

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ПЕТРОВ Андрей Андреевич

**ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА УСТАНОВКИ
ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ
СО ВСТРОЕННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства
и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д-р техн. наук, профессор
Пушкарёв Александр Евгеньевич

Санкт-Петербург – 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	17
1.1. Установки для выполнения бестраншейного монтажа подземных коммуникаций	17
1.2. Методы увеличения производительности породоразрушающего инструмента	33
1.3. Анализ технических решений в области бестраншейной прокладки коммуникаций	38
1.4. Цели и задачи исследований	45
1.5. Выводы по главе 1	46
2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	47
2.1. Методика исследования ресурса работы колебателя в зависимости от свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин.	47
2.1.1. Технологическое оборудование для проведения термической обработки	49
2.1.2. Аналитическое и испытательное оборудование	51
2.2. Методика проведения стендовых испытаний по проверке работоспособности и оценке резонансных характеристик бурильной головки	59
2.3. Методика расчета усталостной прочности пластины резонатора бурильной головки	62
2.4. Факторы и показатели, определяющие и характеризующие работу бурильной головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний	65
2.5. Выводы по главе 2	69

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ БУРИЛЬНОЙ ГОЛОВКИ	71
3.1. Определение влияния свойств используемого материала и режимов термообработки на усталостную прочность пластины колебателя	71
3.1.1. Результаты исследования пластины колебателя 60С2А с разными режимами термической обработки	71
3.1.2. Результаты исследования пластины колебателя 65Г с разными режимами термической обработки	78
3.1.3. Результаты исследования пластины колебателя 60С2ВА с разными режимами термической обработки	85
3.1.4. Результаты исследования пластин колебателя из стали 60С2А, 65Г и 65С2ВА с разными режимами термической обработки	93
3.2. Результаты стендовых испытаний опытного образца бурильной головки	95
3.3. Анализ усталостной прочности пластины колебателя бурильной головки	98
3.4. Анализ усталостной прочности пластины колебателя бурильной головки	103
3.5. Анализ влияния силового воздействия пластины колебателя на колебания лопатки бурильной головки	110
3.6. Выводы по главе 3	112
4. МЕТОДИКА ВЫБОРА ТИПА И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА УСТАНОВКИ ГНБ СО ВСТРОЕННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ	114
4.1. Способ горизонтально направленного бурения и устройство бурильной головки	114
4.2. Расчет геометрических параметров бурильной головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний	119
4.3. Выводы по главе 4	125

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В	142

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие транспортной инфраструктуры является стратегической задачей страны. При этом строительство дорог должно выполняться с учетом специфики условий эксплуатации. В то же время ведение строительных работ, прокладка коммуникаций, обустройство коллекторов и прочих инженерных сооружений зачастую приводит к необходимости временного разрушения дорожных одежд, что требует проведения дополнительных мероприятий по восстановлению конструкции дороги, существенно снижает ее прочность и живучесть, влияет на эффективность и комфортность ее эксплуатации. С учетом изложенного, в качестве наиболее перспективных для применения технологий, предусматривающих различные типы работ с инженерными коммуникациями, следует рассматривать технологии горизонтально направленного бурения (ГНБ) и направленного прокола, позволяющие реализовать бестраншейную прокладку трубопроводов. При этом работы могут выполняться даже без остановки эксплуатации дороги. Однако область применения машин ГНБ ограничена возможностями используемого ими механического породоразрушающего инструмента. Новым техническим решением является повышение энерговооруженности рабочей головки породоразрушающего инструмента за счет подведения к нему вибрационных колебаний, генератор которых встраивается в конструкцию самой головки, а источником энергии является поток промывочной жидкости, подаваемой при бурении. Гидродинамический инструмент, построенный на базе описанного принципа, имеет существенные преимущества перед традиционным как в части повышения производительности бурения и прокола, так и в части увеличения зоны использования таких установок на более устойчивые, крепкие и прочные массивы грунта. Однако вибрационные процессы, реализуемые при работе инструмента, оказывают значительное влияние на саму конструкцию машины, повышая требования к усталостной прочности механических элементов. Таким образом повышается значимость выбора конструктивного исполнения

инструмента и рабочих режимов, обеспечивающих, с одной стороны, достижение необходимых показателей выполнения производственной задачи, а, с другой стороны, не создающих условий для снижения надежности и долговечности машины в целом. При этом закономерности формирования характеристик вибрационных колебаний, встроенного в головку породоразрушающего инструмента генератора, реализующего эффект Польмана – Яновского, в зависимости от факторов процесса не установлены. Кроме того, отсутствуют рекомендации по выбору конструктивных параметров и режимов работы встроенного генератора вибрационных колебаний в зависимости от технологии изготовления элементов его конструкции. Поэтому проведение исследований, определяющих влияние вибрационных характеристик гидродинамического инструмента установки ГНБ на надежность элементов конструкции для обоснованного выбора конструктивных параметров и режимов работы, учитывающего физико-механические свойства нагруженных элементов, представляет собой важную научно-техническую задачу и определяет актуальность настоящей работы.

Степень разработанности темы исследования. Технология горизонтально направленного бурения востребована при бестраншейной прокладке трубопроводов, когда работы выполняются без обустройства траншей и вскрытия дневной поверхности. Мировыми лидерами в области создания машин для бестраншейных технологий являются производители США (VERMEER, Ditch Witch), Германии (Herrenknecht) и др. В России современные установки ГНБ производит Скуратовский машиностроительный завод (Тульская область), Завод Буровой Техники (г. Волгодонск), группа компаний «Экопром» (Московская область) и др. При этом экстраполяция области применения машин ГНБ на более крепкие массивы возможно обеспечить за счет динамического воздействия на породы, при котором сопротивляемость массивов механическому воздействию снижается. Для этого можно использовать встраиваемые в породоразрушающий инструмент генераторы вибрационных колебаний, эффективность которых доказана. Исследованиями

в этой области успешно занимались научные школы Тульского государственного университета, Саратовского государственного технического университета, Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ). Н. В. Васильевым, В. М. Земсковым, Н. В. Краснолудским, Н. Я. Кершенбаумом, А. Е. Пушкаревым и другими учеными сформулированы основы научной базы применения вибрационных инструментов рабочих органов установок ГНБ и прокола. Обоснована возможность повышения энерговооруженности рабочей головки породоразрушающего инструмента за счет подведения к нему вибрационных колебаний. При этом использование дополнительных источников энергии для приведения в действие механических устройств, создающих вибрационные колебания на рабочем инструменте, нерационально, так как повышается энергоемкость работы установки и возникает необходимость решения непростой задачи передачи энергии к породоразрушающей головке в компактных габаритных размерах. Указанных недостатков лишен гидродинамический генератор вибрационных колебаний, который встраивается в конструкцию самой головки, а источником энергии является поток промывочной жидкости, подаваемой при бурении. Так, например, встроенный в инструмент для ГНБ генератор вибрационных колебаний, реализующий эффект Польшмана – Яновского и использующий энергию потока промывочной жидкости (Патент Российской Федерации на полезную модель № 2013135577/03(053370)), обеспечивает до 30 % снижения нагрузки на инструменте, что позволяет разрушать более крепкие породы. Также основы рабочего цикла генератора вибрационных колебаний, встроенного в бурильную головку, отражены в научных трудах российских ученых (Г. С. Назаров, А. Б. Рогов, В. В. Колесников) и зарубежных коллег (Ши-Го-Бао). На базе кафедры наземных транспортно-технологических машин СПбГАСУ разработан и изготовлен комплект экспериментального образца рабочей головки ГНБ со встроенным гидродинамическим генератором вибрационных колебаний. Конструкция экспериментальной головки позволяет

использовать гидродинамический генератор в исполнениях с различным количеством колебателей и струеформирующих насадок, что обеспечивает возможность исследования закономерностей взаимодействия инструмента с массивом в широком диапазоне изменения параметров. Однако в настоящее время нет научно обоснованных рекомендаций как по выбору конструктивных параметров инструмента со встроенным генератором вибрационных колебаний для эффективной работы, так и по режимам работы генератора в зависимости от свойств материала резонирующих пластин, а закономерности влияния вибрационных нагрузок на надежность и долговечность элементов конструкции встроенного генератора пока не установлены.

Цель исследования. Определить эффективность и долговечность функционирования породоразрушающего инструмента установки ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний для обоснования конструктивных параметров и режимов работы (с учетом возможностей насосной установки конкретной машины, при которых реализация технологии ГНБ происходит с минимальной энергоемкостью).

Задачи исследования. Для достижения цели данного диссертационного исследования необходимо решить ряд последовательных задач, а именно:

1. Провести расчет конструктивных параметров и изготовить опытный образец бурильной головки установки ГНБ с генератором вибрационных колебаний, встроенным внутрь в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых и натурных испытаний.

2. Осуществить стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительной оценке резонансных характеристик опытного образца бурильной головки машины ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок.

3. Экспериментально определить закономерности функционирования генератора вибрационных колебаний, встроенного в бурильную головку машины ГНБ, и выявить конструктивные параметры инструмента и режимы его работы, при которых реализация технологии ГНБ происходит при минимальной энергоемкости.

4. Исследовать ресурс работы колебателей в зависимости от свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин.

5. Обосновать конструктивное исполнение гидродинамического инструмента и режимов работы установки горизонтально направленного бурения в конкретных условиях применения, обеспечивающих реализацию технологии ГНБ в энергоэффективном режиме.

6. Разработать методику выбора конструктивных параметров инструмента со встроенным генератором вибрационных колебаний для эффективной работы.

Объект исследования. Породоразрушающий инструмент установки ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний.

Предмет исследования. Эффективность и долговечность встроенного генератора вибрационных колебаний различного конструктивного исполнения, с учетом свойств материала резонирующих пластин.

Рабочая гипотеза. Эффективная работа породоразрушающего инструмента установки ГНБ обеспечивается обоснованным выбором конструктивных параметров и режимов работы встроенного генератора вибрационных колебаний на основе установленных закономерностей влияния режимов термообработки резонирующих пластин на усталостную прочность и ресурс их работы, с учетом возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Установлены закономерности формирования резонансных частот резонирующих пластин встроенного в бурильную головку генератора вибрационных колебаний в зависимости от возможностей насосной установки конкретной машины, а также количества и размеров струеформирующих

насадок, что позволило выявить рациональные сочетания конструктивных параметров, при которых реализация технологии ГНБ происходит при минимальной энергоемкости.

2. Определены закономерности изменения физико-механических свойств и усталостной прочности резонирующих пластин в зависимости от использованного материала и термической обработки, что позволило установить режимы, при соблюдении которых ресурс их работы достигает максимальных значений.

Теоретическая значимость работы заключается в раскрытии закономерностей формирования резонансных частот в генераторе вибрационных колебаний, встроенном в инструмент установки ГНБ, и разработке на их основе научно обоснованных рекомендаций по выбору конструктивных параметров инструмента и режимов его работы, при которых реализация технологий ГНБ происходит при минимальной энергоемкости, с учетом особенностей конструкции инструмента и условий ведения работ; в определении влияния свойств использованного материала и термической обработки резонирующих пластин на конструктивное исполнение и выбор режимов работы встроенного генератора вибрационных колебаний, что позволило установить допустимые вибрационные характеристики (при соблюдении которых ресурс работы машины достигает максимальных значений).

Практическая значимость работы заключается в создании опытного образца инструмента установки ГНБ с генератором гидродинамических колебаний, встроенным внутрь бурильной головки, и экспериментальном определении эффективности и закономерностей его функционирования; в обосновании конструктивного исполнения и режимов работы встроенного генератора вибрационных колебаний в зависимости от использованного материала и термической обработки резонирующих пластин (при соблюдении которых ресурс их работы достигает максимальных значений).

Методология и методы исследования. Достижение поставленной перед исследованием цели реализуется применением комплексного метода исследования, предусматривающего:

- анализ и обобщение научного и производственного опыта использования оборудования для ГНБ с использованием динамического воздействия на массивы;
- научный анализ и обобщение результатов теоретических исследований работы генераторов вибрационных колебаний, реализующих эффект Польмана – Яновского, с определением энергетических характеристик вибрационного процесса;
- экспериментальные исследования функционирования генератора вибрационных колебаний, встроенного в рабочий орган машины ГНБ в стендовых условиях;
- обработку, оценку и анализ данных, полученных в ходе проведения испытаний с использованием теории вероятности, математической статистики, сопоставления экспериментальных и расчетных данных;
- экспериментальные исследования взаимодействия гидродинамического инструмента машины ГНБ с массивом по обоснованию режимов работы установки, при которых достигается минимальная энергоёмкость процесса;
- разработку рекомендаций для конструктивного исполнения и режимов работы генератора гидродинамических колебаний в конкретных условиях применения, обеспечивающих реализацию технологии ГНБ в энергоэффективном режиме.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.5.11. «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы», п. 2: «Методы расчета и проектирования, направленные на создание новых и совершенствование существующих транспортно-технологических средств и их комплексов с учетом полного жизненного цикла изделий, обладающих высоким качеством, в том числе повышенными показателями экономичности, надежности, производительности, экологичности

и эргономичности, обеспечивающих энергоэффективность и безопасность эксплуатации» и п. 3: «Экспериментальные исследования и испытания транспортно-технологических средств и их комплексов, а также отдельных систем, агрегатов, узлов, деталей и технологического оборудования».

Положения, выносимые на защиту

1. Эффективная работа породоразрушающего инструмента установки ГНБ обеспечивается рациональным сочетанием конструктивных параметров, а именно количеством резонирующих пластин и размерами струеформирующих насадок в зависимости от возможностей насосной установки конкретной машины, при которых реализация технологии ГНБ происходит с минимальной энергоемкостью.

2. Режимы работы встроенного генератора вибрационных колебаний задаются на основании установленных закономерностей влияния свойств используемого материала и режимов термообработки на усталостную прочность резонирующих пластин, при которых ресурс их работы в зависимости от возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины является максимальным.

3. Представлена методика выбора конструктивного исполнения и режимов работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ в зависимости от физико-механических свойств материала резонирующих пластин, возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обоснована применением методов непараметрической статистики, апробированных ранее в иных отраслях науки, и подтверждается результатами проведения испытаний на многоцикловую усталость. Результаты конечно-элементного моделирования согласуются с данными стендовых испытаний опытного образца. Использовались стандартизованные методики измерения и последующего анализа результатов. Степень достоверности результатов

обеспечена применением сертифицированных средств измерения, обеспечивающих надлежащую точность.

Сформулированные соискателем выводы и практические рекомендации могут быть использованы в области машиностроения при проектировании и эксплуатации рабочего органа установок ГНБ и направленного прокола.

Практическая ценность и реализация результатов исследования состоит в использовании материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Обоснование режимов работы породоразрушающего инструмента установки горизонтально направленного бурения с встроенным генератором гидродинамических колебаний в зависимости от конструктивного исполнения», в учебном процессе выпускающей кафедры наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета при изучении дисциплины (модуля) «Строительные машины» по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование».

Используются предприятием АО «Обуховский завод» г. Санкт-Петербург, при проектировании бурового инструмента. Конструкция разработанного бурильного инструмента установки ГНБ со встроенным генератором гидродинамических колебаний защищена патентом Российской Федерации на изобретение.

Личный вклад автора. При проведении исследования автор лично:

- разработал конструкцию и изготовил опытный образец бурильного инструмента со встроенным генератором колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых и натурных испытаний;
- организовал проведение, обработал и проанализировал результаты экспериментальных исследований опытного образца бурильной головки машины ГНБ;

- организовал проведение, обработал и проанализировал результаты экспериментальных исследований влияния физико-механических свойства материала резонирующих пластин на режимы работы встроенного генератора вибрационных колебаний, при соблюдении которых ресурс их работы достигает максимальных значений;

- научно обосновал и разработал методику выбора конструктивных параметров и режимов работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний в зависимости от физико-механических свойств материала резонирующих пластин, возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались на следующих конференциях:

1. 71-я научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (4–6 апреля 2018 года, г. Санкт-Петербург).

2. 73-я научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (8–10 апреля 2020 года, г. Санкт-Петербург).

3. 1-я Международная научно-практическая конференция «Транспортная доступность Арктики: сети и системы» (3–4 июня 2021 года, г. Санкт-Петербург).

4. 2-я Международная научно-практическая конференция «Транспортная доступность Арктики: сети и системы» (1–2 июня 2022 года, г. Санкт-Петербург).

5. 75-я научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (11–14 октября 2022 года, г. Санкт-Петербург).

Публикации. Основные положения и научные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах (три из них – в рецензируемых изданиях

из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, четыре – в издании, индексируемом в базе данных Scopus; кроме того, речь идет об одной монографии и одном патенте на изобретение).

Структура и объем диссертационного исследования. Работа состоит из: введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Материалы диссертации содержат 138 страниц основного текста, 64 рисунка, 37 таблиц. Библиографический список литературы включает 106 наименований. Общий объем диссертации составляет 150 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования; сформулированы его цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ исследований в предметной области диссертационной работы.

Во второй главе представлены научно-методические подходы к решению поставленных задач и достижению поставленной цели. Дается описание стендовой базы и аппаратуры для проведения экспериментальных исследований. Приводится расчет конструктивных параметров и принципов функционирования опытного образца бурильного инструмента, внутри которого установлен генератор гидродинамических колебаний, идущий в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых и натурных испытаний. Представлены методики экспериментальных исследований опытного образца бурильного инструмента с установленным внутри генератором гидродинамических колебаний и ресурса работы колебателей с опорой на свойства материала и режимов термической обработки резонирующих пластин.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований работы опытного образца бурильного инструмента с установленным внутри генератором гидродинамических колебаний и ресурса работы резонирующих

пластин в зависимости от свойств материала и режимов термической обработки; сформулированы рекомендации по выбору конструктивных параметров и режимов работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний исходя из физико-механических свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин, а также возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

В четвертой главе разработана методика выбора конструктивных параметров и режимов работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний в зависимости от физико-механических свойств материала резонирующих пластин, возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Установки для выполнения бестраншейного монтажа подземных коммуникаций

Согласно СП [1], регламентирующему работу с подземными коммуникациями, бестраншейные технологии можно подразделить на пилотируемые и непилотируемые. Все пилотируемые технологии являются управляемыми; непилотируемые могут быть как управляемыми, так и неуправляемыми. Примером непилотируемых управляемых технологий являются микротоннелирование, вдавливание, ГНБ, плужный метод, а также комбинированные технологии прокладки подземных трубопроводов. Непилотируемые неуправляемые технологии представлены технологиями, связанными с уплотнением и удалением грунта, а также реновацией, в основе которой лежит работа с новым трубопроводом без разрушения старого. Пилотируемые управляемые технологии подразделяются на щитовую проходку и горный метод [1].

При выборе способа и технологии прокладки руководствуются требованиями технических условий на прокладываемые подземные коммуникации, действующих нормативных документов на проектирование и строительство подземных коммуникаций соответствующего вида. Учитываются размеры, применяемые материалы, протяженность трассы, точность прокладки подземных коммуникаций, а также инженерно-геологические, гидрогеологические и градостроительные условия строительства [1].

Рассмотрим подробнее технологии прокола и ГНБ.

Прокол – технология производства работ с подземными инженерными коммуникациями, основанный на уплотнении окружающего массива грунта в забое путем ударно-импульсного, ударного или статического внедрения в него штанги (трубы) с направляющим наконечником. Расширение пилотной

скважины производится коническим расширителем с трубопроводом. Труба (штанга) продавливается гидродомкратами при статическом методе [2]. Неуправляемый прокол может применяться через существующий трубопровод с его разрушением и вдавливанием осколков в окружающий массив грунта. Статический способ выполняется задавливанием или затягиванием штанг расширителя или ножа.

Статический прокол используется в грунтах I–V категорий по буримости. Он предназначен для монтажа инженерных коммуникаций под землей. Диаметр прокладываемых коммуникаций варьируется в диапазоне 50–500 мм, длина прокладки достигает 100 м, а глубина прокладывания не должна быть менее пяти диаметров эксплуатируемой трубы. По способу контроля за проведением работ технология прокола классифицируется как управляемый и неуправляемый проколы. В управляемом способе прокола используется [2] специальная локационная система. Локационная система передового бура (рисунок 1.1) состоит из находящегося в корпусе измерительного зонда, механизма поворота передового бура и рабочего наконечника в виде лопатки.

Локационная система позволяет получать информацию об уклоне, глубине, крене, азимуте для осуществления контроля местоположения передового бура. Коррекция направления движения выполняется при отсутствии вращения буровой штанги в определенном положении скоса лопатки передового бура; при этом штанга задавливается для получения необходимого проектного состояния по траектории движения. Если передовой бур ушел ниже проектной траектории, то он отводится назад на длину нескольких штанг и корректируется направление пилотного бурения.

Для разных типов грунтов служат разные типы передовых буров, отличающиеся друг от друга своей длиной и диаметром. Вместе с тем головки с наибольшей длиной и наименьшим диаметром применяются в наиболее слабых грунтах.

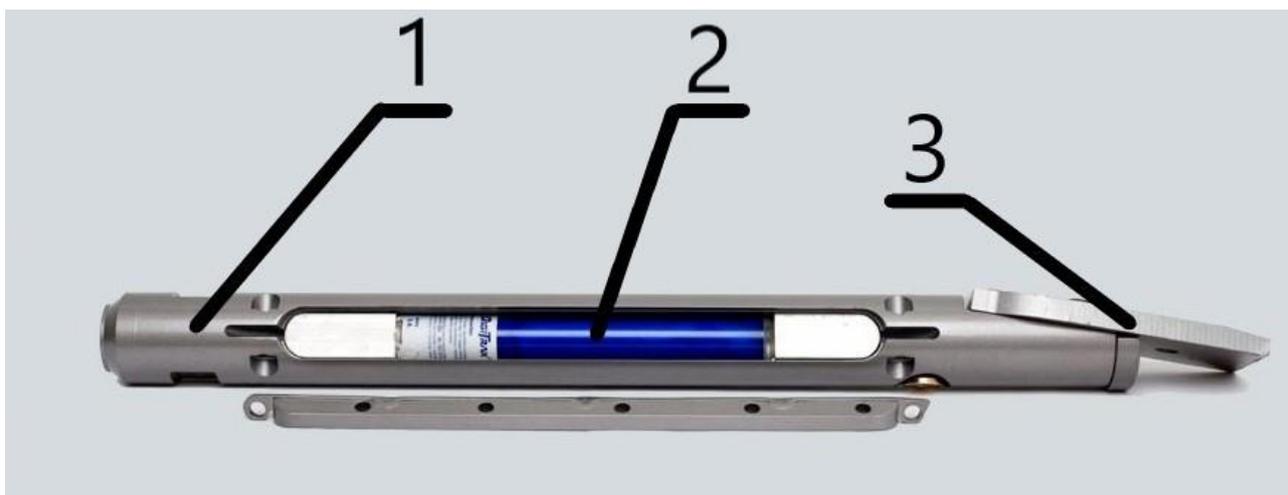


Рисунок 1.1 – Передовой бур:

1 – корпус; 2 – измерительный зонд; 3 – лопатка

Установка управляемого прокола грунта может включать в себя следующие узлы:

- домкратной станции со шпиндельным вращателем и трубоотворотом (в отдельных случаях);
- гидростанции;
- комплект инструмента (пилотный бур, буровые штанги, захваты для труб ПНД (полиэтилена низкого давления) и др.);
- локационной системы управления;
- вспомогательного инструмента (грузовые серьги, упорные шайбы, ключи для скручивания штанг и др.).

Для начала работы установки сооружают стартовый и приемный котлованы.

Конструктивное исполнение установки обеспечивает прокол грунта передовым буром, а также римера (расширителя) для этапа расширения скважины за счет гидродомкрата с полым штоком, который смонтирован на металлической раме с упорами, расположенными спереди и сзади. Конструктивное решение гидросистемы, включающее в себя до трех управляемых контуров, отдельно обеспечивают прямое и обратное

перемещение буровой головки или римера (с его вращением в скважине). Концы рамы распираются в упорные стенки котлована.

Локационная система управления включает в себя измерительный зонд, установленный в специальном отделе передового бура, приемного устройства и дистанционного экрана, перемещаемого на поверхности оператором. На дистанционном экране или приемном устройстве в графическом виде отображается информация о глубине нахождения передового бура с точностью до $\pm 5\%$, угле его наклона и поворота с точностью до $0,1\%$.

От проектной глубины прокладки подземных коммуникаций зависит какой измерительный зонд необходимо применить. Например одночастотный передатчик с частотой 12 кГц РХ 12 или РХ 19 с частотой 19 кГц работает до глубина 20 метров, двухчастотный передатчик РХL 12/19 с частотами 12 и 19 кГц позволяет увеличить глубину прокладки до 33 метров и т.д.

Прокладка пилотной скважины происходит за счет попеременной работы гидроцилиндра. Шток гидроцилиндра двигается вперед, обеспечивая вдавливание пилотного бура в грунт. При втягивании штока гидроцилиндра освобождается место для установки следующей штанги. После установки новой штанги процесс вдавливания повторяют до тех пор, пока не завершат прокол выходом бура в проектную точку на поверхность или приемный котлован [3].

Данный метод прокола широко распространен. Производители аналогичных установок находятся как в России (ООО «СОЭЗ» (Тула), ЗАО «Энерпром-Инжиниринг» (Москва), ООО «Опытно механический завод» и ООО «Михневский ремонтно-механический завод» (Санкт-Петербург), НПЦ «Экопром» (Истра)), так и за границей (Ditch Witch, Warrior (США)) [2].

Установка неуправляемого прокола ПУ-2 (рисунок 1.2), выполненная на базе ООО «Михневский ремонтно-механический завод – Санкт-Петербург» [2], предназначена для прокладки магистралей методом прокола в грунтах 1-й, 2-й категорий под автодорогами, железнодорожными насыпями, болотистыми грунтами, оврагами с последующей протяжкой кабеля или трубы ПНД.



Рисунок 1.2 – Установка неуправляемого прокола ПУ-2

Основа данной установки – штатная гидростанция. Кроме того, принцип ее работы предполагает подключение к гидросистеме дорожно-строительной машины мощностью не менее 45 кВт. Необходимое количество обслуживающего персонала – не менее трех человек. Технологическая выемка (котлован) должна иметь габариты 1×4 м. Загрузка и выгрузка установки выполняются краном-манипулятором или другим грузоподъемным средством. Винтовые опоры позволяют установить ее на дно котлована, а габариты котлована обеспечивают возможность распереть установку передним и задним щитом. Технические данные установки представлены в таблице 1.1 [4].

Таблица 1.1 – Технические данные модели ПУ-2

Технические данные	Параметры
Длина в рабочем/транспортном положении, мм	3233/2283
Длина прокола не более, м	50
Диаметр расширения не более, мм	377
Скорость прокола, не менее, м/мин	2
Наружный диаметр штанг, мм	52
Усилие продавливания, кН, т	246 (24,6)
Усилие обратного хода, кН, т	184 (18,5)

Установка для выполнения работ по управляемому проколу Ditch Witch P80 (рисунок 1.3) получила широкое распространение на территории Российской Федерации не смотря на широкий ассортимент представленного на рынке оборудования данного класса.



Рисунок 1.3 – Установка управляемого прокола Puncher 20CS

Отличительные особенности данной установки следующие: высокая производительность сочетается с компактностью; прогрессивная конструкция прокольной головки обеспечивает точность вектора бурения; встроенные электронные защитные устройства от поражения электрическим током; система локационного слежения позволяет точно определять положение бура.

Установка управляется локационной системой. Изменение траектории происходит за счет конструктивных особенностей передового бура со скосом его наконечника.

Платформа компактных габаритов позволяет выполнять работы в колодце 1×1 м для проколов длиной до 100 м.

Технология проведения прокола схематично отображена на рисунке 1.4, а технические данные – в таблице 1.2.

