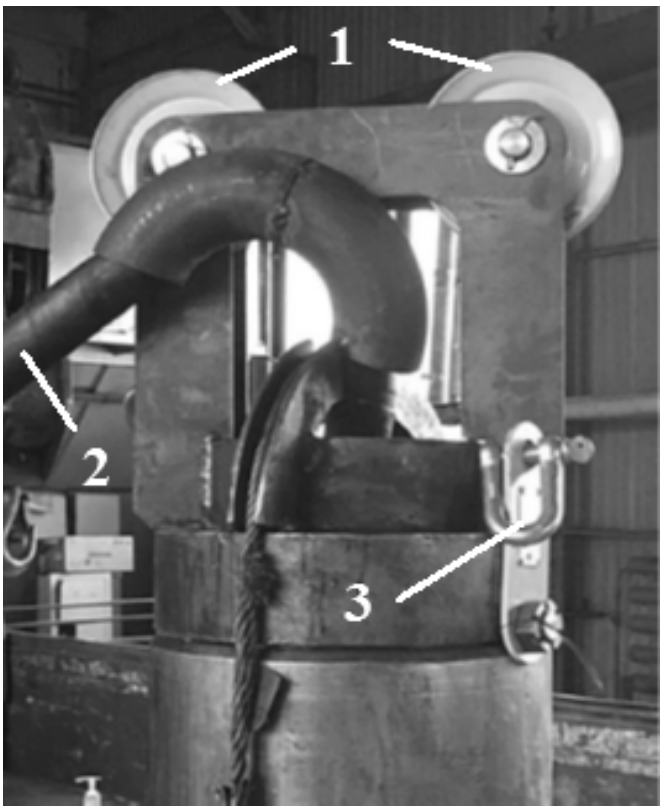
Второй задачей является преодоление упругой составляющей массива под забойным торцом трубы. Цикл внедрения трубы в массив под действием отдельно взятого ударного импульса включает два этапа. На первом происходит продвиже-

ние трубы в направлении действия ударного импульса, энергия которого расходуется на преодоление сил трения, упругую и пластическую деформацию массива. Затем начинается второй этап движения трубы в обратном направлении под действием силы упругости массива. Результатом действия импульса является некоторое остаточное перемещение, определяемое как разность перемещения вперед (полное перемещение) и назад (упругое перемещение). Обычно при забивании труб остаточное перемещение составляет 10 – 15 % от полного, т. е. 85 – 90 % от перемещения трубы вперед компенсируется ее последующим перемещением назад. В этом заключены значительные резервы увеличения эффективности технологического процесса. Полномасштабные эксперименты выявили ощутимый эффект от комбинированного воздействия статической и динамической нагрузок на погружаемую трубу в варианте горизонтальной проходки скважины [45]. Суммарная величина остаточного перемещения достигала 50 – 60 % от полного перемещения, что в несколько раз превышает аналогичный показатель без дополнительного статического воздействия. Таким образом, при использовании дополнительного статического усилия создается упруго-напряженное состояние на поверхности контакта массива с забойным торцом трубы. На этом фоне лишь небольшая часть энергии ударного импульса затрачивается на работу по упругому деформированию и достижению начала пластической деформации. Бóльшая часть энергии остается для полезной работы. Такой прием позволяет существенно повысить производительность процесса ударного внедрения металлических кожухов в массив, снизить его энергоемкость, уменьшить уровень необходимой энергии удара, расширить диапазон технических возможностей по диаметру и глубине проходки скважин [45]. Вместе с тем на практике определить рациональное соотношение между энергией удара и статической силой для заданных свойств массива, диаметра и глубины погружения на данном этапе не представляется возможным.

Технологически реализовать статическое поджатие трубы к забою при вертикальном погружении значительно проще, чем при горизонтальном, так как наличие подпорной стенки необязательно. Сложность заключается лишь в том, что на платформе необходимо разместить пригруз, масса которого в сумме с весом самой

лебедки и платформы должна быть больше или равна удвоенному тяговому усилию лебедки. Для сохранения единства энергоносителя лебедка пневматическая. Тогда пневмомолот, систему очистки трубы и лебедку можно будет запитать от одного компрессора.

На платформе как можно ближе к поверхности трубы необходимо закрепить обводной блок и проушину для крепления тягового каната для того, чтобы вектор усилий в канате был параллелен оси погружаемой трубы. Некоторые изменения необходимо внести и в конструкцию прижима. В существующем варианте подтяжка пневмомолота к трубе осуществляется с помощью винтового талрепа. На прижиме есть дуговой желоб, в котором канат осуществляет разворот на 180º. Канат, контактирующий с неподвижным желобом почти в половину длины окружности, фактически является ленточным тормозом, и разница усилий в набегающих и сбегающих ветвях может достигать 25 – 30 % [136]. Такой вариант прижатия создает ощутимую разницу усилий в канатах, закрепленных на платформе и идущих в барабан лебедки, что, в свою очередь, приведет к перекосу погружаемой трубы и отклонению от вертикали. Чтобы исключить негативный эффект, на прижиме смонтированы два блока на подшипниках. Как известно из [136], потери тягового усилия в этих блоках не превышают 1 %. Узел крепления блоков к пневмомолоту представлен на рисунке 4.11. Для контроля тягового усилия лебедки в месте крепления свободного конца каната установлен динамометр растяжения. Это позволит в процессе полевых испытаний оценить влияние статического поджатия к забою на процесс погружения трубы.



1 — блоки; *2* — воздухоподводящий рукав; *3* — проушина для подъема пневмомолота

Рисунок 4.11 — Узел крепления блоков

4.3.3 Снижение сил бокового трения между наружной поверхностью трубы и массивом

Возможность снижения сил бокового трения лежит в подаче смазки в зону контакта внешней поверхности трубы и массива. Доля энергии на преодоление сил бокового сопротивления может достигать 30 – 50 % от общего сопротивления погружению в зависимости от длины, размеров поперечного сечения и конфигурации погружаемого элемента. Использование обмазок из материалов, обладающих высокими антифрикционными свойствами, способностью к тиксотропным изменениям и низким сопротивлением сдвигу, может привести к ускорению процесса погружения и снижению затрат энергии на погружение. На основании экспериментальных исследований по обмазке железобетонных свай квадратного сечения без

формирования зазора между поверхностью сваи и грунта рекомендуются следующие технические характеристики глинистых суспензий: плотность 1050 – 1300 кг/м^3; вязкость 18 – 30 с; водоотдача за 30 минут 30 см^3; суточный отстой 4 %, которые являются оптимальными. При этом достигается увеличение глубины погружения при прочих равных условиях на 40 – 45 % [152]. Следует также учитывать разное поведение песчаных и глинистых грунтов в процессе погружения обсадной трубы.

При ударном погружении свай через песчаные грунты сила бокового трения с глубиной может резко увеличится. В данном случае под острием сваи образуется переуплотненное ядро, а вдоль ее ствола за счет отжатия (миграции) воды возникает «сухое» трение (рисунок 4.12). Отток воды от источника колебаний в песчаных грунтах связан с хорошей фильтрующей способностью песков. В результате свая перестает погружаться. Для возобновления погружения сваи необходимо предоставить «отдых», т. е. остановить забивку на 3 – 5 дней. За это время в околосвайном пространстве восстанавливается поровое давление, грунтовая вода снова подходит к стволу сваи, трение снижается. В итоге сваю можно снова добивать до проектной отметки погружения.

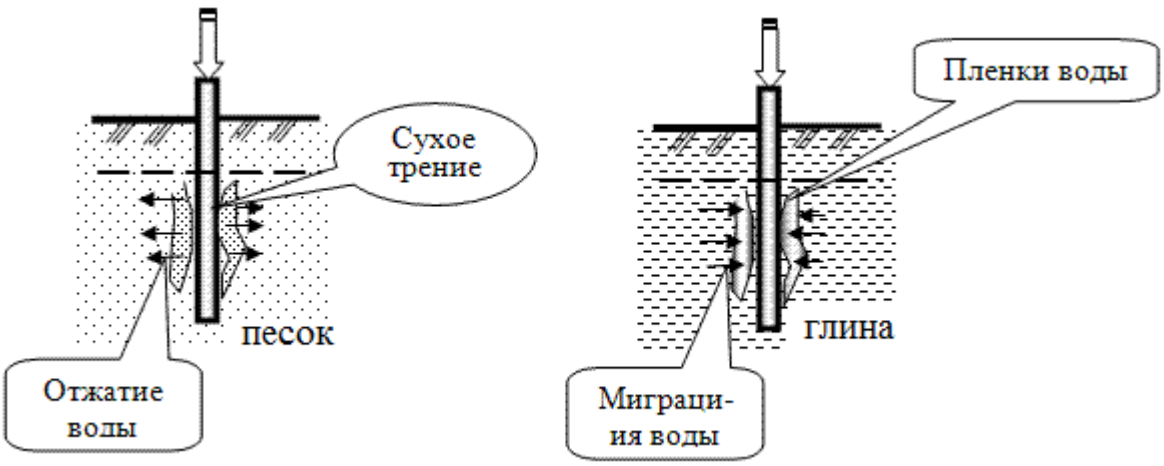


Рисунок 4.12 — Взаимодействие ствола сваи в процессе забивки

При погружении свай через водонасыщенные глинистые грунты с увеличением глубины забивки сила бокового трения может уменьшаться, и свая «проваливается» в водонасыщенное основание. Это явление обусловлено тем, что колебательный контур ствола сваи создает избыточное поровое давление и в глинистом грунте вдоль наружной поверхности погружаемого элемента формируются пленки воды, существенно снижающие трение [14]. Следовательно, наибольший положительный эффект от применения антифрикционных обмазок можно получить на грунтах с высоким содержанием песчаных частиц, а в глинистых грунтах снижение сил бокового трения происходит естественным образом.

Другой технологический прием в строительстве имеет название «тиксотропная рубашка». Это слой специального глинистого раствора, заливаемого в зазор, сформированный между породной стенкой шахтного ствола (котлована) и внешней поверхностью погружаемого методом «опускного колодца» сооружения. Назначение тиксотропной рубашки: снижение сил трения погружаемой конструкции о породу; предотвращение обрушения или сползания породных стенок за счет нагрузки, создаваемой раствором, плотность которого превышает соответственный показатель грунтовых вод; кольматаж (глинизация) породных стенок и, как следствие, снижение их водопроницаемости; гидроизоляция погруженного сооружения за счет создания по его внешней поверхности гидроизолирующего экрана из превратившегося в гель тиксотропного раствора [38]. Наиболее простой вариант формирования зазора между наружной поверхностью трубы и массивом реализуется за счет локального увеличения наружного диаметра на удалении в 2 м от забойного торца. К моменту, когда локальное уширение подойдет к грунту, в массиве уже будет двухметровый отрезок трубы, который будет играть роль направляющей, и значительного влияния на точность погружения уширение оказывать не будет. Вместе с тем в процессе всего дальнейшего погружения в сформировавшийся зазор можно подавать смазывающий раствор на основе воды. Давление столба жидкости поддерживает этот зазор, а антифрикционные компоненты позволят снизить трение. Кроме того, при использовании бентонита происходит укрепление обнажен-

ной грунтовой поверхности в затрубном пространстве, что также будет способствовать сохранению зазора до полного погружения трубы, несмотря на значительно разную плотность смазывающего раствора и массива.

В случае схлопывания зазора положительный эффект все равно сохранится. Механизм такого эффекта хорошо продемонстрирован в исследовании, проведенном на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 4.13 [68].

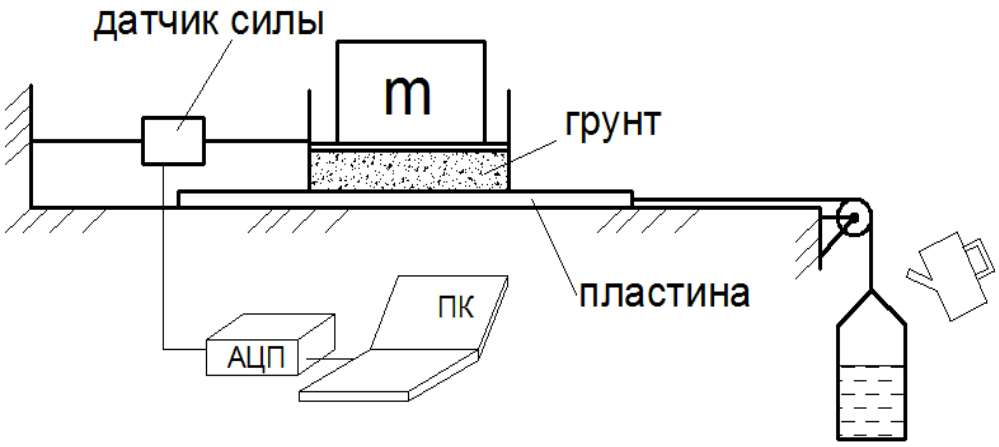


Рисунок 4.13 — Стенд для измерения силы трения

Грунт, ограниченный по периметру легкой и достаточно жесткой пластиковой оболочкой установлен на гладкой пластине и находится под давлением, созываемым грузом. К оболочке прикреплен датчик силы, а к пластине — нагрузочный канат, другой конец которого, проходя через направляющий блок, соединен с емкостью. Увеличение объема жидкости в емкости приводит к росту силы тяги на канате. Датчик силы регистрирует изменение силы трения во времени и фиксирует момент перехода силы трения покоя в силу трения скольжения.

В результате проведенного исследования установлено, что при относительном перемещении сухой пластины и образца с заданной влажностью повышение влажности образца во всех случаях ведет к увеличению силы трения. Характер изменения коэффициента трения в исследованном диапазоне остается линейным, а результаты сопоставимы с известными данными.

Следующий этап эксперимента — определение силы трения между образцом грунта (суглинок с влажностью 10 %) и пластиной, на поверхность которой нанесен тонкий слой воды. После первой протяжки на поверхности пластины образовы-

вался тонкий илистый след. При повторном протягивании этой поверхности значение коэффициента трения составило 0,15, тогда как при отсутствии пограничной переувлажненной пленки коэффициент трения для такого образца 0,6.

При использовании в качестве образца кварцевого песка уменьшение сил трения не наблюдалось. Следовательно, на поверхности пластины формируется тонкий переувлажненный слой из глинистых частиц, заполняющий микронеровности и образующий смазывающую прослойку, при движении по которой силы сопротивления значительно ниже.

Таким образом, в случае схлопывания зазора на определенном удалении от устья скважины эффект снижения сил трения сохранится. При необходимости зазор можно восстанавливать, формируя локальное уширение повторно с некоторым шагом.

Эффективность одновременного применения глинистых растворов и зазора между трубой и массивом для снижения бокового трения в литературе не проводилась, поэтому оценка такого приема может быть сделана лишь в процессе проведения натурных испытаний, поскольку снижение сил бокового трения может нивелироваться ростом лобового сопротивления, создаваемого локальным уширением диаметра.

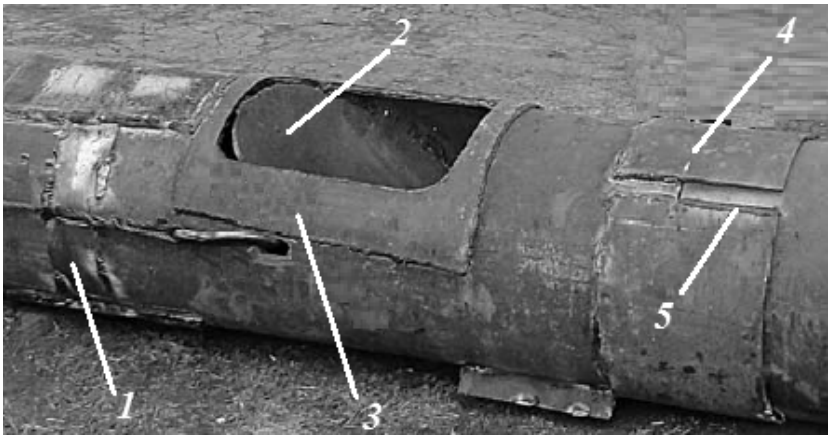
4.3.4 Разработка адаптера с разгрузочным окном

Помимо снижения сил сопротивления и увеличения энергоэффективности пневмомолота, в том числе за счет комбинации со статическим давлением, резерв производительности заключается в оптимизации технологических операций и сокращения затрат времени на их выполнение.

Наиболее продолжительная технологическая операция — это сварочные работы при наращивании секций трубы. Они могут продолжаться 1 – 1,5 ч. Время зависит прежде всего от степени подготовленности соединяемых поверхностей. Столь продолжительные простои не только вредны с точки зрения производитель-

ности в целом, но могут привести и к росту сил бокового трения вследствие «засасывания» трубы. Этот эффект в глинистых грунтах вызван тем, что после прекращения ударного воздействия вода перераспределяется в грунтовом массиве до естественного состояния и в зоне контакта наружной поверхности трубы с грунтом уже нет влагонасыщенного слоя, снижающего силы трения.

Технологической особенностью способа погружения трубы с циклично-поточным удалением керна является необходимость в разгрузочном окне. Наиболее простой способ его создания — вырезать фрагмент боковой поверхности трубы. Однако возникает потребность в приварке такого фрагмента на место после погружения секции в массив, а это длина шва, сопоставимая с периметром трубы. Следовательно, время вспомогательных операций при наращивании обсадной трубы возрастает почти вдвое. Избежать необходимости прорезать, а потом заваривать разгрузочное окно можно за счет применения переходника между пневмомолотом и трубой с уже вырезанным разгрузочным окном (рисунок 4.14). Такая конструкция позволяет реализовать энергоэффективную передачу удара по торцевому сопряжению без использования конических поверхностей. Площадь разгрузочного окна соответствует поперечному сечению трубы и не создает дополнительных сопротивлений на выходе. Кроме того, внутри переходника смонтирован экран-отражатель, который направляет поток разрушенной породы в разгрузочное окно.



1 — наковальня; *2* — экран-отражатель; *3* — усиление окна; *4* — лепестки; *5* — временный сварной шов

Рисунок 4.14 — Переходник с разгрузочным окном

Поскольку прорезанное окно в достаточной мере ослабляет конструкцию переходника, по периметру окна сделано локальной усиление в виде накладки большей площади из фрагмента трубы, которая приварена к переходнику внахлест.

С пневмомолотом переходник соединен талрепами, а на трубу монтируется при помощи трех лепестков. Погружаемая секция трубы размещается таким образом, чтобы ее торец по всему периметру контактировал с торцом переходника. Затем для подъема всей конструкции труба приваривается временными швами к переходнику. После погружения очередной секции трубы сварные швы срезаются и пневмомолот вместе с переходником снимается с трубы.

4.4 Производственные испытания

Предложенная технология прошла опытно-промышленные испытания в условиях горного отвода шахты им. С. М. Кирова. Виброударное погружение обсадной трубы проводилось рядом с работающей установкой *Prakla* RB50. Мощность осадочных пород известна и составляет 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^3/мин. Погружаемая 9-метровая труба диаметром 426 мм с уже смонтированным на ней пневмомолотом, переходником 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 4.15 и https://www.youtube.com/watch?v=bB1-ExaMumI). На глубине 8 м буровой процесс прерывался на вспомогательные операции по демонтажу ударного модуля с переходником. Далее производилось наращивание и погружаемой трубы, и трубопровода для очистки с помощью сварного соединения. Затем ударное погружение возобновлялось до глубины в 15 м. По мере погружения породный состав менялся. До глубины 8 м бурение велось по желтой глине, в интервале от 8 до 14,5 м — по серо-голубой глине, а с отметки 14,5 м из

разгрузочного окна начали выходить крупные обломки алевролита, свидетельствующие о внедрении забойного торца трубы в коренные породы (рисунок 4.16). Физико-механические свойства буримых горных пород представлены в таблице 4.3. Во избежание замятия кромки обсадной трубы на глубине 15 м бурение остановили, поскольку поставленная технологическая задача уже была выполнена.

Таблица 4.3 — Физико-механические свойства буримых горных пород

	Показатель	Значение показателей		
	Образец	A	B	C
	Глубина отбора, м	4	8	14,5
Определение пластичности и консистенции грунтов	Природная влажность, д. е	0,10	0,13	0,002
	Граница текучести, д. е	0,37	0,38	—
	Граница раскатывания, д. е	0,20	0,24	—
	Число пластичности, д. е	0,17	0,14	—
	Показатель текучести	< 0	< 0	—
	Реакция с кислотой	отсут.	бурная	бурная
Определение физико-механических свойств	Плотность, г/см^3	—	—	2,47
	Плотность сухого образца, г/см^3	—	—	2,46
	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	—	—	—
	— в воздушно-сухом состоянии	—	—	32,87
	— в водонасыщенном состоянии	—	—	10,9

По показателям прочности коренная порода (образец C) оказалась ниже, чем по данным геологического разреза (40 – 50 МПа), а образцы *A* и *B* относятся к квазиоднородной группе.

С указной последовательностью было пробурено две скважины глубиной 14,5 и 15 п. м. Скорость погружения трубы варьировалась от 30 м/час на первой секции обсадной трубы до 15 м/час на второй. Очистка внутренней полости осуществлялась каждые 250 мм погружения. Чистое время виброударного воздействия для первой скважины составило 46,5 мин, а для второй — 59,2 мин. После завершения проходки объем разрушенной породы, оставшийся внутри трубы, не превышал по высоте 1,5 м. На установленных кондукторах 426 мм впоследствии базировалась буровая установка *Prakla* RB50 и продолжала бурение диаметром скважины 390 мм с помощью погружного пневмоударика, а оставшийся в трубе керн был удален в режиме штатной шламоочистки. Вспомогательных операций по зачистки кондуктора не потребовалась.

Важной задачей проведенных исследований было определение возможности и энергии ударной 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 с уже 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^2, достаточно для внедрение обсадной трубы в алевролит с прочностью на сжатие 32,87 МПа, а давление сжатого воздуха 2,55 МПа при расходе 32,6 м^3/мин, подаваемого в призабойную зону кондуктора, обеспечивает вскрытие трещин в породе и вынос керна на поверхность.

Рисунок 4.15 — Процесс погружения трубы и выхода породы

Рисунок 4.16 — Эволюция породы по глубине погружения

Оценка эффективности бурения по массиву осадочных горных пород выполнялась с использованием способа исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый массив геосреды [112]. На рисунке 4.17 представлены результаты исследования чистого бурения в стратифицированном массиве при установке стартовых кондукторов на глубину 14,5 и 15 м. Удельный показатель перемещения обсадной трубы за удар пневмомолота J определялся с учетом фактической частоты ударных воздействий на каждом контрольном отрезке пути длиной 0,5 м.

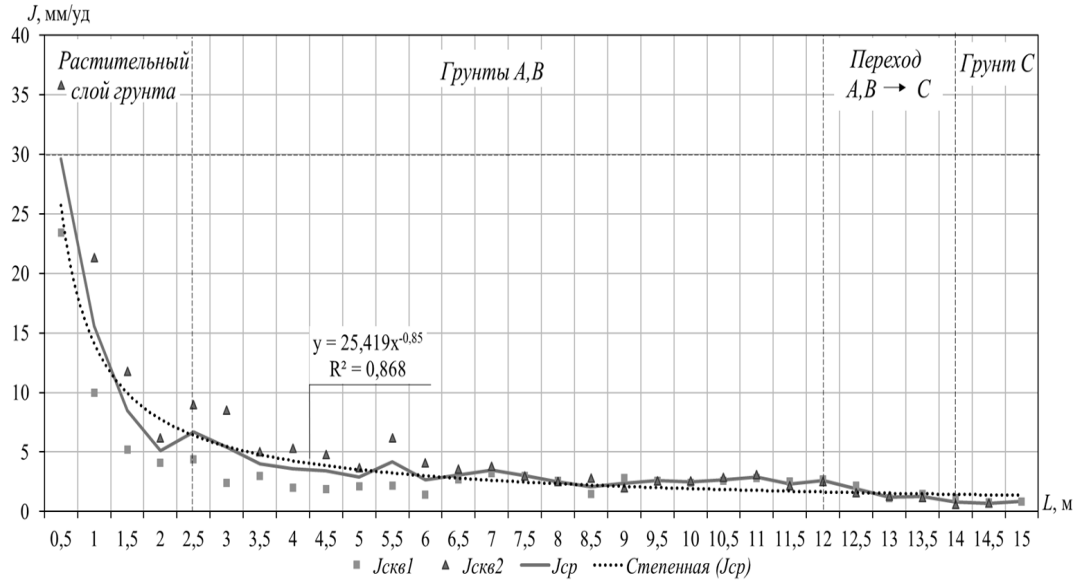


Рисунок 4.17 — Зависимости удельного перемещения за удар (J)

Скорость проходки скважины с одновременным обсаживанием зависит от физико-механических свойств массива, а ее спад происходит при снижении пластичности. Изменение показателей J, характеризующих механическую скорость бурения, протекает умеренно, что говорит о возможности применения виброударного бурения на объектах с более мощными слоями осадочных пород.