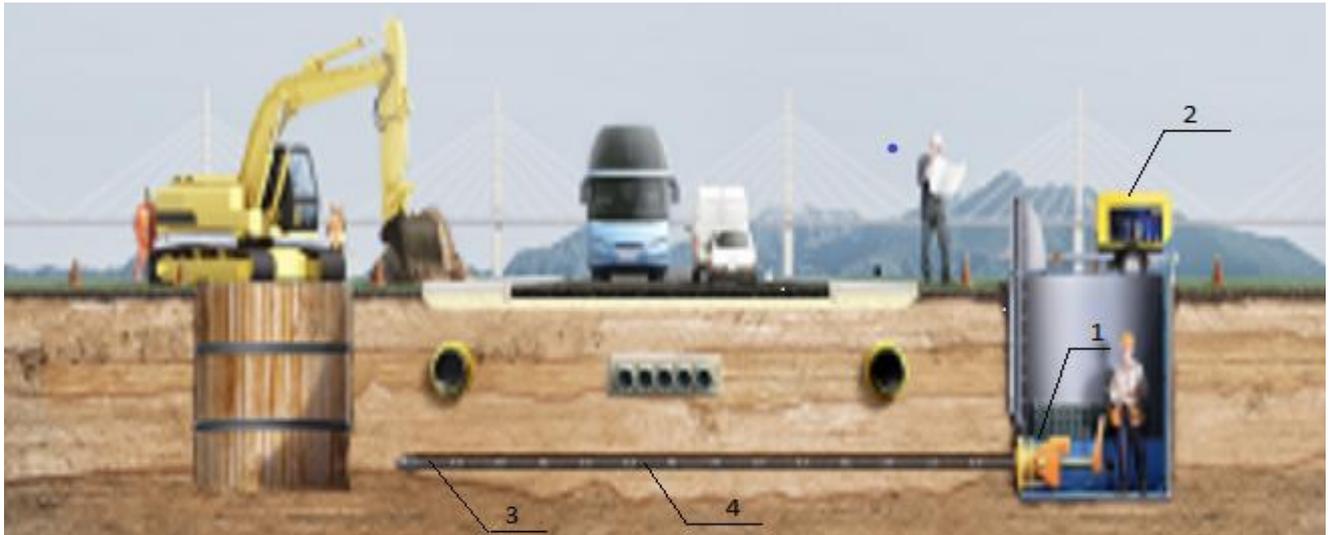


Рисунок 1.4 – Схема выполнения прокола с помощью установки Puncher 20CS:

1 – установка Puncher 20CS; 2 – гидравлическая маслостанция; 3 – пилотный став; 4 – буровая штанга

Таблица 1.2 – Технические данные модели Puncher 20CS

Технические данные	Параметры
Ход поршня, мм	230
Максимальный диаметр скважины, мм	315
Мощность двигателя гидравлической станции, л. с.	24
Давление в гидросистеме, бар	200
Длина прокола, м	100
Усилие тяги в обе стороны, т	20
Размеры платформы, мм:	
длина	920
ширина	500
высота	350
Масса узла задавливания, кг	250
Масса маслостанции, кг	150
Диаметр штанги, мм	50

Одним из конкурентов данной установки является установка выполнения прокола УНП-40Б (рисунок 1.5). Она служит для бестраншейной прокладки кабельных трасс и труб, диаметр которых не превышает 400 мм, в глинистых, суглинистых и песчаных грунтах с категорией прочности I–III. УНП-40Б

приводится в действие за счет гидростанции масляной типа НСД-2-40, но может подключаться и к гидросистеме любой дорожно-строительной машины.



Рисунок 1.5 – Установка для направленного прокола УНП-40Б

Преимуществом установки УНП-40Б является возможность управления гидроблоком, размещенным на раме. Высокоточная система локации для обеспечения направленного движения как в плане, так и в профиле, высококачественная система навигации отечественного производства.

Технические характеристики установки УНП-40Б представлены в таблице 1.3 [6].

Таблица 1.3 – Технические данные модели УНП-40Б

Технические данные	Параметры
Диаметр протягиваемой трубы, мм	<400
Диаметр разрушаемой трубы, мм	<220
Длина прокладываемого трубопровода, м	150
Толкающее усилие, тс	40
Тянущее усилие, тс	40
Рабочее давление, МПа	16
Кол-во гидроцилиндров, шт.	1
Ход штока гидроцилиндра, мм	230
Раб. длина штанги, мм	805
Диаметр штанги, мм	50
Расход масла при давлении 16 МПа, л/мин	20–60
Габариты, мм (Д×Ш×В)	3108×790×798
Вес, кг	782

Достоинствами данного вида прокола можно считать простоту конструкции, удобство эксплуатации установок, небольшую трудоемкость работ, а также высокую степень безопасности при производстве работ.

Основными недостатками является возможность деформации наружной поверхности дорог или находящихся вблизи коммуникаций, а также относительно небольшой диаметр прокладываемых трубопроводов.

В случае бестраншейной работы с трубопроводом возможными вариантами могут стать вибрационный и виброударный проколы. В первом варианте, помимо статической нагрузки, действует также вибрационная. С целью распространения функциональных возможностей машин, применяемых для прокола грунта при прокладке разных подземных коммуникаций в песчаных, супесчаных и плавунных грунтах, используют вибропрокалывающие и вибропродавливающие инструменты, отличающиеся от инструмента для статического прокола наличием вибратора, встроенного в рабочий наконечник [3] или присоединяемого к наружному концу трубы. Снижение усилий для прокладки трубопроводов за счет использования вибрационного прокола снижает до 10 раз прикладываемое усилие для прокола массива по сравнению со статическим проколом и повышает точность прокладки коммуникаций.

Вибрационный прокол с осевыми колебаниями имеет как существенные достоинства, так и недостатки, заключающиеся в возрастании времени и трудоемкости подготовки установки для вибрационного прокола к работе, а также увеличении ее габаритов.

Виброударный прокол представляет собой поступательное движение механизма, осуществляемое без постоянно поступающей внешней силы. Бурильная головка, включающая наконечник конусного типа, присоединена к корпусу установки с помещенным внутрь блоком, генерирующим виброудар. Виброударный блок приводит в движение штангу к забою, тем самым осуществляя внедрение в массив. При этом отсутствует потребность

в дополнительном статическом усилии, что в значительной степени упрощает выполнение подготовительных работ. Вибрационный и виброударный прокол схематично показаны на рисунке 1.6 и относятся к категории вибрационного прокола [7].

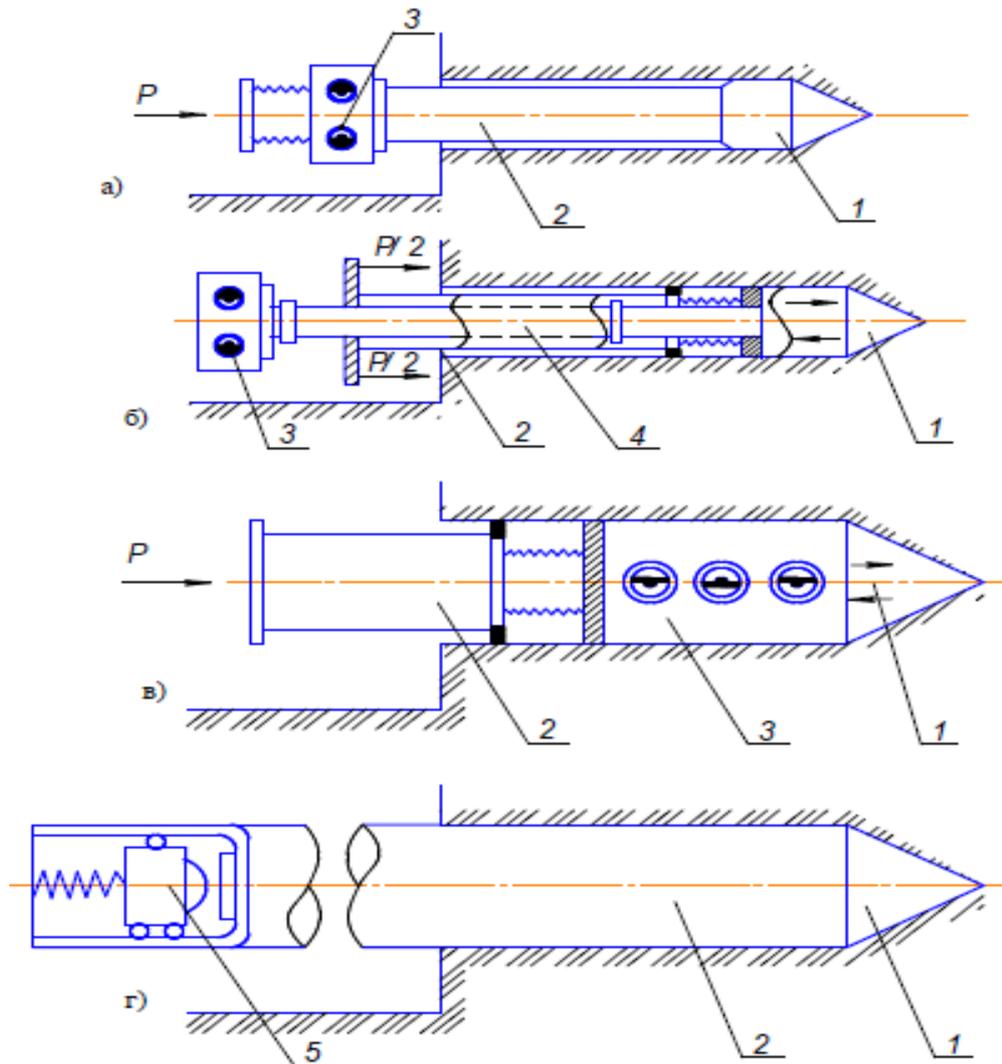


Рисунок 1.6 – Принципиальные схемы проведения вибрационного и виброударного прокола с динамическим воздействием в осевой плоскости:
a – передача вибрации на трубу и наконечник; *б* – передача вибрации только на наконечник; *в* – встроенный в наконечник возбудитель колебаний;
г – виброударное прокалывание; *1* – наконечник конусного типа;
2 – прокладываемый трубопровод; *3* – блок вибраторов; *4* – элемент, соединяющий блок вибратора с наконечником конусного типа;
5 – виброударный блок [33]

Еще одним способом устройства подземных трубопроводов является шнековое бурение (рисунок 1.7). Привод гидроцилиндров, обеспечивающих усилие продавливания, осуществляется от гидростанции или электродвигателя. Шнековое бурение не подразумевает выход на поверхность, а выполняется через устройство и проход между двумя котлованами – стартовым и приемным. Данный тип бурения по классификации схож с проколом: он предполагает как управляемое шнековое бурение, так и неуправляемое [2]. Принцип его работы подобен ГНБ: это проходка пилотной скважины – расширение шнеками – установка трубы (футляра). Подача бурового раствора через сопла, помимо основного действия, также одновременно предполагает смазывание проходческого става, способствуя удержанию стенок пилотируемой скважины и охлаждению передатчика.

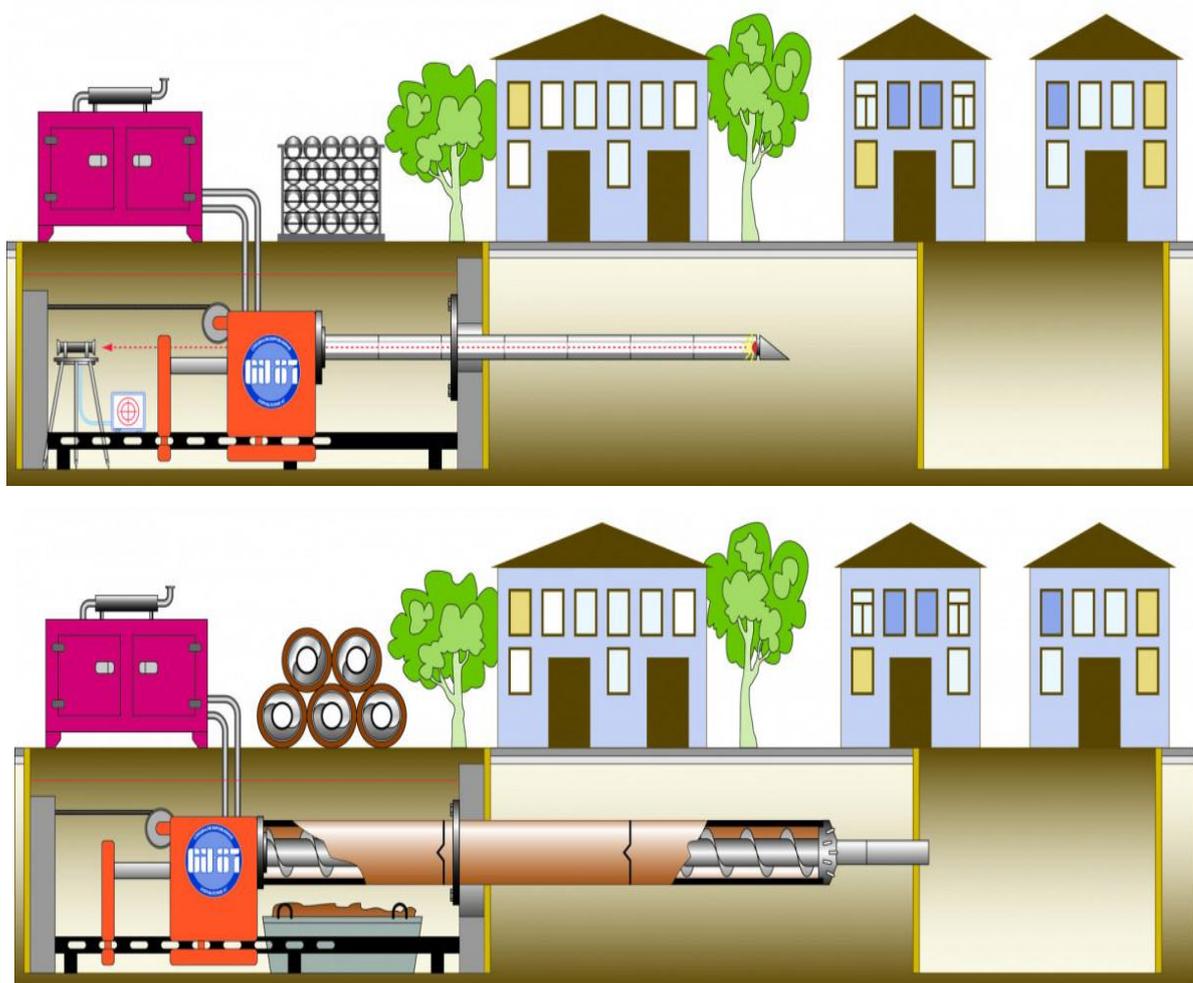


Рисунок 1.7 – Технология горизонтального шнекового бурения

В РФ машины для шнекового бурения производит ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный завод» (УМТ-0,2). Его внешний вид и характеристики представлены соответственно на рисунке 1.8 и в таблице 1.4 [2].



Рисунок 1.8 – Установка УМТ-0,2

Таблица 1.4 – Технические параметры модели УМТ-0,2

Технические данные	Параметры
Диаметр расширения, мм	<560
Длина прокола, м	50
Усилие продавливания, кН	800
Момент вращения, Н · м	<9000
Точность прокладки, мм	±30 мм на 50 м
Мощность маслостанции, кВт	114

Немецкая компания Perforator производит многофункциональную установку горизонтального бурения РВА 20 (рисунок 1.9, таблица 1.5) [11] для управляемого и неуправляемого бурения.



Рисунок 1.9 – Установка горизонтального бурения Perforator РВА-20

Таблица 1.5 – Технические данные модели Perforator РВА-20 для горизонтального бурения

Технические данные	Параметры
Тяговое усилие, кН	197
Усилие расширения, кН	129
Рабочий ход, мм	225
Крутящий момент, Н·м	4750
Максимальная скорость вращения, об/мин	30
Ход редуктора, мм	100
Масса оборудования, кг	480
Диаметр прокладываемого трубопровода, мм	324
Ширина установки, мм	830
Длина установки, мм	1880
Длина доп. рамы, мм	500, 2000, 3000
Расстояние от дна котлована до оси бурения, мм	360

Специальный инструмент, присоединенный к пилотной штанге, позволит разрушить старую стальную, чугунную или керамическую трубу с одновременным затягиванием новой трубы (так называемый метод санации разрушением). Возможность одной и той же установкой выполнять различные виды работ делает РВА-20 незаменимым помощником в бестраншейном строительстве.

Рассмотренное выше оборудование не способно обеспечить как работу установок с дневной поверхности, так и подготовку технологических и стартовых котлованов, что создает предпосылки для возникновения сложностей (например, дополнительных подготовительных работ, снижающих к тому же производительность и эффективность установки) при работе в наиболее трудных (горно-геологических) условиях.

В свою очередь, в устройстве установок ГНБ подобные ограничения отсутствуют. Исследуемые машины ГНБ применимы в эксплуатации труб длиной 50–1000 м. Технология ГНБ позволяет производить работы в труднодоступных территориях и стесненных условиях. Одним из главных преимуществ является возможность бурения не прямой скважины, скважины, имеющей искривления. Классификация установок ГНБ различна и предусматривает самые разнообразные критерии (таблица 1.6) [2].

Таблица 1.6 – Классификация установок ГНБ

Тип буровой установки	Максимальная тяговая сила, кН	Максимальный крутящий момент, кН·м	Вес, т
Мини-	<100	7–13	<7
Миди-	100–400	15–30	7–25
Макси-	400–2500	30–100	25–60
Мега-	>2500	>100	>60

Буровая установка выполняет пилотное бурение по необходимой траектории с дальнейшим расширением и протягиванием плети трубы через скважину. Принцип работы основан на передаче тягового усилия бурильной

штанге, на конце которой устанавливается бурильная головка. Продавливание ведется с вращением (или без него) бурильной головки с установленным внутри измерительным локационным зондом, позволяющим контролировать и определять местонахождение, а также отверстием, предназначенным для подвода бурового раствора (чаще всего представленного бентонитами, полимерами, а реже – водой [2]).

Установка Grundodrill JCS 130 (Германия), отнесенная к классу «миди» (рисунок 1.10, таблица 1.7 [2]), оснащена гидроударником, позволяющим работать и управлять рабочим инструментом, в том числе в каменистых породах.



Рисунок 1.10 – Установка ГНБ Grundodrill JCS 130

Таблица 1.7 – Технические данные модели Grundodrill JCS 130

Технические данные	Параметры
Тяговое и обратное усилие, кН	130
Максимальный крутящий момент, Н·м	4500
Производительность бентонитового насоса, л/мин	190
Давление бентонита, бар	85
Пилотное отверстие, мм	100
Габариты установки, мм	8300×1900×3424
Масса, кг	11 830

Мощность двигательной установки, кВт	100
Длина отверстия, м	300
Диаметр расширения, мм	500

Во всех установках ГНБ применяют буровой раствор. Состав последнего определяют до начала выполнения работ по прокладке трассы, исходя из инженерных изысканий о горно-геологических условиях на месте выполнения буровой скважины. Буровым раствором может служить как тиксотропный глинистый раствор на основе бентонита, так и полимерный раствор без содержания бентонита (например, при прокладке скважины через глину). В исключительных случаях может применяться морская вода с участием специальных добавок. Бентонит – это тонкодисперсная глина, которая в виде густой суспензии используется для приготовления буровых растворов. Свойства бурового раствора характеризуют такие показатели, как вязкость, плотность, реологические характеристики, толщина фильтрационной корки, активность ионов водорода, фильтрация.

Можно отметить следующие полезные свойства бурового раствора для работы установок горизонтально-направленного бурения:

- формирование и укрепление стенок скважины при продвижении бура и защита его от налипания грунта;
- защита стенок скважины от воды;
- уменьшение температуры и смазывание поверхности бура;
- удаление шлама при бурении.

Буровой раствор подбирается исходя из физико-химических свойств грунта для обеспечения устойчивости стенок скважины. Для мелкоземельных грунтов, к которым относятся глина, сланец, ил, используют смесь бентонита и полмеров, для крупно комковых, в число которых включены гравий, песок – бентонитовый раствор. Последний характеризуется показателем предела

текучести раствора, зависящего от концентрации бентонита в растворе (таблица 1.8) [2].

Таблица 1.8 – Величина концентрации бентонита относительно величины зерна грунта

Диаметр зерна, мм	Кол-во бентонита на 1 м ³ суспензии, кг	Кол-во воды на 1 м ³ суспензии, л	Концентрация бентонита, %
2,0	40	985	4
4,5	50	981	5
9,0	60	977	6
17,0	70	973	7
26,0	80	969	8
38,0	90	965	9
50,0	100	961	10

Имеет место корректировка состава бентонитового раствора в зависимости от технического задания проекта. Важное условие – поэтапный контроль вязкости и насыщенности буровой мелочью (не более 30 %) используемого раствора. Отработанный раствор проходит фильтрацию. В очищенном от мелочи виде с добавленным (при необходимости) бентоните раствор повторно используется в бурении, образуя замкнутый производственный цикл.

1.2. Методы увеличения производительности породоразрушающего инструмента

Анализ существующей техники ГНБ показал следующее.

1. Установки для выполнения прокладки подземных коммуникаций бестраншейным методом наиболее эффективны при увеличении тягового усилия и, как следствие, габаритно-массовых характеристик машин.

2. Нагрузки на буровом инструменте снижают, применяя вибрацию и удар, в сравнении со статическим проколом.

3. Трение, нагрев и укрепление рабочей скважины выполняют, применяя буровой раствор, что позволяет уменьшить время проходки.

4. При прокладке подземных коммуникаций наиболее эффективны установки ГНБ с использованием буровых растворов.

5. Новым техническим решением является повышение энерговооруженности рабочей головки породоразрушающего инструмента за счет подведения к нему вибрационных колебаний, генератор которых встраивается в конструкцию самой головки, а в качестве источника энергии выступает поток промывочной жидкости, подаваемой при бурении.

Принцип работы генератора гидродинамических колебаний (ГК) [15] заключен в преобразовании части энергии струи рабочей жидкости в энергию акустических волн. Работа встроенного в бурильную головку установки ГНБ генератора ГК основана на возбуждении вибраций в жидкости, возникающих в условиях взаимодействия вытекающей струи и препятствия с конкретными геометрическими параметрами либо, в другом варианте, при принудительном периодическом прерывании потока струи рабочей жидкости. Подобные преобразования приводят к вихреобразованию, в свою очередь переходящему в кавитацию [16–20].

Максимальное давление возникает на переднем крае пластины колебателя и снижается при смещении от колеблющейся поверхности. При этом в пластинах колебателя возникают нормальные волны трех типов:

- симметричные волны Лэмбла (имеют два вида смещений; при этом продольная деформация в направлении распространения волны значительно выше поперечной);
- антисимметричные волны Лэмбла (имеют два вида смещений; при этом поперечная деформация в направлении распространения волны значительно выше продольной);

- поперечные нормальные волны (соответствуют продольной стоячей волне).

При реальных условиях колебания пластины колебателя без постоянного воздействия на нее бурового раствора, истекающего из насадки, постепенно бы затухли. Амплитуда колебаний постепенно снижалась бы из-за воздействия на нее сил трения [2].

Кавитация как явление представляет собой появление разрывов сплошности жидкости, сопровождающееся появлением каверн с парами и/или газами. Кавитация возникает в моменте падения давления в области капельной жидкости ниже критического.

По происхождению кавитацию разделяют на гидродинамическую и акустическую. Разница здесь состоит в природе причины понижения давления. Гидродинамическая кавитация возникает при высоких местных скоростях в потоке движущейся жидкости, а акустическая – при акустических волнах. Разделение также может быть основано на размерах парогазовых пузырьков: при гидродинамической кавитации пузырьки большие, при акустической – нет.

Пузырьки крайне неустойчивы, ввиду чего они растут, пульсируют, схлопываются. Проходя заключительную стадию «схлопывания», давление в центре пузырька возрастает, формирует сферическую ударную волну и способствует внутри пузырька резкому росту температуры [2].

Возникновение акустических колебаний в вязких средах происходит при более высоких скоростях течения жидкости: чем выше вязкость, тем выше должны быть скорости. Данная зависимость обуславливается стабилизацией вязкости набегающего потока жидкости [24]. При совпадении частоты колебаний жидкости и собственных колебаний встроеной пластины возникает резонансное возбуждение. В данном случае через возбуждение изгибных колебаний создается вибрация пластины [25–27].

Принципиальная схема генератора ГК представляет собой сопло, погруженное в жидкость, и пластину, закрепленную консольно и направленную в сторону струи жидкости (рис 1.11).

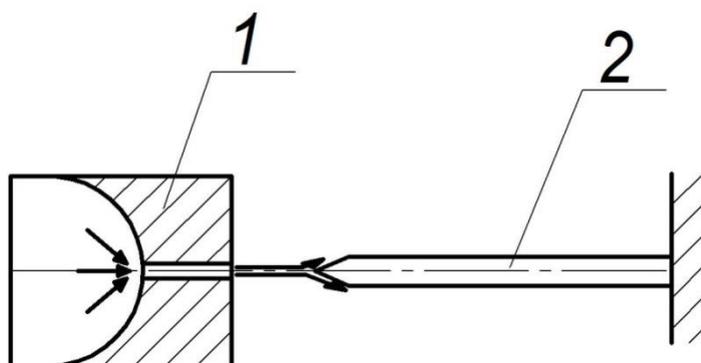


Рисунок 1.11 – Генератор гидродинамических колебаний:

1 – сопло; 2 – пластина

Частота собственных колебаний пластины в первом приближении может быть вычислена по формуле [2]:

$$f_{PL} = \alpha \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1.1)$$

где α – коэффициент пропорциональности;

l – длина пластины, мм;

t – толщина пластины, мм;

E – модуль упругости;

ρ – плотность.

В случае, когда перечисленные величины выражены в единицах системы СГС, $\alpha = 0,162$.

Наличие присоединенной массы несколько снижает значение f_{PL} . Частота автоколебаний натекающей струи рассчитывается по формуле [2]:

$$f_c = kv/h, \quad (1.2)$$

где v – скорость натекающей струи, м/с;

h – расстояние между соплом и пластиной, мм;

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от расстояния между соплом и пластиной.

В соответствии с выводами, сделанными в рамках исследований Ши-Го-Бао [29], генератор ГК – автоколебательная система с поверхностными волнами вдоль натекающей струи в качестве ее основания. Этот автор установил, что изменение размеров струеформирующего устройства не ведет к изменению частоты генерируемых колебаний, а толщина пластины и угол ее заострения не оказывают влияния на частоту колебаний. Определено, что на частоту работы пластины оказывает влияние глубина погружения и сопутствующий рост присоединенной массы. Установлено, что с некоторой неопределенной глубины влияние на частоту прекращается.

По результатам научной работы в области развития технологий ГНБ А. Б. Рогов сформулировал следующие выводы по материалам расчета собственных частот и форм колебаний пластины [30].

Работа пластин происходит в автоколебательном режиме, который возникает в процессе сложного воздействия обтекающей среды на пластину. Автоколебания пластины имеют свою частоту.

Место крепления пластины – это сечение, в котором проявляются наибольшие напряжения при ее колебаниях.

Добиться уменьшения нормальных напряжений в месте крепления пластины, возникающих из-за вибрации, можно, увеличив в корневом сечении пластины радиус скругления.

Наиболее точное описание протекающих физических процессов позволяет метод второго порядка интерполяции диффузионных членов. При этом снижается схемная вязкость.

Увеличить скорость выполнения расчетов форм колебаний линейных колебательных систем можно за счет метода суперпозиции [2].

С помощью этого метода можно моделировать колебания пластины. Исходные данные при расчете – это амплитуда и частота автоколебаний

пластины, механические свойства материала пластины, физические свойства, рабочее давление и расход используемой жидкости.

В своих научных трудах В. В. Колесников [31] разработал математическую модель процесса работы пластины, встроенного в бурильный инструмент установки ГНБ генератора ГК. Решение уравнения Навье – Стокса с учетом полуэмпирической модели турбулентности лежит в основе математической модели. Особенности формирования набегающей струи рабочей жидкости описаны на основе второй теории турбулентности Прандтля, учитывающие безразмерные профили скорости и показатели турбулентной вязкости.