Из проведенных полевых испытаний следует (*Приложение Г*), что предложенная технология позволяет исключить из действующего технологического цикла операции по бурению шарошечными долотами, обсадке и бетонированию затрубного пространства. Вместе с тем по производительности буровых работ способ имеет больший потенциал и окончательно не раскрыт. Это объясняется тем, что комплект оборудования и система автоматики представляли собой эксперимен-

тальный образец. Продолжительность вспомогательных операций, таких как позиционирование направляющей платформы и трубы в ней, монтаж и демонтаж ударного модуля, наращивание секций трубы, передислокация на новую точку бурения, занимали значительно большую часть времени, чем чистое бурение. Кроме того, исследователи, проводившие апробацию предложенного способа в полевых условиях, ранее не имели специализированной практики выполнения подобных операций. В дальнейшем при создании промышленного образца большинство операции будут автоматизированы. Полученный результат уже сейчас позволяет дать обобщенную оценку.

В первую очередь важно, что установка кондуктора может проводиться в непосредственной близости к действующим буровым установками и использовать компрессорное оборудование, прикрепленное к буровой, имеется потенциал установки до восьми кондукторов за время проходки дегазационной скважины на всю глубину. При этом работы по установке кондукторов могут выполняться без снижения производительности буровых бригад, т. е. в период ремонтных простоев, сервисного обслуживания буровых установок или параллельно, во время продолжительных операций по обсадке скважин на глубоких горизонтах или подъема бурового става. Таким образом, на момент завершения работ по сооружению одной дегазационной скважины буровая установка будет обеспечена готовыми стартовыми участками скважинами. Дальнейшим оперативным циклом буровых работ по сооружению кондукторов дегазационных скважин является транспортировка в район эксплуатации следующей буровой установки с аналогичным эффектом [94].

4.5 Журнал технико-экономической оценки

В ходе промышленных испытаний проведена сравнительная оценка действующей технологии, состоящей из операции вращательного бурения скважины шарошечным долотом и операции по ее обсадке, с технологией ударного погружения осадной трубы и циклично-поточным транспортированием породы. Анализ эффек-

тивности технологий выполнен на основе способа исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый массив геосреды и методических основ оценки энергоэффективности бурения скважин, имеющих широкую апробацию в условиях горного производства [64, 112, 113, 140, 173]. Условия сравнительных испытаний представлены в п. 4.4, а физико-механические свойства осадочных пород — в таблице 4.3.

4.5.1 Перечень и основные технические характеристики бурового и вспомогательного оборудования технологий

Технические характеристики бурового и вспомогательного оборудования установки кондуктора для технологии с применением шарошечного долота представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 — Наименование и технические характеристики бурового и вспомогательного оборудования для технологии с применением шарошечного долота

Наименование показателя	Значение
1.Буровая установка	
Марка	*Prakla* RB 50
Автомобиль MAN TGS 33.440 6 х 6 с мощностью ДВС, кВт	324
Глубина бурения осадочных пород, м	0 – 65
Диаметр бурения, мм	490
Крутящий момент силовой головки (вертлюга) на второй передаче (0 – 82 об/мин) при 82 об/мин, кН·м	16,6
Усилие прямой подачи, кН	80
Усилие обратной подачи, кН	160
Рабочий ход цилиндров подачи, мм	7500
Максимальная скорость подачи, м/с	0,8
Максимальное натяжение каната главной лебедки, кН	95
Максимальное тяговое усилие крюковой подвески, кН	500
Длина буровой штанги, м	6
Наружный диаметр буровой штанги, мм	114
Внутренний диаметр буровой штанги, мм	96
Масса буровой штанги, кг	158,2

Продолжение таблицы 4.4.

2. Шарошечное долото	
Модель	Ш490 С-ЦВ
Частота вращения, об/мин	40 – 600
Осевая нагрузка, кН	167 – 333
Масса долота, кг	300
3. Обсадная труба	
Внешний диаметр, мм / Толщина стенки, мм	426 / 9
Длина, м	9 – 12
4. Емкость для воды	
Вместимость, т	4,5
5. Авторазливочная станция	
АЦПТ-10 Урал (водовозка с насосом) 4320-1922-60	
6. Сварочный аппарат	
7. Аппарат для резки металла	

Технические характеристики бурового и вспомогательного оборудования установки кондуктора для технологии ударного погружения представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 — Наименование и технические характеристики бурового и вспомогательного оборудования для технологии ударного погружения

Наименование показателя	Значение
1. Автомобильный кран-манипулятор (Nissan Condor КМУ)	
Шасси	Nissan Diesel Condor
Кран-манипулятор	UNIC360
Максимальная грузоподъемность, т	3
Вылет стрелы, м	5,5 – 15
Расход топлива при работе крана-манипулятора, л/ч	6,5
Средний расход топлива при движении, л/ч	28
2. КМУ «Галичанин»	
Марка крана	КС-55713-1
Вылет стрелы, м	9 – 21,9
3. Пневмомолот (опытно-промышленный комплект)	
Энергия единичного удара при 0,5 МПа, Дж	4000
Частота ударов, Гц	0,9 – 2
Рабочее давление воздуха, МПа	0,6
Расход воздуха, $м^3$/мин	10

Продолжение таблицы 4.5

4. Лебедка	
Тяговое усилие, кН	30
Масса лебедки, кг	800
Марка пневмодвигателя	ДАР 5
Давление сжатого воздуха, МПа	0,5
Расход воздуха, $м^3$/мин	до 5
Мощность, кВт	4
5. Обсадная труба с очистным каналом	
Внешний диаметр, мм	426
Длина, м	9 – 12
Толщина стенки, мм	9
6. Ресивер	
Объем, л	200
7. **Емкость для воды**	
Вместимость, т	1
8. Компрессор	
Винтовой компрессор Sullair Combo 900XHH-1150XH	
Марка ДВС Cat15ATAAC, кВт	403
Номинальное давление при расходе воздуха 32,6 $м^3$/мин, МПа	24
Минимальное давление, МПа	17
Емкость топливного бака, л	719
Расход топлива при 70 % нагрузке, л/ч	77,2
7. Пригруз платформы	
Общая масса, т	1,5
9. Сварочный аппарат	
10. Аппарат для резки металла	

4.5.2 Время основных и вспомогательных операций

В ходе проведенных исследований для определения механической и рейсовой скорости бурения, норм выработки и времени, а также себестоимости прямых затрат установлено время основных и вспомогательных операций, затрачиваемое на установку кондукторов для двух оцениваемых технологий. Результаты исследований приведены в таблицах 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6 — Перечень вспомогательных и основных операций для технологии шарошечного бурения и последующей обсадки

№ группы операций	Название вспомогательных операций, выполненных в течение $T_{оп}$ при установке кондукторов	Время операций, мин
1.	**Размещение буровой установки *Prakla* RB50 и оборудования**	**179,5**
1.1	Переезд буровой установки к месту бурения и ее позиционирование на месте заложения проектируемой скважины	20
1.2	Подготовка шламоотстойника (зумфа)	40
1.3	Оборудование площадок для бурового оборудования, секции для приема пищи и отдыха буровой бригады, перемещение и расстановка	119,5
2.	**Вспомогательные операции при шарошечном бурении 15 п. м**	**78,4**
2.1	Установка бурового долота и выбор режима бурения	12,5
2.2	Наращивание буровых штанг (3 операции на 15 п. м)	4 / 3,5 / 2,7
2.3	Разбор бурового става и снятие долота	55,7
3.	**Операции по обсадке скважины**	**122,4**
3.1	Подготовка обсадных труб к эксплуатации	60,6
3.2	Вывешивание трубы (2 секции по 8 м)	2,8 / 5,5
3.3	Сварное соединение труб	21,5
3.4	Обрезка трубы согласно проектной высоте от поверхности	7
3.5	Сварное соединение фланца к обсадной трубе	25
Общее время вспомогательных операций $t_{вс1}$, мин		**380,3/220,8***

*Значение $t_{вс1}$ без операций 1.2 и 1.3, которые необходимы для всех этапов строительства скважины

Время основных операций (чистое бурение) $t_{осн}$, выполненных в течение $T_{оп}$

1. Шарошечное бурения скважины

	Уч. изм. № 1	Уч. изм. № 2	Уч. изм. № 3	Уч. изм. № 4
$L_{уч}$, м	2,932	4,742	4,742	2,584
$t_{осн1}$, мин	26,8	51,14	62,3	28
Сумма затрат основного времени на шарошечное бурение, мин				**168,2**

2. Обсадка скважины трубами

Время обсадки первой секции, мин	2,1	Сумма затрат основного времени на обсадку скважин трубами, мин	5,1
Время обсадки второй секции, мин	3		
Итого общее время основных операций $t_{осн1}$, мин			**173,3**
Итого общее время основных и вспомогательных операций $t_{оп1}$, мин			**553,6/394,1**

Примечания

1. Две операции из трех по заполнению емкости для воды выполнялись во время бурения скважины.
2. Операции по погружению труб в скважину при обсадке отнесены к основным операциям.
3. Логистические простои не учитывались.
4. Технологические простои по ТО агрегатов буровой установки не учитывались.

Таблица 4.7 — Перечень вспомогательных и основных операций для технологии ударного погружения обсадной трубы

№ группы операций	Наименование вспомогательных операций, выполненных в течение $T_{оп}$ при установке кондукторов	Время операций, мин		
		$t_{вс2.1}$	$t_{вс2.2}$	$t_{\overline{вс2}}$
		Скв. № 1	Скв. № 2	Ср. знач.
1.	**Установка буровой платформы и бурового оборудования**	56	64,3	**60,1**
1.1	Переезд установки к месту бурения (Nissan Condor)	3	2,5	2,7
1.2	Установка платформы (КМУ UNIC360)	12	15	13,5
1.3	Пригруз платформы бетонными блоками (КМУ UNIC360)	10	8,5	9,3
1.4	Стыковка пневмомолота и обсадной трубы (КМУ UNIC360)	7	9	8
1.5	Монтаж очистного канала к обсадной трубе	10	12,3	11,1
1.6	Монтаж обсадной трубы с пневмомолотом на платформе (КМУ «Галичанин»)	14	17	15,5
2.	**Забуривание (КМУ «Галичанин»)**	13,5	16,5	**14,8**
2.1	Выставление вертикальной оси трубы	7	8	7,5
2.2	Контроль и коррекция вертикального положения трубы после прохождения первого п. м скважины	3,5	4	3,7
2.3	Расстроповка пневмомолота	3	4,2	3,6
3.	**Наращивание става**	63,5	69,3	**66,3**
3.1	Демонтаж пневмомолота	5,5	4,5	5
3.2	Стыковка пневмомолота и обсадной трубы (КМУ UNIC360)	7	10	8,5
3.3	Состыковка обсадных труб в вертикальном положении (КМУ «Галичанин»)	10	7,3	8,6
3.4	Сварное соединение обсадных труб	38	43	40,5
3.5	Растроповка пневмомолота (КМУ «Галичанин»)	3	4,5	3,7
4.	**Заключительные работы**	38	37	**37,4**
4.1	Демонтаж пневмомолота (КМУ UNIC360)	5,5	4	4,7
4.2	Обрезка трубы согласно проектной высоте от поверхности	8,5	7	7,7
4.3	Сварное соединение фланца к обсадной трубе	24	26	25
5.	**Погрузка платформы и бурового оборудования на автомобиль (КМУ UNIC360)**	23	19	**21**
Общее время вспомогательных операций, мин		171	186,8	**199,6**

Время основных операций (чистое бурение) $t_{осн}$ выполненных за $T_{оп}$

L,м	$t_{осн.с1}$	$t_{осн.с2}$	$t_{\overline{осн2}}$	L,м	$t_{осн.с1}$	$t_{осн.с2}$	$t_{\overline{осн2}}$	L,м	$t_{осн.с1}$	$t_{осн.с2}$	$t_{\overline{осн2}}$
1.	0,63	0,71	0,67	**6.**	2,08	4,81	3,44	**11.**	2,81	2,98	2,89
2.	1,7	1,78	1,74	**7.**	2,21	2,65	2,43	**12.**	3,35	2,9	3,12
3.	1,46	2,8	2,13	**8.**	3	3,05	3	**13.**	5,46	5,51	5,48
4.	1,48	3,56	2,52	**9.**	3,43	4,35	3,89	**14.**	8,6	6,05	7,32
5.	2,36	4,05	3,2	**10.**	3,13	3,03	3,08	**15.**	10,1	10,9	10,5

Итого общее время основных операций (по среднему значению) $t_{\overline{осн2}}$ при чистом бурение скважины 15 п. м с одновременной обсадкой, мин	**55,4**
Итого общее время основных и вспомогательных операций $t_{\overline{оп1}}$, мин	**255**

Примечания

1. Операции по порционному удалению керна относятся к чистому бурению, так как выполняются при работающем пневмомолоте.
2. Монтаж очистного канала к обсадной трубе второй и последующей секций выполняется во время бурения.
3. Логистические простои не учитывались.
4. Бурении скважины № 1 производилось до вхождения трубы в алевролит, отметка 14,5 п. м. Для сравнительного анализа принято 15 п. м, время прохождения такое же, как на интервале 14 – 14,5 п. м.

4.5.3 Данные для определения производительности и себестоимости прямых затрат

Общие расчетные данные для проведения сравнительной оценки производительности установки кондукторов рассматриваемыми технологиями за счет определения сменных норм выработки и времени приведены в таблице 4.8. Составленные данные для установления норм выработки и времени двух технологий опирались на действующий нормативный документ [116].

Таблица 4.8 — Данные для определения норм выработки $H_{в}$ и времени $H_{вр}$

Показатель	Расчетная формула	
$H_{в}$, п. м	$H_{в} = \frac{T_{оп}}{t_{оу} + t_{ву}} \cdot k_{п} = \frac{T_{см} - (T_{пз} + T_{об} + T_{лн})}{t_{оу} + t_{ву}} \cdot k_{п} = \frac{T_{оп}}{t_{опу}} \cdot k_{п}$	(4.2)
$t_{оу}$, $t_{ву}$ мин/п. м	$tоу = tосн / L_{к}$; $tву = tвс / L_{к}$	(4.3)
$t_{опу}$, мин/п. м	$t_{опу} = (t_{ву} + t_{оу}) / L_{к}$	(4.4)
$H_{вр}$, чел.-мин/ п. м	$H_{вр} = \frac{T_{см}}{H_{в}}$	(4.5)
Показатель	Название, содержание работ и примечания	
$T_{см}$	*Полное время рабочей смены, мин*	720
$T_{оп}$	*Оперативное время рабочей смены, мин*	648
$t_{оу}$ и $t_{ву}$	*Удельное время основной работы и вспомогательной работы.* Определялись с использованием значения показателей $t_{осн}$ и $t_{вс}$, где $L_{к}$ — длина кондуктора	расч.
$t_{опу}$	*Удельное оперативное время установки кондуктора.*	расч.
$T_{пз}$	*Подготовительно-заключительное время работы, мин*. Прием-сдача смены: ознакомление с записями в буровом журнале за предыдущую смену, получение дополнительных сведений о состоянии станка и его узлах, неполадках от сменщиков. Ознакомление с паспортом буровых работ, определение оптимального параметра режима бурения. Осмотр состояния устья скважины, принятие мер по предотвращению попадания посторонних предметов в скважину по окончании бурения. Уборка рабочего места и станка (протирка ветошью основных узлов станка, удаление пыли с окон, стен и пола кабины). Заполнение бурового журнала (учета работы бурового станка и другой документации).	8
$T_{от}$	*Время организационно-технического обслуживания рабочего места.* Организационное обслуживание: осмотр станка, рабочей площадки, основного и вспомогательного оборудования, питающих магистралей, рабочего органа станка, наличие средств защиты и индикации метана, пожаротушения, заземления, инструмента, обтирочно-смазочного материала. Техническое обслуживание: смазка узлов и агрегатов станка, заправка компрессора, заполнение водой емкостей, включение (и отключение) электроэнергии, опробование станка на холостом ходу, устранение мелких неисправностей.	17
$T_{отд}$	*Время отдыха буровой бригады.* Принято 6 % от продолжительности оперативного времени $T_{оп}$ [116].	39
$T_{лн}$	*Время на личные надобности*. Принято из [116].	10
$k_{п}$	*Понижающий коэффициент нормирования*. Испытания проводилась в летний сезон, сложных горнотехнических условий не было. Принято $k_{п}$= 1.	–

Исходные данные для расчета себестоимости прямых затрат на установку кондуктора предложенными технологиями представлены в таблице 4.9 и согласованы с экономическим отделом АО «СУЭУ-Кузбасс».

Таблица 4.9 — Исходные данные для расчета себестоимости прямых затрат на установку кондуктора

Общие данные для расчета себестоимости прямых затрат		
Стоимость дизельного топлива — 38 руб./л		
Стоимость заправки водой — 250 руб./т		
Расход воды на скважину глубиной 15 п. м: – технология с шарошечным бурением — 13 т; – технология ударного погружения — 2 т.		
Затраты на расход топлива дизель-генератора QAS 125 во время выполнения сварочных работ при 50 % нагрузке с расходом 12,4 л/час — 471,2 руб./час		
Группа расходов	**Технология с шарошечным бурением и последующей обсадкой**	
А	**Показатель**	**Стоимость, руб./п. м**
1.	Станок *Prakla* RB50 (амортизация)	428
3.	Долото (стоимость 420500 руб. ресурс 600 п. м.)	701
4.	Штанги буровые	10,5
6.	Техническая вода	216,6
	Итого, руб./п. м	**1356,1**
В	**Заработная плата буровой бригады и вспомогательных специалистов**	**Стоимость, руб./час**
1.	Буровой мастер, руб./час	900
2.	Бурильщик (два человека), руб./час	1300
3.	Сварщик. Учитывается время работы при выполнении основных и вспомогательных операций по обсадке скважины (таблица 4.6)	650
С	**Вспомогательная информация для расчета затрат на расход энергоносителей**	**Стоимость, руб./час**
1.	Затраты на ДТ при работе ДВС Prakla RB50 в режиме чистого бурения (вращение + подача) с расходом ДТ 43 л/ч	1634
2.	Затраты на ДТ при работе ДВС Prakla RB50 в режиме вспомогательных операциях (обсадка труб, позиционирование установки) с расходом ДТ 17 л/ч	646

Продолжение таблицы 4.9.

Группа расходов	**Технология ударного погружения**	
А	Показатель	Стоимость, руб./п. м
1.	Грузовик с манипулятором Nissan Diesel Condor	127
3.	Компрессор Sullair Combo 900XHH-1150XH	274
4.	Пневмомолот «Тайфун»	64
5.	Труба очистной магистрали	247
6.	Техническая вода	33,3
7.	Аренда КС «Галичанин» на одну скважину 15 п. м по тарифу 2000 руб./час	133,3
	Итого, руб./п. м	**878,6**
В	**Заработная плата буровой бригады и вспомогательных специалистов**	Стоимость, руб./час
1.	Крановщик	700
2.	Сварщик	650
3.	Бурильщик	650
С	**Вспомогательная информация для расчета расхода энергоносителей**	Затраты на ДТ, руб./ч
1.	Затраты на ДТ при работе ДВС компрессора Sullair Combo 900XHH-1150XH в режиме 70 % нагрузке	2933,6
2.	Затраты на ДТ при работе ДВС Nissan Diesel Condor передвижение / работа КС	1064 / 247
Примечание 1. Затраты на обсадную трубу диаметром 426 мм не учитывались (одноименная номенклатура расхода для двух технологий). 2. Расход масла и смазок при эксплуатации дизельных двигателей машин и других агрегатов не учитывался.		

При определении технико-экономической оценки время на вспомогательные операции для технологии шарошечного бурения п. 1.1 и 1.2 (таблица 4.6) не учитывалось, поскольку эти операции необходимы для всех этапов строительства глубоких дегазационных скважин. Для технологии ударного погружения при расчетах использовалось время средних значений основных $t_{\overline{\text{осн2}}}$ и вспомогательных $t_{\overline{\text{вс2}}}$ операций, полученных по результатам установки двух кондукторов.

4.5.4 Определение технико-экономических параметров оценки эффективности технологий установки кондукторов

Определение механической $V_м$ и рейсовой $V_р$ скоростей осуществлялось по следующей формуле (4.6) с использованием значений показателей в таблицах 4.6 и 4.7:

$$V_м = \frac{L}{t_{осн}} \text{ и } \quad V_р = \frac{L}{(t_{осн} + t_{вс})}. \tag{4.6}$$

При установлении рейсовой скорости бурения для технологии с шарошечным долотом время вспомогательных операции перед началом бурения скважины суммируются с основным временем бурения первого участка измерения, а время вспомогательных операций после окончания бурения суммируются с основным временем бурения заключительного участка измерения. Аналогичный подход применялся при определении показателей $V_м$ и $V_р$ при обсадке пробуренной скважины трубами. Результаты расчета приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 — Результаты расчета $V_м$ и $V_р$ при установке кондуктора по технологии с шарошечным долотом

Показатель	Значение показателей					
	1. Шарошечное бурение				2. Обсадка	
Участок измерения	1	2	3	4	5	6
$L_{уч}$, мм	2932	4742	4742	2584	8000	8000
$t_{вс1}$, мин		4,06	3,5	58,4		
$t_{осн1}$, мин		51,14	62,3	28		
$V_м$, мм/мин	109,4	92,7	76,1	92,3	3809,5	2666,6
$V_р$, м/мин	49,4	86	72	30	122,1	129

Для определения рейсовой скорости бурения в технологии ударного погружения время 1 и 2 групп вспомогательных операций суммируются с основным временем бурения первого метра, а время операций групп 4 и 5 — с основным временем бурения заключительного участка (таблица 4.7). Результаты расчетов приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 — Результаты расчета механической и рейсовой скорости установки кондуктора по технологии ударного погружения

Показатель	Значение показателей на каждом метре проходки							
L, м	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_{\overline{\text{вс2}}}$, мин	74,9	—	—	—	—	—	—	66,3
$t_{\overline{\text{осн2}}}$, мин	0,67	1,74	2,13	2,52	3,2	3,44	2,43	3
$V_{\text{м}}$, мм/мин	1492,5	574,7	469,4	396,8	312,5	290,6	411,5	333,3
$V_{\text{р}}$, мм/мин	13,2	574,7	469,4	396,8	312,5	290,6	411,5	14,4
L, м	9	10	11	12	13	14	15	
$t_{\overline{\text{вс2}}}$, мин	—	—	—	—	—	—	58,4	
$t_{\overline{\text{осн2}}}$, мин	3,89	3,08	2,89	3,12	5,48	7,32	10,5	
$V_{\text{м}}$, мм/мин	257	324,6	346	320,5	182,4	136,6	95,2	
$V_{\text{р}}$, мм/мин	257	324,6	346	320,5	182,4	136,6	14,5	

Используя данные из таблиц 4.6 – 4.8, по формулам (4.2) – (4.5) определили нормы выработки и времени, требуемые на установку двухсекционных кондукторов длиной 15 п. м. Результаты исследования приведены в табл. 4.12.

Таблица 4.12 — Исходные данные и результаты расчета норм выработки и времени для установки двухсекционных кондукторов длиной 15 п. м

Технология с шарошечным долотом		Технология ударного погружения	
Показатель	Значение показателей	Показатель	Значение показателей
$t_{\text{вс1}}$, мин	220,8	$t_{\overline{\text{вс2}}}$, мин	199,6
$t_{\text{осн1}}$, мин	173,3	$t_{\overline{\text{осн2}}}$, мин	54,5
$t_{\text{ву1}}$, мин/п. м	17,7	$t_{\overline{\text{ву2}}}$, мин	11,9
$t_{\text{оу1}}$, мин/п. м	11,5	$t_{\overline{\text{оу2}}}$, мин/п. м	3,7
$t_{\text{опу1}}$, мин/п. м	26,2	$t_{\overline{\text{опу2}}}$, мин/п. м	15,6
$H_{\text{в1}}$, п. м	24,7	$H_{\overline{\text{в2}}}$, п. м	38,1
$H_{\text{вр1}}$, чел.-мин/п. м	29,1	$H_{\overline{\text{вр2}}}$, чел.-час/п. м	18,9

Определение себестоимости прямых затрат на установку двухсекционных кондукторов длиной 15 п. м

Для определения себестоимости прямых затрат на установку кондукторов рассматриваемыми технологиями использовалась формула (4.7)

$$C_{\text{т}} = C_{A\text{т}} + C_{B\text{т}} + C_{C\text{т}}\,, \tag{4.7}$$

где $C_{A\text{т}}$ — удельные амортизационные затраты технологии на буровое оборудование и другие затраты из группы расходов A, руб./п. м; $C_{B\text{т}}$ — удельные затраты на заработную плату буровой бригады и вспомогательных специалистов, группа расходов B, руб./п. м; $C_{C\text{т}}$ — затраты на потребление энергоносителей, группа расходов C, руб./п. м. Параметр $C_{B\text{т}}$ определяется по формуле (4.8)

$$C_{B\text{т}} = \frac{C_{Bl1}+C_{Bl2}+C_{Bl3}+\ldots C_{Bln}}{L_k} = \frac{\sum_i^l C_{Bli}}{L_k}, \quad (4.8)$$

где $C_{Bl1}, C_{Bl2}, C_{Bl3}, C_{Bln}$ — текущие затраты на заработную плату по контрольным участкам при установке кондуктора, руб.; L_k — длина кондуктора, п. м

Параметр $C_{C\text{т}}$ получен по формуле (4.9)

$$C_{\text{Ст}} = \frac{C_{Cl1}+C_{Cl2}+C_{Cl3}+\ldots C_{Cln}}{L_k} = \frac{\sum_i^l C_{Cli}}{L_k}, \quad (4.9)$$

где $C_{Cl1}, C_{Cl2}, C_{Cl3}, C_{BCln}$ — текущие затраты на потребление энергоносителей по контрольным участкам при установке кондуктора, руб.