Расстояние конца пластины от отверстия насадки напрямую влияет на амплитуду колебаний вибрационной пластины. Также при определенном расстоянии могут возникать максимальные значения амплитуды колебаний, которые зависят от вязкости используемой жидкости, коэффициента расхода и давления в системе [32–38].

Работа породоразрушающего инструмента с генератором вибрационных колебаний за счет энергии колебаний, передаваемой на корпус, способствует движению крупинок грунта, уменьшая напряжение, действующее на корпус. Это позволяет снизить тяговое усилие на буровой инструмент.

1.3. Анализ технических решений в области бестраншейной прокладки коммуникаций

Б. Ф. Белецкий в своих научных трудах неоднократно рассматривал существующие типы наконечников, используемых в установках ГНБ и прокола, применение которых направлено на снижение сопротивления и сил трения (рисунок 1.12) [39]. Наиболее широко применяют наконечники конусного типа (рисунок 1.12, *a–d*) и расширительные пояса с заглушками (рисунок 1.12 *p, ф*). При небольшой длине прокола трубы прокол ведется открытым концом (рисунок 1.12, *к*).

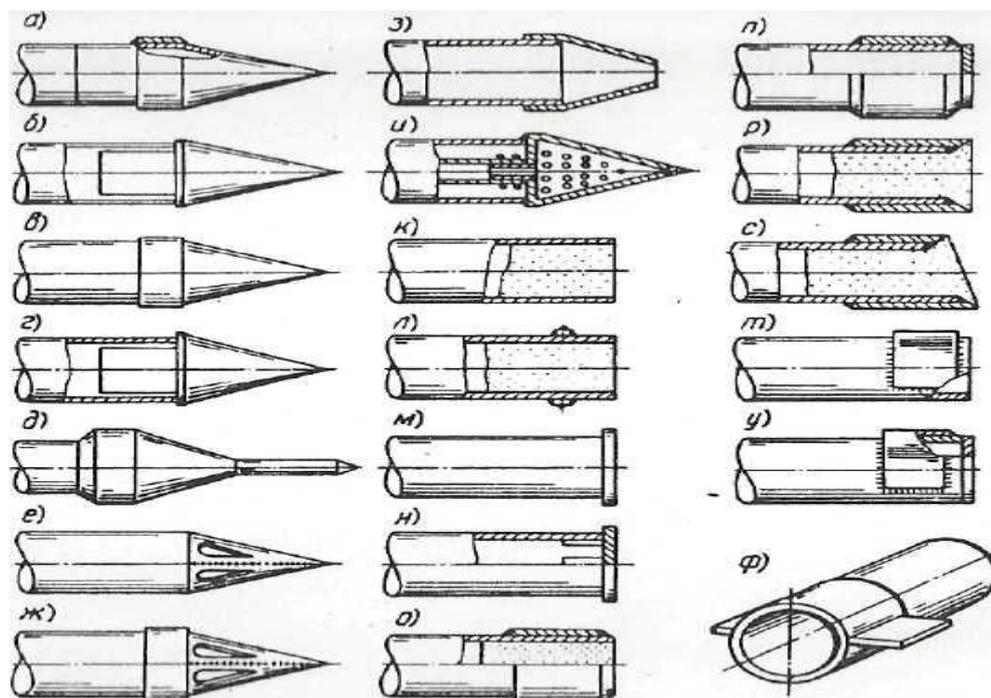


Рисунок 1.12 – Наконечники для прокладки труб способом прокола:
а–в – конусного типа; *г* – конусного типа с эксцентриситетом; *д* – конусного типа со штырем; *е, ж* – конусного типа с щелевыми прорезями; *з* – конусного типа с усеченной вершиной; *и* – конусного типа с отверстиями для увлажнения грунта; *к* – открытый конец трубы; *л* – открытый конец трубы с кольцом; *м* – приварная заглушка; *н* – съемная заглушка; *о* – кольцевой нож с наружным скосом кромок; *п* – то же, с приварной заглушкой; *р* – кольцевой нож с внутренним скосом кромок; *с* – кольцевой нож клиновидной формы с внутренним скосом кромок; *т* – нож серпообразного сечения; *у* – то же, с приварной заглушкой; *ф* – кольцевой нож с направляющими пластинками (стабилизаторами) [2]

Установки ГНБ известны широким диапазоном представленного бурового инструмента [2] (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Буровой инструмент установок ГНБ

На текущий момент в эксплуатации преобладает инструмент для работы с породами малой и средней крепости. Для работы с крепкими породами предлагается совершенствование рабочего инструмента, достигаемое применением энергии рабочей жидкости и создаваемой вибрации.

Исходя из изложенного, ученые Д. А. Ермолин и М. М. Зайнашев создали гидромониторную бурильную головку (ГБГ) ГНБ (рисунок 1.14) [40]. Она позволяет контролировать отклоняющее воздействие на буровой снаряд в породах с гравийно-валунно-галечниковыми отложениями и повышает надежность опережающего направленного гидромониторного воздействия [2].

Техническое оснащение разработанной ГБГ позволяет решить поставленную техническую задачу по совершенствованию бурильной головки, работающей с твердыми породами. Важно отметить, что в данной установке имеется ассиметричный скос в направляющей части, позволяющий выполнять управление породоразрушающим инструментом. Гидромониторное сопло расположено параллельно ассиметричному скосу и обеспечивает воздействие бурового раствора на грунт в месте воздействия на него буровым инструментом.

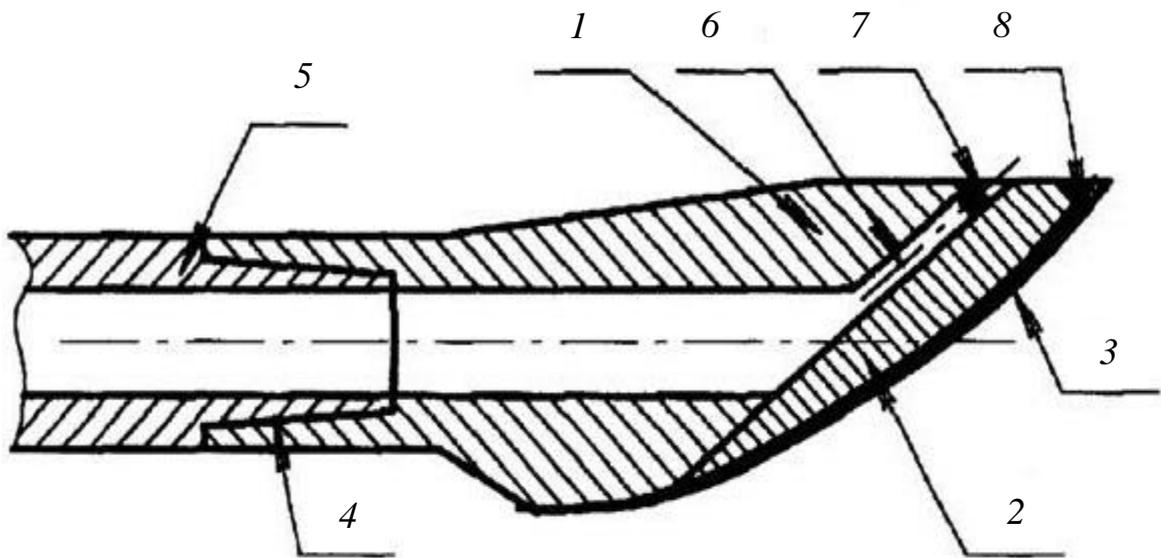


Рисунок 1.14 – Гидромониторная бурильная головка (ГБГ):

1 – калибрующая часть; 2 – направляющая часть; 3 – асимметричный скос;
4 – резьба; 5 – колонна бурильной трубы; 6 – ввод; 7 – гидромониторное сопло;
8 – породоразрушающий зуб

В области разработки ГБГ оставил свой след Д. Рольф. Разработанная им ГБГ (рисунок 1.15) [41] используется при бурении больших в диаметре подземных тоннелей.

ГБГ может вращаться вокруг своей оси при бурении скважины. Центральная часть корпуса включает внутренний канал для подачи бурового раствора. Этот канал имеет два наклонных выхода, расположенные под углом $10\text{--}15^\circ$ относительно центральной оси корпуса. Одно сопло направлено вперед, а другое – в противоположную сторону.

ГБГ может быть в нескольких исполнениях:

- с несколькими передними и дополнительными соплами, расположенными относительно одного из них симметрично под углом 45° ;
- с дополнительным соплом, направленным под углом 15° относительно центральной оси головки, передними соплами под углом $10\text{--}15^\circ$ и др.

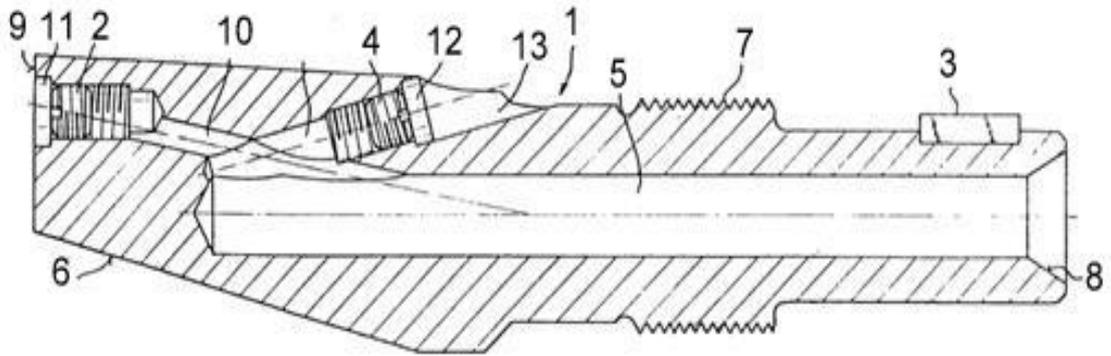


Рисунок 1.15 – ГБГ: 1 – бурильная головка; 2 – сопло направленное;
 3 – шпонка; 4 – сопло; 5 – осевой канал; 6 – передняя поверхность; 7 – резьба;
 8 – заходная часть; 9 – насадка; 10 – канал; 11 – выемка; 12 – насадка;
 13 – канал

Техническая идея данной ГБГ заключена в повышении эффективности установки путем облегчения маневрирования бурового инструмента. Она реализована за счет использования в конструкции породоразрушающего инструмента дополнительного сопла, направленного в обратную сторону от направления воздействия на грунт бурового инструмента. Данное сопло связано с осевым каналом, через который подается буровой раствор, что позволяет менять направление движения ГБГ.

Ученые института техники, технологии и управления СГТУ разработали инструмент, предназначенный для прокладывания трубопроводов закрытым способом в рамках технологии прокола [42] (рисунок 1.16). Разработанный породоразрушающий инструмент состоит из пустотелого конусного рабочего наконечника. Внутри наконечника установлен каток, выполняющий функцию вибратора. Каток через водило шарнирно соединен с центральным стержнем. В трубопроводе установлен электродвигатель, который через муфту приводит в действие центральный стержень [2].

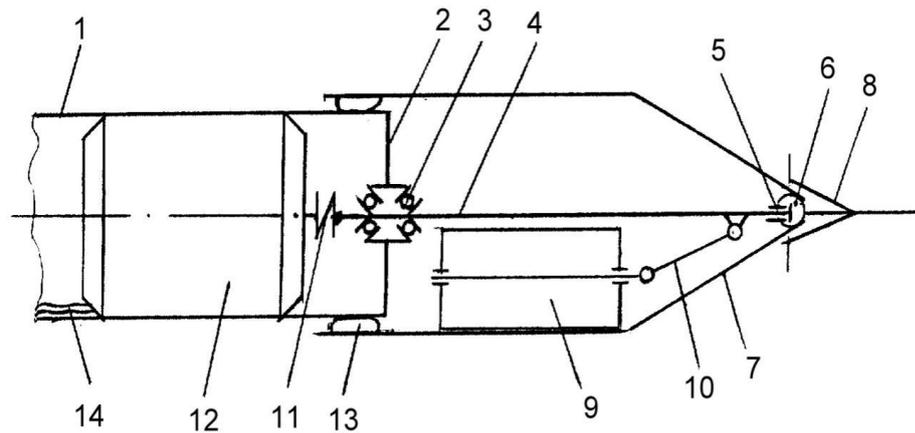


Рисунок 1.16 – Устройство для технологии прокола, разработанное на базе СГТУ:

1 – трубопровод; *2* – фланец; *3* – опора; *4* – стержень; *5* – опора вращения; *6* – шаровая опора; *7* – рабочий наконечник; *8* – лидер; *9* – каток; *10* – водило; *11* – муфта; *12* – электродвигатель; *13* – уплотнение; *14* – кабель

Работа данного породоразрушающего инструмента происходит за счет вращения центральной оси электродвигателем, которая заставляет вращаться каток внутри пустотелого наконечника. Вращаясь внутри наконечника, каток создает на поверхности инструмента круговые колебания, частота которых равна частоте вращения электродвигателя. Данное воздействие на поверхность скважины обеспечивает движение частиц массива в радиальном направлении, что уменьшает его трение и позволяет снизить сопротивления грунта проколу, увеличивая скорость бурения скважины.

Эффективность бурения твердых пород может быть повышена за счет применения вибрационно-вращательного способа бурения, что обусловлено приданием виброускорения породоразрушающему инструменту [2]. Преимуществом указанного типа бурения является сочетание положительных эффектов одновременно вибрационного и вращательного бурения. Порода разрушается под действием вибраций (динамической силы) и вращения буровой коронки (статической силы).

Установлено, что применение способа вибрационно-вращательного бурения положительно влияет на возрастание скорости бурения, снижение энергозатрат и увеличение срока службы бурового инструмента [2].

Кафедрой ГиСПС разработана и предложена к эксплуатации конструкция рабочего органа для машины ГНБ – ГБГ со встроенным генератором ГК (рисунок 1.17) [46–49]. Устройство непосредственно предназначено для укладки трубопроводов в условиях, когда необходимо максимально сохранить окружающий ландшафт, а именно под автомобильными и железными дорогами и другими сетями коммуникаций. Кроме того, оно используется как головная часть установки ГНБ при бурении пилотной скважины совместно с буровыми растворами.

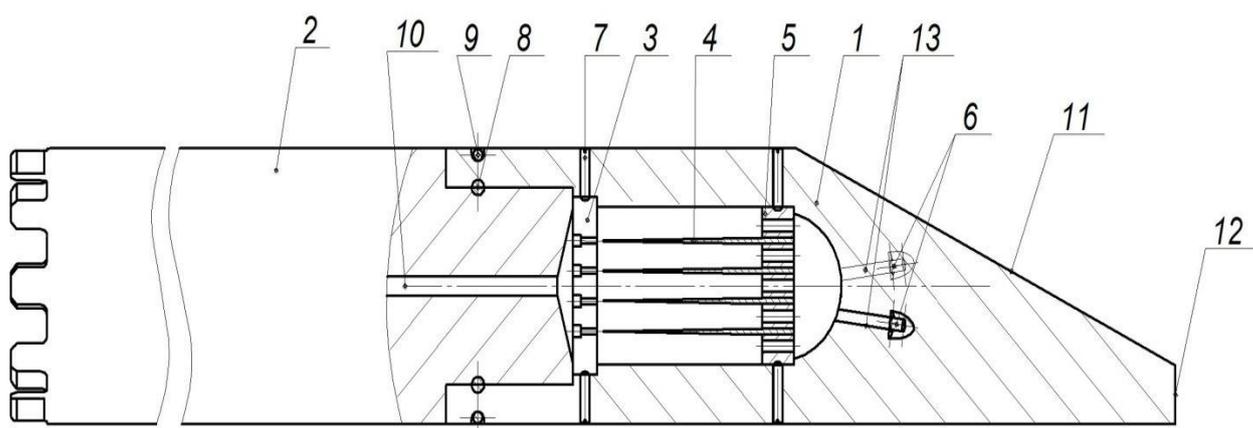


Рисунок 1.17 – ГБГ с установленным внутри генератором ГК:

1 – корпус бурильной головки; 2 – хвостовая часть; 3 – диск с входными струеформирующими каналами; 4 – пластина; 5 – диск с выходными отверстиями; 6 – сопла; 7 – фиксирующие винты; 8 – штифт; 9 – обжимное кольцо; 10 – внутренний канал; 11 – управляющая поверхность; 12 – передняя поверхность; 13 – каналы

Задача повышения эффективности бурильного инструмента решается через расположение генератора ГК внутри головки ГБГ. Струеформирующие каналы расположены напротив пластин генератора ГК. Буровой раствор подаваемый через струеформирующий канал оказывает воздействие на

пластину. Вокруг пластины возникает кавитационная область, возбуждающая ее колебания, за счет чего вибрация передается на ГБГ [2].

Технический результат данной идеи состоит в том, что за счет возникающих колебаний корпуса ГБГ происходят динамическое воздействие на канал скважины и снижение тягового усилия на породоразрушающий инструмент. Это позволяет повысить его эффективность при использовании по более крепким породам.

Вместе с тем для данного устройства нет рекомендаций по выбору геометрических (конструктивных) параметров и режимов работы.

1.4. Цели и задачи исследований

На основании изложенного, цель исследования следует сформулировать как определение эффективности и долговечности функционирования породоразрушающего инструмента установки ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний для обоснования конструктивных параметров и режимов работы с учетом возможностей насосной установки конкретной машины, при которых реализация технологии ГНБ происходит с минимальной энергоемкостью.

Поставленная цель достигается последовательным решением следующих задач:

1. Провести расчет конструктивных параметров и изготовить опытный образец бурильной головки установки ГНБ с генератором вибрационных колебаний, встроенным внутрь в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых и натурных испытаний.

2. Провести стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительной оценке резонансных характеристик опытного образца бурильной головки машины ГНБ со встроенным генератором вибрационных

колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок.

3. Экспериментально определить закономерности функционирования генератора вибрационных колебаний, встроенного в бурильную головку машины ГНБ, и выявить конструктивных параметры инструмента и режимы его работы, при которых реализация технологии ГНБ происходит при минимальной энергоемкости.

4. Исследовать ресурс работы колебателей в зависимости от свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин.

5. Обосновать конструктивное исполнение гидродинамического инструмента и режимов работы установки ГНБ в конкретных условиях применения, обеспечивающих реализацию технологии ГНБ в энергоэффективном режиме.

6. Разработать методику выбора конструктивных параметров инструмента со встроенным генератором вибрационных колебаний для эффективной работы.

1.5. Выводы по главе 1

1. В рассмотренных методах прокладки подземных коммуникаций – будь то прокол, горизонтальное направленное бурение или горизонтальное шнековое бурение, – используется пилотная бурильная головка.

2. Для повышения эффективности прокладки подземных коммуникаций в грунтах категорий 1–4 буримости используются различные типы бурильных головок.

2. МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Методика исследования ресурса работы колебателя в зависимости от свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин

Получение заданных свойств сталей без изменения формы изделия и химического состава, исключительно путем внесения изменений в структуру, выполнено в процессе термической обработки (ТО). Ввиду того, что основными факторами воздействия на сталь при ТО являются температура и время, режим любой ТО определяется графиком в координатных осях t – τ в соответствии с рисунком 2.1 [55].

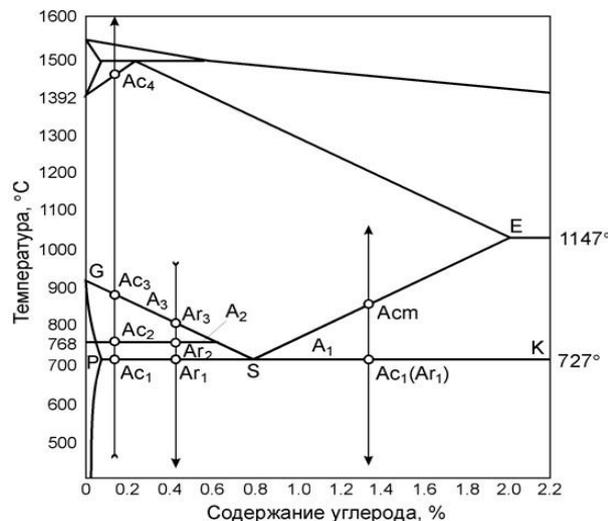


Рисунок 2.1 – Диаграмма «железо – углерод»

Этапы ТО включают в себя нагрев до расчетной температуры, выдержку при заданной температуре и охлаждение, играющее ведущую роль в получении необходимой структуры. В некоторых случаях цикл ТО может быть усложнен несколькими этапами нагрева и последующего охлаждения. В любом случае изменение свойств сплава должно быть остаточным [55].

Выбор режимов проведения ТО был выполнен на основе анализа исследований превращений в сталях, влияния скорости нагрева, максимальной температуры, времени выдержки при нагреве и скорости охлаждения на превращения [55].

При проведении исследований ресурса работы колебателей в зависимости от свойств материала и режимов ТО резонирующих пластин были использованы следующие виды ТО:

- отжиг;
- закалка в соляной ванне;
- отпуск.

Под закалкой понимают такой вид ТО материалов (металлы, их сплавы, стекло), при котором происходит их нагрев выше критической температуры (температуры изменения типа кристаллической решетки, т. е. полиморфного превращения) с последующим быстрым охлаждением в масле.

От скорости охлаждения зависит результат закалки. Самые распространенные закалочные среды – это вода, масло, расплавленные соли. Различают три стадии начального, среднего и конечного периода охлаждения:

- пленочное кипение – образуется паровая пленка около охлаждаемой детали, что характеризует низкую скорость охлаждения;
- пузырьчатое кипение – возникает непосредственный контакт охлаждающей жидкости с изделием в результате разрушения паровой пленки, что увеличивает скорость охлаждения;
- конвективный теплообмен – температура детали ниже температуры кипения охлаждающей среды, скорость теплоотвода снижается. Охлаждение протекает с низкой скоростью.

С целью снижения внутренних напряжений после закалки и повышения пластичности и вязкости был применен отпуск, при котором замечено небольшое по величине снижение твердости и прочности материала.

Отпуск предназначен для получения более высокой пластичности и снижения хрупкости материала при сохранении приемлемого уровня его

прочности. В рамках отпуска изделие подвергается нагреву в печи до температуры от 150–260 до 370–650 °С с последующим медленным остыванием.

Рассмотрим несколько видов отпуска.

Низкотемпературный отпуск проводят при температурах до 250 °С. Закаленная сталь сохраняет высокую износостойкость, однако такое изделие (если оно не имеет вязкой сердцевины) не выдержит высоких динамических нагрузок. Данному типу отпуска подвергаются режущие и измерительные инструменты из углеродистых и низколегированных сталей.

Среднетемпературный отпуск проводят при температурах 350–500 °С. Его применяют для пружин, рессор, штампов. Среднетемпературный отпуск обеспечивает высокие пределы упругости и выносливости, а также релаксационную стойкость. Охлаждение после отпуска осуществляется при температурах 400–500 °С в воде, после чего возникают сжимающие остаточные напряжения, увеличивающие предел выносливости пружин.

Высокотемпературный отпуск проводят при температурах 500–680 °С. В таком случае остаются высокая прочность, пластичность, максимальная вязкость. Высокотемпературному отпуску подвергаются детали, воспринимающие ударные нагрузки (зубчатые колеса, валы).

Нагрев под закалку может осуществляться в печах (газовых и электрических), соляных ваннах и установке ТВЧ [50].

2.1.1. Технологическое оборудование для проведения термической обработки

Для нагрева использовалась электрическая печь ПВП 300/12,5 «Накал» (рисунок 2.2). Это электрическая печь, оснащенная распашной дверью и выконтным подом. Нагрев печи и садки производится излучением и конвекцией от электронагревательных элементов, расположенных вдоль боковых стенок печи и пода. Температура и продолжительность нагрева под

закалку зависят от вида обрабатываемых деталей и колеблются в пределах 860–950 °С; время составляет 1–2 часа. Рабочее пространство – 0,66×1,1×0,4 м, максимальная масса садки с оснасткой – 500 кг, $T_{\text{макс}} = 1250$ °С, мощность – 36 кВт, габариты 3,1×1,5×1,5 [59].



Рисунок 2.2 – Печь для отжига, нормализации и закалки ПВП 300/12,5 «Накал».

В качестве закалочных сред использовалось масло

Масло широко применяется в качестве закалочной среды. Для закалки применялось индустриальное масло. Для более равномерной закаливаемости заготовок масло перемешивалось.

В работе использовался бак с маслом объемом 0,6 м³ (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Ванна закалочная ВМ 26.22.15/0,6

Ванна закалочная ВМ 26.22.15/0,6 имеет следующие характеристики [61]:

- длина 2600 мм;
- ширина 2200 мм;
- высота 1500 мм;
- масса садки 850 кг;
- среда закалки – масло.

В баках предусмотрены система перемешивания закалочной среды с помощью насосов и сопел, система удаления образующихся паров, решетка для сбора окалины, защитная крышка с автоматическим электроприводом, теплообменники для охлаждения закалочной среды. Баки с маслом дополнительно могут оснащаться системой пожаротушения с трубопроводом углекислого газа и насосами для откачки масла в течение 10 минут при аварийной ситуации. Температура в баках с водой регулируется в пределах 25–60 °С, а в баках с маслом – от 30 до 80 °С. Загрузка в баки осуществляется с помощью подвешного крана КМПЭД 10,0...2×12,0...26,0 и траверс.

2.1.2. Аналитическое и испытательное оборудование

Измерение замера твердости проводилось на твердомере Роквелла (HRC) Wilson R574T, представленном на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Твердомер Роквелла (HRC) Wilson R574T

Прибор представляет собой стационарное средство измерения, состоящее из устройства приложения нагрузки и измерительного блока. Принцип действия прибора основан на статическом вдавливании наконечника – алмазного конуса Роквелла, с последующим измерением глубины внедрения наконечника. Затем значение глубины внедрения пересчитываются в значение твердости по Роквеллу и Супер-Роквеллу [62].

Допустимые пределы измерений на твердомере Роквелла с применением алмазного шарика – 20–67 единиц. Во время испытаний прибор был защищен от ударов и вибраций. Детали, заготовки, образцы лежали на столе-подставке устойчиво без смещения и прогиба во время испытаний. Твердомер Роквелла (HRC) Wilson R574T имел инвентарный номер 109414 (номер документа в государственном реестре С-ВТЖ/20-05-2021/64993292).

Подготовка и измерение твердости деталей или заготовок проведена после термической обработки. Место и количество точек измерений твердости определялось технологическим процессом. Поверхность в месте измерения образца, заготовки или детали была гладкой, ровной, свободной от окалина и других посторонних веществ (масла, грязи и т. д.). С целью снятия обезуглероженного слоя и для обеспечения необходимой шероховатости поверхности зачищались площадки для измерения твердости. Схема измерения твердости по Роквеллу представлена на рисунке 2.5.

Вдавливание индентора осуществлялось действием двух последовательно прилагаемых нагрузок: предварительной F_0 и общей F :

$$F = F_0 + F_1, \quad (2.1)$$

где $F_0 = 10$ кгс; F_1 – основная нагрузка, равная 50, 90 или 140 кгс.

Для измерения микротвердости применялся микротвердомер ПМТ-3М. Принцип его действия основан на процессе вдавливания алмазного наконечника (пирамиды) в исследуемый образец под заданной нагрузкой и измерении линейной величины диагонали полученного отпечатка.