Параметр C_C для каждого контрольного участка L рассчитывается по формуле (4.10)

$$C_{Cln} = C_{\text{эв}ln} + C_{\text{эо}ln}, \quad (4.10)$$

где C_{Cln} — текущая стоимость затрат на энергоносители при выполнении вспомогательных операций на конкретном контрольном участке, руб.; $C_{\text{эо}}$ — текущая стоимость затрат на энергоносители при выполнении основных операций (чистое бурение или обсадка) на конкретном контрольном участке, руб.

Для определения значений показателей C_B и C_C на контрольных участках L использовались время конкретных операций, выполняемых при установке кондуктора и удельные расходные показатели затрат групп B и C, обозначенных как U_b и U_c руб./ч. (таблицы 4.6, 4.7, 4.9).

Параметр C_B отдельно взятого участка измерений $C_{Bl1}, C_{Bl2} \ldots C_{Bln}$ вычислялся по формуле (4.11)

$$C_{Bln} = \left(\sum_i^{ln} t_{\text{вс}lni} + t_{\text{осн}ln}\right) \cdot U_{bn}, \quad (4.11)$$

где U_{bln} — удельный расходный показатель группы B, принадлежащий конкретному контрольному участку, руб./ч.

Эта формула использовалась в определении параметров C_B для технологии с шарошечным долотом, где значения показателей U_b при бурении и обсадке отличались.

В технологии с ударным погружением кондуктора, где значение показателя U_b было одинаковым, а длина участка контроля составляла 1 п. м, применялась формула (4.12)

$$C_B = \frac{t_{\overline{\text{оп2}}} \cdot U_{bn}}{L_k}, \tag{4.12}$$

где $t_{\overline{\text{оп2}}}$ — общее оперативное время, затрачиваемое на установку кондуктора.

Определение параметров $C_{\text{эв}}$ и $C_{\text{эо}}$ для расчета C_C на конкретных контрольных участках L_n вычислялось по формулам (4.13) и (4.14)

$$C_{\text{эв}ln} = t_{\text{вс}i1} \cdot U_{ci1} + t_{\text{вс}i2} \cdot U_{ci2} + t_{\text{вс}i3} \cdot U_{ci3} + \ldots t_{\text{вс}in} \cdot U_{cin}, \tag{4.13}$$

$$C_{\text{эо}ln} = t_{\text{осн}ln} \cdot U_{cn.} \tag{4.14}$$

Результаты расчета себестоимости прямых затрат для двух рассматриваемых технологий приведены в таблицах 4.13 и 4.14.

Пример расчета параметра C_{B1} для $L_{\text{уч}4}$ и $L_{\text{уч}6}$ по формуле (4.9):

$$C_{B1l4} = (0{,}045 + 0{,}93 + 0{,}46) \cdot 2200 = 3168 \text{ руб.}$$

$$C_{B1l6} = (0{,}091 + 0{,}36 + 0{,}11 + 0{,}41 + 0{,}5) \cdot 2850 = 4189{,}5 \text{ руб.}$$

Пример расчета параметра C_{C1} для $L_{\text{уч}1}$ и $L_{\text{уч}5}$ по формуле (4.8):

$$C_{C1l1} = 0{,}33 \cdot 646 + 0{,}2 \cdot 646 + 0{,}44 \cdot 1634 = 1061{,}3 \text{ руб.}$$

$$C_{C1l5} = 1{,}01 \cdot 471{,}2 + 0{,}046 \cdot 646 + 0{,}035 \cdot 646 = 562{,}7 \text{ руб.}$$

Таблица 4.13 — Результаты определения $C_{т1}$ для технологии с шарошечным бурением

		Пункты $t_{вс}$ (табл. 4.6)	$t_{вс1}$, ч	$t_{осн1}$, ч	$t_{оп1}$, ч	C_{B1}, руб.	$C_{эв1}$, руб.	$C_{эо1}$, руб.	$C_{С1}$, руб.
Бурение	$L_{уч1}$	п. 1.1	0,33	0,44	0,97	2134[b1]	213,1[c1]	719 [c2]	1061,3
		п. 2.1	0,2				129,2 [c1]		
	$L_{уч2}$	п. 2.2	0,06	0,85	0,91	2002 [b1]	38,7 [c1]	1389 [c2]	1427,7
	$L_{уч3}$	п. 2.2	0,058	1,03	1,08	2376 [b1]	37,4 [c1]	1683 [c2]	1720,4
	$L_{уч4}$	п. 2.2	0,045	0,46	1,43	3168 [b1]	29 [c1]	751,6 [c2]	1381,3
		п. 2.3	0,93				600,7 [c1]		
Обсадка	$L_{уч5}$	п. 3.1	1,01	0,035	1,09	3106,5 [b2]	475,9[c3]	57,1[c1]	562,7
		п. 3.2	0,046				29,7 [c1]		
	$L_{уч6}$	п. 3.2	0,091	0,05	1,02	2909,8 [b2]	58,7 [c1]	81,7[c1]	554,9
		п. 3.3	0,36				169,6[c3]		
		п. 3.4	0,11				51,8[c3]		
		п. 3.5	0,41				193,1[c3]		
Затраты на установку кондуктора, руб.				C_{A1}= 20341,5		12528,3	—	—	6708,3
				Итого: 39578,1					

Итого: $C_{т1}$ = 2638,5 руб./п. м	Удельные затраты по группам А, В, С, руб./п. м				
	$C_{Aт1}$	$C_{Bт1}$	—	—	$C_{Cт1}$
	1356,1	835,2	—	—	447,2

Примечание

Учет удельных затрат при определении C_{B1} и $C_{С1}$:

[b1]Общие удельные затраты на зарплату буровой бригады, U_{b1} = 2200 руб./ч

[b2]Общие удельные затраты на зарплату буровой бригады со сварщиком, U_{b2} = 2850 руб./ч

[c1]Удельные затраты на ДТ при вспомогательных операциях (*Prakla* RB50), U_{c1} = 646 руб./ч

[c2] Удельные затраты на ДТ при чистом бурении (*Prakla* RB50), U_{c2} = 1634 руб./ч

[c3] Удельные затраты при ведении сварочных работ (QAS125), U_{c3}= 471,2 руб./ч

Таблица 4.14 — Результаты определения $C_{т2}$ для технологии ударного погружения

	L, п. м	Пункты $t_{вс2}$* (табл.4.7)	$t_{вс2}$, ч	$t_{осн2}$, ч	$t_{оп2}$, ч	C_{B2}, руб.	$C_{эв2}$, руб.	$C_{эо2}$, руб.	C_{C2}, руб.
Бурение с одновременной обсадкой скважины	1	п. 1.1	0,045	0,011	3,9	566,6[b1]	47,8[c1]	32,2 [c3]	293,9
		п. 1.2	0,225				55,5[c2]		
		п. 1.3	0,155				38,3[c2]		
		п. 1.4	0,133				32,8[c2]		
		п. 1.5	0,185				87,3[c2]		
	2	—	—	0,029				85 [c3]	750,7
	3	—	—	0,035				102,6 [c3]	
	4	—	—	0,042				123,2 [c3]	
	5	—	—	0,053				155,4 [c3]	
	6	—	—	0,057				167,2 [c3]	
	7	—	—	0,04				117,3 [c3]	
	8	п. 3.1	0,083	0,05			20,5[c2]	146,6 [c3]	519,9
		п. 3.2	0,141				34,8[c2]		
		п. 3.4	0,675				318[c4]		
	9	—	—	0,064			—	187,7 [c3]	1255,3
	10	—	—	0,051			—	149,6 [c3]	
	11	—	—	0,048			—	140,8 [c3]	
	12	—	—	0,052			—	152,5 [c3]	
	13	—	—	0,091			—	266,9 [c3]	
	14	—	—	0,122			—	357,8 [c3]	
	15	п.4.1	0,0783	0,175			19,3[c2]	513,3[c3]	875,3
		п.4.2	0,128				60,3[c4]		
		п.4.3	0,416				196[c4]		
		п.5	0,35				86,4[c2]		
Затраты на установку, руб.				C_{A2}= 13179		8500	—	—	3695,1
				Итого: 25374,1					
Итого: $C_{т2}$ = 1691,5 руб./п. м				Удельные затраты по группам А, В, С, руб./п. м					
				$C_{Aт2}$		$C_{Bт2}$	—	—	$C_{Cт2}$
				876,6		566,6	—	—	246,3

Примечание. Учет удельных затрат при определении C_{B2} и C_{C2}

*При расчете C_{C2} п. 1.6, п. 2.1–2.3, п. 3.3 и 3.5 не учитывались, так как затраты на аренду КС «Галичанин» уже учтены в группе расходов А (таблица 4.9)

**Сумма значений C_{C2} на участках измерений со 2 по 7 п. м

[b1]Общие удельные затраты на зарплату буровой бригады, U_{b1} = 2000 руб./ч

[c1]Удельные затраты на ДТ при перемещении бурового оборудования, U_{c1} = 1064 руб./ч

[c2]Удельные затраты при вспомогательных операциях (КМУ UNIC360), U_{c2} = 247 руб./ч

[c3]Удельные затраты при чистом бурении (Sullair Combo 900XHH-1150XH), U_{c3} = 2933,6 руб./ч

[c4]Удельные затраты при ведении сварочных работ (QAS125), U_{c4} = 471,2 руб./ч

4.5.5 Результаты технико-экономической оценки эффективности технологий

В ходе монтажа кондукторов в осадочных породах с применением шарошечного долота установлено, что бурение скважин диаметром 490 мм осуществляют на 2-й передаче с частотой вращения 0,75 Гц (45 об/мин) при усилии подачи ниже минимальных значений, рекомендованных заводом-изготовителем бурового долота в 3 – 4 раза (таблица 4.5). Бурение в ограниченном режиме (по усилию подачи) ведется с позиции снижения рисков по обрушению стенок ствола скважины и ее отклонения от проектной оси [36]. Следовательно, резерв повышения производительности шарошечного бурения по осадочным породам за счет увеличения механической скорости проходки скважин очень ограничен. Ввиду технико-технологических ограничений по бурению скважин в оптимальном режиме в задачи исследований не входило подробное изучение режимов проходки скважин на буровой установке *Prakla RB50*. Исследования процесса установки двухсекционного кондуктора выполнялся на одном из буровых участков на горном отводе шахты им. С. М. Кирова. Полученные результаты исследования по производительности установки кондуктора длиной 15 п. м (таблица 4.12) схожи для технологии с применением шарошечного бурения и на других буровых участках ± 6,5 % (из сверки с данным буровых журналов трех буровых бригад). При возникновении аварийных ситуаций в процессе установки кондуктора длиной 14 – 16 п. м простои составляют в среднем 1,5 рабочих смены.

На рисунке 4.18 представлена технико-экономическая диаграмма установки кондуктора с применением шарошечного бурения.

Штатная обсадка двумя трубами составляет лишь 4 % от общего времени операций по строительству стартового участка скважины. Следовательно, основной объем работ приходится на вспомогательные операции. Наиболее объективную оценку процесса обсадки трубами дает рейсовая скорость бурения $V_{\text{р}}$, в связи с чем скорость «чистого» внедрения обсадных труб (значения показателей $V_{\text{м}}$ из таблицы 4.10) на графике не отображена. Несмотря на то что время вспомогательных операций при шарошечном бурении на 24 % ниже, чем при обсадке трубами,

рейсовая скорость обсадки выше за счет минимума сопротивления погружению труб в скважину. Тренд текущих затрат на установку кондуктора C_1 построен с учетом данных C_{A1}, C_{B1}, C_{C1} для каждого конкретного контрольного участка. Спад показателей C_1 на участке обсадки скважины обусловлен 25 % снижением средних затрат на энергоносители по сравнению с участком шарошечного бурения.

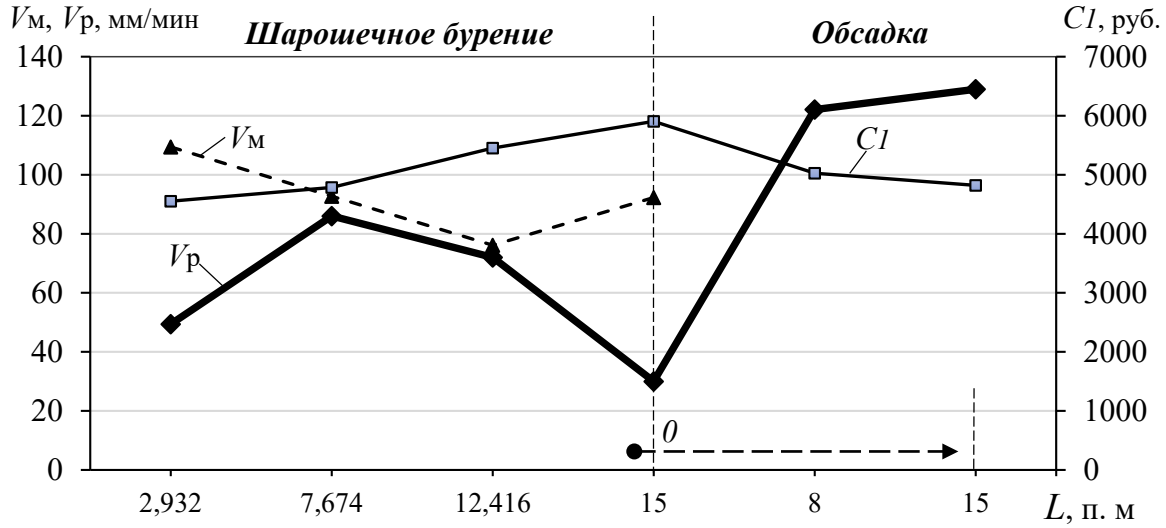


Рисунок 4.18 — Технико-экономическая диаграмма установки кондукторов шарошечным бурением

На рисунке 4.19 представлена технико-экономическая диаграмма технологии установки кондуктора ударным погружением.

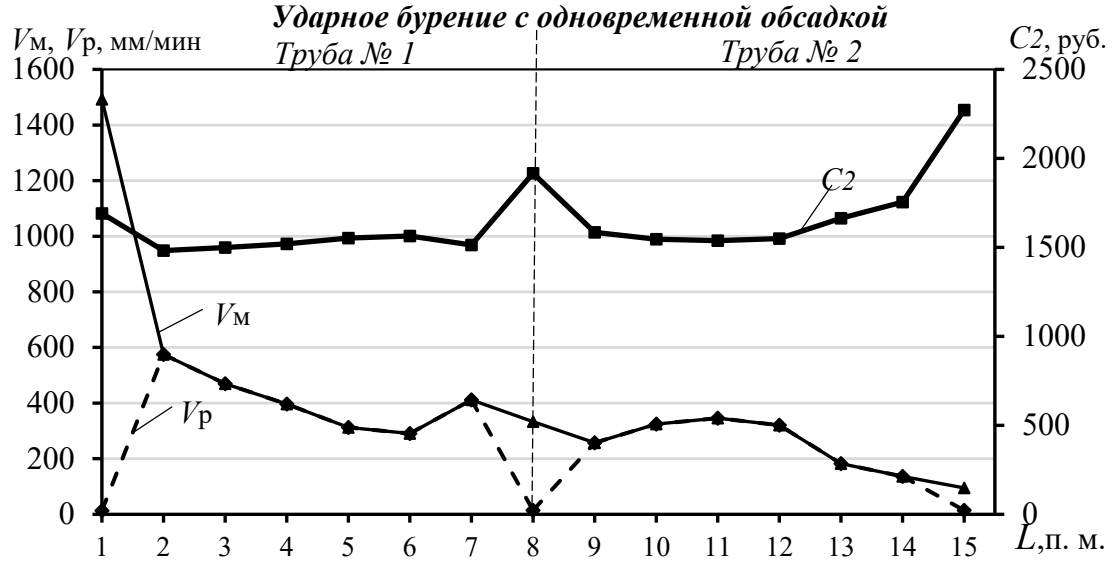


Рисунок 4.19 — Технико-экономическая диаграмма установки кондуктора ударным погружением

Технология имеет высокие показатели механической скорости внедрения кондуктора. Ее спад отмечается в зоне перехода от грунтов к скальным породам в интервале 13 – 14 п. м и при внедрении в алевролит 14 – 15 п. м. Средние показатели механической скорости $V_м$ внедрения кондуктора в 4,2 раза выше, чем при шарошечном бурении, однако отмечается существенный спад рейсовой скорости бурения $V_р$ при росте затрат C_2 на первом, восьмом и последнем участках пути. Для первого участка спад вызван затратами времени на погрузо-разгрузочные работы, позиционирование буровой платформы и забуривание. На промежуточном (8 п. м) основные затраты времени приходятся на сварочное соединение труб, где продолжительность работ в 2 раза выше, чем у технологии с применением шарошечного бурения, что обусловлено высокими требованиями к качеству сварного соединения труб для эффективной передачи энергии от пневмомолота к забойному торцу трубы. На заключительном участке осуществлялись работы по обрезке забитой трубы на требуемый уровень от поверхности земли, демонтаж и погрузка оборудования.

На рисунке 4.20 представлен сравнительный анализ производительности двух технологий по данным результатов исследований норм выработки и времени из таблицы 4.12.

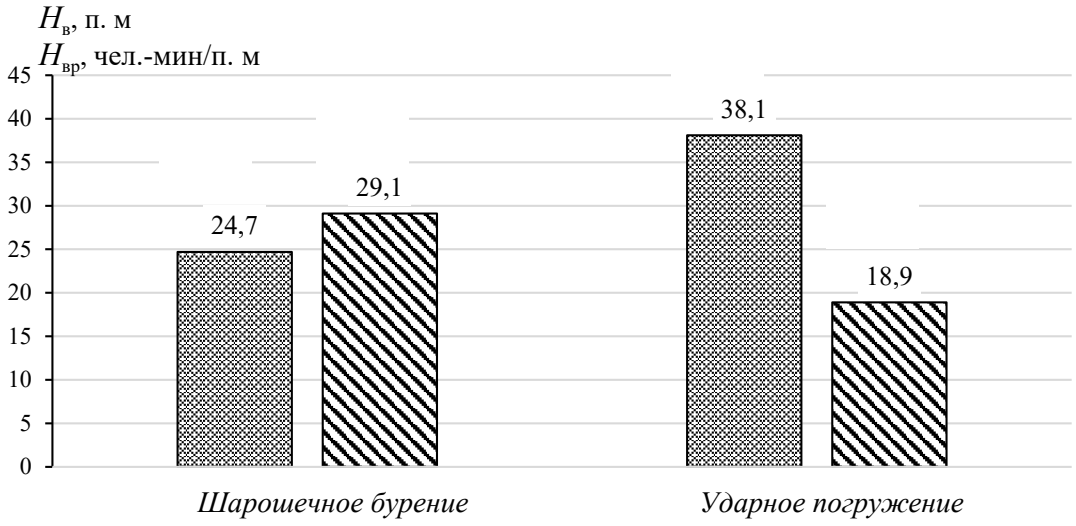


Рисунок 4.20 — Производительность технологий

Производительность технологии ударного 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. Эти организационные мероприятия позволят снизить время сварочных работ не менее чем в 2 раза без увеличения затрат на заработную плату. В этом случае время вспомогательных операций на сварочные работы (п. п. 1.5, 3.4, 4.3 из таблицы 4.7) для установки кондуктора длиной 15 п. м сократится на 38,5 мин, а дополнительный прирост производительности увеличится на 18 % и составит 45 п. м в смену. Следовательно, сменная норма выработки будет уже на 82 % выше, чем у технологии шарошечного бурения.

Важно, что технология установки кондуктора с применением шарошечного бурения включает цементирование, в приведенных расчетах не учитывались эти операции, а также технологический простой, необходимый для затвердевания цемента, который составляет по продолжительности 24 ч (2 смены).

За время технологического простоя технология ударного погружения кондуктора способна обеспечивать установку 5 кондукторов при $H_{в1}$ = 38,1 п. м, а при включение в штат второго сварщика $H_{в1}$= 45 п. м — 6 кондукторов длиной 15 п. м. Операции по цементированию кондуктора для технологии ударного погружения не требуются, поскольку обсадная труба после погружения плотно обжата массивом горных пород по всей глубине. Это обстоятельство ведет к существенному снижению затрат на этапе установки стартового кондуктора.

Оценка эффективности любой технологии бурения только по показателям производительности недостаточна, так как при близких показателях сменной производительности буровых работ затраты на выполнение основных и вспомогательных операций могут иметь существенное отличие ввиду разницы затрат на буровое оборудование, энергоносители и заработную плату. Следовательно, любое технико-технологическое и организационное решение, направленное на повышение производительности буровых работ, должно оцениваться по удельным показателям себестоимости прямых затрат на проходку 1 п. м скважины с конкретной привязкой

к горнотехническим и горно-геологическим условиям. Таким образом, любой шаг, направленный на оптимизацию процесса бурения внутри технологии (замена энергоисточника, адаптация режимов бурения к условиям горных пород, восстановление породоразрушающих элементов буровых долот, использование новых очистных агентов, смена погружных ударных машин и инструмента и др.) или замену одной технологии на другую с ее последующей оптимизацией, должен иметь последовательную, независимую и объективную оценку для успешного внедрения в практику горного производства [62, 63].

Рассмотрим представленный на рисунке 4.21 сравнительный анализ себестоимости прямых затрат на установку кондукторов длиной 15 п. м (из таблиц 4.13 и 4.14).

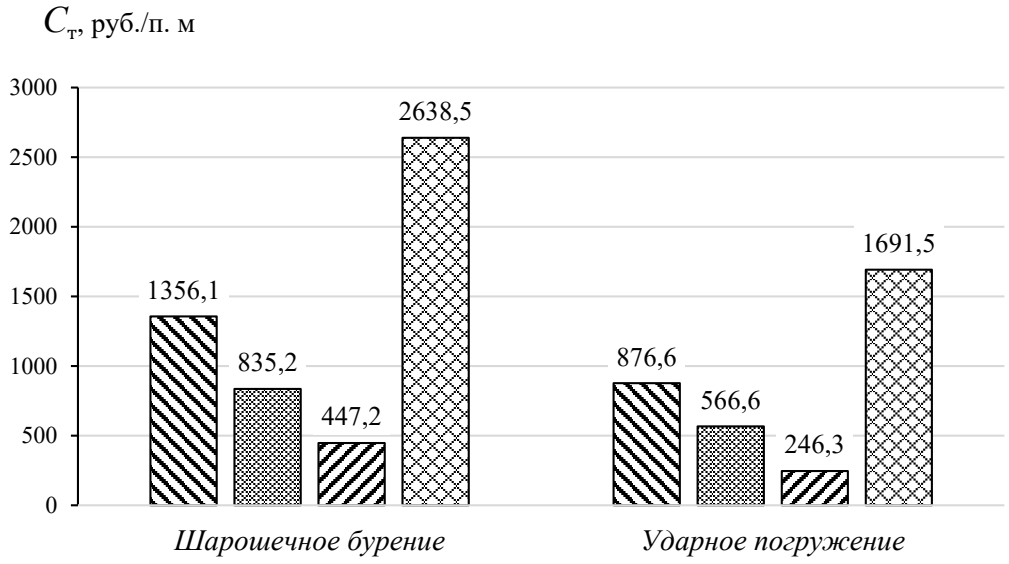


Рисунок 4.21 — Себестоимость прямых затрат на установку кондуктора длиной 15 п. м

В ходе исследований установлено, что по удельной себестоимости прямых затрат Cт технология погружения кондуктора ударным способом обходится дешевле на 56 %, чем при использовании действующей технологии (*Приложение Д*). Рассматривая отдельно удельные затраты по группам расходов *A*, *B*, *C*, важно выделить, что удельные денежные средства, затрачиваемые на буровое оборудование $C_{A\text{т}}$ при эксплуатации новой технологии, ниже на 54,7 %, затраты на оплату труда буровой бригады $C_{B\text{т}}$ — на 47,4 %, а затраты на расходуемые энергоносители

$C_{\text{Ст}}$ — на 81,5 %, что также говорит о высокой энергоэффективности новой технологии в сравнении с действующей. Это обусловлено тем, что удельные затраты энергии на контрольных участках измерений зависят от мощности W энергоисточников и продолжительности операций (t), затрачиваемых на выполнение основных и вспомогательных работ. Следовательно, соотношение значений показателей $C_{\text{Ст}}$ аналогично отображают соотношение удельных затрат энергии на установку кондуктора для двух технологий, которая будет иметь аналогичную разницу в 81,5 % с учетом затрат на расходуемую энергию ДВС буровой установки для действующей технологии, компрессора для новой и дизель-генератора, применяемого в обоих случаях. Важно, что для сравнения энергоэффективности технологий через показатели $C_{\text{Ст}}$ стоимость самого энергоносителя для оценки не имеет значения. Если не задавать реальную стоимость потребляемого энергоносителя (в рассматриваемом случае ДТ), а принимать ее условной, но одинаковой для каждой технологии, изменение значений $C_{\text{Ст}}$ отобразит и разницу в затратах денежных средств (с учетом условной стоимости энергоносителя), и разницу по энергии, необходимой на реализацию технологии. Соответственно, если стоимость текущих затрат фактическая, значения показателей $C_{\text{Ст}}$ аналогичные, т. е. отражают реальное положение дел по финансовым затратам на энергоносители при эксплуатации техники, обеспечивающей технологические процессы, в рублях.

Из приведенных результатов опытно-промышленных испытаний следует, что технология установки кондукторов ударным погружением обеспечивает надежную и безаварийную установку кондуктора согласно проектной оси.

Полученные результаты имеют важное значение для выбора ударного узла для данной технологии при переходе на глубину установки кондукторов до 65 п. м включительно, а также для проектирования ударных машин с регулируемой энергией единичного удара, позволяющей обеспечивать стабильно высокие показатели механической скорости погружения с учетом горно-геологических условий на любой глубине внедрения. Помимо резерва увеличения производительности установки кондукторов по механической скорости, технология имеет возможность дополнительного снижения вспомогательных операций за счет использования труб

длиной 11,5 п. м, что при переходе на большие глубины снизит количество сварных соединений и будет способствовать уменьшению энергетических потерь при ударном погружении. Кроме этого, при глубине около 20 м процесс погружения целесообразно осуществлять единым отрезком трубы, состоящим из предварительно сваренных секций, что также приведет к сокращению вспомогательных операций. 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. Платформа имеет отверстие и два центрирующих захвата трубы, разнесенных на 1,5 – 2 м по высоте друг от друга. Захваты оснащены гидроцилиндрами для оперативной и автоматизированной корректировки вертикального положения погружаемой трубы. Гидравлические аутригеры позволяют оперативно выставлять платформу в строго горизонтальное положение.

Создание такой специализированной платформы, работающей в паре с автокраном, имеющим вылет стрелы 31 – 34 м и грузоподъемность 32 – 40 т, снизит время вспомогательных операций на этих этапах по меньшей мере 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 превысят 20 млн руб. [65]. Для сравнения: стоимость буровой установки *Prakla* RB50 88 млн руб. [117]. При этом автокран может быть задействован в логистической цепочке и осуществлять погрузочно-разгрузочные работы для нужд всех буровых участков компании.

Разработанный журнал технико-экономической оценки технологий имеет важную научную-практическую ценность. Обозначенные подходы могут приме-

няться для тестирования других технологий бурения на последующих этапах строительства скважин, но уже с учетом их специфики. Следовательно, составление подобных журналов при тестировании новых образцов техники и технологий на всех этапах сооружения дегазационных скважин будет объективно отображать технико-экономический эффект от технических, технологических и организационных нововведений, направленных на снижение экономических затрат при бурении дегазационных скважин на угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс», а также при проходке скважин иного назначения.

4.6 Выводы по Главе 4

1. Технология установки кондукторов ударным способом с порционным удалением керна при сооружении дегазационных скважин с поверхности исключает аварийные ситуации, связанные с неустойчивостью стенок скважины и на этапе бурения, и при обсадке.

2. Применение технологии позволяет исключить из действующего технологического цикла операции по бурению шарошечными долотами, обсадке и бетонированию затрубного пространства.

3. Способ виброударного бурения обеспечивает прохождение скважин с их одновременным обсаживанием трубой диаметром 426 мм по пластичным грунтам и скальным прослоям прочностью до 32,8 МПа на глубину свыше 15 м.

4. Производительность технологии ударного погружения кондуктора на 54 % выше, чем у технологии с применением шарошечного бурения.

5. По удельной себестоимости прямых затрат технология погружения кондуктора ударным способом обходится дешевле на 56 %, чем при использовании технологии шарошечного бурения с последующей обсадкой.

6. Предложенная технология способствует развитию новых подходов в области бурения вертикальных скважин большого диаметра в горном деле и может применятся на значительно больших глубинах в уплотняемом массиве осадочных горных пород при условии использования ударного привода соответствующей мощности.

ГЛАВА 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА В ВЕРТИКАЛЬНО ПОГРУЖАЕМОЙ ТРУБЕ

Процесс забивания металлических труб в массив осадочных горных пород с применением машин ударного действия можно охарактеризовать тремя основными параметрами: длина забиваемой трубы, скорость забивания и точность проходки скважины. Очевидно, что два последних параметра имеют смысл только при наличии первого, т. е. при условии заданной или фактически достигнутой глубины погружения. Другими словами, при планировании любых 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 возможен только с позиции анализа волновой картины, возникающей в волноводе, роль которого выполняет забиваемая труба, при генерации, передаче и трансформации ударного импульса.

5.1 Моделирование и анализ затухания ударного импульса

Цель данного раздела — выяснение роли исходных параметров исследуемого процесса в волновой картине затухания ударного импульса при его движении по забиваемой трубе.

Для этого воспользуемся следующей идеализацией процесса забивания металлических труб с открытым передним концом с применением машин ударного действия, базирующейся на динамических моделях поведения упругих стержней с внешним трением [96, 98, 132].

Постановка задачи. Металлическая труба диаметром D с толщиной стенки h и длиной H, моделируемая упругим стержнем с сечением $S = \frac{\pi}{4}\left[D^2 - (D-2h)^2 \right]$, находится в массиве, описываемом идеальной упруго-пластической моделью [26].

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 [58].

Система координат выбрана таким образом, чтобы ее начало совпадало с верхним торцом забиваемой трубы, а ось 0X была направлена вдоль оси трубы вглубь массива (рисунок 5.1).

Тогда граничные условия задачи (5.1) будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} &\sigma(0,t) = \Phi(t) \\ &\sigma(H,t) = -P_{л}, \end{aligned} \tag{5.1}$$

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

На участке $H_0 \le x \le H$ труба нагружена нормальным давлением $P_{бок}$ (5.2), линейно увеличивающимся с ростом глубины погружения:

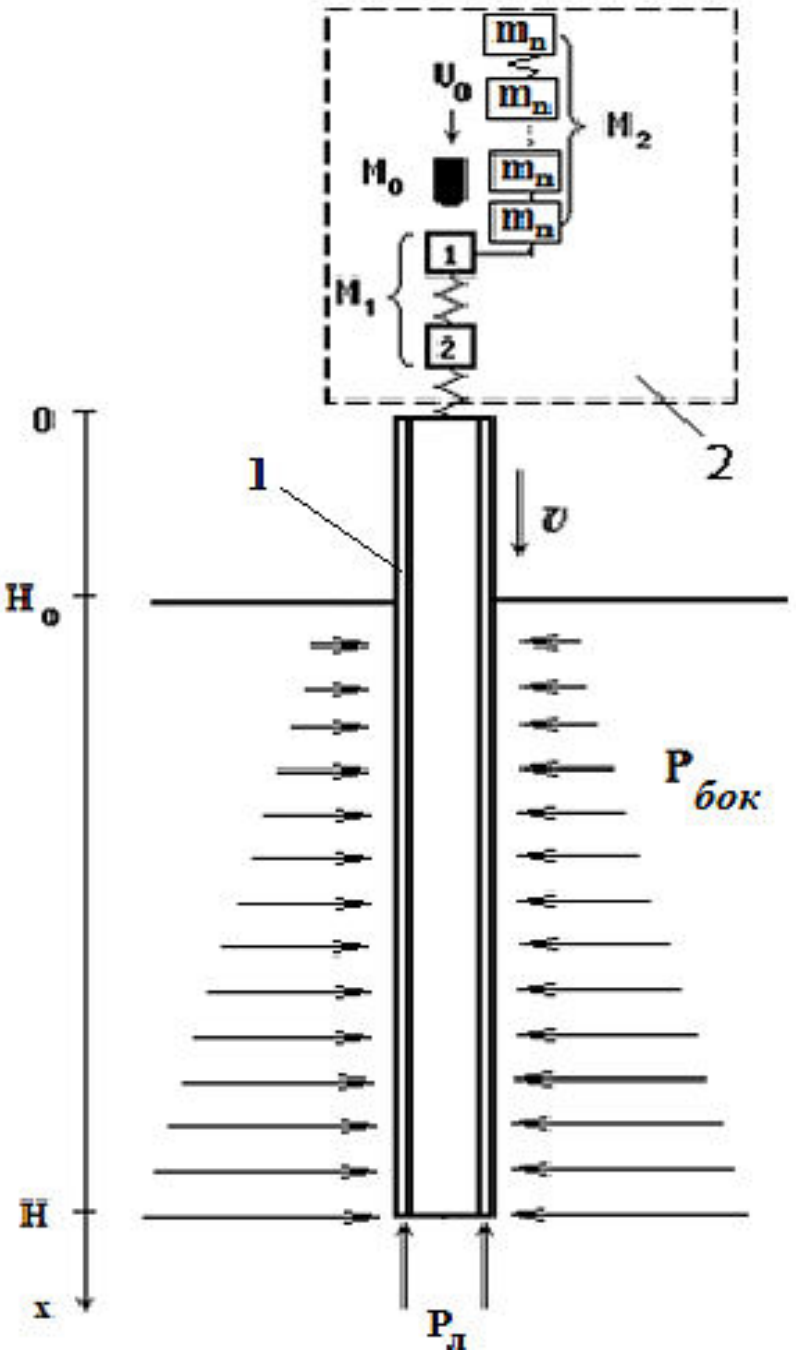
$$P_{бок} = k_{бок} \cdot \rho_{гр} \cdot g \cdot x \ , \tag{5.2}$$

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

Система дифференциальных уравнений (5.3), описывающих движение одномерного упругого стержня в массиве, имеет вид

$$\begin{cases} \rho \dfrac{\partial \upsilon}{\partial t} = \dfrac{\partial \sigma}{\partial x} + f(x,\upsilon) \\ \dfrac{\partial \sigma}{\partial t} = E \dfrac{\partial \upsilon}{\partial x} \end{cases}, \tag{5.3}$$

где ρ — плотность трубы; E — ее модуль Юнга; $\upsilon(x,t)$ и $\sigma(x,t)$ — массовая скорость и напряжение в точке x в момент времени t; $f(x,\upsilon)$ — удельная сила бокового сопротивления трубы по (5.4), отнесенная к площади ее поперечного сечения *S*:



1 — металлическая труба; *2* — генератор ударных импульсов

Рисунок 5.1 — Постановка задачи об ударном вертикальном погружении в осадочный массив

$$f(x,v)=\begin{cases} -\dfrac{\pi D}{S}\tau(u) \quad при \quad |u|<\dfrac{\tilde{F}_{mp}}{G_1} \\ -sign(v)\tilde{F}_{mp} \quad при \quad |u|\geq\dfrac{\tilde{F}_{mp}}{G_1} \end{cases} \tag{5.4}$$

где $u(x,t)$ — перемещения стержня; $\widetilde{F}_{тр} = P_{бок} \cdot k_{тр} \dfrac{\pi D}{S}$ — усредненная по сечению удельная сила трения трубы о вмещающий массив при необратимых деформациях; $G_1 = \dfrac{\pi D}{S}\widetilde{G}$, $\widetilde{G}$ — приведенный модуль сдвига грунта; $k_{тр}$ — коэффициент трения трубы о массив.

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 использованием машин ударного действия.

Система уравнений (5.5), описывающих поведение ударника и двухмассового промежуточного элемента, имеет вид

$$\begin{cases} M_0 \dfrac{d^2 u_0}{dt^2} = -k_0 (u_0 - u_1^{(1)})^{3/2} \\ M_1^{(1)} \dfrac{d^2 u_1^{(1)}}{dt^2} = k_0 (u_0 - u_1^{(1)})^{3/2} - k_1^{(1)} (u_1^{(1)} - u_1^{(2)}) + k_m (u_2^{(1)} - u_1^{(1)}) \\ M_1^{(2)} \dfrac{d^2 u_1^{(2)}}{dt^2} = k_1^{(1)} (u_1^{(1)} - u_1^{(2)}) - k_1^{(2)} (u_1^{(2)} - u^{(0)}), \end{cases} \tag{5.5}$$

где u_0 — перемещение ударника; $u_1^{(1)}$ — перемещение 1-го промежуточного элемента; $u_1^{(2)}$ — перемещение 2-го промежуточного элемента; $u^{(0)}$ — перемещение верхнего торца стержня.

Движение дискретных масс m_n в процессе удара описывается системой уравнений (5.6):

$$\begin{cases} m_n \dfrac{d^2 u_2^{(1)}}{dt^2} = k_m (u_2^{(2)} - 2u_2^{(1)} + u_1^{(1)}) \\ m_n \dfrac{d^2 u_2^{(2)}}{dt^2} = k_m (u_2^{(3)} - 2u_2^{(2)} + u_2^{(1)}) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ m_n \dfrac{d^2 u_2^{(n-1)}}{dt^2} = k_m (u_2^{(n)} - 2u_2^{(n-1)} + u_2^{(n-2)}) \\ m_n \dfrac{d^2 u_2^{(n)}}{dt^2} = k_m (-u_2^{(n)} + u_2^{(n-1)}), \end{cases} \tag{5.6}$$

где $u_2^{(i)}$ — перемещение *i*-го элемента присоединенной массы.

Для замыкания системы уравнений (5.3), (5.5) и (5.6) необходимо ввести в (5.7) условие сопряжения генератора ударных импульсов с трубой, связывающее функцию $\Phi(t)$ (см. (5.1)) с перемещениями промежуточного элемента и нижнего торца трубы:

$$\Phi(t) \cdot S = -k_1^{(2)} (u_1^{(2)} - u^{(0)}). \tag{5.7}$$

Приведенная система уравнений (5.3), (5.5)–(5.7) с граничными условиями (5.1) и начальными условиями записывается так (5.8):

$$\begin{aligned} &\sigma(x,0) = v(x,0) = 0 \\ &u_0(0) = u_1^{(j)}(0) = u_2^{(i)}(0) = u^{(0)}(0) = 0 \\ &du_0 / dt\big|_{t=0} = V_0 \\ &du_1^{(j)} / dt\big|_{t=0} = 0 \\ &du_2^{(i)} / dt\big|_{t=0} = 0 \\ &du^{(0)} / dt\big|_{t=0} = 0\,. \end{aligned} \tag{5.8}$$

В рамках вышеуказанных допущений описывается процесс забивания в массив упругой трубы с использованием генератора ударных импульсов, включающего энергоноситель — ударник, промежуточный элемент — наковальню с узлом крепления и присоединенную массу — корпус ударной машины.

На рисунке 5.2 показаны последовательные фазы расчетных профилей массовых скоростей и касательных напряжений при распространении волны напряжений вдоль трубы диаметром 426 мм, толщиной 9 мм и длиной 50 м, забиваемой в массив пневмомолотом с энергией удара 10000 Дж. В расчете были использованы следующие значения параметров задачи: M_0 = 3200 кг, V_0 = 2,5 м/с, R_0 = 160 мм; $E = E_0 = E_1 = E_2$ = 203 ГПа; C_p = 5100 м/с, $\nu_0 = \nu_1$ = 0,3, M_1 = 100 кг, k_1 = 1000 кН/мм, k_2 = 1000 кН/мм (жесткость промежуточных элементов); L_2 = 1,5 м (длина корпуса), M_2 = 800 кг (масса корпуса), $k_{тр}$= 0,4, $k_{бок}$= 0,4, $\widetilde{G}$ = 1000 МПа/м. Горизонтальные участки на графиках касательных напряжений, действующих на боковой поверхности трубы, соответствуют областям проскальзывания отдельных участков трубы относительно массива, накопление которых во времени определяет величину реальных перемещений трубы.

Первостепенным вопросом, лежащим в основе любых оценок предельно допустимых глубин погружения, является задача 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 проектных глубины скважины, сооружаемой в массиве осадочных породе путем забивания металлических труб открытым концом.

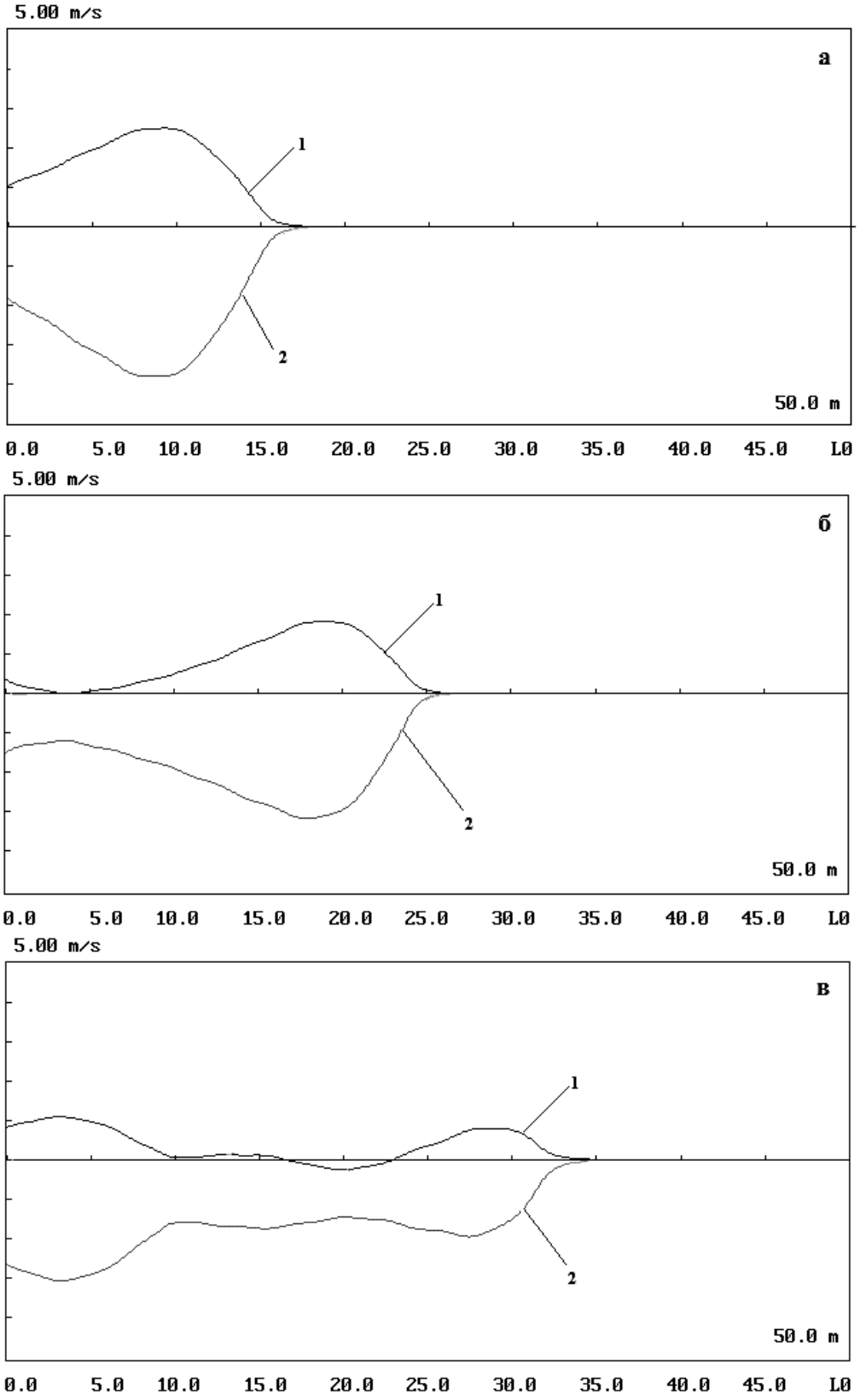


Рисунок 5.2 — Профили массовых скоростей поперечных сечений трубы *1* и касательных напряжений *2*, действующих на поверхности трубы, в процессе распространения волны напряжений вдоль продольной оси трубы на расстояние: *а* — 20 м; *б* — 30 м; *в* — 40 м

Рассмотрим основные факторы, которые могут оказывать влияние на характер затухания упругой волны, распространяющейся вдоль трубы, находящейся в массиве.

Конфигурация ударного импульса. На рисунке 5.3 приведены рассчитанные по вышеописанной схеме 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 (5.1), в этом случае имеет вид (5.9)

$$\Phi(t) = \begin{cases} -\sigma_0 \cdot \sin\left(\dfrac{\pi t}{t_m}\right) & npu \quad 0 \le t \le t_m \\ 0 \quad npu \quad t > t_m \,, \end{cases} \tag{5.9}$$

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

В расчетах использовались следующие параметры: k_{mp}= 0,4; $\widetilde{G}$ = 10000 МПа/м. Приведенный модуль сдвига грунта соответствует минимальному сцеплению 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 5.3, наилучший результат по дальности распространения конечных перемещений поперечных сечений трубы дает наиболее резкий из сравниваемых ударов, имеющий наибольшую амплитуду при наименьшей длительности.

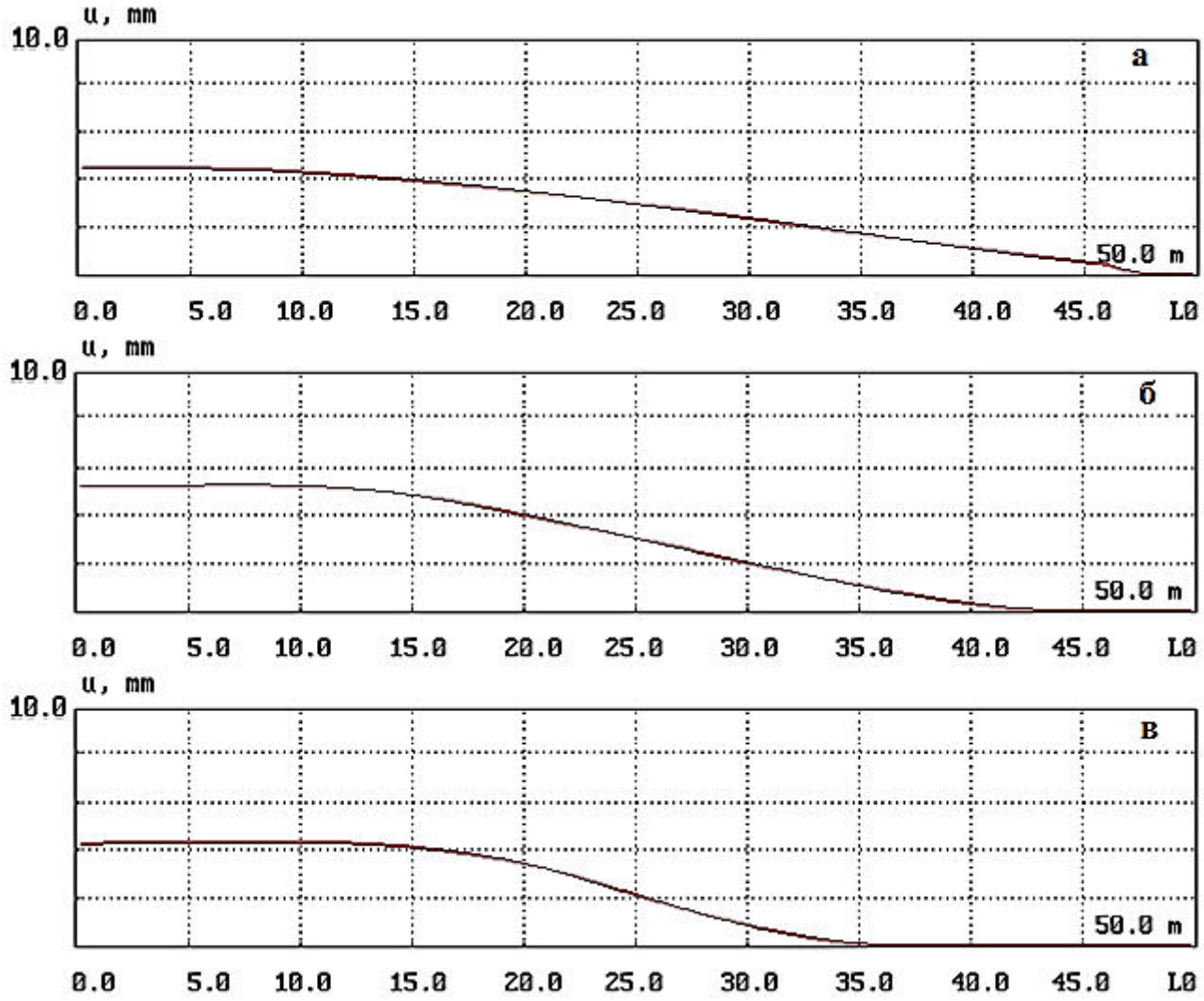


Рисунок 5.3 — Эпюры остаточных перемещений поперечных сечений забиваемой в массив трубы, вызванных синусоидальным импульсом напряжений с параметрами: *а* — σ_0 = 232 МПа, t_m = 1,25 мс;

б — σ_0 = 164 МПа, t_m = 2,5 мс;

в — σ_0 = 116 МПа, t_m = 5,0 мс

Важно, что более затянутый импульс приводит к более высокому градиенту 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.