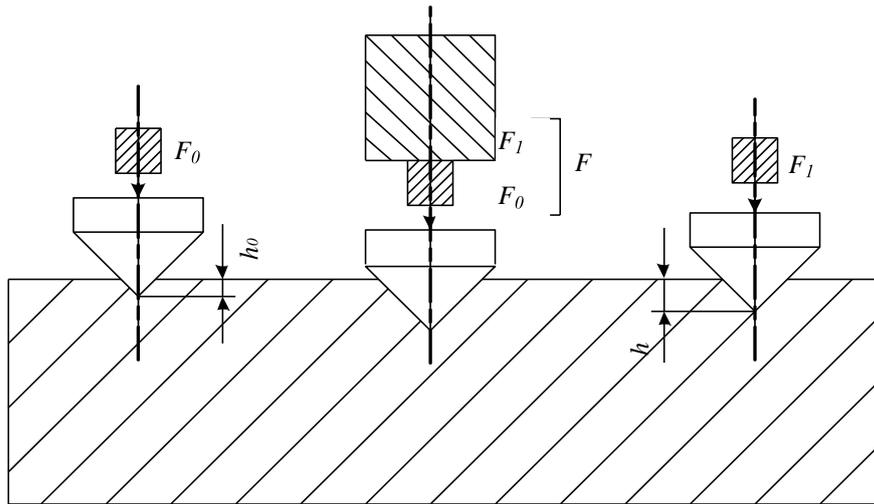


Рисунок 2.5 – Схема измерения твердости по Роквеллу

Схема измерения отпечатка представлена на рисунке 2.6. Количество микротвердости определяется делением нормальной нагрузки F , приложенной к пирамиде, на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка S [63]:

$$HV = F/S, \quad (2.2)$$

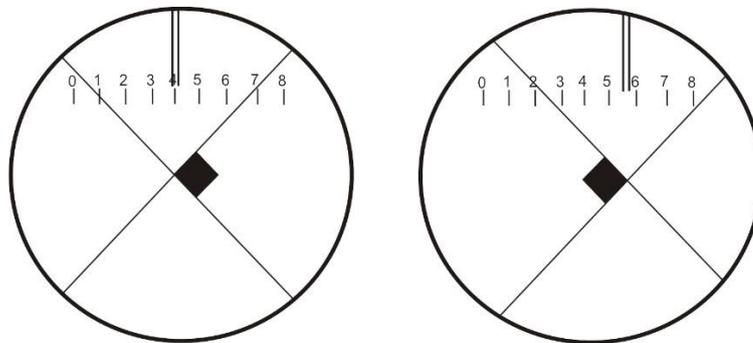


Рисунок 2.6 – Схема измерения отпечатка

Разность отсчетов, умноженная на действительное значение цены деления барабанчика, дает истинную величину диагонали отпечатка.

Число микротвердости рассчитано по формуле

$$HV = \frac{1854P}{d^2}, \quad (2.3)$$

где H – усилие, кгс;

P – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику;

d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм.

Принцип работы основан на преобразовании нагрузки, приложенной к испытываемому образцу, тензорезисторным датчиком в аналоговый электрический сигнал, изменяющийся пропорционально этой нагрузке.

Используемый при исследованиях микротвердомер представлен на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Микротвердомер ПМТ-3М

Для проведения испытания образцов материалов на растяжение использовали разрывную машину. Приложенная нагрузка, создаваемая машинами, деформирует испытуемый образец. При этом производили измерения значения величины этой нагрузки и соответствующей ей величины деформации образца.

Для определения предела прочности при растяжении нагружали образцы с постоянной скоростью растяжения вплоть до их разрушения.

Временное сопротивление (предел прочности) вычисляем по формуле

$$\delta_{\max} = \frac{P_{\max}}{F_0}, \quad (2.4)$$

где P_{\max} – максимальное усилие при растяжении [68].

Усилие при верхнем пределе текучести P_{TB} [68] определяем в точке верхнего предела текучести, которая задается вручную после испытания в окне «Список точек диаграммы».

Верхний предел текучести [60] вычисляем по формуле

$$\sigma_{TB} = \frac{P_{TB}}{F_0}, \quad (2.5)$$

где P_{TB} – усилие при верхнем пределе текучести.

Усилие при нижнем/физическом пределе текучести P_T определяется в точке нижнего/физического предела текучести, задающейся вручную после испытания в окне «Список точек диаграммы» [68].

Нижний/физический предел текучести вычисляем согласно уравнению

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (2.6)$$

где P_T – усилие при нижнем/физическом пределе текучести.

Усилие при условном пределе текучести $P_{0,2}$ определяем в точке пересечения диаграммы испытания $P(l)$ («усилие – деформация») с прямой, параллельной участку упругой деформации и смещенной относительно этого участка на величину допуска пластической деформации. Допуск на величину пластической деформации задаем в параметрах расчета [68].

Условный предел текучести вычисляем по выражению

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad (2.7)$$

где $P_{0,2}$ – усилие при условном пределе текучести.

Равномерное удлинение Δl_P определяем по диаграмме испытания в точке с максимальным усилием P_{\max} . Способ определения удлинения [68] задаем в параметрах расчета [60].

Относительное равномерное удлинение (в процентах) вычисляется по следующей формуле [60]:

$$\delta_P = \frac{\Delta l_P}{l_0} 100, \quad (2.8)$$

где Δl_P – равномерное удлинение.

Относительное удлинение после разрыва (в процентах) [60] вычисляем по выражению

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100, \quad (2.9)$$

где l_k – конечная расчетная длина образца [60] (задали после испытания в окне «Диаграмма испытания»); l_0 – начальная расчетная длина образца.

Относительное сужение после разрыва (в процентах) вычисляем по формуле

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100, \quad (2.10)$$

где F_k – площадь поперечного сечения образца после разрыва (задали после испытания в окне «Диаграмма испытания»).

Модуль упругости определили по прямолинейному участку упругой деформации на диаграмме испытания $P(l)$ («усилие – деформация») [60] и вычислили по формуле

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_0}{\Delta l \cdot F_0}, \quad (2.11)$$

где ΔP – приращение усилия на прямолинейном участке диаграммы $P(l)$; Δl – приращение деформации на прямолинейном участке диаграммы $P(l)$.

Усилие в точке разрыва $P_{\text{разр}}$ определяется по диаграмме испытания в точке разрыва. Прочность в точке разрыва вычисляется по выражению

$$\sigma_{\text{разр}} = \frac{P_{\text{разр}}}{l_0} 100. \quad (2.12)$$

где $P_{\text{разр}}$ – усилие в точке разрыва.

Удлинение в точке разрыва [60] $\Delta l_{\text{разр}}$ определяется по диаграмме испытания в точке разрыва. Способ определения удлинения задаем в параметрах расчета.

Относительное удлинение в точке разрыва (в процентах) [68] вычислили по формуле

$$\delta_{\text{разр}} = \frac{\Delta l_{\text{разр}}}{l_0} 100. \quad (2.13)$$

где $\Delta l_{\text{разр}}$ – удлинение в точке разрыва.

Максимальную нагрузку на ширину вычислили по формуле [60]

$$a_{\text{max}} = \frac{P_{\text{max}}}{b}, \quad (2.14)$$

где P_{max} – максимальное усилие при растяжении;

b – начальная ширина образца.

Нагрузка на ширину при разрыве вычислена по формуле [60]

$$a_{\text{разр}} = \frac{P_{\text{разр}}}{b}, \quad (2.15)$$

где $P_{\text{разр}}$ – усилие в точке разрыва; b – начальная ширина образца.

Машина для испытаний конструкционных материалов И2143М на указана на рисунке 2.8.

Для испытаний на растяжение были использованы плоские образцы тип II (см. ГОСТ 11704–84) с размерами 3,0×20×200 мм. Длина рабочей части составила 80 мм. Записывалась диаграмма нагружения «усилие P – перемещение захвата w ». Точность измерения усилия составила 0,5 %.

Определение среднего размера зерна провели по методике, предусмотренной ГОСТ 5639–82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна».



Рисунок 2.8 – Машина для испытаний конструкционных материалов И2143М

Для испытаний применялись образцы на усталость типоразмера 8 (рисунок 2.9). Партия образцов из 6 штук подверглась испытаниям на многоцикловую усталость. Для определения предела выносливости образцы попеременно подвергались циклической нагрузке. Количество циклов на нагружение было принято $3 \cdot 10^6$.

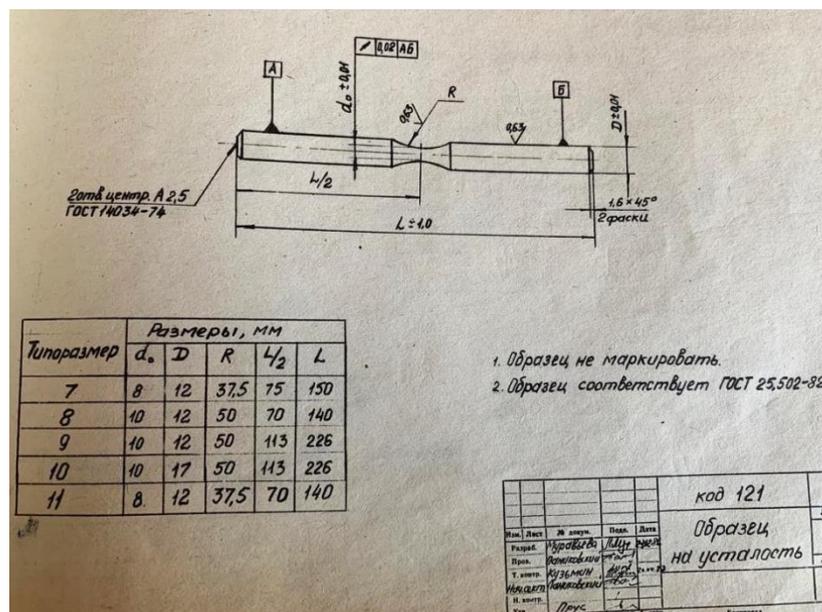


Рисунок 2.9 – Образец на усталость

Машины МУИ-6000 (рисунок 2.10) предназначены для испытаний при чистом повторно-переменном изгибе; режим изменения напряжения в образце происходит по симметричному циклу.



Рисунок 2.10 – Машина для испытания на многоцикловую усталость МУИ-6000

2.2. Методика проведения стендовых испытаний по проверке работоспособности и оценке резонансных характеристик бурильной головки

Стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительной оценке резонансных характеристик опытного образца головки машины ГНБ со встроенным внутри генератором ГК, идущим в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами колебателей и струеформирующих насадок, были проведены на стенде (рисунок 2.11),

представляющем собой насосную станцию высокого давления мультипликаторного типа 1, емкость с грунтом 2 и подвижную каретку 3 с возможностью крепления испытуемого образца породоразрушающего инструмента, осуществляющую рабочие перемещения вдоль поверхности грунта посредством гидроцилиндра 4 с задаваемой скоростью.



Рисунок 2.11 – Стенд для испытаний опытного образца бурильной головки со встроенным генератором ГК в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами колебателей

При этом регистрируются следующие факторы и показатели процесса:

- $P_{\text{п}}$ – усилие подачи, МПа;
- P – давление в гидросистеме, МПа;
- t – время работы установки, с;
- Q – расход жидкости, м³/с;
- L – длина головки, м.

Наблюдаются характеристики истечения струй из бурильной [2] головки.

Расход жидкости через струеформирующую насадку можно определить [64] следующим образом:

$$Q = S_0 \mu \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} k, \quad (2.16)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения канала диска, м²;

ΔP – перепад давления в формирующей насадке, МПа;

ρ – плотность среды, кг/м³;

μ – суммарный коэффициент расхода насадки, характеризующий ее геометрию:

$$\mu = \varphi \varepsilon,$$

где φ – коэффициент гидравлического сопротивления, его значения колеблются в пределах (0,7–0,98);

ε – коэффициент объемного сжатия струи:

$$\varepsilon = \frac{f'_0}{f_0},$$

где f_0 – площадь поперечного сечения струи до выхода из бурильной головки (численно равна площади канала диска);

f'_0 – площадь поперечного сечения струи на выходе из бурильной головки, м²;

k – коэффициент, зависящий от количества каналов в диске.

Коэффициент объемного сжатия струи для насадок с профилируемой формой может достигать единицы. Значение суммарного коэффициента расхода в конструкциях каналов варьируется от 0,55 до 0,9.

Измеряются характеристики вибрации с разными колебателями:

- P – давление в гидросистеме, МПа;
- L – расстояние от выходного отверстия канала струеформирующей насадки до незакрепленного конца пластины, м;
- A – амплитуда колебаний пластины, м.

Внедрение головки в массив происходит за счет усилия подачи посредством нагрузочного устройства.

Для проведения исследований был использован опытный образец бурильной головки [2].

Экспериментальные исследования проводились на породах, основные свойства которых приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Свойства пород

Характеристика породного массива	Ед. изм.	Значение		
		Образец I	Образец II	Образец III
Коэффициент сопротивления уплотнению $\delta_{упл}$	кПа	430	250	180

Исследование процесса работы бурильной головки со встроенным внутри генератором ГК проходило с помощью экспериментально-статистического метода [2].

2.3. Методика расчета усталостной прочности пластины резонатора бурильной головки

Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния, реализующихся в лепестке колебателя, построена конечно-элементная модель в программном комплексе Ansys Workbench.

Анализ параметров напряженно-деформированного состояния выполнен в модуле Harmonic Response.

Принимая во внимание тот факт, что физика рассматриваемого процесса не изучена в достаточной степени, не представляется возможным однозначно подобрать условия нагружения и математическую модель бурильной головки, которые обеспечили бы максимальное соответствие реально протекающим в конструкции физическим процессам. Для ухода от неопределенности в качестве модели бурильной головки принимается линеаризированная конечно-элементная модель (КЭМ). В таком случае в качестве модели воздействия выступает гармоническое кинематическое воздействие на элементы геометрии КЭМ, а критерием соответствия физике процесса принимается отклик лопатки бурильной головки, который, согласно экспериментальным данным, составляет по амплитуде перемещений 1,5–2,2 мм.

Таким образом, цели данного раздела — это формирование представления о вероятной долговечности лепестков в зависимости от схемы приложения кинематического воздействия на бурильную головку, а также рассмотрение целесообразности изменения конструкции лепестков.

Для выполнения расчетов построено несколько КЭМ бурильного инструмента, отличающихся между собой только геометрическими параметрами лепестков. Общий вид КЭМ отображен на рисунке 2.12. Параметры демпфирования в КЭМ приняты так, чтобы соответствовать относительному коэффициенту демпфирования, равному 0,03. Рассмотрим систему условных обозначений КЭМ с учетом выведенных схем нагружения:

- 1) исходная геометрия, колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, трясем за консоль;
- 2) исходная геометрия, колебания лопатки $\approx 1,5$ мм, трясем за консоль;
- 3) исходная геометрия, колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, трясем за корпус;
- 4) исходная геометрия, колебания лопатки $\approx 1,5$ мм, трясем за корпус;
- 5) колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, лепесток выполнен равномерно более тонким ($-0,2$ мм по нормали с каждой стороны, т. е. от толщины 0,6 идем к толщине 2,6), трясем за консоль;
- 6) колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, лепесток из перечисления (5), трясем за корпус;
- 7) колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, лепесток неравномерно более тонкий (вместо угла 1:50, угол наклона 1:66, т. е. от толщины 1,0 идем к толщине 2,5 мм), трясем за консоль;
- 8) колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, лепесток из перечисления (7), трясем за корпус.

Схемы нагружения КЭМ приведены на рисунках 2.13 и 2.14.

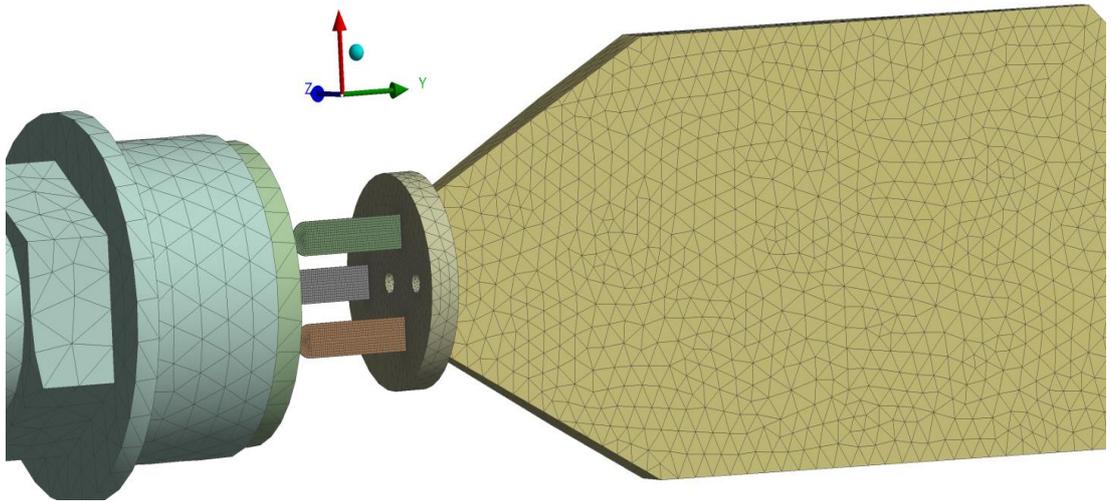


Рисунок 2.12 – КЭМ бурильной головки

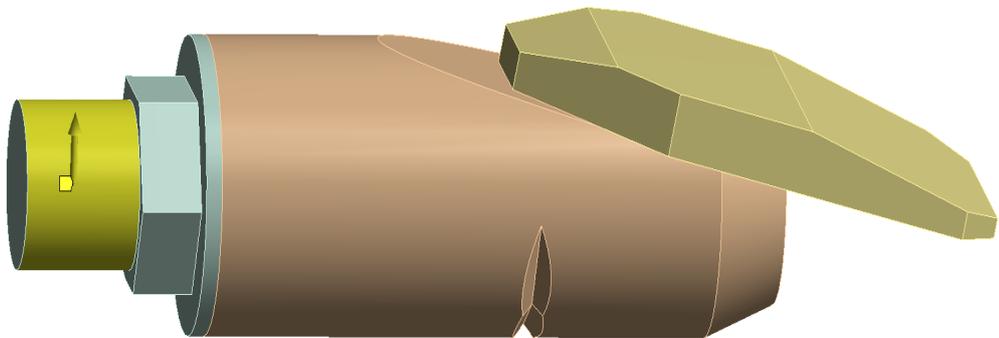


Рисунок 2.13 – Схема кинематического воздействия для КЭМ (1), (2), (5), (7)

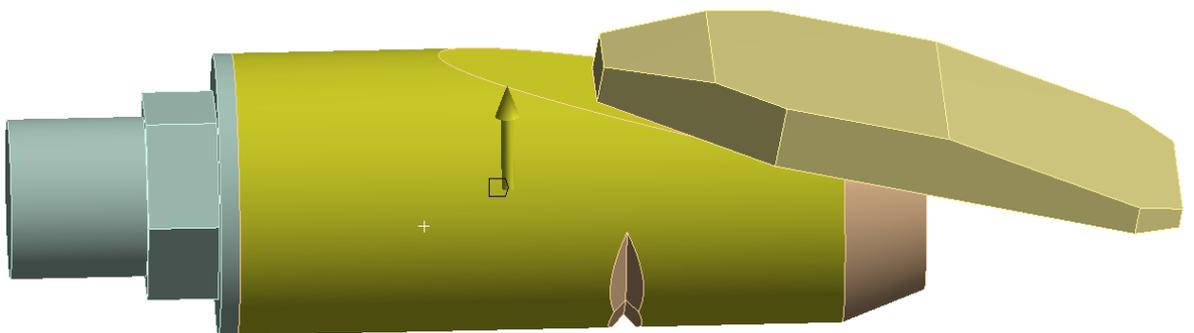


Рисунок 2.14 – Схема кинематического воздействия для КЭМ (3), (4), (6), (8)

Для оценки долговечности лепестков бурильной головки в качестве расчетной математической модели принималась степенная зависимость без

учета участка для напряжений цикла ниже предела выносливости материала ($\sigma < \sigma_{-1}$):

$$N(\sigma) = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^m, \quad (2.17)$$

где N_0 – базовое число циклов испытаний (база испытаний); σ_{-1} – предел выносливости материала, соответствующий значению напряжений цикла, обеспечивающих неразрушение на базе испытаний N_0 с 50%-ной вероятностью; m – эмпирический показатель степени (определяется для двух значений σ и соответствующим им N в многоцикловой области).

2.4. Факторы и показатели, определяющие и характеризующие работу бурильной головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний

Энергия колебаний встроенного генератора ГК через корпус ГБГ передается на грунт, приводя в движение его частицы, что повышает эффективность проходки пилотной скважины. Изменение структуры грунта оказывает существенное влияние и одновременно уменьшает напряжение, действующее на бурильную головку, из-за чего уменьшается также усилие, требуемое для разрушения массива. Удаляясь от источника колебаний, поверхность фронта деформирующей волны возрастает. Вследствие этого на единицу массы грунта, прилегающей к фронту волны, приходится значительно меньшая доля переносимой энергии, а значит, амплитуда колебаний снижается при увеличении расстояния от поверхности корпуса инструмента.

При воздействии колебаний на отдельные зерна грунта происходит их движение с разной амплитудой из-за разницы формы, массы, размеров связей с соседними частицами. В результате возникает их колебательное перемещение и снижается сопротивление действию постоянной силы давления торца. Поэтому приложенное усилие позволяет раздвинуть зерна грунта в стороны, в некоторой мере освободив путь рабочему инструменту.

Из-за колебаний нормального давления зерен грунта на прилегающие к ним другие зерна изменяется действительная сила трения между ними. При достаточной величине этого эффекта появляется дополнительная возможность вызвать смещение зерен под действием постоянной малой силы.

Проскальзывание и прижимание друг к другу зерен грунта из-за вибрации способствуют освобождению некоторой доли воды, адсорбированной на поверхности частиц (и даже, возможно, в близком к поверхности частиц слое), а в конечном счете – обогащению грунта свободной водой, действующей в качестве смазки [51–53].

Для создания скважины требуемых размеров приняты три буровых параметра:

- время соприкосновения с грунтом;
- скорость проходки;
- прилагаемое усилие.

Вышеуказанные переменные величины контролируются с помощью регулирования давления смеси, размеров сопла, скорости подачи и тяги.

Прилагаемое усилие будет зависеть от подаваемого давления смеси в пределах 0–100 бар и размера регулируемого сопла (чем больше размер сопла, тем сильнее струя, т. е. тем больше будет количество раствора при более низком давлении). Логично, что при заранее заданной длине бурения более сильная струя рабочей жидкости передаст большее усилие. Следует отметить, что скорость потока бентонита в скважине должна составлять 0,5 м/с. От скорости подачи напрямую зависит время соприкосновения с грунтом, так как чем дольше струя будет воздействовать на определенную площадь, тем больше энергии поступит на эту площадь.

Скорость проходки в буровом процессе является результатом затраченного усилия и состава грунта. Удаляясь от сопла, сила давления струи теряет свою энергию. Проходимые грунты могут быть, во-первых, мягкими, имеющими небольшое сопротивление, позволяющее проходить большие

расстояния, а во-вторых – такими, что требуют большого давления, создаваемого в непосредственной близости от сопла [54–56].

Расчет объема бурового раствора $V_{бр}$ производится по формуле

$$V_{бр} = \frac{\pi d_p^2}{4} (l + \delta) K_p, \quad (2.18)$$

где d_p – наибольший диаметр проходимой скважины, м;

l – расчетная длина скважины, м;

δ – возможное увеличение фактической длины скважины, м;

K_p – коэффициент расхода бурового раствора, выражающий отношение объема прокачиваемого бурового раствора к выбуренной породе.

Для обеспечения полной очистки скважины от выбуренной породы коэффициент расхода бурового раствора K_p принимается по таблице 2.2. Для машин классов «макси» и «мега» значение коэффициента расхода бурового раствора K_p следует корректировать по результатам работ.

Таблица 2.2 – Коэффициент расхода бурового раствора

Грунтовые условия	Коэффициент расхода бурового раствора
Песок, гравий, скальная порода	2–3
Супесь, суглинок	3–4
Глина	3–4
Активная глина	≥ 6

Примечание. Значения коэффициента расхода бурового раствора даны для установок классов «мини» и «миди».

Количество компонента бурового раствора m_k , необходимого для производства работ, выраженное в килограммах, определяется по формуле

$$m_k = V_{бр} \cdot c_k, \quad (2.19)$$

где c_k – концентрация компонента бурового раствора, кг/м³.

Подбор буровой установки для конкретного объекта производится на основании данных по типу, диаметру и длине предполагаемого к прокладке

трубопровода, по инженерно-геологическим условиям строительства, с учетом требований по обеспечению необходимых значений усилий тяги и крутящего момента. Для обеспечения проходки буровая установка должна обеспечивать усилие подачи P_T , кН, обеспечивающее выполнение условия

$$P_T \geq k_1 \cdot P_{ГП}, \quad (2.20)$$

где k_1 – коэффициент запаса по усилию буровой установки, выбираемый в диапазоне от 1,5 до 2,5 в зависимости от инженерно-геологических условий [57];

$P_{ГП}$ – расчетное значение необходимого усилия для протягивания трубопровода, кН.

Крутящий момент и скорость вращения шпинделя обеспечивают мощность, передаваемую от буровой установки через штанги на буровую головку и расширитель. За исключением случаев, когда дополнительная мощность передается на буровой инструмент при использовании забойного двигателя.

Чтобы обеспечить разработку грунта при проходке пилотной скважины и расширении скважины буровая установка должна развивать крутящий момент M_6 , кН·м, не менее следующего:

$$M_6 \geq k_2 \sum M, \quad (2.21)$$

где k_2 – коэффициент запаса по мощности буровой установки, выбираемый в диапазоне от 1,2 до 1,5;

M – наибольшее расчетное значение суммарного крутящего момента для проходки пилотной скважины или расширения канала, кН·м.

Рабочий инструмент для бурения пилотной скважины выбирается исходя из состава грунтов. В случае грунтов категорий I–IV (землистые, мягкие) по буримости для механического вращательного бурения [58], должны применяться гидромониторные долота длиной от 300 до 1000 мм и диаметром от 40 до 200 мм. Гидромониторные долота отличаются числом и размерами промывочных насадок. Как правило, используют не более пяти насадок с раскрывающимся диаметром от 1 до 10 мм. Управляющая поверхность

головки гидромониторного долота либо вся труба долота выполняются со скосом под небольшим углом для регулировки направления.

В случае грунтов категорий IV–VII (средней крепости) по буримости для механического вращательного бурения применяются шарошечные долота с гидромониторными насадками, которые способны механически разрушать горную породу. Для шарошечного долота рекомендуется использовать забойные двигатели.

Процесс бурения пилотной скважины ГБГ со встроенным внутрь генератором ГК (рисунок 2.15) с колебаниями перпендикулярно оси проходки представляет собой внедрение в грунт под действием усилия подачи вибрационного инструмента в виде рабочего наконечника со скосом, внутри которого встроен генератор ГК.

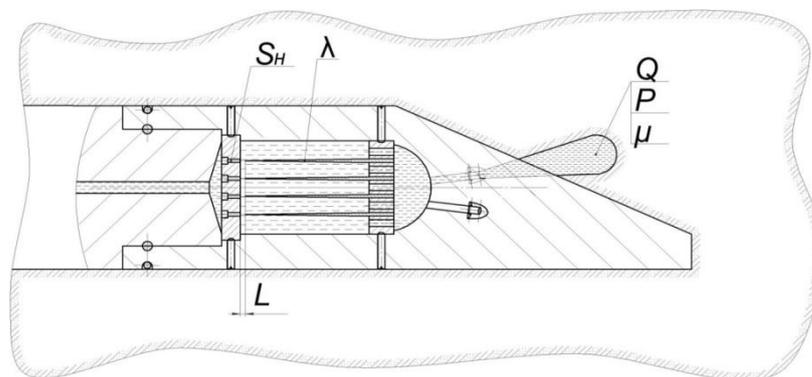


Рисунок 2.15 – Бурильная головка со встроенным генератором ГК и основные параметры работы: Q – расход промывочной жидкости; P – давление; μ – вязкость; S_n – площадь сечения насадки; λ – модуль упругости; L – расстояние пластины от насадки [2]

2.5. Выводы по главе 2

1. Разработана методика исследования ресурса работы пластины колебателя в зависимости от свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин.

2. Разработана методика проведения стендовых испытаний по проверке работоспособности и оценке резонансных характеристик бурильной головки.

3. Разработана методика расчета усталостной прочности пластины резонатора бурильной головки.