Упругость массива. Это свойство внешней среды, способное существенно влиять на процесс забивания трубы в массив осадочных горных пород, 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 5.4 приведена расчетная эпюра перемещений поперечных сечений металлической трубы с синусоидальным импульсом, приложенным к ее торцу при $\widetilde{G}$ = 100 МПа/м. Такие значения модуля сдвига соответствуют вязким водонасыщенным грунтам, где возвратно-колебательные движения трубы при ударе могут быть ощутимы. Расчетная эпюра на рисунке 5.3*а* соответствует супеси с величиной $\widetilde{G}$ = 10000 МПа/м. Видно, что 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 5.3*а* и 5.4).

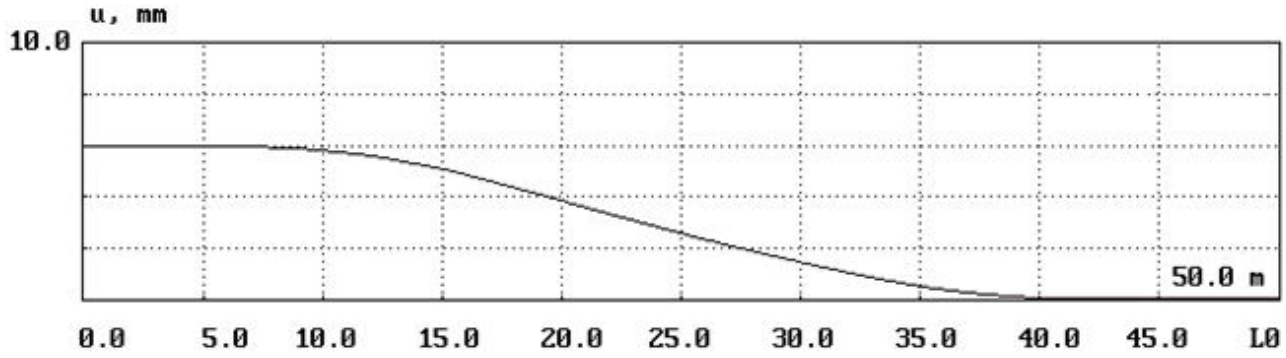


Рисунок 5.4 — Эпюра остаточных перемещений поперечных сечений забиваемой в вязкий грунт трубы, вызванных синусоидальным импульсом напряжений с параметрами σ_0 = 232 МПа, t_m = 1,25 мс при $\widetilde{G}$ = 100 МПа/м

Определим характер затухания импульса при описании внешнего сопротивления среды законом сухого трения. Эта формализация, как было показано выше, не ограничивает анализ картины затухания упругих волн в стержнях и трубах рамками только простейшего случая описания внешней среды без учета ее упругих свойств там, где речь идет о наличии остаточных перемещений трубы.

Рассмотрим две последовательные фазы ударного импульса, представленные на рисунке 5.5 профилями массовых скоростей в поперечном сечении трубы с амплитудами v_0 и v_l. Выделим элементарный прямоугольный импульс 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.

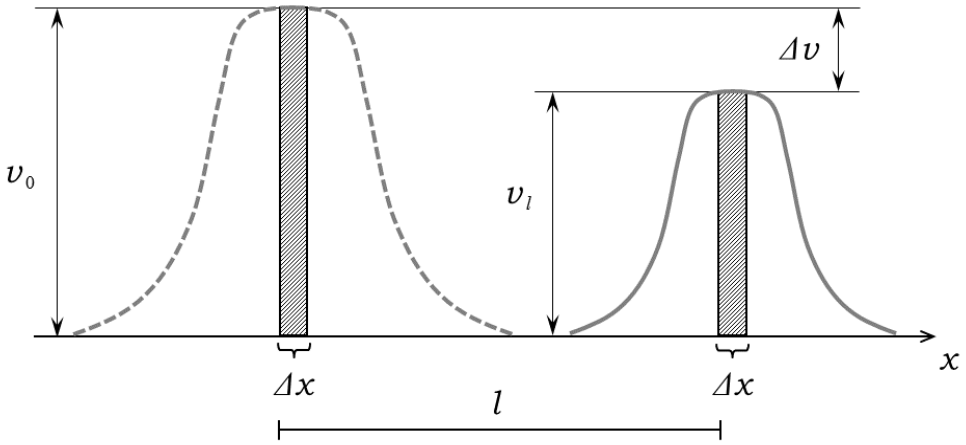


Рисунок 5.5 — Схема к выводу формулы коэффициента затухания массовой скорости при распространении упругой волны по трубе, взаимодействующей с массивом по закону сухого трения

В процессе движения выделенного элементарного импульса вдоль трубы в зоне его действия изменение массовой скорости трубы описывается уравнением (5.10)

$$dv = adt\,, \tag{5.10}$$

где a — ускорение, вызываемое трением боковой поверхности трубы о массив. Ускорение a найдено из второго закона Ньютона (5.11), записанного для элементарного кольца трубы с массой Δm:

$$F_{тр} = \Delta m \cdot a\,, \tag{5.11}$$

где $\Delta m = S \cdot \Delta x \cdot \rho$; $F_{тр} = \pi D \cdot \Delta x \cdot P_{бок} \cdot k_{тр}$ — сила бокового трения; $P_{бок} = \rho_{гр} \cdot g \cdot x \cdot k_{бок}$ — боковое давление массива на глубине x; $k_{бок}$ — коэффициент бокового давления массива.

Тогда, интегрируя уравнение (5.10) по времени от $t = 0$ до $t = t_l = l / C_p$, с учетом (5.11) получено (5.12)

$$v_0 - v_l = \int_0^{t_l} a dt = k_v \cdot l^2, \tag{5.12}$$

где k_v — коэффициент затухания имеет вид (5.13)

$$k_v = \frac{1}{2}\frac{\pi D}{S} k_{mp} \cdot k_{бок} \cdot \frac{\rho_{гр} \cdot g}{\rho \cdot C_p}. \tag{5.13}$$

Выражения (5.12) и (5.13) позволяют записать закон затухания амплитуды массовых скоростей импульса произвольной конфигурации (5.14), распространяющегося вдоль упруго стержня (трубы) с условием внешнего трения вплоть до прекращения проскальзывания отдельных участков стержня относительно массива:

$$\Delta v = k_v \cdot l^2, \tag{5.14}$$

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.

5.2 Расчетная программа для определения перемещений забойного торца трубы под действием единичного удара

Представленная математическая модель реализована в формате программы *Pipe-vert* [128], 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. Стартовый лист программы с исходными данными представлен на рисунке 5.6.

НАИМЕНОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ			ВВЕДЕННЫЕ ДАННЫЕ:
Масса ударника	<кг>	My	My = 500
Скорость звука в ударнике	<м/с>	Cy	Cy = 5100
Радиус кривизны ударника	<мм>	Ry	Ry = 180
Плотность ударника	<кг/куб.м>	Roy	Roy = 7800
Скорость ударника	<м/с>	Vyd	Vyd = 4
Масса корпуса	<кг>	Mc	Mc = 800
Длина корпуса	<м>	Lc	Lc = 1.5
Масса переходника	<кг>	Mm	Mm = 100
Жесткость переходника	<кН/мм>	Km	Km = 1000
Длина свободной части трубы	<м>	L1	L1 = 3
Длина трубы	<м>	L0	L0 = 15
Внешний диаметр трубы	<мм>	D0	D0 = 426
Толщина стенки трубы	<мм>	hp	hp = 9
Скорость звука в трубе	<м/с>	Cp	Cp = 5100
Плотность материала трубы	<кг/куб.м>	Ro	Ro = 7800
Сила давл. на трубу сверху	<кН>	F1	F1 = 15
Сила лобового сопротивления	<кН>	F2	F2 = 20
Коэффициент бокового давления		lambda	lambda = .6
Коэффициент сухого трения		kf	kf = .3
Коэффициент сдвига грунта	<МПа/м>	Gg	Gg = 1000

Рисунок 5.6 — Исходные данные программы *Pipe-vert*

В качестве иллюстрации возможностей разработанной программы в таблице 5.1 приведены результаты расчетов перемещений погружаемой трубы различного диаметра при заданной энергии удара. Глубина 15, 40 и 65 м выбрана в соответствии с мощностью слоя осадочных горных пород на горных отводах угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс».

Адекватность математической модели и работы программы *Pipe-vert* проверена с помощью программной системы конечно-элементного анализа ANSYS аналогично расчетам, выполненным в п. 3.3. Расчетная схема и сетка конечных элементов для вертикальной постановки представлены на рисунке 5.7. Исходными данными для калибровки свойств массива приняты результаты производственных испытаний, изложенные в п. 4.4.

Таблица 5.1 — Погружение трубы за 1 удар (программа *Pipe-vert*)

Диаметр трубы, мм	2000 Дж			4000 Дж			6000 Дж		
	15 м	40 м	65 м	15 м	40 м	65 м	15 м	40 м	65 м
325	1,107	0,14	0,056	2,262	0,287	0,112	3,287	0,448	0,161
426	0,88	0,113	0,042	1,761	0,228	0,087	2,668	0,328	0,128
530	0,7	0,09	0,034	1,344	0,178	0,065	2,016	0,264	0,098
630	0,595	0,076	0,027	1,179	0,148	0,057	1,786	0,229	0,087
730	0,483	0,066	0,025	0,976	0,132	0,051	1,495	0,195	0,071
	10000 Дж			15000 Дж			20000 Дж		
325	5,537	0,746	0,277	8,58	1,13	0,441	10,7	1,601	0,628
426	4,447	0,535	0,202	6,864	0,825	0,331	8,56	1,185	0,465
530	3,431	0,435	0,171	5,28	0,665	0,255	6,74	0,956	0,363
630	2,947	0,37	0,137	4,576	0,568	0,225	5,71	0,812	0,316
730	2,413	0,326	0,123	3,77	0,497	0,2	4,75	0,705	0,278
	25000 Дж			30000 Дж			35000 Дж		
325	12,6	1,888	0,727	14,59	2,24	0,817	17	2,39	0,946
426	9,869	1,416	0,538	11,22	1,704	0,621	12,89	1,865	0,688
530	7,83	1,124	0,417	8,976	1,34	0,485	10,39	1,457	0,552
630	6,62	0,96	0,365	7,58	1,155	0,422	8,76	1,269	0,488
730	5,51	0,84	0,316	6,373	1	0,374	7,36	1,08	0,434
	40000 Дж			45000 Дж					
325	21,45	2,84	1,06	25,967	3,191	1,271			
426	15,895	2,216	0,781	18,81	2,537	0,95			
530	12,81	1,717	0,627	15,28	1,936	0,748			
630	10,81	1,497	0,554	12,854	1,715	0,642			
730	9,24	1,274	0,492	10,977	1,435	0,572			

Граничными условиями принято: жесткое закрепление основания и боковых стенок модели, контактные условия на границе раздела сред «кольцевой цилиндрический элемент – массив», сила гравитации, постоянное статическое давление и единичное ударное воздействие на внешний конец кольцевого цилиндрического элемента. 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.

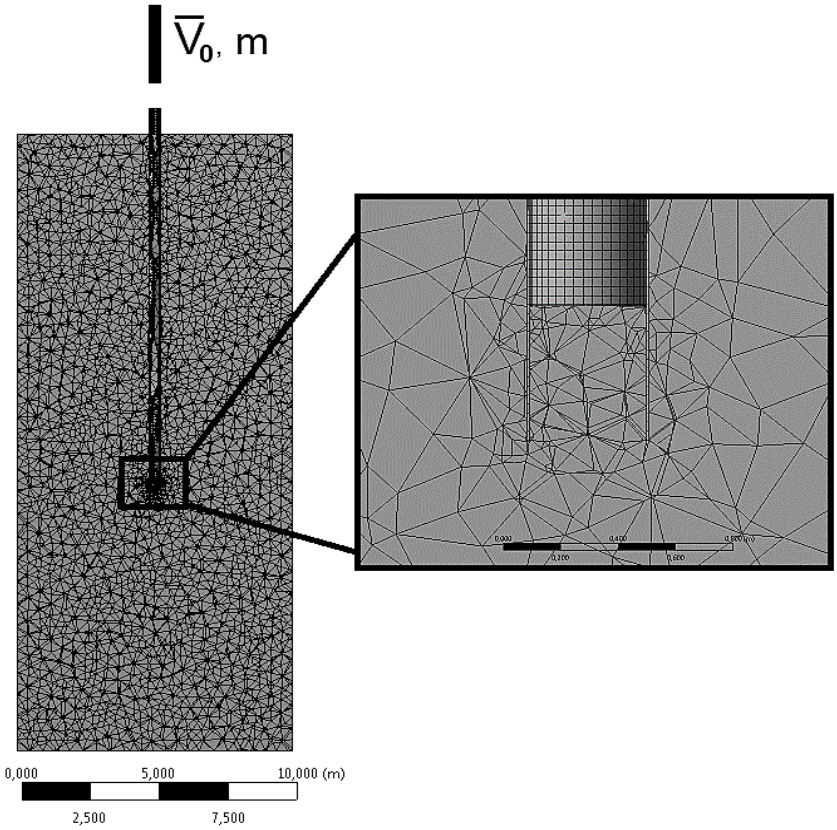


Рисунок 5.7 — Расчетная схема для метода конечных элементов

В качестве допущений принято следующее:

1) труба не имеет сварных стыков;

2) труба погружается без вспомогательного трубопровода для удаления керна;

3) внутри трубы находится керн только на участке от забойного торца до отверстия для подачи сжатого воздуха (0,5м);

4) удар передается на трубу без каких-либо промежуточных элементов;

5) по всей глубине скважины физико-механические свойства массива одинаковы.

Для описания поведения массива используются следующие показатели: плотность — 1980 кг/м^3; модуль упругости Юнга (Young's modulus) — 48 МПа; коэффициент Пуассона (Poisson's ratio) — 0,30; параметры модели Ментери – Вилама (Menetrey – Willam): прочность на одноосное сжатие (Uniaxial comprehenssive

strength) — 9850 Па; прочность на одноосное растяжение (Uniaxial tensile strength) — 2250 Па; прочность на двухосное сжатие (Biaxial comprehenssive strength) — 10 кПа; угол дилатансии (Dilatancy angle) — 0,25 рад; параметры пороупругости (porous elasticity): индекс свободного вспучивания (swell index) — 0,0024; предел упругости при растяжении (elastic limit of tensile strength) — 34474 Па; первоначальный коэффициент пористости (initial void ratio) — 0,355. Высота падения груза — 0,459 м, что обеспечивает скорость при соударении 2,9988 м/с [72].

Исходя из практики, минимально допустимое продвижение обсадной трубы за час необходимо ограничить 1 м. В противном случае возрастает вероятность разрушения сварных швов, а сменная производительность не превышает 10 м/см. Принимая во внимание, что ударные машины с высокой энергией, как правило, имеют частоту не более 2 Гц, перемещение за 1 удар должно быть не менее 0,5 мм. Расчетная модель учитывает размеры погружаемой трубы, предударную скорость, а также свойства массива, такие как модуль упругости, коэффициенты бокового распора и трения, а также прочность массива и его плотность. Результаты проверочного расчета в ANSYS представлены в таблице 5.2.

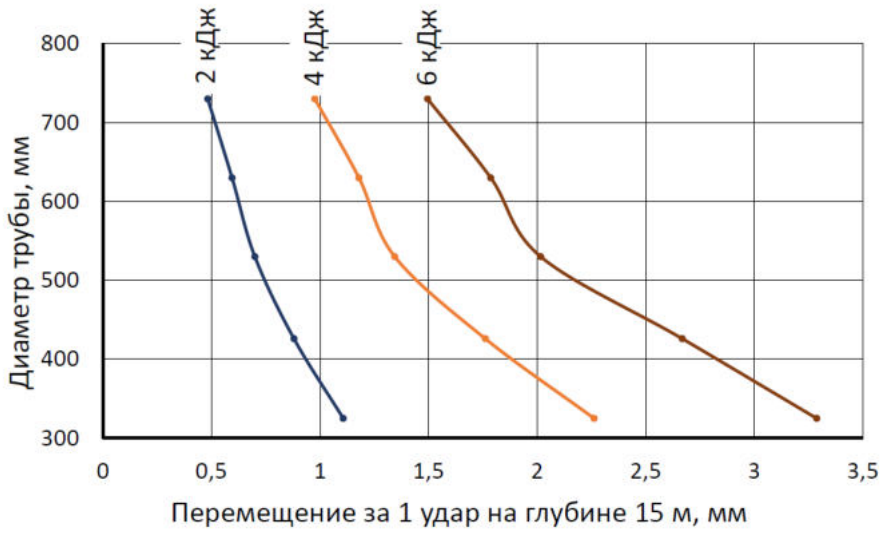
Сравнивая результаты в таблицах 5.1 и 5.2, установили, что расхождение данных не превышает 9 %. Данное обстоятельство свидетельствует о корректности расчетов, проведенных в программе *Pipe-vert*.

Таблица 5.2 — Результаты проверочного расчета в ANSYS для трубы 426 мм

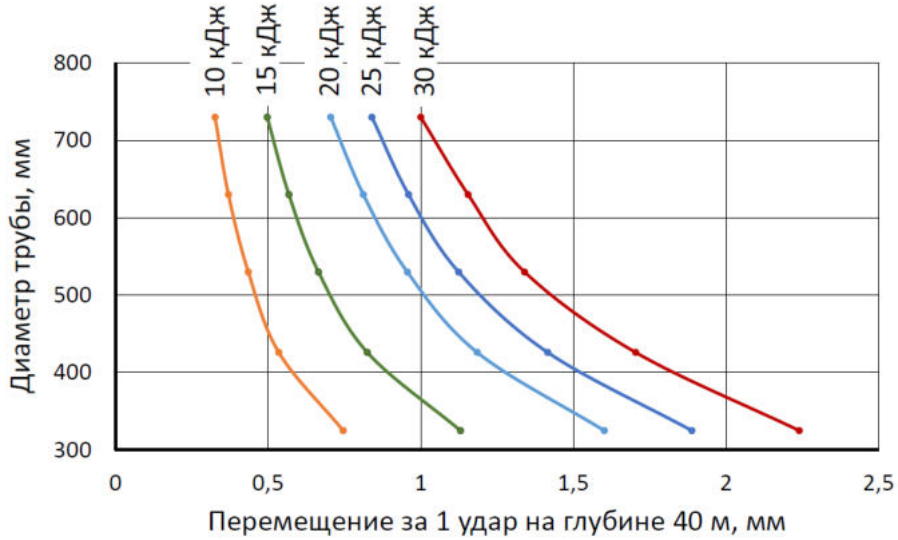
Глубина погружения, м	Энергия удара, кДж					
	2	6	15	25	35	45
15	0,95	2,82	7,33	11,2	13,7	20,3
40	0,122	0,41	0,93	1,61	2,02	2,93
65	0,037	0,097	0,26	0,41	0,54	0,88

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 5.8).

а



б



в

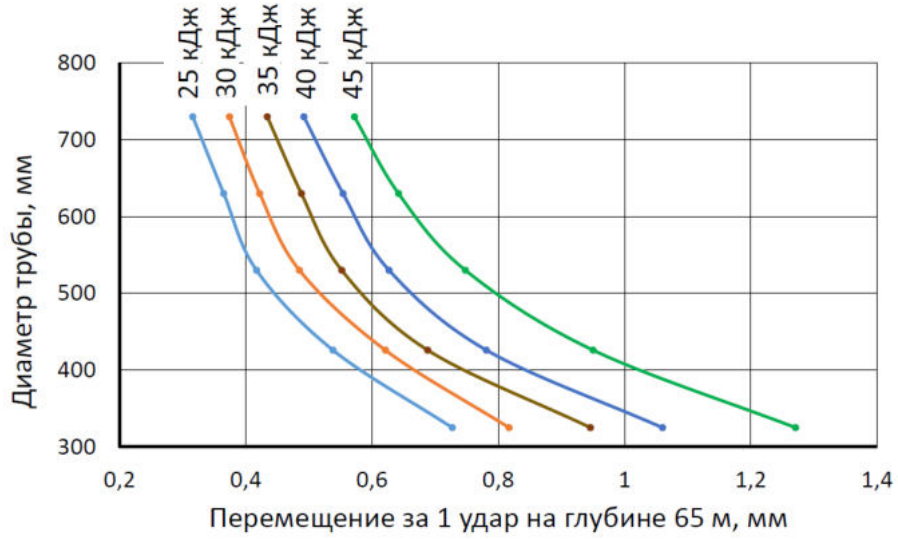


Рисунок 5.8 — Результаты расчетов в программе *Pipe-vert* для глубины:

а — 15 м; *б* — 40 м; *в* — 65 м

Представленные на рисунке 5.8 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 будет значительно выше.

5. 3 Выводы по Главе 5

1. На примере синусоидальных импульсов, приложенных к торцу забиваемой в массив трубы, показано, что наиболее эффективным по критерию предельной длины забиваемой трубы является импульс, сформированный наибольшей предударной скоростью при фиксированной энергии удара.
2. Возникающие в трубе остаточные деформации (напряжения), обусловленные наличием сил внешнего трения, тем выше, чем длиннее ударный импульс.
3. 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.
4. Математическая модель вертикального ударного погружения металлической трубы в массив осадочных горных пород позволяет определить энергию единичного удара, необходимую для погружения трубы на требуемую глубину с учетом размеров трубы и физико-механических свойств массива.

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 керн 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 влиянии волновых процессов на взаимодействие погружаемой трубы с керном и вмещающим массивом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдеев, В. В.** Прокладка трубопроводов под путями железных дорог способом пробивания / В. В. Авдеев // Сб. материалов по обмену опытом. Вып. №4 (25). Госстройиздат, 1957. – С. 220 – 227.

2. **Авторское свидетельство № 1041646 СССР, МПК E02F 5/18 (2000.01)** Способ бестраншейной прокладки подземных коммуникаций и устройство для его осуществления: № 2734928: заявлено 07.03.1979: опубликовано 15.09.1983 / Костылев А. Д, Гилета В. П., Григоращенко В. А. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 4 с. : ил.

3. **Авторское свидетельство № 1058647 СССР, МПК B08B 9/00 (2000.01), E02F 5/18 (2000.01)** Самоходное грунтозаборное устройство: № 3310795: заявлено 19.06.1981: опубликовано 07.12.1983 / Костылев А. Д., Григоращенко В. А., Поляков А. С. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 4 с. : ил.

4. **Авторское свидетельство № 1118746 СССР, МПК E02F 5/18 (2000.01)** Самоходное устройство для забора грунта:№ 2714903: заявлено 22.01.1979: опубликовано 15.10.1984 / Костылев А. Д., Бакунин В. А., Ткач Х. Б. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 3 с. : ил.

5. **Авторское свидетельство № 1120069 СССР, МПК E02F 5/18 (2000.01)** Способ бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: № 2706741: заявлено 04.01.1979: опубликовано 23.10.1984 / Костылев А. Д., Гилета В. П., Григоращенко В. А. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 3 с. : ил.

6. **Авторское свидетельство № 1263767 СССР, МПК E02F 5/18 (2000.01)** Способ бестраншейной прокладки трубопроводов: № 802979713: заявлено 15.08.1980: опубликовано 13.11.1982 / Костылев А. Д., Тишков А. Я., Стажевский С. Б. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 4 с. : ил.

7. **Авторское свидетельство № 1270233 СССР, МПК E02F 5/18 (2000.01)** Грунтозаборное устройство для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: № 2883803: заявлено 25.12.1979: опубликовано 15.11.1986 / Костылев А. Д,

Гилета В. П., Григоращенко В. А. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 3 с. : ил.

8. **Авторское свидетельство № 1326710 СССР, МПК E02F 5/18 (2000.01)** Способ бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: № 2976558: заявлено 24.02.1982: опубликовано 15.11.1986 / Костылев А. Д, Исаков А. Л., Григоращенко В. А. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 7 с. : ил.