4. Определены факторы и показатели, определяющие и характеризующие работу бурильной головки со встроенным генератором ГК.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ БУРИЛЬНОЙ ГОЛОВКИ

3.1. Определение влияния свойств используемого материала и режимов термообработки на усталостную прочность пластины колебателя

3.1.1. Результаты исследования пластины колебателя из стали 60С2А с разными режимами термической обработки

Для исследований использовались образцы в трех состояниях, связанных с режимами термической обработки (ТО), которая проводится для повышения пластичности пластины колебателя из стали 60С2А:

- состояние 1 – состояние поставки, лента холоднокатанная, без дополнительной ТО (образцы № 14 и 15);
- состояние 2 – ТО по режиму 1 (образцы № 16 и 17);
- состояние 3 – ТО по режиму 2 (образцы № 9 и 10);

Режим ТО по ГОСТ 14959–16 обеспечивал следующие уровни механических характеристик:

- условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 1375$ МПа;
- предел прочности $\sigma_b = 1570$ МПа;
- относительное удлинение при разрыве $\delta_5 = 6$ %;
- относительное сужение $\Psi = 20$ % (определено на цилиндрических образцах).

В таблице 3.1 приведен химический состав стали 60С2А по ГОСТ 14959–2016 и фактический, определенный на образцах из плавки 1Т46911.

Таблица 3.1 – Химический состав стали 60С2А

Содержание элемента, %								
С	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
Требование ГОСТ 14959–2016								
0,58–0,63	0,60–0,90	1,60–2,00	≤0,025	≤0,025	≤0,30	≤0,25	≤0,20	–
Фактический состав плавки 1Т46911								
0,57	0,7	1,96	0,006	0,004	0,03	0,05	0,07	0,005

В таблице 3.2 представлены режимы ТО заготовок резонирующих пластин.

Таблица 3.2 – Режимы ТО заготовок резонирующих пластин

Образцы № 14, 15	Образцы № 16, 17. Режим 1	Образцы № 9, 10. Режим 2	ГОСТ 14959–16. Режим ГОСТ
Без термической обработки	Закалка в соляной ванне: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 860 °С; • нагрев до $T = 860\text{--}870$ °С; • выдержка с получением температуры 1 мин; • охлаждение в масле, качать 	Отжиг в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 600 °С; • нагрев до $T = 650\text{--}670$ °С; • выдержка при максимальной температуре 30 мин; • охлаждение с печью со скоростью 50 °С/ч до температуры 280 °С и далее на воздухе 	Закалка (870 °С, охлаждение в масле)
–	Отпуск в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 300 °С; • нагрев до $T = (350\text{--}370)$ °С; • выдержка при максимальной температуре не менее 4 ч; • охлаждение на воздухе 	Закалка в соляной ванне: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 860 °С; • нагрев до $T = 860\text{--}870$ °С; • выдержка при максимальной температуре 1 мин; • охлаждение в масле, качать 	Отпуск (420 °С, охлаждение на воздухе)
–	–	Отпуск в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 400 °С; • нагрев до $T = 400\text{--}420$ °С; • выдержка при максимальной температуре не менее 4 ч; • охлаждение на воздухе 	–

Как видим, химический состав поставленной стали соответствует требованиям стандарта за исключением содержания углерода. Но для ленты из стали 60С2А допускается отклонение по содержанию углерода до $\pm 0,02$ % (ГОСТ 2283–79). Так что можно говорить о полном соответствии содержания элементов требованиям нормативной документации.

Результаты металлографических исследований представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты металлографических исследований

Вид контроля	Номер образца		
	14, 15	16, 17	9, 10
Глубина обезуглероженного слоя, мм	0,08	0,1	0,09
Степень полосчатости	Отсутствует		
Величина зерна по ГОСТ 5639–82	6–7 баллов по шкале 1	8 баллов по шкале 1	8 баллов по шкале 1

Описание микроструктуры образцов по ГОСТ 8233–56 приведено в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Микроструктура образцов по ГОСТ 8233–56

Номер образца	Описание
14	Зернистый перлит, 8–9 баллов по шкале 2
15	
16	Весьма мелкоигольчатый мартенсит отпуска, 2 балла по шкале 3
17	
9	Скрытоигольчатый мартенсит отпуска, 1 балл по шкале 3
10	Весьма мелкоигольчатый мартенсит отпуска, 2 балла по шкале 3

Сталь 60С2А относится к перлитному классу. В процессе отпуска при температуре 80–300 °С формируется структура отпущенного мартенсита. То есть микроструктура образцов соответствует проведенной ТО.

Описание микротвердости образцов пластины колебателя представлено в таблице 3.5, а сравнительные характеристики микротвердости отображены на рисунках 3.1 и 3.2.

Таблица 3.5 – Микротвердость образцов

Расстояние от поверхности, мм	60С2А, плавка № 1Т46911					
	Образцы № 14, 15. Без термообработки		Образцы № 16, 17. Режим 1		Образцы № 9, 10. Режим 2	
	Микротвердость, HV 0,05					
	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2
0,02	232	232	260	220	218	162
0,03	232	232	260	262	304	288
0,04	253	254	260	269	444	290
0,06	262	256	293	294	464	254
0,08	276	256	342	394	468	386
0,1	276	256	498	494	490	444
0,12	291	282	498	494	464	462
0,14	295	290	494	494	468	473
0,16	295	290	494	494	494	494
0,18	295	295	494	494	494	494
0,2	295	295	494	494	494	494

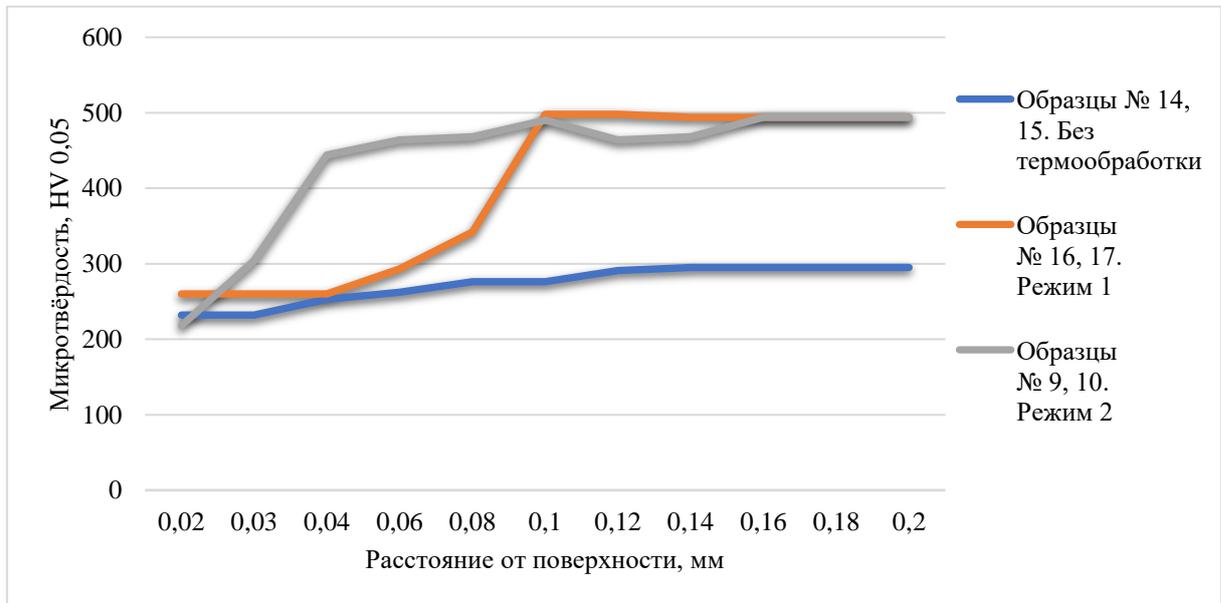


Рисунок 3.1 – Сравнительная характеристика микротвердости по стороне 1

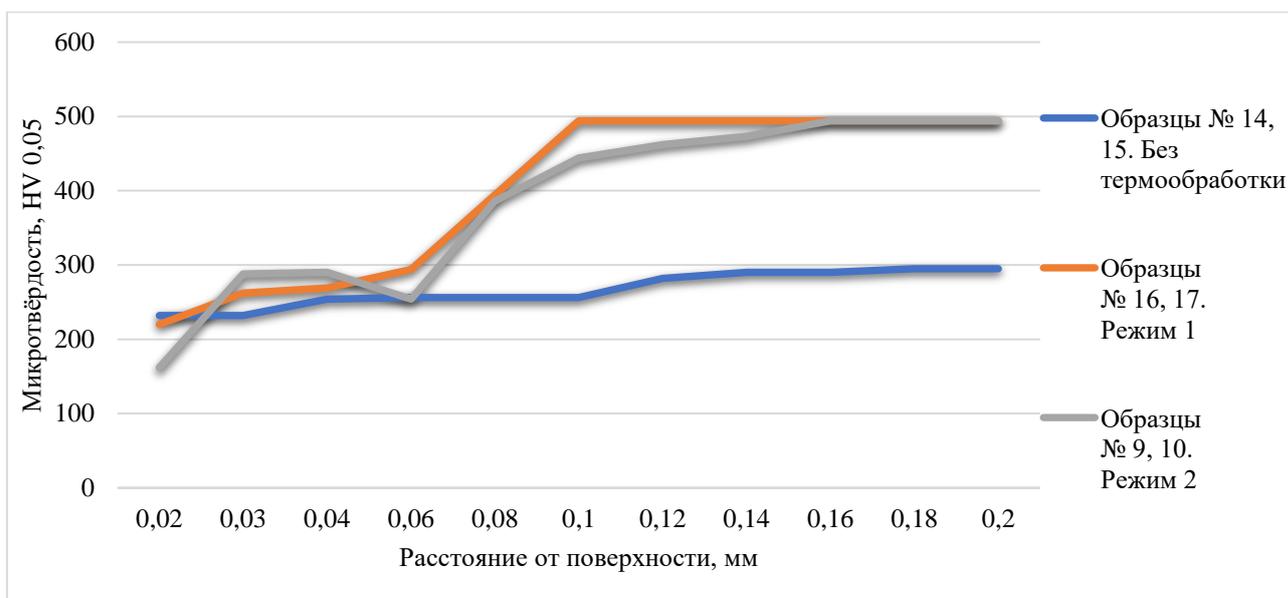


Рисунок 3.2 – Сравнительная характеристика микротвердости по стороне 2

Результаты замеров микротвердости показывают зависимость ее снижения после ТО на толщине обезуглероженного слоя исследуемых пластин колебателя из сталей 60С2А-ТШ-С-3,0×34 (ГОСТ 2283–79, плавка № 1Т46911).

В таблице 3.6 приведены показатели механических характеристик исследуемых образцов пластин колебателя из стали 60С2А (приведены средние значения для двух образцов).

Таблица 3.6 – Механические характеристики стали 60С2А

Характеристика	Образцы № 14, 15	Образцы № 16, 17	Образцы № 9, 10	ГОСТ 14959–16
σ_b , МПа	564	1382	1221	1570
$\sigma_{0,2}$, МПа	417	1250	850	1375
δ_4 , %	3,4	2,7	1,1	6*
Твердость, HRC	27	43,5	29–39	
K_δ	0,3616	0,3628	0,3658	0,3565
σ_{-1} , МПа	339	832	739	937
П	1,32	1,08	1,42	1,08

Примечания: 1. Приведено значение δ_5 , которое при данном уровне показателя в первом приближении можно считать равным δ_4 [95]. 2. П – параметр пластичности.

Для сравнения в таблице 3.6 представлены данные для пластин колебателя из стали 60С2А, прошедшей термическую обработку по ГОСТ 14959–2016.

Основная цель данного исследования состоит в определении режима ТО, который обеспечивал бы, наряду с повышением прочности материала пластин колебателя, также улучшение их пластичности с целью снижения чувствительности деталей к концентраторам напряжений в виде возникающих в процессе работы трещин. Помимо простых показателей пластичности δ и Ψ , необходимо рассматривать более сложные, которые учитывали бы сопротивление деформации. Одним из таких показателей является коэффициент пластичности K_δ , определяемый из соотношения [95]

$$K_\delta = (1 - \delta)^{1/\delta}. \quad (3.1)$$

Значения коэффициента пластичности K_δ для различных состояний материала приведены в таблице 3.6 и рисунке 3.3. Видно, что по своему значению рассматриваемые режимы ТО и состояние поставки имеют достаточно близкие значения. Наибольшее значение параметра пластичности реализуется при ТО стали 60С2А по режиму 2 для образцов № 9 и 10. То есть пластины колебателя из стали 60С2А, термически обработанные по данной схеме, обладают наименьшей чувствительностью к концентраторам напряжения из числа образцов, исследуемых в данной работе. ТО по ГОСТ 14959–16 дает наименьшее значение коэффициента пластичности.

Кроме этого, в таблице 3.6 приведены значения предела выносливости σ_{-1} для рассматриваемых режимов ТО, величина которого определялась из соотношения [95]

$$\sigma_{-1} = K_\delta^{0,5} \cdot \sigma_b. \quad (3.2)$$

Следует отметить, что оба исследованных режима ТО обеспечивают повышение предела выносливости стали 60С2А по отношению к состоянию поставки более чем в 2 раза. Последнее обстоятельство говорит о том, что детали (в рассматриваемой работе – колебатель), изготовленные из материала, прошедшего дополнительную ТО, обладают большим ресурсом работы. ТО по

ГОСТ 14959–16 за счет высокого уровня предела прочности дает и более высокий уровень предела выносливости, однако, низкий показатель пластичности в данном случае несколько уменьшает положительное влияние данного фактора из-за большей чувствительности к различного рода концентраторам.

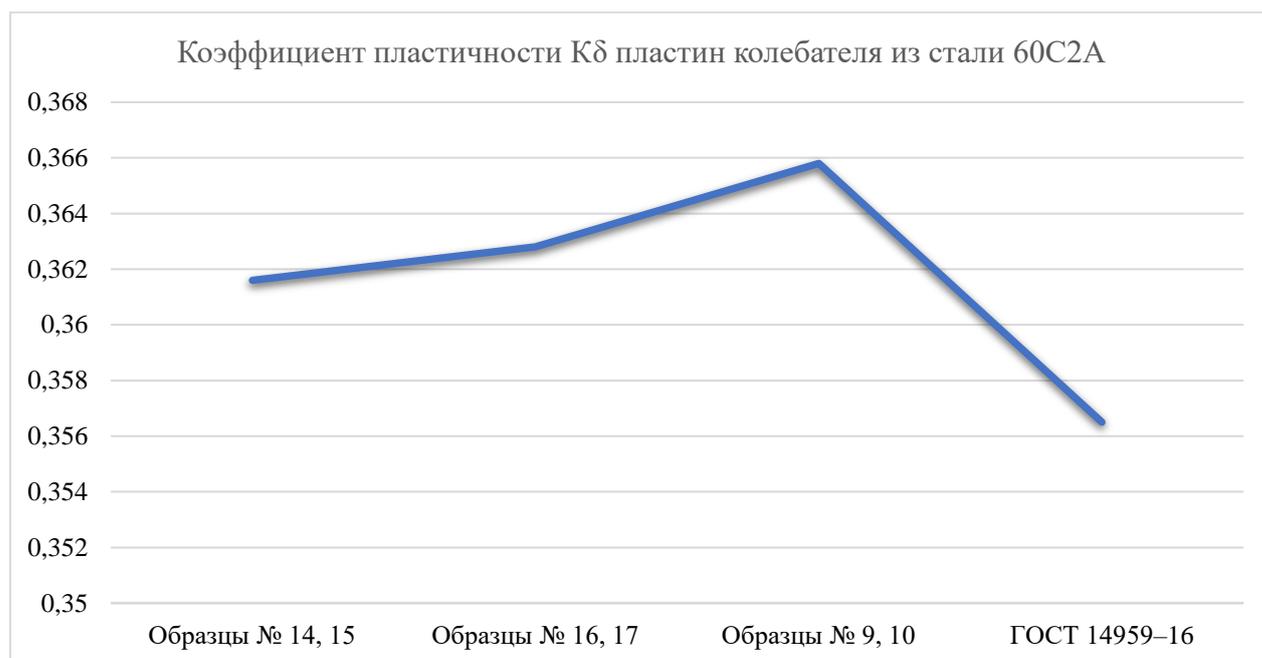


Рисунок 3.3 – Сравнительная характеристика коэффициента пластичности K_δ пластин колебателя из стали 60С2А

При определении режима термической обработки, который обеспечивал бы повышение пластичности материала с целью снижения чувствительности деталей к концентраторам напряжений, включая возникающие в процессе работы трещины, помимо коэффициента пластичности K_δ , выведем показатель, более простой в расчете, но учитывающий сопротивление деформации. Один из таких показателей – это параметр пластичности Π , определяемый из соотношения

$$\Pi = \frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}} - \delta. \quad (3.3)$$

Значение параметра Π приведено в таблице 3.6 и рисунке 3.4. Видно, что наибольшее значение параметра пластичности реализуется при термической обработке, стали 60С2А по режиму 2 для образцов № 9 и 10.

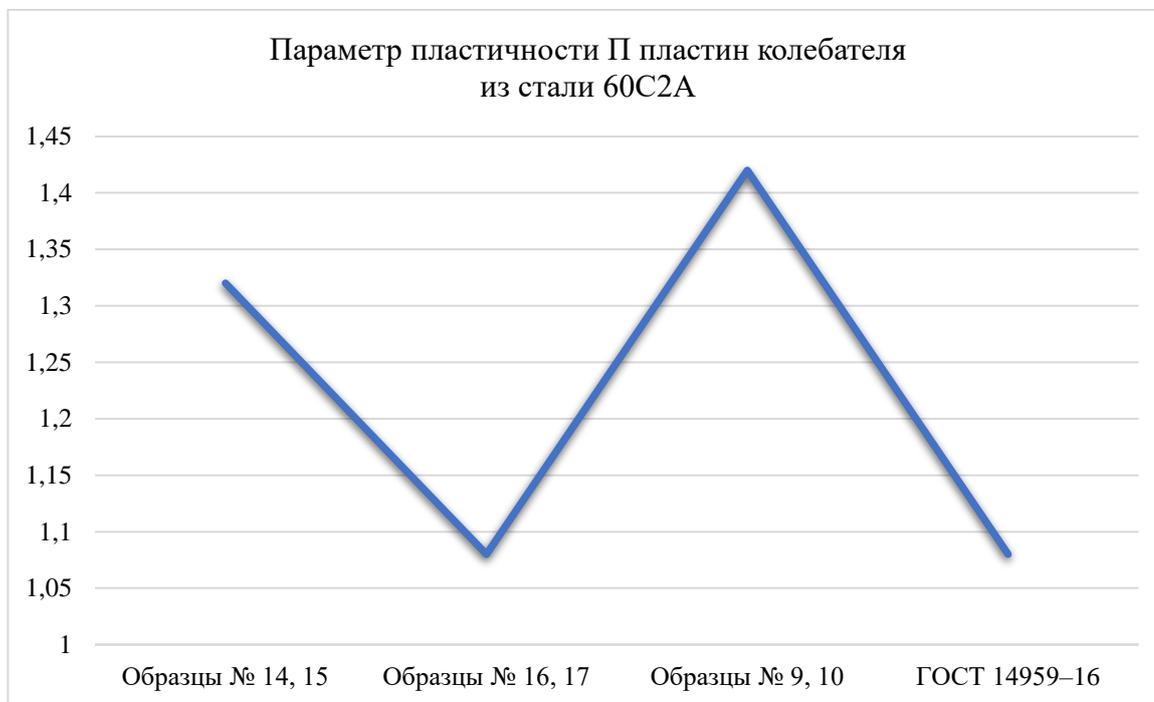


Рисунок 3.4 – Сравнительная характеристика параметра пластичности Π пластин колебателя из стали 60С2А

3.1.2. Результаты исследования пластин колебателя из стали 65Г с разными режимами термической обработки

Для исследований использовались образцы в трех состояниях, связанных с режимами ТО, проводимой для повышения пластичности пластин колебателя из стали 65Г:

- состояние 1 – состояние поставки, лента холоднокатаная, без дополнительной ТО (образцы № 7 и 8);
- состояние 2 – ТО по режиму 1 (образцы № 12 и 13);
- состояние 3 – ТО по режиму 2 (образцы № 18 и 19).

Режимы ТО представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Режимы ТО заготовок резонирующих пластин

Образцы № 7, 8	Образцы № 12, 13. Режим 1	Образцы № 18, 19. Режим 2	ГОСТ 14959–16. Режим ГОСТ
Без термической обработки	Закалка в соляной ванне: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 860 °С; • нагрев до $T = 860\text{--}870$ °С; • выдержка с получением температуры 1 мин; • охлаждение в масле, качать 	Отжиг в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 600 °С; • нагрев до $T = 650\text{--}670$ °С; • выдержка при максимальной температуре 30 мин; • охлаждение с печью со скоростью 50°/ч до температуры 280 °С и далее на воздухе 	Закалка 815–845 °С, охлаждение в масле
–	Отпуск в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 300 °С; • нагрев до $T = 350\text{--}370$ °С; • выдержка при максимальной температуре не менее 4 ч; • охлаждение на воздухе 	Закалка в соляной ванне: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 860° С; • нагрев до $T = 860\text{--}870$ °С; • выдержка при максимальной температуре 1 мин; • охлаждение в масле, качать 	Отпуск 450–510 °С, охлаждение на воздухе
–	–	Отпуск в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 400 С; • нагрев до $T = 400\text{--}420$ °С; • выдержка при максимальной температуре не менее 4 ч; • охлаждение на воздухе 	–

Режим ТО по ГОСТ 14959–16 обеспечивал следующие уровни механических характеристик:

- условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 785$ МПа;
- предел прочности $\sigma_b = 980$ МПа;
- относительное удлинение при разрыве $\delta_5 = 12$ %;
- относительное сужение $\Psi = 30$ % (определено на цилиндрических образцах).

В таблице 3.8 приведен химический состав стали 65Г по ГОСТ 14959–2016 и фактический, определенный на образцах из плавки 014929.

Таблица 3.8 – Химический состав стали 65Г

Содержание элемента, %									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	W	Al
Требование ГОСТ 14959–2016									
0,62–0,70	0,09–1,20	0,17–0,37	≤0,025	≤0,025	≤0,25	≤0,25	≤0,20		–
Фактический состав плавки 014929									
0,66	1,03	0,26	0,02	0,012	0,1	0,05	0,08	–	0,01

Как видим, химический состав поставленной стали соответствует требованиям стандарта.

Результаты металлографических исследований представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты металлографических исследований

Вид контроля	Номер образца		
	7, 8	12, 13	18, 19
Глубина обезуглероженного слоя, мм	0,02	0,02	0,03
Степень полосчатости	Отсутствует		
Величина зерна по ГОСТ 5639–82	4–6 баллов по шкале 1	7–8 баллов по шкале 1	7–8 баллов по шкале 1

Описание микроструктуры образцов по ГОСТ 8233–56 приведено в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Микроструктура образцов

Номер образца	Описание
7	Смесь зернистого и пластинчатого перлита, пропорция 65/35 % по шкале 9
8	
12	Мелкоигольчатый мартенсит отпуска, 3 балла по шкале 3
13	
18	Скрытоигольчатый мартенсит отпуска, 1 балл по шкале 3
19	

Сталь 65Г относится к перлитному классу. В процессе отпуска при температуре 80–300 °С формируется структура отпущенного мартенсита. То есть микроструктура образцов соответствует проведенной термической обработке.

Описание микротвердости образцов представлено в таблице 3.11. Сравнительные характеристики микротвердости показаны на рис. 3.5 и 3.6.

Таблица 3.11 – Микротвердость образцов

Расстояние от поверхности, мм	65Г, плавка № 014929					
	Образцы № 7, 8. Без термообработки		Образцы № 12, 13. Режим 1		Образцы № 18, 19. Режим 2	
	Микротвердость, HV 0,05					
	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2
0,02	162	162	368	333	242	247
0,03	229	206	478	494	295	291
0,04	229	226	478	494	296	331
0,06	229	229	478	494	296	334
0,08	230	229	478	478	301	339
0,1	230	230	494	494	330	397
0,12	247	247	494	494	414	417
0,14	247	255	478	494	431	433
0,16	290	262	494	494	433	447
0,18	290	290	494	462	444	447
0,2	290	291	482	478	444	447

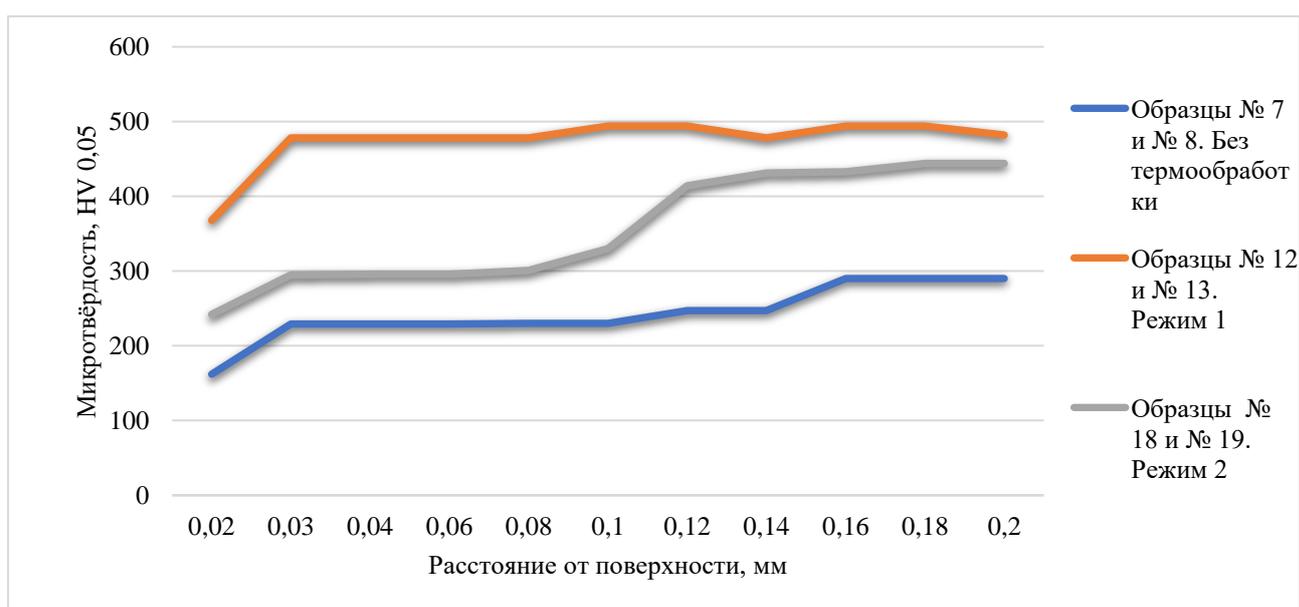


Рисунок 3.5 – Сравнительная характеристика микротвердости по стороне 1

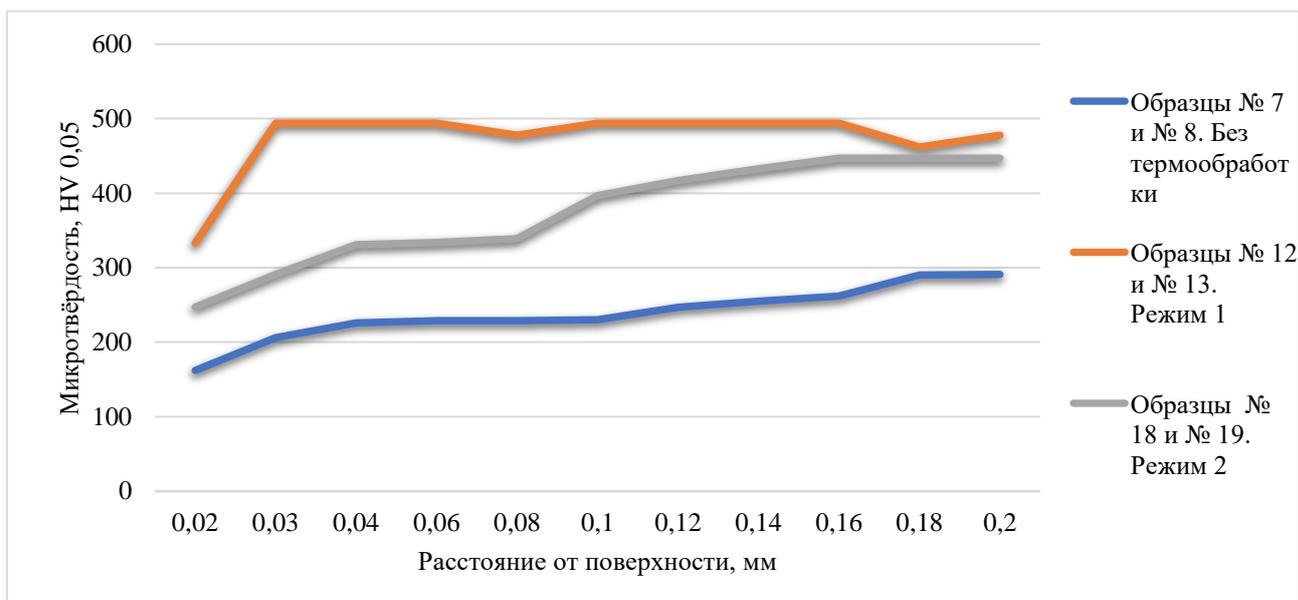


Рисунок 3.6 – Сравнительная характеристика микротвердости по стороне 2

Результаты замеров микротвердости показывают зависимость ее снижения после ТО на толщине обезуглероженного слоя исследуемых пластин колебателя из стали Лента 65Г-С-2,4Х50 (ГОСТ 2283–79, плавка 014929).

В таблице 3.12 приведены показатели механических характеристик исследуемых образцов пластин колебателя из стали 65Г (приведены средние значения для двух образцов).

Таблица 3.12 – Механические характеристики пластин колебателя из стали 65Г

Характеристика	Образцы № 7, 8	Образцы № 12, 13	Образцы № 18, 19	ГОСТ 14959–16
σ_b , МПа	650	1571	1001	980
$\sigma_{0,2}$, МПа	510	1217	750	785
δ_4 , %	4,1	1,7	1,2	12
Твердость, HRC		52	42	
K_δ	0,3602	0,3647	0,3656	0,3446
σ_{-1} , МПа	390	948	605	575
П	1,27	1,29	1,33	1,25

Примечание: приведено значение δ_5 , которое при данном уровне показателя в первом приближении можно считать равным δ_4 [95].

(В расположенной далее в тексте таблице 3.13 будут приведены данные для стали 65Г, прошедшей термическую обработку по ГОСТ 14959–2016.)

Основная цель данного исследования состоит в определении режима ТО, который обеспечивал бы, наряду с повышением прочности материала резонатора, увеличение его пластичности с целью снижения чувствительности деталей к концентраторам напряжений в виде возникающих в процессе работы трещин. Помимо простых показателей пластичности δ и Ψ , необходимо рассматривать более сложные, которые учитывали бы сопротивление деформации. Одним из таких показателей является коэффициент пластичности K_δ , определяемый из следующего соотношения [95]:

$$K_\delta = (1 - \delta)^{1/8}. \quad (3.4)$$

Значения коэффициента пластичности K_δ для различных состояний пластин колебателя из стали 65Г приведены в таблице 3.12 и рисунке 3.7. Видно, что по своему значению рассматриваемые режимы ТО и состояние поставки имеют достаточно близкие значения. Наибольшее значение параметра пластичности реализуется при ТО стали 65Г по режиму 2 образцов № 18 и 19. То есть сталь 65Г, термически обработанная по данной схеме, обладает наименьшей чувствительностью к концентраторам напряжения из числа образцов, исследуемых в данной работе. ТО по ГОСТ 14959–16 дает наименьшее значение коэффициента пластичности.

Кроме этого, в таблице 3.12 были приведены значения предела выносливости σ_{-1} для рассматриваемых режимов ТО, величина которого определялась из соотношения [95]:

$$\sigma_{-1} = K_\delta^{0.5} \cdot \sigma_b. \quad (3.5)$$

Следует отметить, что оба исследованных режима ТО обеспечивают повышение предела выносливости стали 65Г по отношению к состоянию поставки более чем в 2 раза. Последнее обстоятельство говорит о том, что детали (в рассматриваемой работе это резонатор), изготовленные из материала, прошедшего дополнительную термическую обработку, обладают более высоким ресурсом работы. ТО по ГОСТ 14959–16 за счет высокого уровня

предела прочности дает более низкий уровень предела выносливости. Однако низкий показатель пластичности в данном случае также оказывает отрицательное влияние из-за большей чувствительности к различного рода концентраторам.

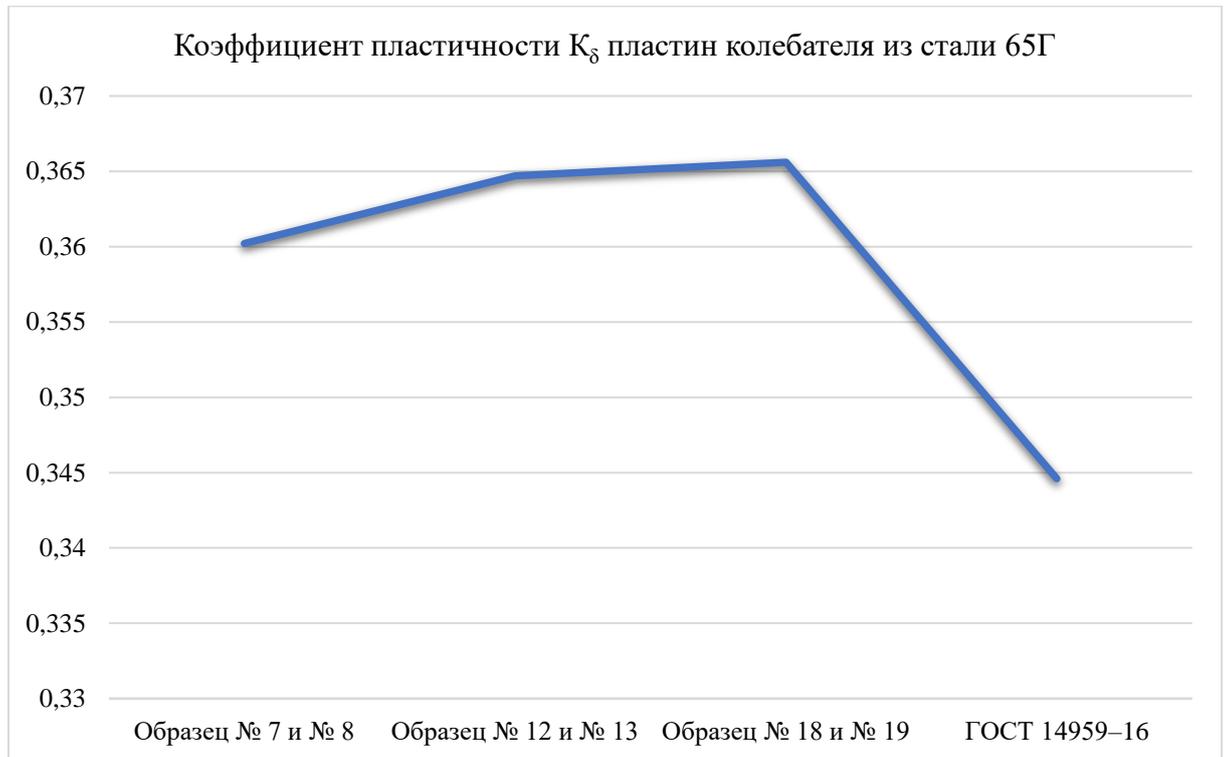


Рисунок 3.7 – Сравнительная характеристика коэффицента пластичности K_δ пластин колебателя из стали 65Г

Определяя режим термической обработки, который обеспечивал бы повышение пластичности материала с целью снижения чувствительности деталей к концентраторам напряжений, включая возникающие в процессе работы трещины, выведем, помимо коэффицента пластичности K_δ , показатель более простой в расчете, но учитывающий сопротивление деформации. Одним из таких показателей является параметр Π , определяемый по формуле

$$\Pi = \frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}} - \delta. \quad (3.6)$$

Значение параметра Π приведено в таблице 3.12. и на рисунке 3.8. Видно, что наибольшее значение параметра пластичности реализуется при термической обработке, стали 65Г по режиму 2 для образцов № 18 и 19.

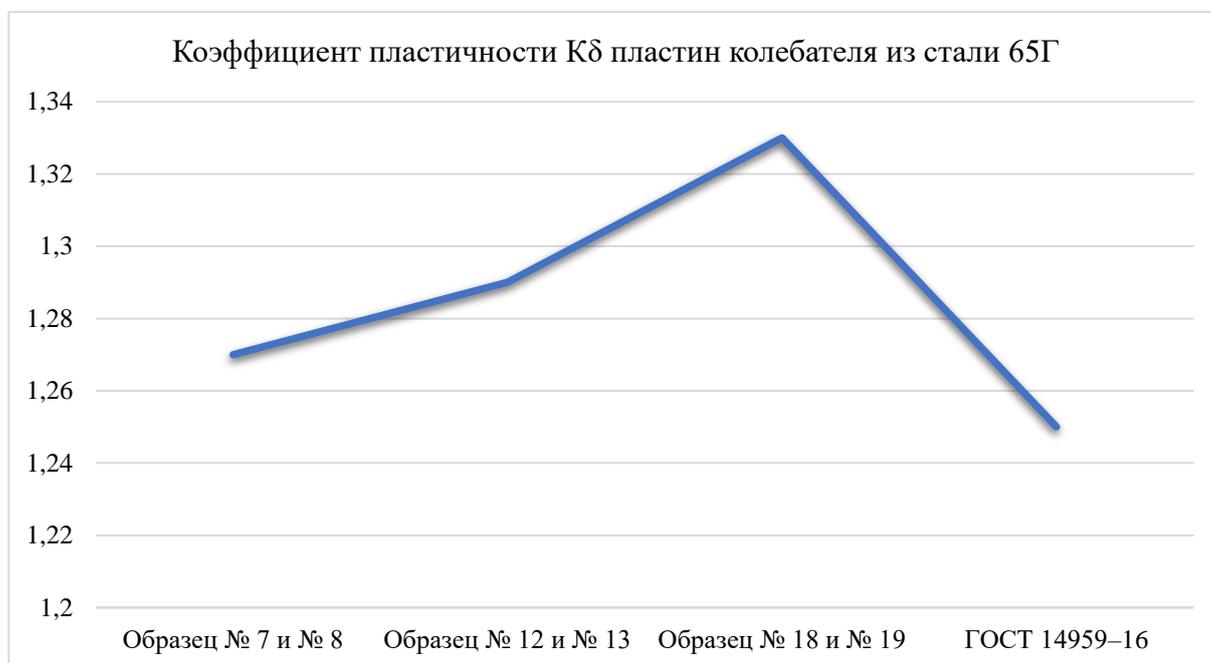


Рисунок 3.8 – Сравнительная характеристика параметра пластичности Π пластин колебателя из стали 65Г

3.1.3. Результаты исследования пластин колебателя из стали 65С2ВА с разными режимами термической обработки

Для исследований использовались образцы в трех состояниях, связанных с режимами ТО, которая проводится для повышения пластичности пластин колебателя из стали 65С2ВА;

- состояние 1 – состояние поставки, лента холоднокатаная, без дополнительной ТО (образцы № 14 и 15);
- состояние 2 – ТО по режиму 1 (образцы № 16 и 17);
- состояние 3: ТО по режиму 2 (образцы № 9 и 10).

Режимы ТО представлены в таблице 3.13.

Режим ТО по ГОСТ 14959–16 обеспечивал следующие уровни механических характеристик:

- условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 1860$ МПа;
- предел прочности $\sigma_b = 1665$ МПа;
- относительное удлинение при разрыве $\delta_5 = 5$ %;
- относительное сужение $\Psi = 20$ % (определено на цилиндрических образцах).

Таблица 3.13 – Режимы ТО заготовок резонирующих пластин

Образцы № 5, 6	Образцы № 3, 4. Режим 1	Образцы № 1, 2. Режим 2	ГОСТ 14959–16 Режим ГОСТ
Без термической обработки	Закалка в соляной ванне: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 860 °С; • нагрев до $T = 860\text{--}870$ °С; • выдержка с получением температуры 1 мин; • охлаждение в масле, качать 	Отжиг в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 600 °С; • нагрев до $T = 650\text{--}670$ °С; • выдержка при максимальной температуре 30 мин; • охлаждение с печью со скоростью 50°/ч до температуры 280 °С и далее на воздухе 	Закалка 835–865 °С, охлаждение в масле
–	Отпуск в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 300 °С; • нагрев до $T = 350\text{--}370$ °С; • выдержка при максимальной температуре не менее 4 ч; • охлаждение на воздухе 	Закалка в соляной ванне: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 860 С; • нагрев до $T = 860\text{--}870$ °С; • выдержка при максимальной температуре 1 мин; • охлаждение в масле, качать 	Отпуск 450–510 °С, охлаждение на воздухе
–	–	Отпуск в электропечи: <ul style="list-style-type: none"> • температура посадки не более 400 С; • нагрев до $T = 400\text{--}420$ °С; • выдержка при максимальной температуре не менее 4 ч; • охлаждение на воздухе 	–

В таблице 3.14 представлен химический состав стали 65С2ВА по ГОСТ 14959–2016 и фактический, определенный на образцах из плавки ЗК1324.

Таблица 3.14 – Химический состав стали 65С2ВА

Содержание элемента, %									
С	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	W	Al
Требование ГОСТ 14959-2016									
0,61–0,69	0,70–1,00	1,50–2,00	≤0,025	≤0,025	≤0,30	≤0,25	≤0,20	0,80–1,20	–
Фактический состав плавки 3К1324									
0,67	0,86	1,7	0,007	0,004	0,17	0,13	0,02	0,87	0,005

Как видим, химический состав поставленной стали соответствует требованиям стандарта.

Результаты металлографических исследований представлены в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Результаты металлографических исследований

Вид контроля	Номер образца		
	5, 6	3, 4	1, 2
Глубина обезуглероженного слоя, мм	0,03	0,04	0,04
Степень полосчатости	Отсутствует		
Величина зерна по ГОСТ 5639–82	4–5 баллов по шкале 1	7–8 баллов по шкале 1	8 баллов по шкале 1

Описание микроструктуры образцов по ГОСТ 8233–56 приведено в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Микроструктура образцов

Номер образца	Описание
5	Зернистый перлит, 8–9 баллов по шкале 2
6	
3	Мелкоигольчатый мартенсит отпуска, 3 балла по шкале 3
4	
1	Смесь цементита пластинчатого и весьма мелкоигольчатого мартенсита отпуска, 2 балла по шкале 3
2	

Сталь 65С2ВА относится к перлитному классу. В процессе отпуска при температуре 80–300 °С формируется структура отпущенного мартенсита. То есть микроструктура образцов соответствует проведенной ТО.

Описание микротвердости образцов приведено в таблице 3.17. Сравнительная характеристика микротвердости представлена на рисунках 3.9 и 3.10.

Таблица 3.17 – Микротвердость образцов

Расстояние от поверхности, мм	65С2ВА, плавка № 3К1324					
	Образцы № 5, 6. Без термообработки		Образцы № 3, 4. Режим 1		Образцы № 1, 2. Режим 2	
	Микротвердость, НV 0,05					
	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2	Сторона 1	Сторона 2
0,02	206	206	294	320	299	332
0,03	232	226	494	433	299	351
0,04	247	232	401	471	404	360
0,06	255	247	511	498	420	366
0,08	262	255	511	498	421	367
0,1	268	262	529	529	428	373
0,12	276	268	529	494	433	376
0,14	292	292	529	494	476	494
0,16	298	298	529	494	478	494
0,18	298	298	511	511	494	494
0,2	298	298	529	529	494	494

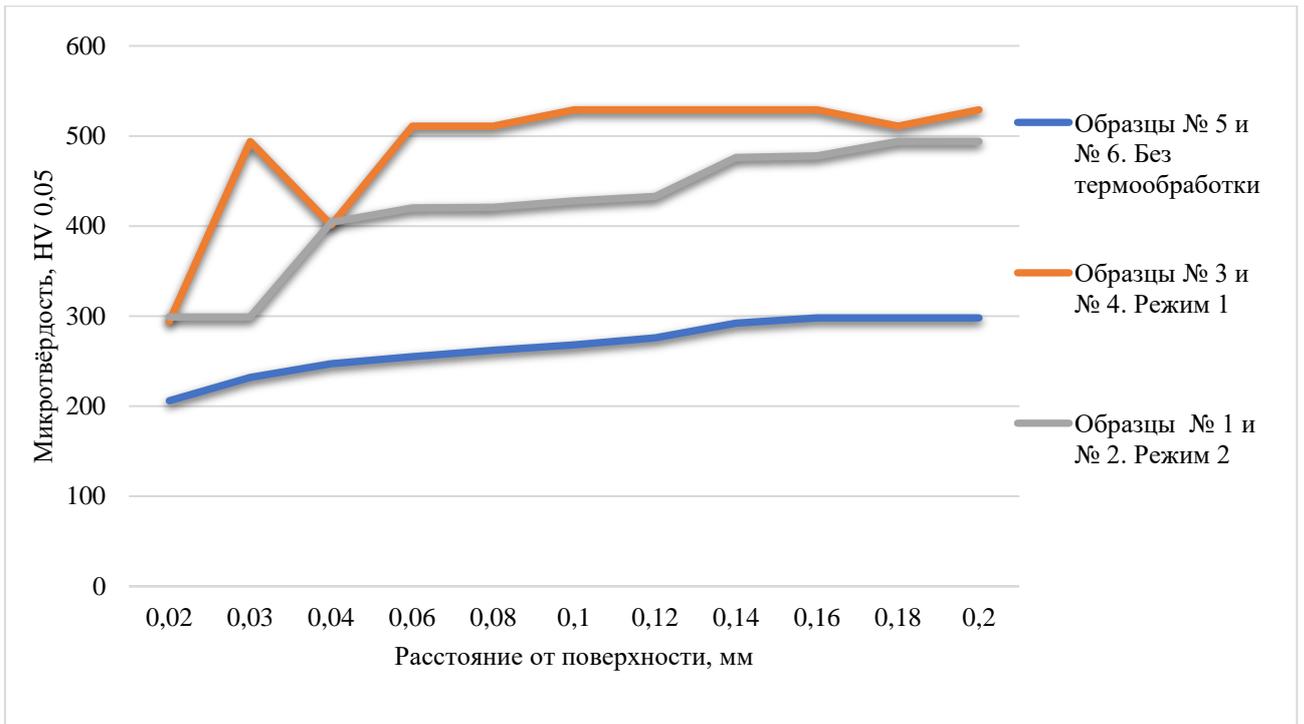


Рисунок 3.9 – Сравнительная характеристика микротвердости по стороне 1

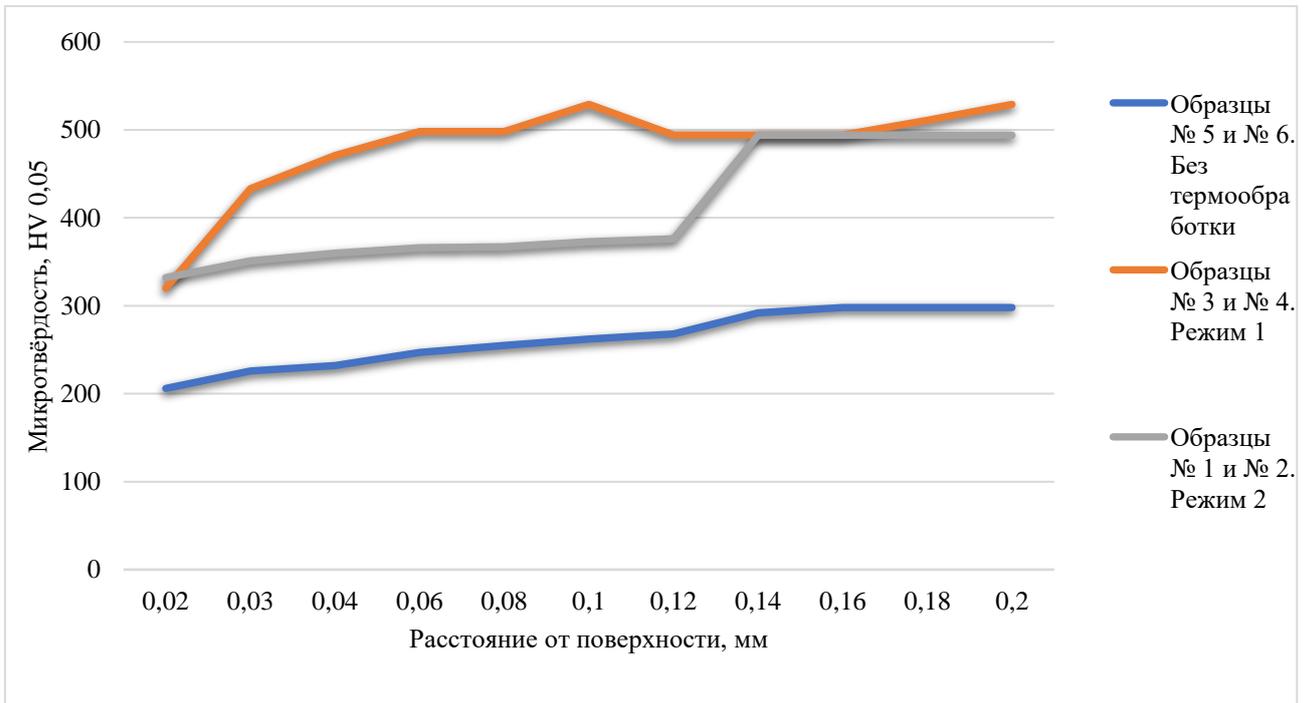


Рисунок 3.10 – Сравнительная характеристика микротвердости по стороне 2

Результаты замеров микротвердости показывают зависимость ее снижения после ТО на толщине обезуглероженного слоя исследуемых пластин

колебателя из стали Лента 65С2ВА-ТШ-С-3,ОХ30 (ГОСТ 2283–79, номер плавки 3К1324).

В таблице 3.18 представлены показатели механических характеристик исследуемых образцов пластин колебателя из стали 65С2ВА (приведены средние значения для двух образцов).

Таблица 3.18 – Механические характеристики пластин колебателя из стали 65С2ВА

Характеристика	Образцы № 5, 6	Образцы № 3, 4	Образцы № 1, 2	ГОСТ 14959–16
σ_b , МПа	673	1905	1492	1860
$\sigma_{0,2}$, МПа	520	1510	1132	1665
δ_4 , %	1,8	1,3	1,2	5
Твердость, HRC		51	40–43	
K_δ	0,3645	0,3654	0,3656	0,3584
σ_{-1} , МПа	406	1151	902	1113
П	1,29	1,26	1,32	1,12

Примечание: приведено значение δ_5 , которое при данном уровне показателя в первом приближении можно считать равным δ_4 [95].

В целях сравнения в таблице 3.18 приведены данные для стали 65С2ВА, прошедшей термическую обработку по ГОСТ 14959–2016.

Основная цель данного исследования состоит в определении режима ТО, который обеспечивал бы, наряду с повышением прочности материала резонатора, улучшение его пластичности с целью снижения чувствительности деталей к концентраторам напряжений в виде возникающих в процессе работы трещин. Помимо простых показателей пластичности δ и Ψ , необходимо рассматривать более сложные, которые учитывали бы сопротивление деформации. Одним из таких показателей является коэффициент пластичности K_δ , определяемый из следующего соотношения [95]:

$$K_\delta = (1 - \delta)^{1/\delta}. \quad (3.6)$$

Значения коэффициента пластичности K_δ для различных состояний материала приведены в таблице 3.18 и на рисунке 3.11. Видно, что по своему значению рассматриваемые режимы ТО и состояние поставки имеют достаточно близкие значения. Наибольшее значение параметра пластичности реализуется при ТО стали 65С2ВА по режиму 2 для образцов 18 и 19. То есть сталь 65С2ВА, термически обработанная по данной схеме, обладает наименьшей чувствительностью к концентраторам напряжения из числа образцов, исследуемых в данной работе. ТО по ГОСТ 14959–16 дает наименьшее значение коэффициента пластичности.

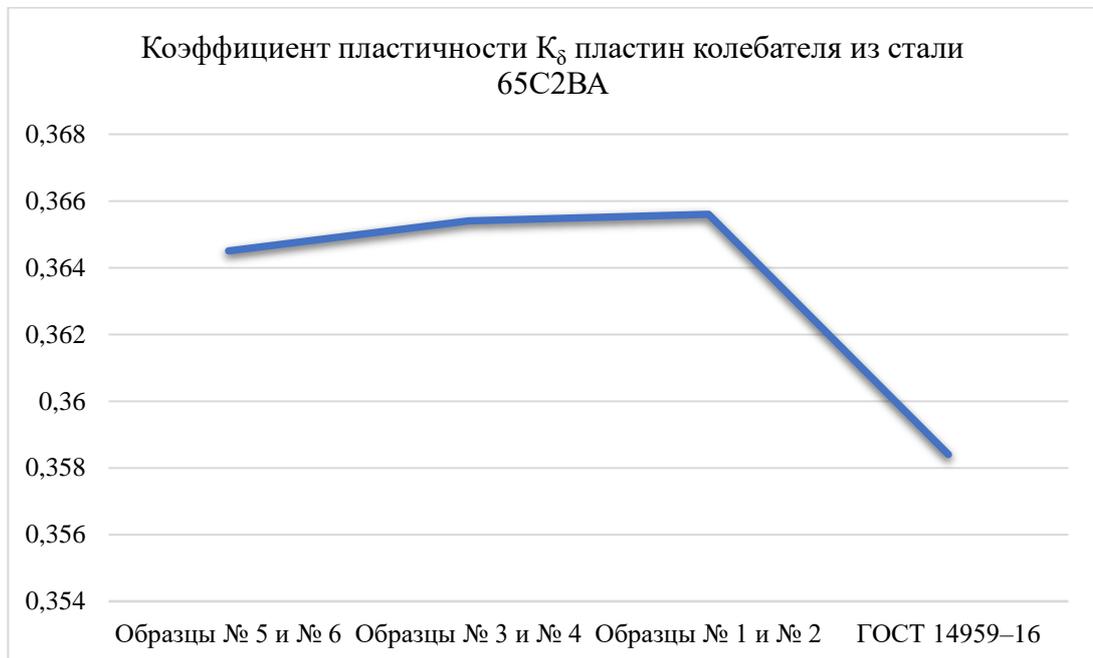


Рисунок 3.11 – Сравнительная характеристика коэффициента пластичности K_δ пластин колебателя из стали 65С2ВА

Кроме этого, в таблице 3.18 приведены значения предела выносливости σ_{-1} для рассматриваемых режимов ТО, величина которого определялась из следующего соотношения [95]:

$$\sigma_{-1} = K_\delta^{0,5} \cdot \sigma_b. \quad (3.7)$$

Следует отметить, что оба исследованных режима ТО обеспечивают повышение предела выносливости стали 65С2ВА по отношению к состоянию поставки более чем в 2 раза. Последнее обстоятельство говорит о том, что детали (в рассматриваемой работе это резонатор), изготовленные из материала,

прошедшего дополнительную ТО, обладают бóльшим ресурсом работы. ТО по ГОСТ 14959–16 за счет высокого уровня предела прочности дает и более высокий уровень предела выносливости. Но низкий показатель пластичности в данном случае несколько уменьшает положительное влияние данного фактора из-за большей чувствительности к различного рода концентраторам.