9. **Авторское свидетельство № 1368391СССР, МПК E21B 27/00 (2000.01)** Способ бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: № 2996234: заявлено 03.10.1980: опубликовано 30.01.1988 / Костылев А. Д, Козлов В. А., Григоращенко В. А. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 5 с. : ил.

10. **Авторское свидетельство № 802464 СССР, МПК E21B 27/00 (2000.01)** Способ бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: № 2714641: заявлено 17.01.1979: опубликовано 03.02.1981 / Костылев А. Д, Козлов В. А., Григоращенко В. А. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО АН СССР. – 5 с. : ил.

11. **Александрова Н. И.** О влиянии внутренней грунтовой пробки на процесс ударного забивания трубы / Н. И. Александрова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №6. – С. 114 – 126.

12. **Александрова, Н.И.** Расчет движения трубы с грунтовой пробкой при продольном импульсном воздействии / Н. И. Александрова, А. С. Кондратенко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 4. — С. 29–42.

13. **Александрова, Н. И.** Численно-аналитическое исследование процесса ударного погружения трубы в грунт с сухим трением. ч. II. внешняя среда деформируема / Н. И. Александрова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 3. — С. 91 – 106.

14. **Алексеев, С. И.** Основания и фундаменты / С. И. Алексеев // СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения. – 2007. – 111 с.

15. **Баландинский, Е. Д.** Бестраншейная прокладка инженерных коммуникаций: развитие и внедрение / Е. Д. Баландинский, Б. Н. Ладыженский, В. И. Минаев // Механизация строительства. – 1987. – №8. – С. 10 – 11.

16. **Балаховский, М. С.** На Российском рынке – американская фирма "Vermeer" / М. С. Балаховский // Механизация строительства. – 2000. – №10. – С. 2 – 7.

17. **Баркан, Д. Д.** Виброметод в строительстве / Д. Д. Баркан // М. : Госстройиздат. – 1959. – 220 с.

18. **Бауман, В. Л.** Вибрационные машины и процессы в строительстве / В. Л. Бауман // М. : Высшая школа, 1977. – 231с.

19. **Бессолов, П. П.** Внедрение щитов малого диаметра – одно из рациональных направлений закрытой прокладки полупроходных трубопроводов в России / П. П. Бессолов, А. Ю. Синицин // Механизация строительства. – 2000. – №6. – С. 11 – 16.

20. **Блехман, И. И.** Исследование процесса виброударной забивки свай и шпунтов / И. И. Блехман // Инж. сборник АН СССР. – 1964. – № 19. – С. 56 – 61.

21. **Бобылев, Л. М.** Рабочий орган для раскатки скважин в грунте. / А. Л. Бобылев //Механизация строительства. – 1996. – №10. – С. 23 – 26.

22. **Бобылев, Л. М.** Установка для бестраншейной прокладки коммуникаций // Л. М. Бобылев, А. Л. Бобылев, Г. К. Прохоренко, О. А. Мурашов // Строительные и дорожные машины. – 1999. – №10. – С. 7 – 8.

23. **Быков, В. И.** Оборудование для пробивки скважин в грунте / В. И. Быков, В. П. Потемкин // Механизация строительства. – 1990. – №2. – С. 9 – 11.

24. **Варданян, Г. С.** Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г. С. Варданян, В. И. Андреев, Н. М. Атаров, А. А Горшков. – М. : АСВ. – 1995. – 568 с.

25. **Васильев, Ю. М.** Методические рекомендации по укреплению местных грунтов верхней части земляного полотна неорганическими вяжущими / Ю. М. Васильев. // М. : СОЮЗДОРНИИ. – 1977. – 19 с.

26. **Верстов, В. В.** Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах / В. В. Верстов, М. Г Цейтлин, Г. Г. Азбель // Л. : Стройиздат – 1987. – 262 с.

27. **Винда, А. А.** Бестраншейная прокладка трубопроводов методом наклонно-направленного бурения (ННБ). Гидроразрыв грунтов и способы ликвидации грифонопроявлений / А. А. Винда // Сфера Нефтегаз. – 2011. – №1. – С.104 – 105.

28. **Воронцов, Д. С.** Обоснование принципиальной схемы и конструктивных параметров грунтопроходчика: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Воронцов Денис Сергеевич; ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2005. – 123 с.

29. **Воронцов, Д. С.** Обоснование принципиальной схемы и конструктивных параметров грунтопроходчика: 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Воронцов Денис Сергеевич; ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2005. – 22 с.

30. **Галканова, Н. Д.** Испытания трубчатых свай в различных грунтовых условиях / Н. Д. Галканова, Г. В. Миткина, И. Б. Рыжков // Труды БашНИИстрой. – 1966. – Вып.6 – С. 167 – 177.

31. **Гилета, В. П.** Создание и совершенствование пневмоударных устройств для проходки горизонтальных скважин способом виброударного продавливания: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гилета Владимир Павлович; ИГД СО РАН. – Новосибирск, 1997. – 287 с.

32. **Гилета, В. П.** Проходка скважин с частичной экскавацией грунта / В. П. Гилета, Б. Н. Смоляницкий // Строительные и дорожные машины. – 2001. – №4. – С. 7 – 9.

33. **Гилета, В. П.** Повышение эффективности проходки скважин методом виброударного продавливания / В. П. Гилета, Ю. В. Ванаг, И. В. Тищенко // Вестник КузГТУ. — 2016. — № 6. — С. 82 – 89.

34. **Гилета, В. П.** Повышение эффективности циклической проходки скважин в грунте/В. П. Гилета, И. В. Тищенко, Ю. В. Ванаг // Вестник СибАДИ – 2017. – (3(55)) – С. 21 – 31.

35. **Гинсбарг, Р. И.** К вопросу определения несущей способности свай-оболочек, погружаемых с открытым нижним концом / Р. И. Гинсбарг, Г. С. Уланова // Основания и фундаменты. Межведомственный республиканский научный сборник –1969. – Вып. 2. – С.23 – 27.

36. **Голубинцев, О. Н.** Механические и абразивные свойства горных пород и их буримость / О. Н. Голубинцев // М. : Недра. – 1968. – 199 с.

37. **Горбунов-Посадов, М. И.** Основания, фундаменты и подземные сооружения / М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов. – М. : Стройиздат – 1985. – 480 с.

38. Горная энциклопедия. Гл. ред. Е. А. Козловский // М. : Советская энциклопедия. – 1991. – Т.5 – 541 с.

39. Горное дело. Терминологический словарь под научным ред. К. Н. Трубкого и Д. Р. Каплунова // М. : Горная книга. – 2016 – 636 с.

40. **ГОСТ 18599-2001**. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. – Введен 2003–01–01. – М. : Издательство стандартов. – 2002. – 23 с.

41. **ГОСТ Р 58325–2018**. Грунты. Полевое описание. – Введен 2019–06–01. – М. : Стандартинформ. – 2018. – 27 с.

42. **Григорашенко, В. А.** Прокладка металлических труб пневмопробойниками / В. А. Григорашенко // Новосибирск: Изд. ИГД СО АН СССР. – Препринт №38 – 1990. – 32 с.

43. **Громов, И. М.** Упругие потери и эффективность прокладки труб-кожухов пневмопробойниками / И. М. Громов, Л. Б. Белоногов, Л. В. Янковский // Вестник ПГТУ. – 2010. – С.70 – 74.

44. **Давыдов, В. А.** Изыскания и проектирование автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах: учеб. пособие / В. А. Давыдов, Э. Д. Бондарева // Омск: ОмПИ – 1989. – 82 с.

45. **Данилов, Б. Б.** Пути совершенствования технологий и технических средств для бестраншейной прокладки коммуникаций / Б. Б. Данилов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 2. – С. 69 – 75.

46. **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.

47. **Данилов, Б. Б.** Теория и практика создания оборудования для бурения в грунте горизонтальных скважин с пневмотранспортом разрушенного материала по вращающемуся трубопроводу: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Данилов Борис Борисович; ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2009. – 258 с.

48. **Данилов, Б. Б.** Пути повышения эффективности забивания в грунт стальных труб пневматическими молотами / Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2005. — № 6. — С. 81 – 88.

49. **Детали машин и основы конструирования** / С. М. Горбатюк, А. Н. Веремеевич, С. В. Албул, И. Г. Морозова, М. Г. Наумова // М. : Изд. Дом МИСиС – 2014. – 424 с.

50. **Долгих, Г. В.** Расчет грунтов земляного полотна по критерию безопасности давлений / Г.В. Долгих // Строительство. Строительные материалы и изделия. – №6. – 2013. – С. 43 – 49.

51. **Донской, В. М**. Механизация земляных работ малых объемов / В. М. Донской // Л. : Стройиздат. – 1976. – 160 с.

52. **Егорова, Е. С.** Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D / Е. С. Егорова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – №3. – 2016. – С. 31 – 60.

53. **Жарнинский, Е. П.** Землесосные снаряды с погружными грунтовыми насосами / Е. П. Жарнинский // М. : Недра. – 1988. – 145 с.

54. **Зайдель, А. М.** Ошибки измерения физических величин / А. М. Зайдель // Л. : Наука. – 1974. – 108 с.

55. **Иванов, П. Л.** Грунты и основания гидротехнических сооружений / П. Л. Иванов // М. : Высшая школа – 1985. – 352 с.

56. **Игнатов, А. А.** Аналитические исследования скорости движения керна в вязкой жидкости / А. А. Игнатов // ДВНЗ "ДонНТУ", Днепропетровск. – 2012. – С. 179 – 185.

57. **Исаков, А. Л.** Моделирование процесса генерации ударного импульса при забивании металлических труб в грунт / А. Л. Исаков, В. Н. Белобородов, В. Д. Плавских, В. В. Шмелев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1997. — № 6. — С. 66 – 71.

58. **Исаков, А.Л.** Анализ волновых процессов при забивании металлических труб в грунт с использованием генераторов ударных импульсов / А. Л. Исаков, В .В. Шмелев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1998. – №2. – С. 48 – 58.

59. **Исаков, А. Л.** Классификация и расчет набивных свай / А. Л. Исаков, А. К. Ткачук // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2001. — № 6. — С. 46 – 52.

60. Исаков, А. Л. Моделирование процесса забивания металлической трубы в грунт с порционным удалением грунтового керна / А. Л. Исаков, А. С. Кондратенко, А. М. Петреев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 36 – 45.

61. **Калинин, А. Г.** Разведочное бурение. Учебное пособие для вузов / А. Г. Калинин, О. В. Ошкордин, В. М. Питерский, Н. В. Соловьев // М. : Недра – 2000. – 351 с.

62. **Карпов, В. Н.** Анализ проблем нормирования буровых работ при пневмоударной проходке взрывных скважин на горных предприятиях России / В. Н. Карпов, В .В. Тимонин, А. И. Конурин, А. К. Ткачук // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2018. – Т. 6. – С. 43–57.

63. **Карпов, В. Н.** О проблемах повышения производительности буровых работ в отечественных рудниках / В. Н. Карпов, В. В. Тимонин, А. И. Конурин, Е. М. Черниенков // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Т. 5. – № 2. – С. 46–56.

64. **Карпов, В. Н**. Разработка методики оценки энергоэффективности бурения скважин погружными пневмоударниками: специальность 05.05.06 «Горные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Карпов Владимир Николаевич; ИГД СО РАН. – Новосибирск, 2019. – 157 с.

65. **Каталог автокранов «Клинцы» //** Кудесник: [сайт] – 2020 – . – URL: http://www.avtocrane.ru/catalog/avtocranes/klintsy/40t/ks-65719-1k/ (дата обращения 25.01.2019)

66. **Кершенбаум, Н. Я.** Виброметод в проходке горизонтальных скважин / Н. Я. Кершенбаум, В. И. Минаев // М. : Недра – 1968. – 155 с.

67. **Кершенбаум, Н. Я.** Прокладка горизонтальных и вертикальных скважин ударным способом / Н. Я. Кершенбаум, В. И. Минаев // М. : Недра – 1984. – 245 с.

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

69. **Кондратенко, А. С**. Особенности процесса удаления грунтового керна при виброударном воздействии на трубу и статическом воздействии на керн / А. С. Кондратенко, А. М. Петреев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008 – №6. – С. 36 – 46.

70. **Кондратенко, А. С.** Повышение производительности бурения дегазационных скважин с дневной поверхности / А. С. Кондратенко, И. О. Шахторин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – №S48. – С.364 – 372.

71. **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 Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – №1. – С. 40 – 45.

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

73. **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.

74. **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.

75. **Кондратенко, А. С.** Комбинированный способ удаления керна из трубы при ее виброударном погружении / А. С. Кондратенко // Строительные и дорожные машины. — 2012. — № 7. — С. 20–24.

76. **Кондратенко, А. С.** Особенности отчистки обсадной трубы от грунтового керна / А. С. Кондратенко // Горный информационно-аналитический бюллетень.— 2008. — № 7. — С. 327–331.

77. **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.

78. **Кондратенко, А. С.** Технологические аспекты проходки обсаженных скважин с циклично-поточным транспортированием керна / А. С. Кондратенко // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 601 — 609.

79. **Криль, С. И.** К вопросу о методиках расчета основных параметров пневмотранспорта сыпучих материалов по горизонтальным трубам / С. И. Криль, М. Н. Чальцев // Прикладная гидромеханика. – 2010. – Т. 12. – №4. – С. 36 – 41.

80. **Курта, И. В.** Зависимость метанообильности высокопроизводительных лав от скорости подвигания очистного забоя (на примере шахт ОАО "СУЭК-Кузбасс") / И. В. Курта, Г. И. Коршунов, И. А. Павлов, Е. П. Ютяев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 4. – С. 200 – 203.

81. **Кюн, Г.** Закрытая прокладка непроходных трубопроводов / Г. Кюн, Л. Шойбле, Х. Шлик // М. : Стройиздат. – 1993. – 168 с.

82. **Лавров, Г. Е**. Зарубежные машины горизонтального бурения для бестраншейной прокладки труб / Г. Е. Лавров // Строительство трубопроводов. – 1961. – № 1. – С. 31 – 32.

83. **Лавров, Г. Е.** Механизация строительства магистральных трубопроводов под автомобильными и железными дорогами / Е. Г. Лавров, Т. Х. Сатаров // М. : Недра – 1978. – 135 с.

84. **Лавров, Г. Е.** Современные машины горизонтального бурения / Е. Г. Лавров // М. : Гостопиздат – 1961. – 87 с.

85. **Лавров, Г. Е.** Способы производства работ и оборудование при бестраншейной прокладке труб / Г. Е. Лавров // Монтажные и специализированные работы в строительстве. – 1960 – № 3. – С. 10 – 15.

86. Луга, А. А. Работа грунтового ядра забивных свай-оболочек с открытым нижним концом / А. А. Луга // Труды НИИжелезобетонного строительства и проектирования –1952. – С. 89 – 104.

87. **Лучшее решение сложных проблем** // Специальный выпуск с инновационными примерами применения динамического способа забивки труб. – М. : Тракто – Техник, 2003. – 24 с.

88. **Маметьев, Л. Е.** Обоснование и разработка способов горизонтального бурения и оборудования бурошнековых машин специальность: 05.05.06 «Горные машины»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Маметьев Леонид Евгеньевич; Кузбасский государственный технический университет. – Кемерово, 1992. – 492 с.

89. **Маметьев, Л. Е.** Повышение эффективности бурения дегазационных скважин и транспортирования разрушенного угля / Л. Е. Маметьев, А. А. Хорешок, А. М. Цехин, А. Ю. Борисов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2018. – № 1. – С. 106–112.

90. **Марков, Н. Н.** Погрешность и выбор средств при линейных измерениях / Н. Н. Марков, Г. Б. Кайнер, П. А. Сацердотов // М. : Машиностроение. – 1967. – 392 с.

91. **Менес, И. М.** Прокладка труб методом прокола / И. М. Менес // Жилищное коммунальное хозяйство. – 1961. – №5. – С. 24 – 28.

92. **Метод SH бестраншейной прокладки труб** // Строительные и дорожные машины. – 2001. – № 3. – С. 8 – 10.

93. **Методические рекомендации по определению динамических свойств грунтов, скальных пород и местных строительных материалов П 01-72** //Л. : Энергия. – 1972. – 36 с.

94. **Мешков, А. А.** Перспективы ударного погружения стальной трубы-кондутора 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.

95. **Минаев, В. И.** Обоснование метода виброударного прокола грунтовых препятствий / В. И. Минаев // Строительство трубопроводов. – 1964 – №7. – С. 17 – 22.

96. **Мирзаев, И. М.** Динамика предварительно напряженного стержня при действии ударной нагрузки / И. М. Мирзаев // Динамика сплошной среды. – 1985. – №71. – С. 24 – 31.

97. **Миткина, Г. В.** Исследование влияния высоты грунтового ядра на несущую способность грунтовых свай: специальность 05.481 «Механика грунтов, основания, фундаменты и подземные сооружения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Миткина Галина Валентиновна; Уральского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова Свердловск, 1971. – 144 с.

98. **Никитин, Л. В.** Динамика упругих стержней с внешним сухим трением / Л. В. Никитин // Успехи механики. – 1988. – Т. 11. – №4. – С.53 – 106.

99. **Николаев, В. А.** Фирма "Горизонталь" – микротоннельное буровое оборудование. / В. А. Николаев //Строительные и дорожные машины. – 2001 – №10. – С.6 – 11.

100. **Николаева, С. К.** О роли температуры в процессе тиксотропного структурообразования водонасыщенных глинистых грунтов / С. К. Николаева, В.А. Королев // Инженерная геология. –1981. – №5. – С. 37 – 47.

101. **Новая управляемая буровая установка фирмы Tracto-Technik** // Строительные и дорожные машины. – 1994 – №12. – С. 13 – 14.

102. **Новожилов, В. В.** Теория тонких оболочек / В. В. Новожилов // Л. : Судпромгиз. – 1962. – 432 с.

103. **Обзор установок направленного бурения** // Официальный журнал Российского общества бестраншейных технологий. – 1998. – №1. – С. 38 – 40.

104. **Пастернак, П. Л.** Основы нового метода расчёта фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П. Л. Пастернак // М. : Стройиздат. – 1954. – 55 с.

105. **Патент № 2009310 Российская Федерация, МПК E21B 25/00 (1990.01).** Способ очистки трубы, забитой вертикально в грунт и устройство для его реализации: № 914905200: заявлено 28.04.1991: опубликовано 15.03.1994 / Ткач Х. Б., Шалунов С. В., Червов В. В. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО РАН. – 10 с. : ил.

106. **Патент № 2066246 Российская Федерация, МПК B08B 9/02 (1995.01).** Устройство для очистки трубы, забитой вертикально открытым торцом в грунт: № 925066247: заявлено 20.08.1992: опубликовано 10.09.1996 / Ткач Х. Б., Костылев А. Д., Червов В. В. [и др.]; заявитель ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО РАН. – 10 с. : ил.

107. **Патент № 2184191 Российская Федерация, МПК B08B 9/02 (1995.01).** Способ и устройство для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: № 2000131738/03: заявлено 18.12.2000: опубликовано 27.06.2002 / Ткач Х. Б., Смоляницкий Б. Н., Трубицин В. В. [и др.]; заявитель Институт горного дела – Научно-исследовательское учреждение СО РАН. – 18 с. : ил.

108. **Патент № 2186936 Российская Федерация, МПК E21B 33/13 (2000.01).** Устройство для электротермического крепления ствола скважины: № 2000126204/03: заявлено 18.10.2000: опубликовано 10.08.2002 / Литвиненко В. С., Соловьев Г. Н.; заявитель Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (технический университет). – 5 с. : ил.

109. **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.

110. **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.

111. **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.

112. **Патент № 2662743 Российская Федерация, МПК G01P 3/36 (2018.05).** Способ исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый массив геосреды: № 2017135117: заявлено 04.10.2017: опубликовано 30.07.2018 / Карпов В. Н., Тимонин В. В., Ткачук А. К. [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. – 10 с. : ил.

113. **Патент № 2674350 Российская Федерация, МПК E21B 45/00 (2018.08), G01P 3/36 (2018.05).** Акустический способ исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин с ударным принципом погружения на разрабатываемый массив геосреды: № 2018107514: заявлено 28.02.2018: опубликовано 07.12.2018/ Карпов В. Н., Тимонин В. В., Ткачук А. К.

[и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. – 19 с. : ил.

114. **Патент № 3120997 Российская Федерация, МПК F16L 1/028 (2006.01), E02F 5/18 (2006.01).** Способ очистки трубы от грунтового керна и устройство для его осуществления: № 2013312885/04: заявлено 14.03.1998: опубликовано 08.05.1999 / Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицин В. В. [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. – 8 с. : ил.

115. **Петреев, А. М.** Показатели экономичности и совершенствование пневмомолотов / А. М. Петреев, Б. Н. Смоляницкий // Известия высших учебных заведений. – 2001. – №8. – С. 111 – 115.

116. **Постановление Госкомтруда СССР, Секретариата ВЦСПС от 15.10.1990 г. № 404/18-94** "Об утверждении Межотраслевых укрупненных нормативов времени на открытые горные работы для предприятий горнодобывающей промышленности. Бурение" // М., 1990. – 29 с.

117. **Предприятие компании СУЭК-Кузбасс для дегазационных работ получило новые буровые установки «PRAKLA RB-50»** // Miner.ru: [сайт] – 2020 – . – URL: http://www.miner.ru/info/1262/ (дата обращения 25.01.2019)

118. **Прудентов, А. И.** Несущая способность трубчатых свай с грунтовым ядром / А. И. Прудентов // Сб. трудов «Основания, фундаменты и подземные сооружения». –1967. – Вып.1. – С. 263 – 286.

119. **РД 15-09-2006. Методические рекомендации о порядке дегазации угольных шахт** // М. : ОАО «Научно-технический центр по безопасности в промышленности». – 2007. – Сер. 05. – Вып. 14. – 256 с.

120. **Рекач, В. Г.** Руководство к решению задач по теории упругости / В. Г. Рекач // М. : Высшая школа. – 1966. – 228 с.

121. **Рукавцев, А. М.** О несущей способности железобетонных трубчатых свай / А. П. Рукавцев // Совещание-семинар по обмену опытом проектирования и сооружения свайных фундаментов. – 1964. – С. 92 – 99.

122. **Руководство по проходке горизонтальных скважин при бестраншейной прокладке инженерных коммуникаций ЦНИИОМТП Госстроя СССР** // М. : Стройиздат – 1982. – 96 с.

123. **Рыбаков, А. П.** Основы бестраншейных технологий / А. П. Рыбаков // М. : Пресс Бюро. – 2005 – 176 с.

124. **Рыженко, А. П.** О несущей способности свай, заглубляемых вибропогружателями в суглинки / А. П. Рыженко // Прочность и деформативность оснований и фундаментов. – 1963. – Вып. 47. – С. 53 – 56.

125. **Сагомонян, А. Я.** Проникание / А. Я. Сагомонян // М. : МГУ. – 1974. – 300 с.

126. **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.

127. **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.

128. **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.

129. **Свирщевский, В. К.** Проходка скважин в грунте способом раскатки / В. К. Свирщевский // Новосибирск: Наука. – 1982. – 120 с.

130. **Сечи, К.** Испытания трубчатых свай / К. Сечи // ВНИИГС. – 1959. – С. 1 – 12.

131. **Смагулова, Л. К.** Химическое закрепление грунтов / Л. К. Смагулова // Символ науки. – 2017. – №6. – С. 28 – 31.

132. **Смирнов, А. Л.** Расчет процесса ударного погружения свай в грунт / А. Л. Смирнов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1989. – № 4. – С. 56 – 63.

133. **Смоленцев, А. С.** Оценка влияния элементов ударной системы пневмомолота на эффективность погружения в грунт обсадной трубы при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Смоленцев Александр Сергеевич; ИГД СО РАН – Новосибирск, 2012. – 115 с.

134. **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 [и др.] // Новосибирск : Издательство СО РАН. – 2016. – 342 с.

135. **Спектор, М. Б.** Исследование процесса виброударной проходки горизонтальных скважин в грунте: специальность 05.481 «Механика грунтов, основания, фундаменты и подземные сооружения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Спектор Михаил Борисович; Киевский строительный институт – Киев, 1968. – 236 с.

136. **Справочник по кранам** // М. : Машиностроение. – 1988. – 536 с.

137. **Суднишников, Б. В.** Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия / Б. В. Суднишников, Н. Н. Есин, К. К. Тупицын // Новосибирск : Наука. – 1985. – 134 с.

138. **Сулакшин, С. С.** Бурение геологоразведочных скважин / С. С. Сулакшин // М. : Справочное пособие – 1991. – 334 с.

139. **Тернецкий, Л. Н.** Экспериментальное исследование горизонтального виброударного продавливания труб / Л. Н. Тернецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1967. – №1. – С.31 – 35.