При определении режима термической обработки, который обеспечивал бы повышение пластичности материала с целью снижения чувствительности деталей к концентраторам напряжений, включая возникающие в процессе работы трещины, выведем, помимо коэффициента пластичности K_δ , показатель более простой в расчете, но учитывающий сопротивление деформации. Одним из таких показателей является параметр Π , определяемый из соотношения

$$\Pi = \frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}} - \delta. \quad (3.8)$$

Значение параметра Π приведено в таблице 3.18 и на рисунке 3.12. Видно, что наибольшее значение параметра пластичности реализуется при ТО, стали 65С2ВА по режиму 2 для образцов № 1 и 2.



Рисунок 3.12 – Сравнительная характеристика параметра пластичности Π пластин колебателя из стали 65С2ВА

**3.1.4. Результаты исследования пластин колебателя
из стали 60С2А, 65Г и 65С2ВА с разными режимами
термической обработки**

Проведенные исследования пластин колебателя из сталей марок 60С2А, 65Г и 65С2ВА с разными режимами ТО показали, что наиболее предпочтительным режимом ТО является режим 2, характеризующийся следующим образом:

- Отжиг в электропечи: температура посадки не более 600 °С, с последующим нагревом до $T = 650\text{--}670$ °С и выдержкой при максимальной температуре в течение 30 минут. Охлаждение с печью со скоростью 50 °С/ч до температуры 280 °С и далее на воздухе.

- Закалка в соляной ванне: температура посадки не более 860 °С, с последующим нагревом до $T = 860\text{--}870$ °С и выдержкой при максимальной температуре в течение 1 минуты. Охлаждение в масле, качать.

- Отпуск в электропечи: температура посадки не более 400 °С, с последующим нагревом до $T = 400\text{--}420$ °С и выдержкой при максимальной температуре не менее 4 часов. Охлаждение на воздухе.

При данном режиме наблюдается самый высокий показатель пластичности у исследуемых образцов, что свидетельствует о наименьшей чувствительности к концентраторам напряжения пластин колебателя.

Данные таблицы 3.19 и рисунков 3.13, 3.14 показывают, что из исследуемых пластин колебателя наиболее высокими характеристиками пластичности обладает пластина колебателя из стали 60С2А.

Таблица 3.19 – Механические характеристики пластин колебателя из различных марок сталей

Характеристика	Пластина колебателя из стали		
	65Г	60С2А	65С2ВА
σ_b , МПа	1001	1221	1492
$\sigma_{0,2}$, МПа	750	850	1132
δ_4 , %	1,2	1,1	1,2
Твердость, НРС	42	29–39	40–43
K_δ	0,3656	0,3658	0,3656
σ_{-1} , МПа	605	739	902
П	1,33	1,42	1,32

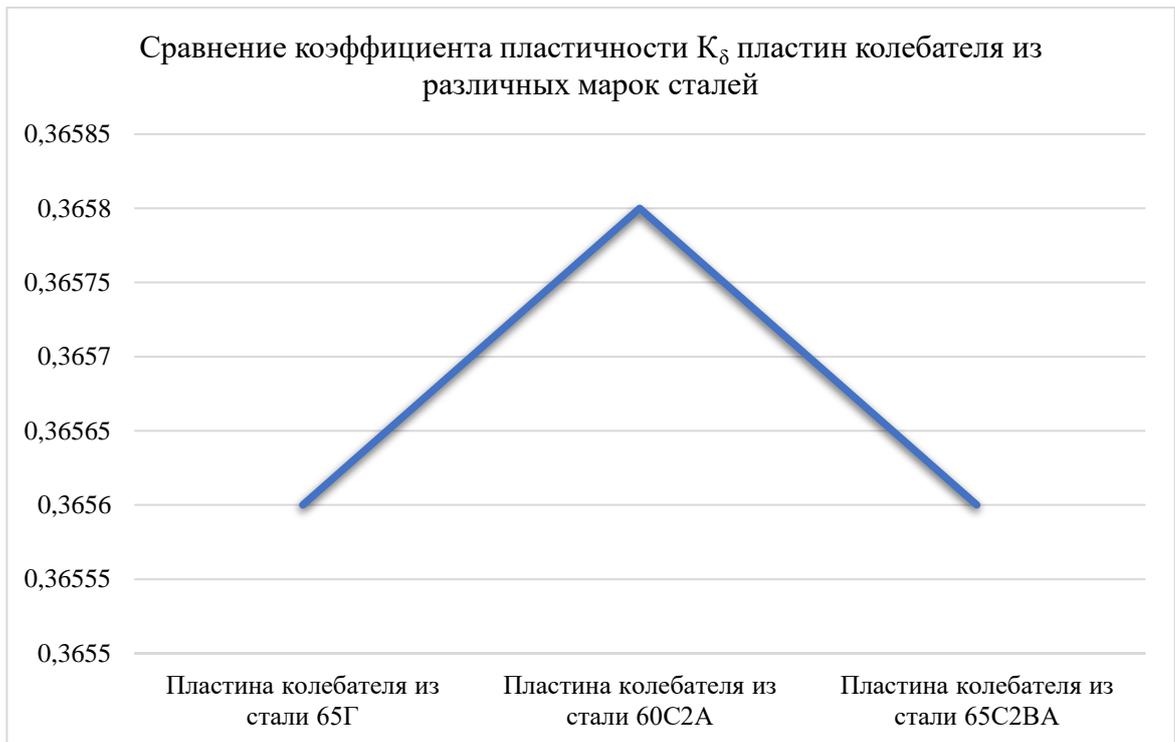


Рисунок 3.13 – Сравнительная характеристика коэффициента пластичности K_δ пластин колебателя из различных марок сталей

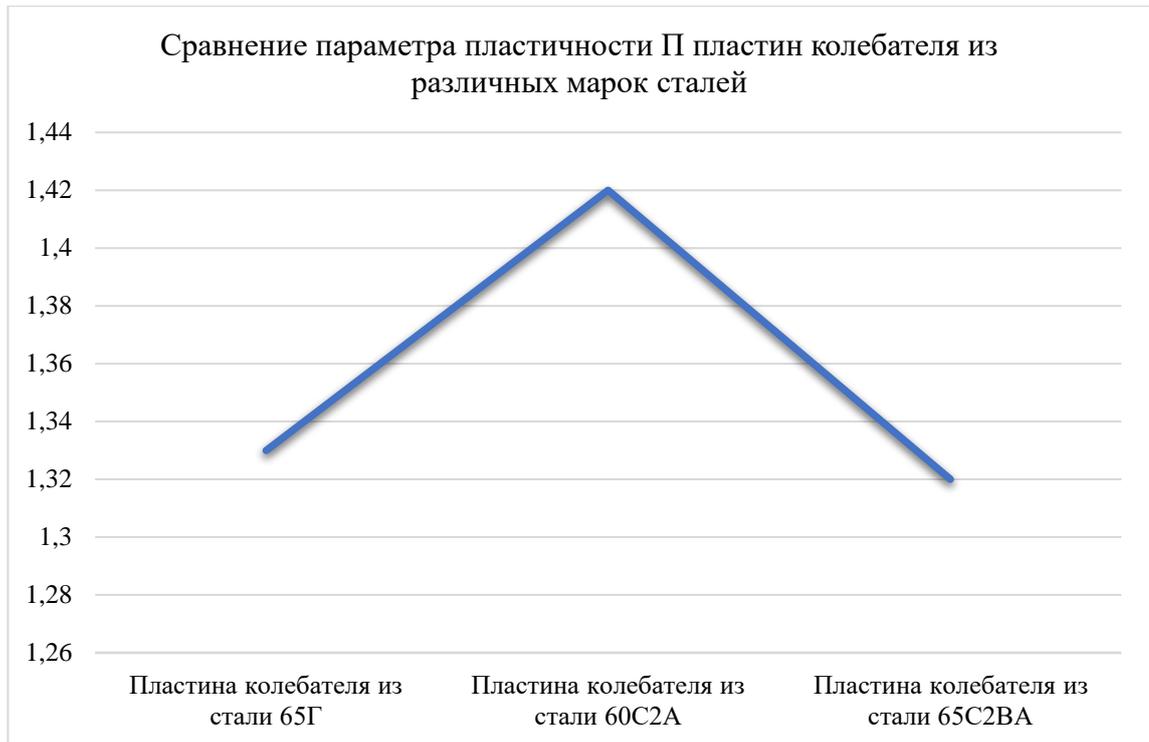


Рисунок 3.14 – Сравнительная характеристика параметра пластичности Π пластин колебателя из различных марок сталей

Поэтому для дальнейших исследований на многоцикловую усталость при чистом повторно-переменном изгибе подвергаем образцы пластины колебателя из стали 60С2А подвергнутые термической обработке по режиму 2.

3.2. Результаты стендовых испытаний опытного образца бурильной головки

Стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительному анализу резонансных характеристик опытного образца бурильной головки установки ГНБ со встроенным внутри генератором ГК в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами колебателей и струеформирующих насадок, были проведены на стенде (рисунок 3.15), представляющем собой насосную станцию высокого давления мультипликаторного типа 1, емкость с грунтом 2, подвижную каретку 3 с возможностью крепления испытуемого образца породоразрушающего

инструмента, осуществляющую рабочие перемещения вдоль поверхности грунта посредством гидроцилиндра 4 с задаваемой скоростью.



Рисунок 3.15 – Стенд для испытаний опытного образца бурильной головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами колебателей

Результаты проведенных испытаний подтвердили работоспособность разработанного бурильного инструмента и позволили определить резонансные режимы работы колебателей (таблица 3.20).

Таблица 3.20 – Резонансные режимы работ колебателей

№ п/п	Кол-во насадок	Резонансная частота, Гц	Амплитуда колебаний, мм
1	2	1340	2,0
2	3	1450	1,5
3	4	1260	2,1
4	5	1380	2,2

Таким образом, реализация полученных режимов работы колебателя, встроенного в бурильную головку, обеспечит функционирование породоразрушающего инструмента с наименьшей энергоемкостью в режимах, определяемых возможностями насосного оборудования установки ГНБ.

Экспериментальные данные легли в основу последующих расчетов долговечности пластин колебателя генератора гидродинамических колебаний, встроенного в бурильную головку.

На рисунке 3.16 представлены изготовленный опытный образец бурильной головки со встроенным генератором ГК (рис. 3.16, *а*) и колебатели с количеством резонирующих пластин в 5, 4, 3 и 2 штук (рис. 3.16, *б–д*).

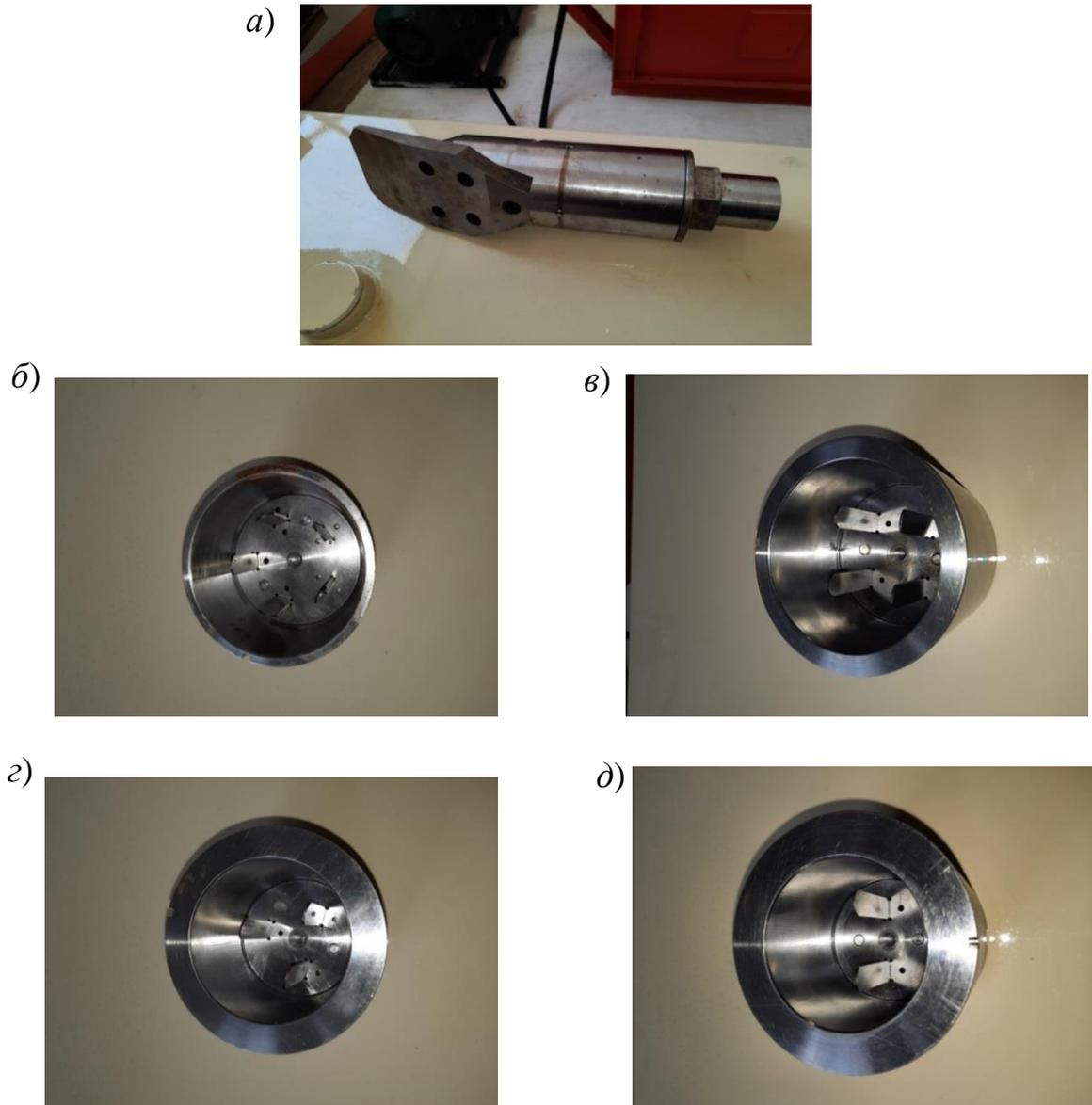


Рисунок 3.16 – Опытный образец рабочей головки со встроенным внутри генератором ГК: *а* – в сборе; *б* – генератор вибрационных колебаний с пятью пластинами; *в* – генератор вибрационных колебаний с четырьмя пластинами; *г* – генератор вибрационных колебаний с тремя пластинами; *д* – генератор вибрационных колебаний с двумя пластинами

На рисунке 3.17 представлена амплитудно-частотная характеристика работы колебателей генератора гидродинамических колебаний при подаче бурового раствора.

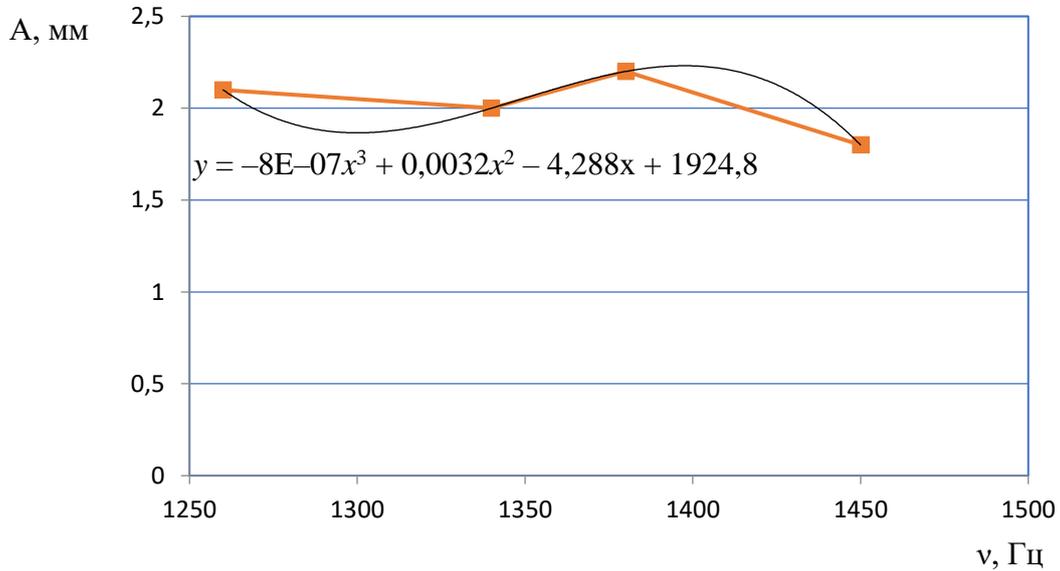


Рисунок 3.17 – Амплитудно-частотная характеристика работы колебателей

Анализ представленных на рисунке 3.17 экспериментальных данных позволил получить уравнение аппроксимирующей кривой, имеющее вид полинома третьей степени:

$$y = -8E-07x^3 + 0,0032x^2 - 4,288x + 1924,8, \quad (3.9)$$

где y – амплитуда колебаний пластины, мм; x – резонансная частота, Гц.

Кривая зависимости амплитуды колебаний пластины генератора от частоты имеет ярко выраженную область наибольших значений амплитуды при резонансной частоте, составляющей 1400 Гц.

3.3. Анализ усталостной прочности пластины колебателя бурильной головки

Анализ циклической прочности лепестков колебателей из состава бурильной головки выполнен на основе экспериментальных данных по амплитудам их колебаний.

Конструкция бурильной головки, работа которой основана на принципе Польмана – Яновского, подразумевает, что лепестки под воздействием струи рабочей жидкости входят в резонанс (так как струе жидкости происходят автоколебания давления), а резонанс в лепестках вызывает вибрацию лопатки, вследствие чего значительно снижается усилие сопротивления в процессе основной работы бурильной установки.

Целями анализа являются:

- оценка долговечности лепестков при работе в резонансном режиме;
- проработка плана мероприятий по доработке конструкции лепестков.

Исходные данные для оценки усталостной прочности лепестков приняты на основе экспериментальных данных с аналогичными конструкциями бурильных головок. Согласно указанным исходным данным, диапазон амплитуд колебаний кончика лепестка (представляет собой пластинку толщиной 2,5 мм и площадью поперечного сечения $71,5 \text{ мм}^2$) составляют от 1,5 до 2,2 мм на резонансной частоте в зависимости от формы насадки.

Для анализа нагрузок выполнена предварительная оценка давлений, действующих на пластинку колебателя, для которой имеются экспериментальные данные.

В результате определено, что для обеспечения колебаний исходной пластинки на 5,5 мм необходимо создать давление 395 кПа.

Примечание. При расчете значение относительного коэффициента демпфирования принято 0,04 (от критического).

Для оценки параметров напряженно-деформированного состояния, реализующихся в лепестке колебателя, построена конечно-элементная модель в программном комплексе Ansys Workbench. Конечно-элементная модель представлена на рисунке 3.18.

Предварительным модальным анализом установлено, что частота первого тона собственных изгибных колебаний лепестка с длиной консоли 40 мм

находится в диапазоне 1340–1450 Гц в зависимости от принятого относительного коэффициента демпфирования.

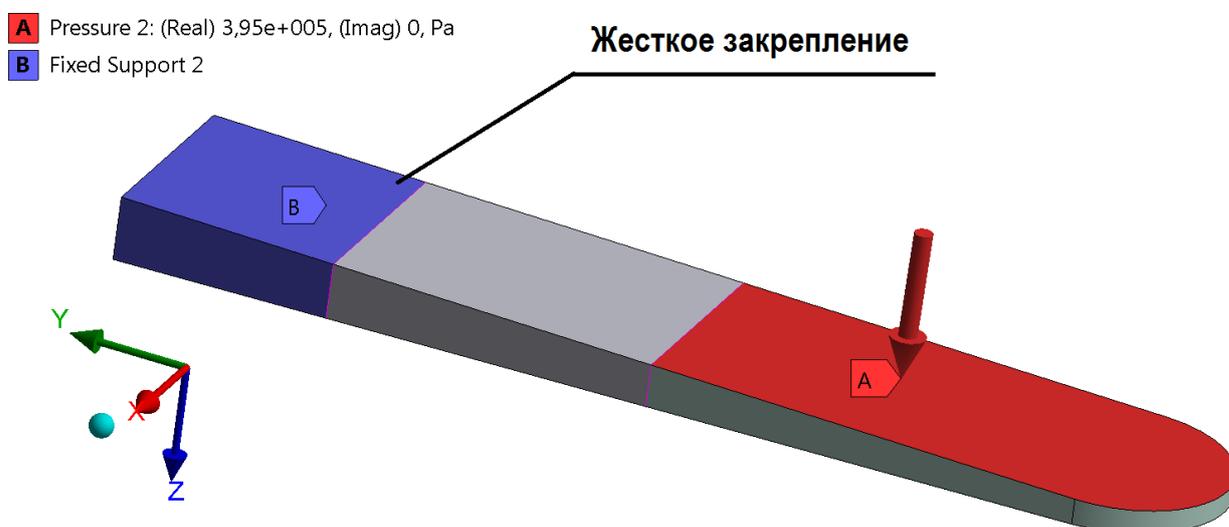


Рисунок 3.18 – КЭМ лепестка и схема его нагружения

Анализ параметров напряженно-деформированного состояния выполнен в модуле Harmonic Response. Напряженно-деформированное состояние лепестка приведено на рисунке 3.19.

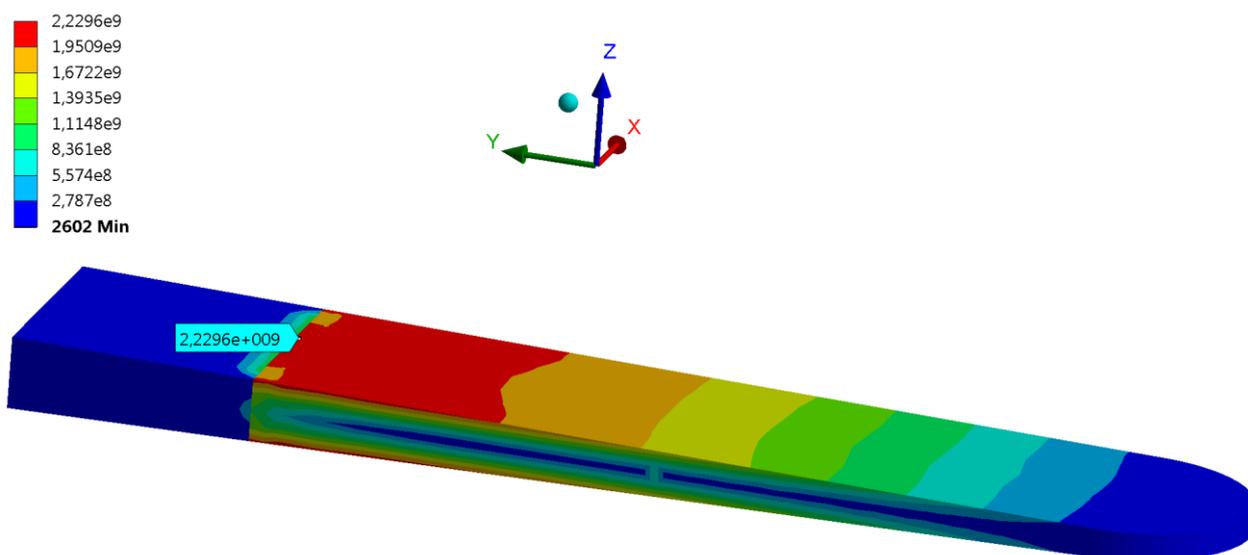


Рисунок 3.19 – Поле нормальных напряжений лепестка, Па

Из полученных результатов видно, что расчетные нормальные напряжения, реализующиеся в лепестке, значительно превышают не только предел выносливости стали 60С2А, но и ее временное сопротивление (при расчете в упругой области).

Деформация кончика лепестка 6,2 мм.

Учитывая, что условия нагружения лепестков при расчете методом конечных элементов были реализованы по большей части «интуитивно», ввиду отсутствия достаточных экспериментальных данных (в частности, по распределению поля давлений на поверхности лепестков). Ниже выполнена оценка долговечности для лепестка из стали 60С2А, проведенная в зависимости от амплитуды деформаций его кончика (в такой постановке результаты расчета не зависят от поля давлений, действующих на лепестки колебателя). Оценка параметров долговечности выполнена на основании стандартной степенной зависимости долговечности от амплитуды цикла напряжений

$$N(\sigma) = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^m, \quad (3.10)$$

где $N_0 = 5\,000\,000$ – база испытаний с уровнем напряжений σ_{-1} ;

$\sigma_{-1} = 739$ МПа – предел выносливости стали 60С2А (согласно проведенным испытаниям);

$m = 17,1$ – параметр степени.

Примечание. Параметр степени m для степенной зависимости принят для базы испытаний в пять миллионов циклов с уровнем напряжений, соответствующих пределу выносливости, и для мгновенного разрушения за один цикл в случае достижения уровня напряжений не менее временного сопротивления (1570 МПа).

Полученные результаты показывают, что для увеличения срока службы свыше 10 000 часов необходимо обеспечить амплитуду колебаний кончика лепестка не более 1,1 мм при сохранении его текущей конструкции. При этом

остается неясным, насколько это допустимо с точки зрения обеспечения необходимых значений амплитуд колебаний лопатки бурильной головки.

Зависимость долговечности работы лепестка в резонансном режиме от амплитуды колебаний его кончика представлена на рисунке 3.20.

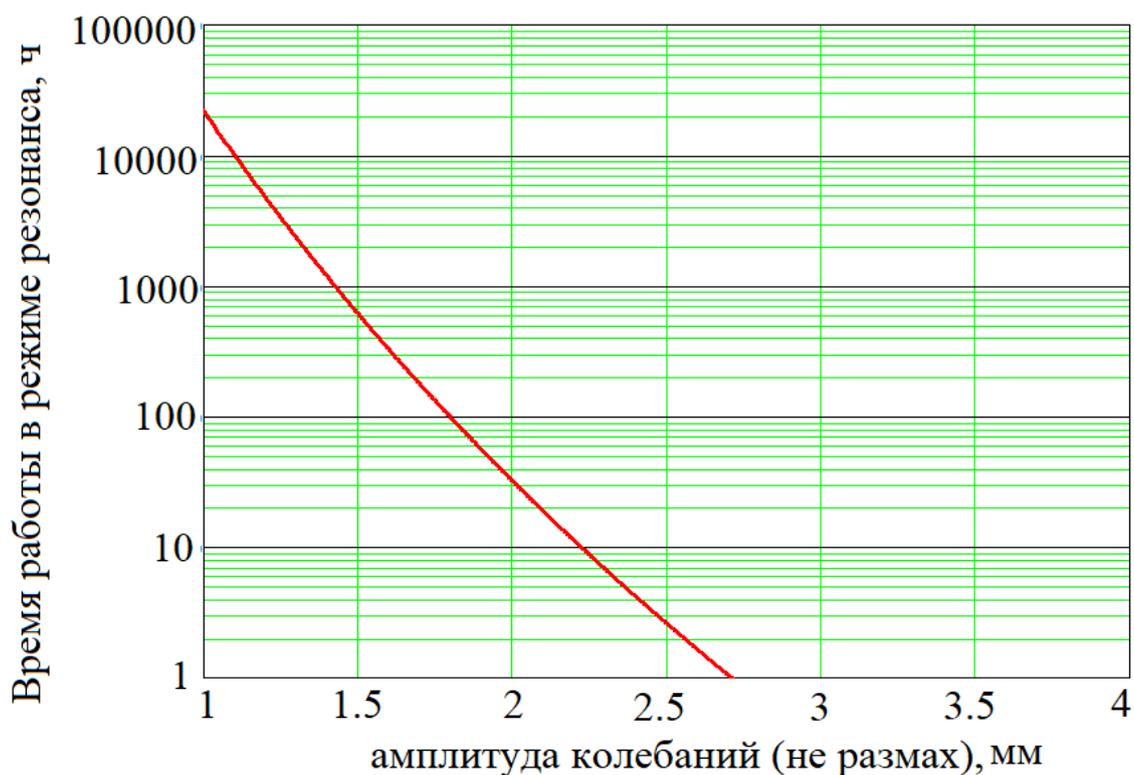


Рисунок 3.20 – Зависимость долговечности работы лепестка в резонансном режиме от амплитуды колебаний его кончика

Таким образом, можно констатировать следующее:

1. По результатам расчетов определено, что напряженно-деформированное состояние, возникающее в лепестках при текущих режимах, не удовлетворяет условию обеспечения их усталостной прочности.