140. **Тимонин, В. В.** Влияние энергетических параметров погружного пневмоударника на технико-экономические показатели бурения скважин с одновременной

обсадкой / В. В. Тимонин, С. Е. Алексеев, В. Н. Карпов, Е. М. Черниенков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018 – №1. – С. 61–70.

141. **Тимошенко, В. П.** Теория упругости / В. П. Тимошенко, Д. Гудьер // М. : Наука. – 1979. — 560 с.

142. **Тищенко, И. В.** Влияние дополнительного вибровозбудителя и комбинации виброударных устройств на скорость внедрения трубы в грунт при прокалывании / И. В. Тищенко, В. В. Червов, А. И. Горелов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 3. — С. 107 – 119.

143. **Ткач, Х. Б.** Исследование способа и устройства для пробивания скважин с частичным удалением грунта: специальность 05.05.04 «Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ткач Хаим Беркович; ИГД СО АН ССР – Новосибирск, 1973. – 241 с.

144. **Тупицин, К. К.** Управляемые пневмопробойники / К. К. Тупицин, А. Д. Костылев, Е. Н. Чередников, А. Т. Караваев // Строительные и дорожные машины. – 1998. – №3. – С. 16 – 19.

145. **Тупицин, К. К.** Управляемые пневмопробойники. / К. К. Тупицин, А. Д. Костылев, Е. Н. Чередников, А. Т. Караваев //Строительные и дорожные машины. – 1998. – №3 – С. 14 – 18.

146. **Фатеев, Н. Т.** Технология направленного гидроразрыва для создания в массиве пород ограждающих конструкций / Н. Т. Фатеев, С. В. Сергеев, В. Ф. Карякин, С. В. Гапон, О. В. Щетинин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №1 – С. 260 – 264.

147. **Федоровский, В. Г.** Прогноз осадок фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит / В. Г. Федоровский, С. Г. Безволев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2000. – № 4. – С. 10 – 18.

148. **Хлудеев, В. И.** Гидромеханизированная бестраншейная прокладка трубопроводов / В. И. Хлудеев // М. : Госстройиздат. – 1952. – 96 с.

149. **Цаплин, С. А.** Виброударные машины / С. А. Цаплин // М. : Автотрансиздат. – 1953. – 134 с.

150. **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.

151. **Черниховский, Ю. Ф.** Машины для бестраншейной прокладки труб / Ю. Ф. Черниховский // Механизация строительства. – 1977. – № 6. С. 19 – 21.

152. **Чернюк, В. П.** Использование обмазок при погружении забивных свай в грунт / В. П. Чернюк, В. И. Юськович, Г. И. Юськович, П. В. Шведовский // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – №1. – С. 125 – 127.

153. **Шахторин, И. О.** Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения / И. О. Шахторин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – № 1. – С. 72–77.

154. **Шахторин, И. О.** Анализ конструкций долот для бурения скважин с одновременной обсадкой / И. О. Шахторин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2018. – Т.6 – С.321 – 329.

155. **Шашкин, А. Г.** Вязко-упруго-пластическая модель поведения глинистого грунта / А. Г. Шашкин // Развитие городов и геотехническое строительство. – №2. – 2011. – С.1 – 32.

156. **Шенк, Х.** Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк // М. : Мир. – 1972. – 381 с.

157. **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.

158. **Aleksandrova, N. I.** Wave propagation in the 2d periodical model of a block-structured medium. Part I: Characteristics of waves under impulsive impact / N. I. Aleksandrova, E. N. Sher // Journal of Mining Science. – 2010. – T. 46. – P. 639 – 649.

159. **Aleksandrova, N. I.** Numerical-analytical investigation into impact pipe driving in soil with dry friction. Part II: Deformable external medium / N. I. Aleksandrova //Journal of Mining Science. – 2013 – Vol. 49 – No. 3. — P. 413 – 425.

160. **Atlas Copco Rock Drilling Tools**. Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers // Atlas Copco – 2002. – 23 p.

161. **Bazant, Z. P.** Microplane Model for Progressive Fracture of Concrete and Rock / Z. P. Bazant, B. H. Oh. // Journal for Engineering Mechanics. – 1985. – Vol. 111. – P. 559 – 582.

162. **Chapman, D. N.** Prediction of jacking forces for microtunnelling operations / D.N. Chapman, Y. Ichioka // Tunneling and Underground Space Technology. – 1999. – Vol. 14. – Supplement 1. – P. 31 – 41.

163. **Currey, J.** On grade, large diameter pipe ramming installations / J. Currey, G. Woodbridge, E. Nicholson // NASTT International no-dig show. – 2009. – P. 11 – 19.

164. **Ding, X. M.** Wave propagation in pipe pile for low-strain integrity testing / X. M. Ding, H. L. Liu, J. Y. Liu, Y. M. Chen // Journal of Engineering Mechanics. – 2011. – 137(9). – P. 598 – 609.

165. **Fattah, M. Y.** Effect of plug removal on load transfer in plugged open ended pile behavior / M. Y. Fattah, M.B. Asaad Al-Gharrawi, N. Salim // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2016. – Volume 7. – Issue 5. – P. 124–136.

166. **Fox, B.** Drilling of explosive wells on open excavations / B. Fox. // Texas – 1999. – 274 p.

167. **Gudavalli, S. R.** Effect of Soil Plugging on Axial Capacity of Open-Ended Pipe Piles in Sands / S. R. Gudavalli, O. Safaqah, H. Seo // Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2013. – P. 1487 – 1490.

168. **Hashash, Y.** Evaluation of Horizontal Directional Drilling (HDD) / Y. Hashash, J. Javier // Technical Report. – 2011. – 43p.

169. **Herrenkneeht AVN-Simply the best** // TIS. – 1993. – № 3. – 128 p.

170. **Horizontal-Erdbohrgerat** // Export-Mark-Machine und Industriansrust. – 1963. – № 42. –43 p.

171. **International Association for Bridge and Structural Engineering.** – 1975. – Is. 19. – P. 1 – 30.

172. **Jirasek, M.** Numerical Modeling of Deformation and Failure of Materials / M. Jirasek // Lecture notes – 2000. – 181 p.

173. **Karpov, V. N.** Importance of early adjustment of rotary-percussion drilling tool to mineral mining conditions / V. N. Karpov, V. V. Timonin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 134.

174. **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.

175. **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 Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. — 2019. — Vol. 19 (1.3). – P. 447 – 453.

176. **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 Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 134.

177. **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.

178. **Kraft, L. M.** Friction capacity of piles driven into clay / L. M. Kraft, J. A. Focht, S. F. Amerasinghe // Journal of Geotechnical Engineering. – 1981. – Vol. 107. – No. 11. – P. 1521 – 1541.

179. **Lade, P. V.** Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil / P. V. Lade, J. M. Duncan // Journal. Geotechnical Engineering Division. – 1975. – Vol. 101. – № 10. – P. 1037 – 1053.

180. **Lekontsev, Yu. M.** Two-side sealer operation / Yu. M. Lekontsev, P. V. Sazhin, O. A. Temiryaeva, A. A. Khoreshok, S. Yu. Ushakov // Journal of Mining Science. – 2013. – №5. – P. 91 – 98.

181. **Liyanapathirana, D. S.** Numerical modelling of the driving response of thin-walled open-ended piles / D. S. Liyanapathirana, A. J. Deeks and M. F. Randolph // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2001. – Vol. 25. – No. 9. – 933 – 953.

182. Liyanapathirana, D. S. Numerical analysis of soil plug behaviour inside open-ended piles during driving / D. S.Liyanapathirana, A. J. Deeks, M. F Randolph // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 1998. – Vol. 22 – No. 4. — P. 303 – 322.

183. **Matsumoto, T**. Effect of soil plug on behavior of driven pipe piles / T. Matsumoto, M. Takei // Soil and foundations. – 1991. – Vol. 31. – No. 2 – P. 14 – 34.

184. **Matsuoka, H.** Stress-deformation and strength characteristics soil under three different principal stresses / H. Matsuoka, T. Nakai // Proceedings Japanese Society Civil Engineering. – 1974. – Vol. 232. – P. 59 – 70.

185. **Menetrey, Ph.** Object-oriented non-linear finite element analysis: application to J2 plasticity / Ph. Menetrey, Th. Zimmermann // Computers & Structures. – 1993. – Vol. 49. – Is. 5. – P.767 – 777.

186. **Menetrey, Ph.** Triaxial failure criterion for concrete and its generalization / Ph. Menetrey, K. J. Willam // Structural Journal. – 1995. – Vol. 92. – Is. 3. – P. 311 – 318.

187. **Meskele, T.** Attenuation of pipe ramming-induced ground vibrations / T. Meskele, A. Stuedlein // Journal Pipeline Systems Engineering and Practice. – 2016. – Vol. 7. – No. 1. — P. 1 – 12.

188. **Najafi, M.** Field Testing of Major Trenchless Technology Methods for Road Crossings / M. Najafi, B. Gunnink, G. Davis and R. Humphreys // Construction Research Congress. Wind of Change: Integration and Innovation, ASCE, Honolulu, Hawaii. – 2004. – P. 1 – 8.

189. **Operator Killed when Horizontal Auger Boring Machine Overturned**. Case Report 11NY043 // New York State Department of Health. – 2011. – P. 11.

190. **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.

191. **Pietruszczak, S.** Numerical Analysis Accounting for Material Hardening and Softening / S. Pietruszczak, Z. Mroz // International Journal Rock Mechanics Mining Science and Geomechanics Abstract. – 1980. – Vol. 17. – №4. – P. 199 – 207.

192. Pile Driveability and Installation // Seaway Heavy Lifting Engineering B. V. [сайт] – The Netherlands, 2009. – . – URL: https://www.seawayheavylifting.com.cy/uploads/media/Pile_Driveability_Installation.pdf. (дата обращения 25.01.2019)

193. **Primychkin, A. Yu.** Determination of variables for air distribution system with elastic valve for down-the-hole pneumatic hammer / A. Yu. Primychkin, V. V. Timonin, A. S. Kondratenko // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. - 2017. – Vol.53.

194. **Profit From Our Experience. Advertisement manual Allied Steel & Tractor Products**. – 1979. – № 1. – С. 12 – 18.

195. **Randolph, M. F.** One-dimensional analysis of soil plugs in pipe piles / M. F. Randolph, E. C. Leong, G. T. Houlsby // Geotechnique. – 1991. – Vol. 41 – No. 4. — P. 587 – 598.

196. **Schrank, J. S.** Pipe ramming under three active railroad lines in difficult soil conditions / J. S. Schrank, M. D. Havekost and S. M. Njoloma // NASTT International no-dig show. – 2009. – P. 18 – 27.

197. **Veletsos, A. S.** Vertical vibration of ring foundations / A. S. Veletsos, Y. Tang // Earthquake Engeenering and Structural Dynamics. – 1987. – Vol. 15. – № 1. – P. 1 – 21.

198. **Wetter, L.** Trenchless success saves a trenchless failure / L. Wetter, K. Staheli and P. Cohen // NASTT International no-dig show. – 2009. – P. 1 – 10.

199. **Willam, K. J.** Constitutive Models for the Triaxial Behavior of Concrete / K. J. Willam, E. P. Warnke // Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering. – 1975. – Vol. 19/ - P. 1 – 30.

200. **Wu, W.** A new interaction model for the vertical dynamic response of pipe piles considering soil plug effect / W. Wu, M. H. El Naggar, M. Abdlrahem, G. Mei, K. Wang // Canadian Geotechnical Journal. – 2017. – Vol. 54. – № 7 – P. 877 – 1001.

201. **Zheng, C. J.** Vertical response of a thin-walled pipe pile embedded in viscoelastic soil to a transient point load with application to low-strain integrity testing / C. J. Zheng, H. L. Liu, G. P. Kouretzis, S. W. Sloan, X. M. Ding // Computers and Geotechnics. – 2015 – Vol.70. – P. 50 – 59.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Последовательность операций при проведении исследований на физических моделях

1. Установить экспериментальную установку на предварительно подготовленный участок на дне котлована. Закрепить металлоконструкцию грунтовыми анкерами.

2. Разметить с использованием измерительной линейки экспериментальную трубу на 20 равных контрольных участков длиной по 50 мм каждый.

3. Установить в ложемент опоры, а на пневмомолот адаптер, соответствующие принятой экспериментальной трубе. Поместить трубу в ложемент. Установить измерительную линейку внутрь трубы через специальное боковое окно.

4. Подключить пневматические линии согласно схеме. Редукционным клапаном отрегулировать давление в ресивере, требуемое для питания ударного привода.

Для статического погружения п. 3 вместо пневмомолота устанавливается гидроцилиндр, а в п.4 производится его подключение к гидравлическому насосу. При этом для статического погружения определяется только длина грунта внутри трубы, скорость внедрения не фиксируется.

5. Отметить начальное положение трубы относительно отметчика.

6. Переводом крана в рабочее положение запустить ударный привод.

7. После погружения в грунт первого контрольного участка зафиксировать время, затраченное на это погружение. По показаниям измерительной линейки определить длину грунтового керна.

8. Повторить операции п.7 до полного погружения трубы (20 контрольных участков). Если время погружения контрольного участка превышает 180 с для динамического погружения, а для статического - давление в магистрали превышает 5 МПа, считается что дальнейшее продвижение трубы невозможно. Эксперимент прекращается.

9. Ручной лебедкой извлечь забитую трубу из массива. Произвести контрольное измерение длины керна внутри трубы.

10. Очистить внутреннюю полость трубы от грунта.

12. Повторить эксперимент (не менее 4-х раз), чередуя диаметры погружаемых труб.

Определение погрешностей измерения

При проведении экспериментов вычислялась скорость погружения трубы. Для оценки точности этих вычислений определялись погрешности измерений и аппаратуры, используемой во время экспериментов. Полагая, что случайные ошибки измерения подчиняются нормальному закону распределения, в качестве оценки истинного значения измеряемой величины и его абсолютного и относительного отклонения были приняты среднее арифметическое значение и среднее квадратичное отклонение.

При выполнении экспериментов в ряде случаев невозможно установить точные значения измеряемых величин с помощью каких-либо эталонов, поэтому применены следующие зависимости для определения погрешностей.

Наиболее вероятное значение измеряемой величины (А.1) при нормальном распределении является среднее арифметическое значение проведенных n измерений:

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad (А.1)$$

где x_1, x_2, …, x_n – случайная выборка объема n экспериментов.

Среднее квадратичное отклонение находится по формуле (А.2):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^{\cdot 2}} \qquad (А.2)$$

Случайная погрешность $\Delta x_{сл}$ (А.3) при вероятности p:

$$\Delta x_{сл} = \frac{S \cdot t_{p,n}}{\sqrt{n}} \qquad (А.3)$$

где $t_{p,n}$- t-критерий Стьюдента, используемый для определения статистической значимости различий средних величин при требуемой достоверности p.

Полная погрешность (А.4) определения величины Δx:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{сл}^2 + \Delta x_{сист}^2} \qquad (А.4)$$

где $\Delta x_{сист}$ – систематическая погрешность, обусловленная погрешностью применяемых средств измерения.

Скорость погружения (А.5) трубы в грунт v:

$$v = \frac{ds}{dt} \qquad (А.5)$$

где, ds – приращение координаты контрольного участка трубы, см, dt – приращение времени, за которое происходит погружение контрольного участка трубы, с.

Погрешность скорости погружения трубы зависит от погрешностей измерения входящих в эту формулу величин координат контрольных участков трубы и отсчета времени погружения.

Каждый эксперимент повторялся четыре раза: n = 4.

Длина контрольных участков трубы не изменялась в процессе экспериментов и составляла s = 5 см. Случайной погрешностью в данном случае можно пренебречь: $\Delta s_{сл} = 0$.

Длина контрольных участков трубы измерялась линейкой с ценой деления 1 мм. Таким образом, систематическая погрешность определения координаты составляет $\Delta s_{сист} = 0{,}05$ см.

Полная погрешность определения координаты составляет: $\Delta s = \Delta s_{сист} = 0{,}05$ см.

$$\Delta ds = \Delta s_{сист} = 0{,}05 \text{ см}.$$

Время погружения контрольных участков трубы изменялось в широком диапазоне от 8 до 180 секунд. После достижения отметки 180 секунд отсчет прекращался и делался вывод о том, что дальнейшая забивка трубы невозможна.

Время погружения контрольных участков трубы измерялась электронным секундомером с ценой деления 1 с.

Таким образом систематическая погрешность определения времени погружения контрольного участка $\Delta t_{сист} = 0{,}5$ с.

Расчет погрешностей измерения времени погружения контрольных участков трубы производился при наибольшей скорости погружения, поскольку отклонение измерения времени в этом случае максимально.

Среднее арифметическое значение времени погружения контрольного участка, с:

$$\bar{t} = \frac{1}{4}(8 + 9 + 8 + 8) = 8{,}25 \text{ с}.$$

Среднее квадратичное отклонение, с:

$$S_t = \sqrt{\frac{1}{4-1}(8-8{,}25)^2 + (9-8{,}25)^2 + (8-8{,}25)^2 + (8-8{,}25)^2} = 0{,}5 \text{ с.}$$

Случайная погрешность при вероятности p= 0,95:

$$\Delta t_{сл} = \frac{0{,}5 \cdot 3{,}2}{\sqrt{4}} = 0{,}8 \text{ с.}$$

Полная погрешность определения величины Δdt:

$$\Delta dt = \sqrt{0{,}8^2 + 0{,}5^2} = 0{,}94 \text{с.}$$

Поскольку скорость погружения трубы определяется путем косвенных измерений, относительная погрешность будет определяться формулой (А.6):

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta ds}{ds} + \frac{\Delta dt}{dt}, \quad (А.6)$$

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{0{,}05}{5} + \frac{0{,}94}{8{,}25} = 0{,}12.$$

Максимальная абсолютная погрешность определения скорости погружения трубы в грунтовый массив по (А.7):

$$\Delta v = v \cdot \frac{\Delta v}{v} \quad (А.7)$$

$$\Delta v = 0{,}12 \cdot 37{,}5 = 4{,}5 \text{ см/мин.}$$

Таким образом, максимальная погрешность определения скорости погружения грубы в грунтовый массив составляет 12%. Это достаточно высокое отклонение, но стоит учитывать, что такое отклонение значение относится только к первому участку из двадцати. Уже на втором участке погрешность определения скорости погружения трубы в грунтовый массив составляет 7,6%, на третьем 5% и т.д. Таким образом, можно сделать вывод, что точность определения скорости погружения трубы в массив по предложенной методике достаточна, замена измерительных средств на более точные и увеличение числа повторений экспериментов не требуется.

Приложение Б
Акт о производственных испытаниях технологии и комплекта обору-дования ИГД СО РАН по прокладке стальных трубных плетей бес-траншейным способом в грунтовом массиве под автодорогой

Утверждаю
Председатель ПКСР «Кедр»
Постников В.И.
«16» июня 2016 г.

АКТ

От 28 мая 2016 г. г. Новосибирск

О производственных испытаниях технологии и комплекта оборудования ИГД СО РАН по прокладке стальных трубных плетей бестраншейным способом в грунтовом массиве под автодорогой

Комиссия в составе:

1. Турченко Б.С. – начальник производственной базы ПКСР «Кедр»
2. Шабаров А.В. – инженер ПТО ПКСР «Кедр»
3. Сырямин А.Т. – ведущий инженер ИГД СО РАН
4. Смоленцев А.С. – научный сотрудник ИГД СО РАН

произвела производственные испытания комплекта технологического оборудования для прокладки трубчатого стального кожуха бестраншейным методом виброударного продавливания с порционной очисткой трубы от грунтового керна воздушно-водяной смесью.

Испытания производились на объекте "Строительство тепловой сети для подключения строящегося жилого дома по адресу г. Новосибирск, ул. Писарева, 108 к теплоцентрали.

1. Цель испытаний

Целью испытания являлось подтверждение применимости технологии бестраншейной прокладки коммуникаций с порционной очисткой от керна, разработанной ИГД СО РАН в условиях плотной городской застройки, а также

определение производительности данной технологии при прокладке полых труб-кожухов.

2. Условия испытаний

Испытания проводились в период с 21 по 24 мая 2016 г. Выполнялась прокладка двух трубных нитей диаметром 325 мм на длину 19 метра (две секции трубы свариваемые встык), необходимых для подключения строящегося жилого дома по адресу г. Новосибирск, ул. Писарева, 108 к теплоцентрали. Строящееся здание и теплоцентраль разделяет проезжая часть шириной 15,5 м (включая пешеходные тротуары). Обязательным условием выполнения работ являлось сохранение автомобильного движения по проезжей части, поскольку ул. Писарева является важной транспортной артерией Калининского района г. Новосибирска и ее перекрытие могло осложнить до критического уровня дорожный трафик, что недопустимо согласно предписанию Департамента транспорта Мэрии г. Новосибирска от 17.06.13.

В этой связи было принято решение применить технологию забивки труб с открытым передним торцом в грунтовый массив с периодической очисткой внутреннего объема забиваемой трубы от грунтового керна водо-воздушным очистным агентом. В качестве генератора ударных импульсов применялась пневмоударная машина СО-166 с набором конических колец-адаптеров, необходимых для передачи ударного импульса на погружаемый элемент.

Грунтовый массив был представлен преимущественно суглинистыми породами (I категории) без прочных включений и примеси строительного мусора. Влажность массива составляла 14-15%.

Прокладка труб-кожухов выполнялась на глубине 3,2 м от дневной поверхности. Перед началом работ был сооружен стартовый котлован (размером 4 х 12 метров). Приемным котлованом являлась теплораспределительная камера.

Перед забивкой в передней части трубы был смонтирован штуцер, через который во внутреннее пространство подавался очистной агент, подводимый по гибкому трубопроводу. В задней части трубы выполнялось разгрузочное отверстие, позволяющее отводить грунтовый керн из внутренней полости трубы в стартовый котлован без демонтажа ударного привода. Каждая труба посредством разметки делилась на условные участки по 500 мм. Время погружения каждого участка фиксировалось секундомером.

3. Результаты испытаний

1. В процессе погружения трубной плети наблюдался процесс стабильного внедрения погружаемого объекта в грунтовый массив. Остановок процесса, связанных с невозможностью ударного привода преодолеть сопротивление грунта не отмечено.

2. Скорость внедрения плети изменялась в зависимости от длины погруженной в массив части трубы. При погружении первых двух участков (1 метр) скорость была максимальна, и составляла около 0,6 м/мин, при дальнейшем внедрении трубы скорость уменьшалась в среднем на 0,1 м/мин на каждом участке (0,5 м). При погружении трубы на 3,5 метра (7 контрольных участков) скорость снизилась до 0,1 м/мин. На этом этапе было принято решение активировать механизм очистки для удаления грунтового керна из внутреннего объема трубы.

3. Удаление грунтового керна производилось путем подачи воздушно-водяого очистного агента во внутреннее пространство трубы. Объем водной порции для единичной очистки составлял 10 литров. Давление воздуха, необходимое для образования водо-воздушной взвеси, ее транспортирования от резервуара до трубы, отрыва грунтовой порции и ее удаления за пределы внутреннего

пространства погружаемой трубы составило 0,5 МПа (5 атм). Очистка производилась без отключения ударного привода.

4. После выхода грунтового керна в стартовый котлован скорость погружения трубы возросла до значения 0,45 м/мин. Тенденция снижения скорости внедрения по мере набора грунтового керна сохранялась.

5. Дальнейшее погружение трубы выполнялось с очисткой каждые 2 метра (4 контрольные участка). Последняя очистка не была реализована, поскольку произошел прорыв очистного водо-воздушного агента в приемный котлован. После каждой очистки скорость внедрения трубы возрастала в среднем в 3…3,5 раза.

7. Суммарное время погружения трубной плети (с учетом вспомогательных операций) составило 2 ч 48 мин. Средняя скорость погружения трубы составила 0,24 м/мин.

8. Отклонение траектории движения трубной плети от проектной линии находилось в пределах допуска, указанного в проектной документации.

4. Выводы

1. Технология бестраншейной прокладки коммуникаций с порционным удалением керна водо-воздушным очистным агентом, разработанная ИГД СО РАН является пригодной для применения в условиях плотной городской застройки.

2. Очистка трубы водо-воздушным агентом в процесс ее забивки позволяет увеличить скорость погружения не менее чем в 3,1…3,5 раза.

3. Гарантированная очистка внутреннего объема трубы водо-воздушным агентом устраняет необходимость применения вспомогательного оборудования для экскавации грунтового керна на промежуточных этапах процесса забивки трубы.

Члены комиссии:

начальник производственной базы ПКСР «Кедр» Турченко Б.С

инженер ПТО ПКСР «Кедр» Шабаров А.В.

ведущий инженер ИГД СО РАН Сырямин А.Т.

научный сотрудник ИГД СО РАН Смоленцев А.С.

Приложение В
Акт производственных испытаний комплекта оборудования для сооружения скважин методом виброударного продавливания с порционной очисткой трубы от грунтового керна воздушно-водяной смесью

Утверждаю
Генеральный директор
ОАО «Сибмедстрой»
_____ Зельцер Б.М.
«26» августа 2017 г.

АКТ

производственных испытаний комплекта оборудования для сооружения скважин методом виброударного продавливания с порционной очисткой трубы от грунтового керна воздушно-водяной смесью

Комиссия в составе:

1. зам. ген. директора ОАО Сибмедстрой Солдатова Н.В.
2. производитель работ ОАО Сибмедстрой Прохоров В.А.
3. м.н.с. ИГД СО РАН Чещин Д.О.
4. ст. инженер ИГД СО РАН Сырямин А.Т.

произвела освидетельствование производственных испытаний комплекта оборудования для сооружения скважин методом виброударного продавливания с порционной очисткой трубы от грунтового керна воздушно-водяной смесью.

Испытания производились на объекте "Строительство тепловой сети от строящегося жилого дома по адресу ул.Кропоткина в районе дома № 130/6 до существующей тепловой камеры через проезжую часть по ул. Кропоткина"

Производственное испытание комплекта оборудования для сооружения скважин методом виброударного продавливания с порционной очисткой внутренней полости трубы от грунтового керна воздушно-водяной смесью осуществлялись путем забивки двух металлических труб-кожухов диаметром 377мм. с толщиной стенки 8 мм длиной по 22 метра каждая под проезжей частью по ул. Кропоткина без нарушения целостности проезжей части. Кожухи забивались в грунт горизонтально с уклоном 3 градуса в

сторону приемного котлована на глубине 1,8 м от дневной поверхности. Межосевое расстояние у погружаемых труб составляло 650 мм. Грунт – супесь средней плотности, влажность 10…12 %.

Цель испытаний: проверка работоспособности метода порционного удаления грунтового керна посредством сжатого воздуха с целью повышения производительности погружения труб-кожухов при сооружении подземных коммуникаций под транспортными магистралями.

Подготовительные операции: для удаления грунтового керна из трубы на расстоянии 0,5 метра от её торца, к которому прикрепляется пневмоударная машина, выполнялось прямоугольное окно размерами 270х170 мм. На первой секции трубы на удалении 0,5 метра от заходного торца трубы монтировался пластиковый трубопровод, по которому в переднюю часть трубы-кожуха периодически по мере необходимости подавалась воздушно-водяная смесь. Данный пластиковый трубопровод погружался вместе с трубой-кожухом.

Результаты испытаний:

1. Погружение труб-кожухов осуществлялось пневмоударной машиной Тайфун-500 посекционно, длина каждой секции составляла 11 метров. Последовательно были забиты две плети труб, отклонения точки выхода скважины в приемный котлован от проектной отметки для обоих труб составили не более 15 см.

2. Очистка первой погружаемой плети проводилась каждые 3 метра погруженной трубы, при этом первый вынос порции грунтового керна произошёл только при погружении трубы на 8 метров. Объем выхода грунтового керна был различным.

Скорость погружения секций трубы изменялась от 0,8 м/мин в начале погружения до 0,02 м/мин в конце погружения при забивке с грунтовой пробкой внутри трубы. После каждой операции по очистке внутренней полости трубы от набранного грунта происходил почти двукратный прирост скорости погружения трубы. После дальнейшего внедрения трубы на длину около 1,5 метров скорость погружения снижалась до значений, предшествующих порционной очистке.

3. Очистка второй погружаемой плети проводилась каждые 2 метра погруженной трубы. Отрыв и удаление грунтового керна не всегда происходило с первой попытки, но повторная попытка через следующий 1 метр погруженной трубы всегда давала положительный результат.

Скорость погружения второй секций трубы практически не отличалась от скорости погружения первой.

Выводы:

1. Метод порционной очистки забиваемой трубы от грунтового керна показал свою работоспособность. Для повышения надежности метода порционного удаления керна необходимо разработать методику ориентировочного расчета величины интервалов погружения трубы между операциями очистки, исходя из энергии удара, размеров трубы и свойств грунта, .

2. Предложенная технология позволяет устранить необходимость периодических остановок процесса погружения трубы для её очистки механическим способом, а также позволяет сократить время ударного воздействия за счет прироста скорости после каждой очистки.

Члены комиссии:

зам. ген. директора ОАО Сибмедстрой Солдатова Н.В.

производитель работ ОАО Сибмедстрой Прохоров В.А.

м.н.с. ИГД СО РАН Чещин Д.О.

ст. инженер ИГД СО РАН Сырямин А.Т.

Приложение Г
Акт опытно-промышленных испытаний «Технологии установки кондукторов виброударным способом с порционным удалением грунта»

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор АО «СУЭК-Кузбасс»
А.А. Мешков
«17» июля 2019 г.

Акт

опытно-промышленных испытаний

«Технологии установки кондукторов виброударным способом с порционным удалением грунта»

Испытания проведены с 14 по 18 мая 2019 г. в условиях горного отвода шахты им. С.М. Кирова ПЕ «УДиУМ» АО «СУЭК-Кузбасс»

Члены комиссии:

От АО «СУЭК-Кузбасс»:

Харитонов И.Л. –начальник технического управления АО «СУЭК-Кузбасс»;

Квитко Е.А. – главный инженер ПЕ «УДиУМ»;

Плеханов В.В. – зам. директора по производству ПЕ «УДиУМ»;

От ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала:

Кондратенко А.С. – директор ИГД СО РАН;

Карпов В.Н. – научный сотрудник ИГД СО РАН;

Сырямин А.Т. – ведущий инженер ИГД СО РАН.

Задачи испытаний:

1. Провести промышленные испытания технологии установки кондукторов виброударным способом с порционным удалением грунта.
2. Выполнить оценку эффективности способа при бурении скважин глубиной 15 м в пластичных и скальных грунтах.

Схема работы технологии установки кондукторов виброударным способом с порционным удалением грунта представлена на рис.1.

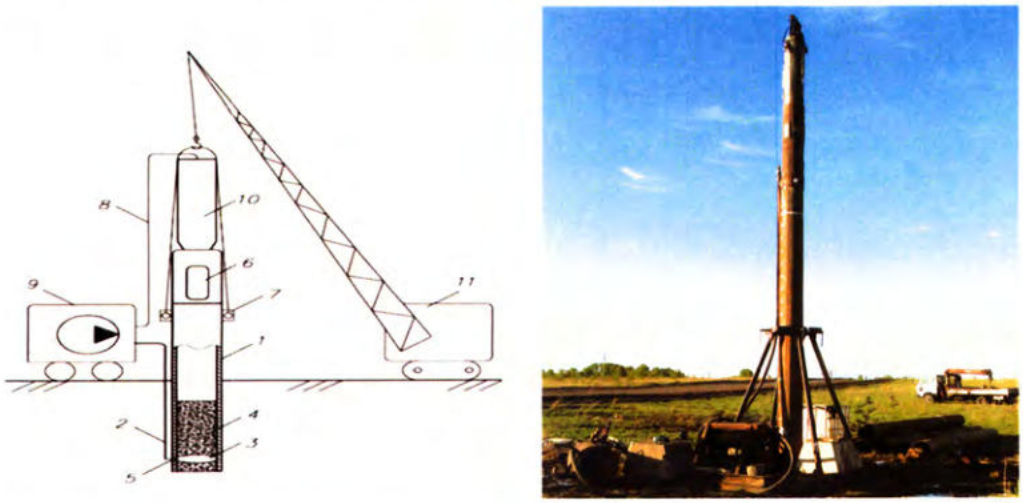


Рис.1. Погружение трубы с порционным удалением керна: *а* – схема работы технологии бурения скважин виброударным способом погружения кондукторов с порционным удалением грунта: *1* – погружаемая труба; *2* – трубопровод; *3* – воздушная камера; *4* –керн; *5* – отверстие для подачи сжатого воздуха; *6* – адаптер с разгрузочным окном; *7* – стяжное устройство; *8* – воздухоподводящий шланг; *9* – компрессор; *10* – пневмомолот; *11* – подъемный кран.

Сущность технологического решения (рис.1) заключается в подведении к забойному торцу трубы 1 по отдельному трубопроводу 2 сжатого воздуха. После формирования очередной порции керна 4 сжатый воздух через отверстие 5 под давлением подается во внутреннюю полость трубы. Он отсекает часть керна, формирует воздушную камеру 3 и перемещает порцию керна в верхнюю часть трубы 1, откуда через разгрузочное окно адаптера 6 керн выдавливается наружу. Указанные операции повторяются после образования новой порции керна. Циклы погружения и очитки продолжаются до проектной глубины погружения.

Условия испытаний

Горный отвод шахты им. С.М. Кирова г. Ленинск-Кузнецкий. На рис.2 приведены грунты, по которым осуществлялось бурение скважин.

Рис.2. Эволюция пород при бурении скважин на горном отводе шахты им. С.М. Кирова:
А – глина желтого цвета; В – глина серо-голубого цвета; С – алевролит

В таблице приведены результаты определения физико-механических буримых грунтов (рис.2.)

ТАБЛИЦА. Физико-механические свойства грунтов

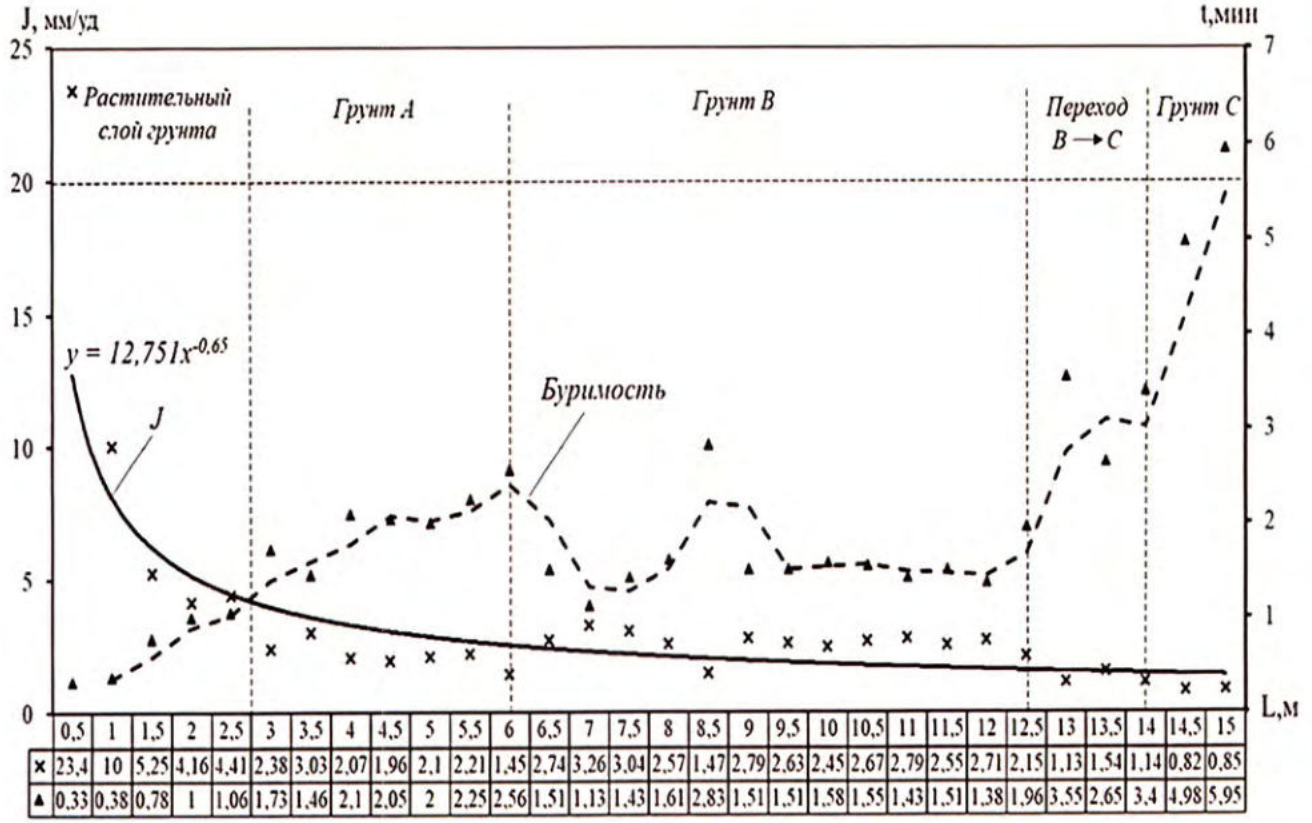
Определение пластичности и консистенции грунтов							Определение физико-механических свойств скального грунта			
Образец	Глубина отбора, м	Природная влажность, д.е.	Предел пластичности, д.е			Показатель текучести	Плотность, г/см^3	Плотность сухого грунта, г/см^3	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	
			Граница текучести	Граница раскатывания	Число пластичности				В воздушно-сухом состоянии	В водонасыщенном состоянии
A	4	0,10	0,37	0,20	0,17	< 0				
B	8	0,13	0,38	0,24	0,14	< 0				
C	14,5	0,002	-	-	-	-	2,47	2,46	32,87	10,09

Результаты испытаний

Было установлено два пилотных кондуктора для дегазационных скважин, которые были приняты в дальнейшую работу. Глубина пробуренных скважин составила 15 м. Погружение обсадной трубы диаметром 426 мм с толщиной стенки 9 мм выполнялось при помощи пневмомолота «Тайфун-500» с номинальной энергией единичного удара 5000Дж при частоте 1,5 Гц. Очистка внутренней полости осуществлялась каждые 250мм погружения давлением сжатого воздуха 25 атм. Чистое время виброударного воздействия для первой скважины составило46,5мин, а для второй -59,2 мин.

Оценка эффективности бурения по грунтовому массиву выполнялась с использованием способа исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый массив геосреды (патент РФ на изобретение № 2662743. Патентообладатель ИГД СО РАН).

На рис.2 представлены результаты исследования чистого бурения в стратифицированном грунтовом массиве одной из пробуренных скважин. На графике приведены зависимости изменения времени (t) бурения скважины на каждые 0,5 м пути (буримость) и показателей удельного перемещения обсадной трубы за удар пневмомолота (J), которые определялись с учетом фактической частоты ударных воздействий на каждом контрольном отрезке пути.



	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15
×	23,4	10	5,25	4,16	4,41	2,38	3,03	2,07	1,96	2,1	2,21	1,45	2,74	3,26	3,04	2,57	1,47	2,79	2,63	2,45	2,67	2,79	2,55	2,71	2,15	1,13	1,54	1,14	0,82	0,85
▲	0,33	0,38	0,78	1	1,06	1,73	1,46	2,1	2,05	2	2,25	2,56	1,51	1,13	1,43	1,61	2,83	1,51	1,51	1,58	1,55	1,43	1,51	1,38	1,96	3,55	2,65	3,4	4,98	5,95

Скорость прохождения скважины с ее одновременным обсаживанием трубного става зависит от физико-механических свойств грунта, а ее спад происходит при снижении пластичности. Изменение показателей J характеризующих механическую скорость бурения происходит умеренно, что говорит о возможности применения виброударного бурения на объектах с более мощными грунтовыми слоями.

ВЫВОДЫ

1. Технология установки кондукторов виброударным способом с порционным удалением грунта при сооружении дегазационных скважин с поверхности исключает аварийные ситуации, связанных с неустойчивостью стенок скважины как на этапе бурения, так и при обсадке.
2. Применение технологии позволяет исключить из действующего технологического цикла АО «СУЭК-Кузбасс» операции по бурению шарошечными долотами, обсадке и бетонированию затрубного пространства.
3. Способ виброударного бурения, используемый в технологии, обеспечивает прохождение скважин с их одновременным обсаживанием трубой диаметром 426 мм по пластичным и скальным грунтам прочностью от 0 до 32,8 МПа на глубину свыше 15 м.
4. Предложенная технология способствует развитию новых подходов в области бурения вертикальных скважин большого диаметра в горном деле и может быть применена на глубинах до 100 м при условии использования ударного привода соответствующей мощности.

РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Сосредоточить усилия на совершенствовании технологии, и направить на повышение производительности бурения путем снижения времени вспомогательных операций, за счет автоматизации процессов позиционирования буровой платформы и обсадной трубы, монтажа и демонтажа ударного модуля.

2. Разработать и изготовить ударный привод для погружения обсадной трубы-кондуктора на глубину 65м.

Начальника технического управления АО «СУЭК-Кузбасс» — Харитонов И.Л.

Главный инженер ПЕ «УДиУМ» — Квитко Е.А.

Зам. директора по производству ПЕ «УДиУМ» — Плеханов В.В.

Директор ИГД СО РАН — Кондратенко А.С.

Научный сотрудник ИГД СО РАН — Карпов В.Н.

Ведущий инженер ИГД СО РАН — Сырямин А.Т.

Приложение Д

Акт о результатах технико-экономической оценки эффективности технологий установки стартовых кондукторов

СУЭК

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «СУЭК-КУЗБАСС»

РОССИЯ, 652507, КЕМЕРОВСКАЯ ОБЛ.,
Г. ЛЕНИНСК-КУЗНЕЦКИЙ
УЛ. ВАСИЛЬЕВА, 1
ТЕЛ: (38456) 9-33-11
ФАКС: (38456) 3-32-19, 3-15-18
E-MAIL: suek-kuzbass@suek.ru

Утверждаю:
Заместитель Генерального директора-
Технический директор
АО «СУЭК-Кузбасс»

А.А. Мешков
2019 г.

Акт
о результатах технико-экономической оценки эффективности технологий установки кондукторов в осадочных породах

Сбор данных для технико-экономической оценки эффективности технологий проводился с 14 по 18 мая и с 12 по 14 августа 2019 г. в условиях горного отвода шахты им. С.М. Кирова ПЕ «УДиУМ» АО «СУЭК-Кузбасс»

Члены комиссии:

От АО «СУЭК-Кузбасс»:
Понизов А.В. – заместитель технического директора – начальник технического управления АО «СУЭК-Кузбасс»
Малых И.Б. – заместитель начальника технического управления (по основным производственным процессам)

От ИГД СО РАН им. Н.А. Чинакала:
Кондратенко А.С. – директор ИГД СО РАН
Карпов В.Н. – научный сотрудник ИГД СО РАН

Задачи испытаний:

1. Провести сбор и определение данных для расчета технико-экономических параметров технологий установки кондукторов.
2. Результаты расчета технико-экономических параметров для двух технологий выполнить в виде отчетно-аналитического документа.

Результаты исследований

По данным полученным в ходе опытно-промышленных испытаний была проведена технико-экономическая оценка эффективности технологий установки кондукторов длиной 15 п.м. Оценивались действующая технология, состоящей из операции вращательного бурения шарошечным долотом и операции по ее обсадке и технология ударного погружения обсадной трубы с циклично-поточным транспортированием породы (бурение скважины с одновременной обсадкой).

Технико-экономическая оценка эффективности технологий выполнена на основе способов исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый массив геосреды и методических основ оценки энергоэффективности бурения скважин, разработанных в ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН.

В ходе научно-исследовательской работы был разработан отчетно-аналитический документ – «Журнал технико-экономической оценки эффективности технологий установки кондукторов длиной 15 п.м», который включен в отчет по договору №37-817.

Результаты исследований, по данным журнала технико-экономической оценки эффективности технологий установки кондукторов, представлены в табл.1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты технико-экономической оценки эффективности технологий установки кондукторов

Параметры	Значения параметров		
	Шарошечное бурение	Ударное погружение	±Δ,%
Длина кондуктора, п.м	15		–
Продолжительность рабочей смены, мин	720		–
Оперативное время рабочей смены, мин	648		–
Средняя механическая скорость бурения, мм/мин	92,6	396,2	227
Сменная норма выработки, п.м	24,7	38,1	54
Сменная норма времени, чел.-мин/п.м	29,1	17,3	
Удельные амортизационные затраты технологии на буровое оборудование, руб/п.м	1356,1	876,6	54,7
Удельные затраты на заработную плату буровой бригады, руб/п.м	835,2	566,6	47,4
Удельные затраты на энергоносители, руб/п.м	447,2	246,3	81,5
Себестоимость прямых затрат на установку кондуктора, руб/п.м	2638,5	1691,5	56

Производительность технологии ударного 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 буровой бригады сварщика. Это организационное мероприятия позволит снизить время сварочных работ не менее чем в 2 раза, без увеличения затрат на заработную плату. В этом случае сокращение времени вспомогательных операций для установки кондуктора длиной 15 п.м снизится на 38,5 мин, а дополнительный прирост производительности увеличится на 18 % и составит 45 п.м в смену. Следовательно, сменная норма выработки будет уже на 82% выше, чем у технологии шарошечного бурения.

Технология установки кондуктора с применением шарошечного бурения включает цементирование, в приведенных расчетах эти операции не учитывались, а также не учитывался технологический простой необходимый для затвердевания цемента, который составляет по продолжительности 24 часа (2 смены).

За время технологического простоя, технология ударного погружения кондуктора способна обеспечивать установку 5 кондукторов при сменной производительности $H_{в1}$ = 38,1 п.м, а при включении в штат буровой бригады второго сварщика при $H_{в1}$= 45 – 6 кондукторов длинной 15 п.м.

В ходе исследований установлено, что по удельной себестоимости прямых затрат технология погружение кондуктора ударным 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 ниже на 47,4 %, а затраты на расходуемые энергоносители снижены на 81,5 %, что также говорит о более высокой энергоэффективности новой технологии, в сравнении с действующей.

Полученные результаты имеют важное значение для выбора ударного узла для данной технологии при переходе на глубину установки кондукторов до 65 п.м включительно, а также для проектирования ударных машин с регулируемой энергией единичного удара, позволяющей обеспечивать стабильно высокие показатели механической скорости погружения с учетом горно-геологических условий и глубины внедрения.

Для увеличения производительности установки кондукторов, технология ударного погружения имеет задел дополнительного снижения вспомогательных операций за счет использования труб с длинной 11,5 п.м, что при переходе на большие глубины снизит количество сварных соединений и будет способствовать снижению энергетических потерь при ударном погружении. При глубинах установки около 20 метров процесс погружения кондукторов целесообразно осуществлять единым отрезком трубы, состоящим из предварительно сваренных секций, что также снизит время вспомогательных операций.

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. Платформа имеет отверстие и два центрирующих захват трубы, разнесенных на 1,5 – 2 м по высоте друг от друга. Захваты оснащены гидроцилиндрами для оперативной и автоматизированной корректировки вертикального положения погружаемой трубы. Создание такой специализированной платформы, работающей в паре с автокраном, имеющим вылет стрелы 31 – 34 м и грузоподъёмность 32 – 40 т, снизит время вспомогательных операций на этих этапах по меньшей мере 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 превысят 20 млн. рублей (в ценах 2019 г.). Для сравнения стоимость буровой установки *Prakla RB50* составляет 88 млн. рублей (в ценах 2018г.). При этом автокран может быть задействован в логистической цепочке и осуществлять погрузочно-разгрузочные работы для нужд всех буровых участков.

ВЫВОДЫ

1. Технология установки кондукторов ударным способом с порционным удалением керна при сооружении дегазационных скважин с поверхности исключает аварийные ситуации, связанных с неустойчивостью стенок скважины как на этапе бурения, так и при обсадке.

2. Применение технологии позволяет исключить из действующего технологического цикла операции по бурению шарошечными долотами, обсадке и бетонированию затрубного пространства.

3. Производительность технологии ударного погружения кондуктора на 54 % выше чем у технологии с применением шарошечного бурения, а путем введения в штат буровой бригады второго сварщика без изменения численного состава) 85%.

4. По удельной себестоимости прямых затрат технология погружение кондуктора ударным способом обходится дешевле на 56 %, чем при использовании технологии шарошечного бурения с последующей обсадкой.

5. Технология ударного погружения кондукторов способствует развитию новых подходов в области бурения вертикальных скважин большого диаметра в горном деле и может быть применена на глубинах до 100 м при условии использования ударного привода соответствующей мощности.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Разработанный журнал технико-экономической оценки технологий имеет важную научную-практическую ценность. Обозначенные подходы могут применятся для тестирования других технологий бурения, применяемых на последующих этапах строительства скважин, но уже с учетом их специфики. Целесообразно составление подобных журналов при тестировании новых образцов техники и технологий на всех этапах сооружения дегазационных скважин. Это позволит объективно отображать технико-экономический эффект от технических, технологических и организационных нововведений, направленных на снижение экономических затрат как при бурении дегазационных скважин на угольных шахтах АО «СУЭК-Кузбасс», так и при проходке скважин иного назначения.

Заместитель технического директора – начальник технического управления АО «СУЭК-Кузбасс» Понизов А.В.

Заместитель начальника технического управления (по основным производственным процессам) АО «СУЭК-Кузбасс» Малых И.Б.

Директор ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН Кондратенко А.С.

Научный сотрудник ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН Карпов В.Н.