2. В дальнейшем планируется проработка конструкции лепестка, обеспечивающая, с одной стороны, достаточную амплитуду колебаний бурильной головки, а с другой – усталостную прочность самого лепестка. Для этого необходимо:

- построить конечно-элементную модель бурильной головки на основе полученных экспериментальных данных;
- выполнить оценку отклика лопатки для конструкции, по которой есть экспериментальные данные;
- подобрать геометрические параметры лепестков и их необходимое количество, обеспечивающее достаточность амплитуды колебаний лопатки и их усталостную прочность.

3.4. Анализ усталостной прочности пластины колебателя бурильной головки

Принимая во внимание тот факт, что физика рассматриваемого процесса не изучена в достаточной степени, не представляется возможным однозначно подобрать условия нагружения и математическую модель бурильной головки, которые обеспечили бы максимальное соответствие реально протекающим в конструкции физическим процессам. Для ухода от неопределенности в качестве модели бурильной головки принимается линеаризованная КЭМ. В таком случае в качестве модели воздействия выступает гармоническое кинематическое воздействие на элементы геометрии КЭМ, а критерием соответствия физике процесса принимается отклик лопатки бурильной головки, который, согласно экспериментальным данным, составляет по амплитуде перемещений 1,5–2,2 мм.

Таким образом, цель данного раздела состоит в формировании представления о вероятной долговечности лепестков с учетом схемы приложения кинематического воздействия на бурильную головку, а также в рассмотрении целесообразности изменения конструкции лепестков.

Для выполнения расчетов построено несколько КЭМ бурильного инструмента, различающихся только геометрическими параметрами лепестков. Общий вид КЭМ показан на рисунке 3.21. Параметры демпфирования в КЭМ приняты с тем, чтобы соответствовать относительному коэффициенту

демпфирования, равному 0,03. С учетом выведенных схем нагружения введена следующая система условных обозначений КЭМ:

- 1) исходная геометрия, колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, трясем за консоль;
- 2) исходная геометрия, колебания лопатки $\approx 1,5$ мм, трясем за консоль;
- 3) исходная геометрия, колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, трясем за корпус;
- 4) исходная геометрия, колебания лопатки $\approx 1,5$ мм, трясем за корпус;
- 5) колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, лепесток выполнен равномерно более тонким ($-0,2$ мм по нормали с каждой стороны, т. е. от толщины 0,6 идем к толщине 2,6), трясем за консоль;
- 6) колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, лепесток из перечисления (5), трясем за корпус;
- 7) колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, лепесток неравномерно более тонкий (вместо угла 1:50, угол наклона 1:66, т.е. от толщины 1,0 идем к толщине 2.5 мм), трясем за консоль;
- 8) колебания лопатки $\approx 2,2$ мм, лепесток из перечисления 7), трясем за корпус.

Схемы нагружения КЭМ приведены на рисунках 3.22 и 3.23.

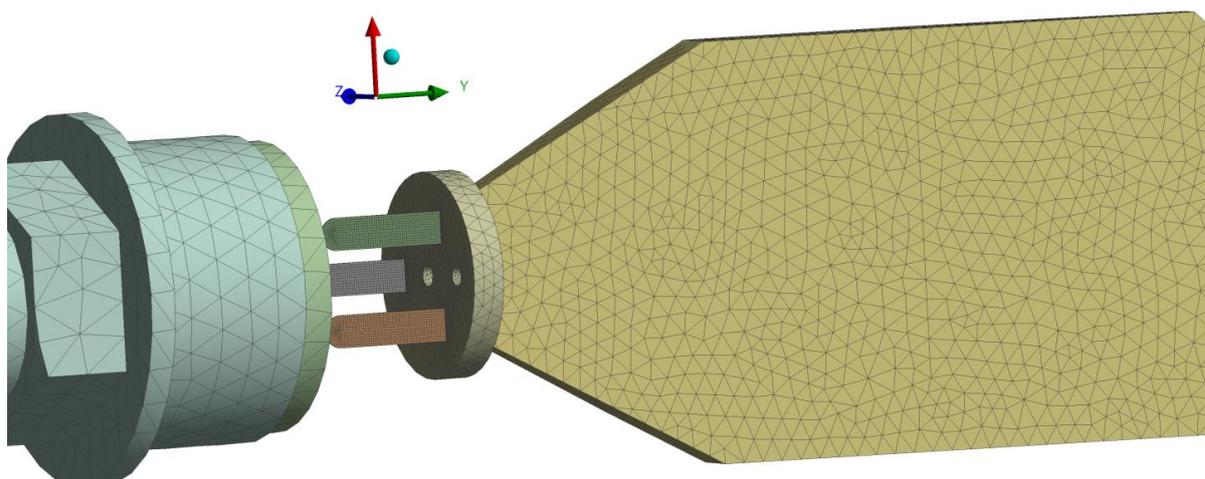


Рисунок 3.21 – КЭМ бурильной головки

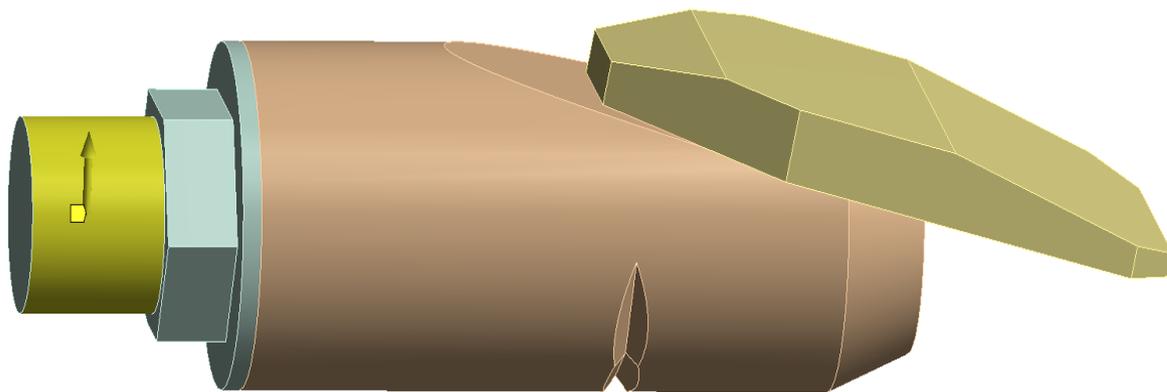


Рисунок 3.22 – Схема кинематического воздействия для КЭМ (1), (2), (5), (7)

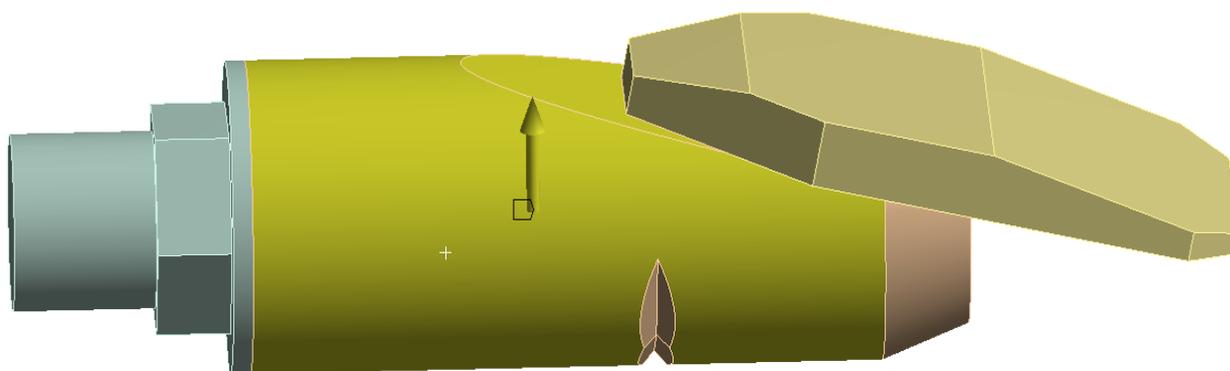


Рисунок 3.23 – Схема кинематического воздействия для КЭМ (3), (4), (6), (8)

Для оценки долговечности лепестков бурильной головки в качестве расчетной математической модели принималась степенная зависимость без учета участка для напряжений цикла ниже предела выносливости материала ($\sigma < \sigma_{-1}$):

$$N(\sigma) = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^m, \quad (3.11)$$

где N_0 – базовое число циклов испытаний (база испытаний); σ_{-1} – предел выносливости материала, соответствующий значению напряжений цикла, обеспечивающих неразрушение на базе испытаний N_0 с 50%-ной вероятностью; m – эмпирический показатель степени (определяется для двух значений σ и соответствующим им N в многоцикловой области).

Для вычисления параметра m используем экспериментальные данные для пластины колебателя из стали 60С2А, представленные в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Параметры для расчета кривой усталости пластины колебателя из стали 60С2А

База испытаний $N_0 (N_\sigma)$, тыс. циклов	Напряжения кручения на каждом цикле τ , МПа	Нормальное напряжение на каждом цикле σ , МПа	Результат испытаний	Обозначение
(90)	650	812,5*	Разрушение образца	$\sigma_{650,90K}$
(90)	600	750,0*		$\sigma_{600,90K}$
(180)	550	687,5*		$\sigma_{550,180K}$
3000	500	625,0*	Без разруш. образца	$\sigma_{-1.исп}$
10000	–	637,0**		$\sigma_{-1.мар}$

* Расчетные значения вычислены на основании выражения $\tau_{-1} = 0,8\sigma_{-1}$ для сталей с σ_b 1300 МПа. Однако аналогичная формула дается для чугунов – к примеру, в источнике [103], где $\tau_{-1} = (0,75...0,9)\sigma_{-1}$.

** Значение согласно [2] Марочник сталей и сплавов / М. М. Колосков, Е. Т. Долбенко, Ю. В. Каширский и др. / под общ. ред. А. С. Зубченко – М.: Машиностроение, 2001. 672 с.: ил.

Показатель степени m вычислен на основе поочередных сопоставлений пределов выносливости (исходный параметр) с экспериментальными значениями напряжений за цикл (вторичный параметр). Результаты расчета приведены в таблице 3.22.

Таблица 3.22 – Результаты расчета параметра m

Исходный параметр	Вторичный параметр	Расчетная база испытаний $N_0 (N_\sigma)$, тыс. циклов	Расчетное значение m	Примечание
$\sigma_{-1.мар}$	$\sigma_{550,180K}$	10 000 (180)	52,6	Значения >21 считаются нефизичными (см. пояснение на рисунке 3.24)
$\sigma_{-1.мар}$	$\sigma_{600,90K}$	10 000 (90)	28,8	
$\sigma_{-1.мар}$	$\sigma_{650,90K}$	10 000 (90)	19,4	–
$\sigma_{-1.мар}$	σ_b	10 000 (0,001)*	17,9	–
$\sigma_{-1.исп}$	$\sigma_{550,180K}$	3000 (180)	29,5	Значения >21

				считаются нефизичными (см. пояснение на рисунке 3.18)
$\sigma_{-1.исп}$	$\sigma_{600,90К}$	3000 (90)	19,3	–
$\sigma_{-1.исп}$	$\sigma_{650,90К}$	3000 (90)	13,4	–
$\sigma_{-1.исп}$	σ_b	3000 (0,001)*	16,2	–
Справочное значение по [1] для похожей стали 60С2А		5000	15,6	–

* В качестве допущения принято, что при достижении амплитудой цикла нагружения значения временного сопротивления разрушение конструкции происходит за один цикл нагружения.

Анализ таблицы 3.22 показывает, что наиболее значимые значения параметра m реализуются в диапазоне от 13,4 до 16,2 при базе испытаний в 3 млн циклов и 17,9 при базе испытаний в 10 млн циклов. Учитывая, что показатель степени m является котангенсом угла наклона кривой усталости в логарифмических координатах, очевидно, что чем меньше его значение, тем ниже значение долговечности при уменьшении амплитуды цикла напряжений. (См. пояснение на рисунке 3.24, где в качестве примера построены кривые выносливости при $m = 17$ и $m = 1$. Из рисунка видно, что при одних и тех же значениях напряжений цикла долговечность для $m = 1$ ниже.) Ввиду этого в запас расчета принято, что для базы испытаний в 3 млн циклов значение параметра m составляет 13,4.

Таким образом, расчет долговечности лепестков выполнен на основании двух наборов исходных данных:

- 1) для базы испытаний 10 млн циклов – согласно [102] и значению $m = 17,9$;
- 2) для базы испытаний 3 млн циклов – согласно данным натуральных испытаний образцов и значению $m = 13,4$.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.23.

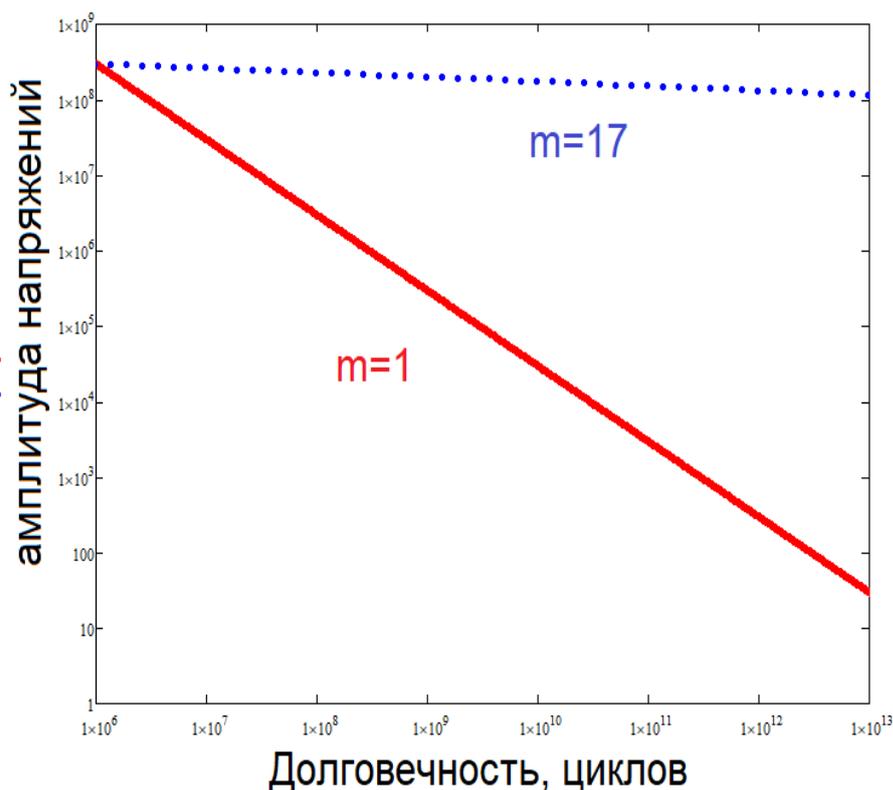
Рисунок 3.24 – Влияние параметра m на долговечность

Таблица 3.23 – Сводная таблица результатов

КЭМ	Амплитуда колебаний, мм		Собственная частота колебаний лепестка по первой изгибной форме, Гц	Максимальное расчетное значение эквивалентного напряжения в лепестке, МПа	Расчетная долговечность с 50%-ной обеспеченностью, ч	
	лопатки	лепестка			$m = 17,9;$ $N_0 = 10$ млн циклов	$m = 13,4;$ $N_0 = 3$ млн циклов
1	2,1	2,54	1550	800	Не более 10	
2	1,5	1,77		640		
3	2,2	1,19		440	24	59
4	1,5	0,8		300	22 480	9790
5	2,2	1,15	1366	320	7859	4604
6	2,2	1,22		339	2955	2216
7	2,2	0,54	1282	191	∞	
8	2,2	1,18		406	122	206

Примечание. Собственная частота колебаний лопатки лежит в диапазоне от 1550 до 1750 Гц, что может свидетельствовать о целесообразности снижения собственной частоты первой формы колебаний лепестков.

Расчетные оценочные значения силовых параметров, реализующихся в заделке лепестков, приведены в таблице 3.24.

Таблица 3.24 – Сводная таблица нагрузок в заделке лепестков

КЭМ	Амплитуда колебаний лопатки, мм	Максимальное усилие в заделке лепестка, Н	Максимальный изгибающий момент в заделке лепестка, Н·м
1	2,1	393,6	9,0
3	2,2	177,1	5,0
5	2,2	137,9	2,6
6	2,2	103,0	2,7
7	2,2	134,7	1,5
8	2,2	117,4	3,3

Дополнительно рассмотрена целесообразность применения стали 65С2ВА. Справочные данные [104] показывают, что расчетный предел выносливости этой стали не превышает 620 МПа на базе испытаний 10^7 циклов. Это лишь незначительно отличается от предела выносливости стали 60С2А (637 МПа на базе в 10^7 циклов). Ввиду этого применение стали 65С2ВА принято малоперспективным.

Результаты показывают, что долговечность исходной конструкции лепестка при амплитуде колебаний лопатки 2,2 мм не превышает 10 часов для принятой первой схемы нагружения (за консоль) и 24–59 часов для принятой второй схемы нагружения (за корпус), что потребует частой замены лепестков бурильной головки из-за выхода их из строя.

Анализ таблицы 3.24 говорит о том, что целесообразным решением поставленной технической задачи представляется доработка конструкции лепестков в сторону равномерного уменьшения их толщины, что впоследствии позволит обеспечить их максимальную долговечность вне зависимости от схемы приложения воздействия и расчетной модели долговечности.

3.5. Анализ влияния силового воздействия пластины колебателя на колебания лопатки бурильной головки

В настоящем разделе рассмотрена задача оценки отклика лопатки бурильной головки при силовом возбуждении мест установки лепестков. Цель данного раздела – анализ природы возникновения колебаний лопатки бурильной головки и выявление причинно-следственных связей при генерации колебаний в рассматриваемой механической системе.

Существуют две гипотезы:

1) собственные колебания лепестков, вызванные гидродинамическими силами, являются основным источником колебаний лопатки бурильной головки;

2) собственные колебания лепестков вызывают лишь явление кавитации, в результате которой образуются высокочастотные перепады давления, представляющие собой основной источник колебаний лопатки бурильной головки.

Для анализа природы возникновения колебаний в лопатке бурильной головки, достигающих значений в 2,2 мм, был выполнен расчет в программном комплексе ANSYS Workbench. Расчет выполнен на основании ИД, представленных в таблице 3.24 для КЭМ № 1 как наибольших по значению и, соответственно, способных вызвать наиболее значимый отклик лопатки бурильной головки.

КЭМ с точки зрения геометрии полностью соответствует КЭМ, приведенной в предыдущем разделе. Схема нагружения и закрепления КЭМ приведена на рисунке 3.25.

Условному обозначению «А» соответствует закрепление консоли по шести степеням свободы.

Условным обозначениям «В–G» соответствуют силы и моменты, действующие на заделку лепестков (силы и моменты совпадают по фазе).

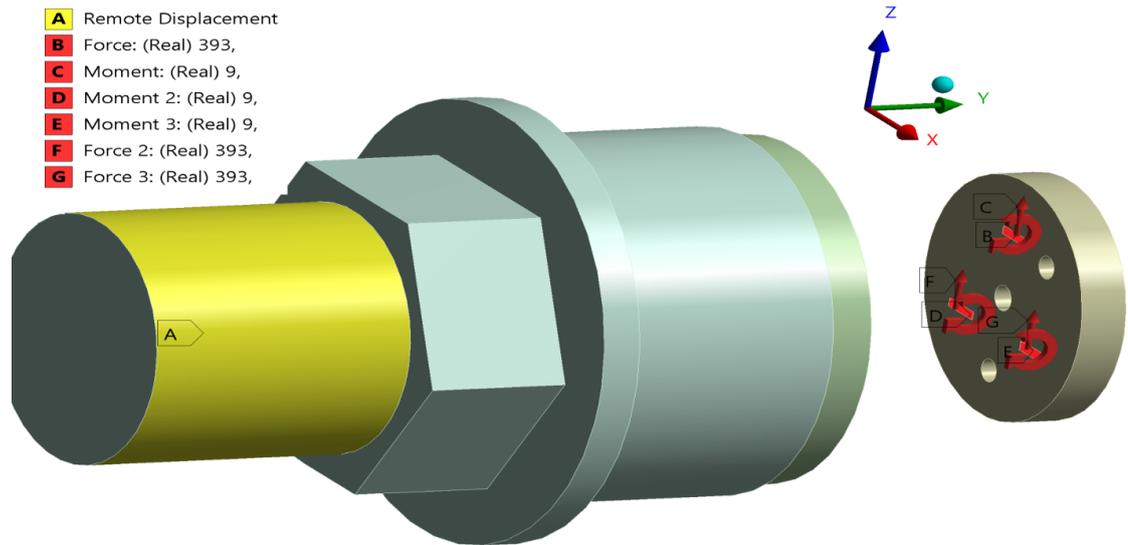


Рисунок 3.25 – Схема закрепления и нагружения модели

В результате расчетов получен отклик КЭМ на гармоническое силовое воздействие в диапазоне частот от 1100 до 2100 Гц. График зависимости отклика крайней поверхности лопатки бурильной головки от частоты приведен на рисунке 3.26.

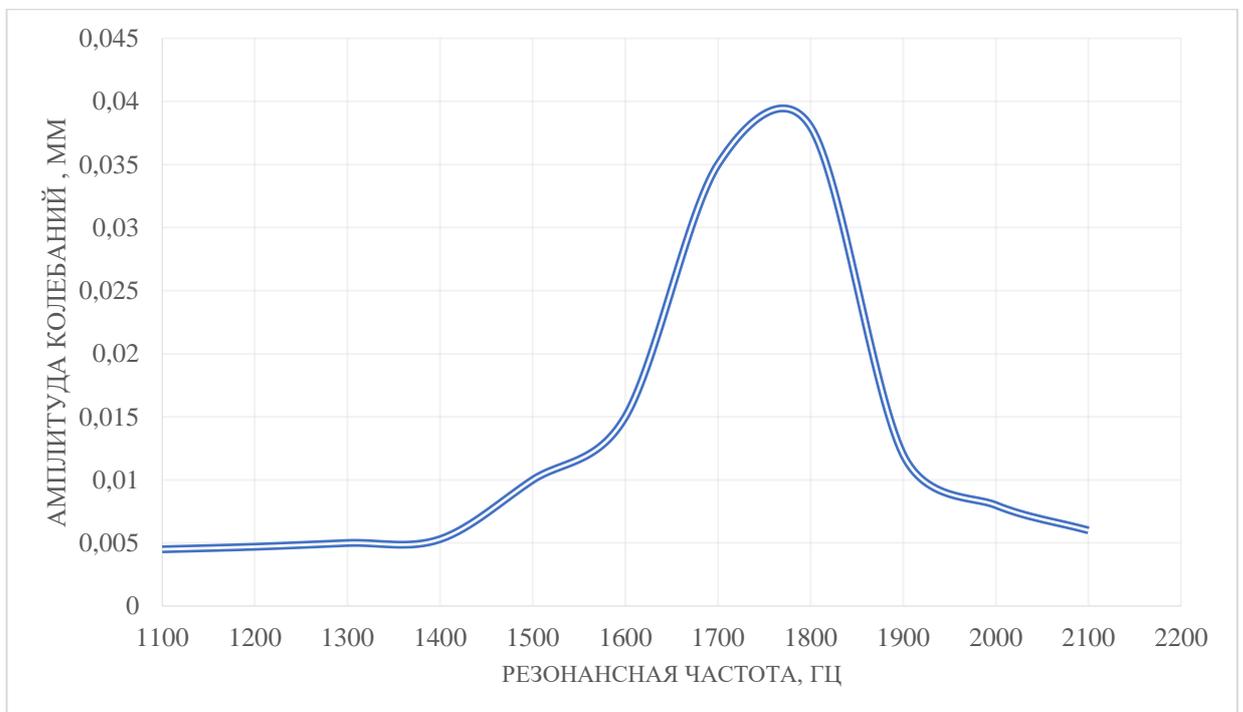


Рисунок 3.26 – Зависимость амплитуды колебаний лопатки от частоты при силовом возбуждении мест установки лепестков

Результаты показывают, что максимальное расчетное значение колебаний лопатки бурильной головки при силовом воздействии на нее, приложенном к местам заделке лепестков, составляет не более 38 мкм. Так как экспериментальное значение амплитуды колебаний лопатки составляет около 2,2 мм, следует считать, что собственные колебания лепестков вызывают соответствующие колебания бурильной головки за счет кавитационных процессов, протекающих в рабочей жидкости бурильной головки.

3.6. Выводы по главе 3

1. Разработана конструкция и изготовлен опытный образец бурильной головки машины ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых и натурных испытаний.

2. Проведены стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительной оценке резонансных характеристик опытного образца бурильной головки машины ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок. Подтверждена работоспособность предложенной конструкции бурильной головки.

3. Экспериментально определены закономерности функционирования и выявлены режимы работы генератора вибрационных колебаний, встроенного в инструмент установки горизонтально направленного бурения, при которых реализация технологии ГНБ происходит при минимальной энергоемкости. Установлено, что при частоте в диапазоне от 1340 до 1450 Гц для всех вариантов исполнения колебателей возникает резонанс, а амплитуда достигает $1,5...2,2 \cdot 10^{-3}$ м.

4. Исследовано влияние свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин на ресурс работы колебателей. Установлено, что при изготовлении резонирующей пластины из стали 60С2А, 65Г и 60С2ВА с отжигом в электропечи, последующей закалкой в соляной ванне и отпуском в электропечи (режим 2) долговечность работы резонирующей пластины в резонансном режиме при амплитуды колебаний $1,2 \cdot 10^{-3}$ м составит не менее 5000 ч. Выявлена зависимость долговечности работы резонирующей пластины в резонансном режиме от амплитуды колебаний.

5. Расчетным методом получено подтверждение тому, что первопричиной колебаний бурильной головки являются кавитационные процессы, протекающие в рабочей жидкости бурильной головки.

4. МЕТОДИКА ВЫБОРА ТИПА И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПОРОДОРАЗРУШАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА УСТАНОВКИ ГНБ СО ВСТРОЕННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

4.1. Способ горизонтально направленного бурения и устройство бурильной головки

Один из путей совершенствования способа горизонтально направленного бурения – это повышение работоспособности используемой техники путем совершенствования конструкций породоразрушающего инструмента, формирования на рабочем инструменте машин горизонтально направленного бурения динамических усилий и применения устройств, использующих для увеличения эффективности работы породоразрушающего инструмента энергию потока струй промывочной жидкости и рабочих растворов.

Наиболее перспективным следует признать применение в конструкции породоразрушающего инструмента встроенных генераторов вибрационных колебаний. Так, известна конструкция, где в корпус бурильной головки встроен диск с входными струеформирующими отверстиями, напротив которых расположены резонирующие элементы в виде пластин, консольно закрепленных во втором диске с выходными отверстиями. Под действием динамического напора водяной струи пластины переходят в режим колебаний, которые передаются на корпус, придавая ему дополнительные динамические усилия, что снижает сопротивляемость грунта и повышает эффективность ГНБ.

Однако расположение генератора гидродинамических колебаний непосредственно в бурильной головке не позволяет осуществлять регулирование взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин и изменять тем самым параметры динамического воздействия в зависимости от свойств пород. При изменении условий применения потребуется замена всей бурильной головки, что снижает эффективность процесса бурения.

Наиболее близким к заявленному техническому решению является устройство ГБГ для бурения подземной скважины (RU 137300), включающей средство соединения, центральный канал, корпус бурильной головки с каналами и соплами, управляющей поверхностью и передней поверхностью, отличающееся тем, что хвостовая часть соединена с корпусом бурильной головки штифтами и обжимным кольцом, внутри которого расположен фиксирующийся посредством винтов диск с входными струеформирующими отверстиями, напротив которых расположены резонирующие элементы в виде пластин, консольно закрепленных во втором диске с выходными струеформирующими отверстиями, фиксирующемся винтами.

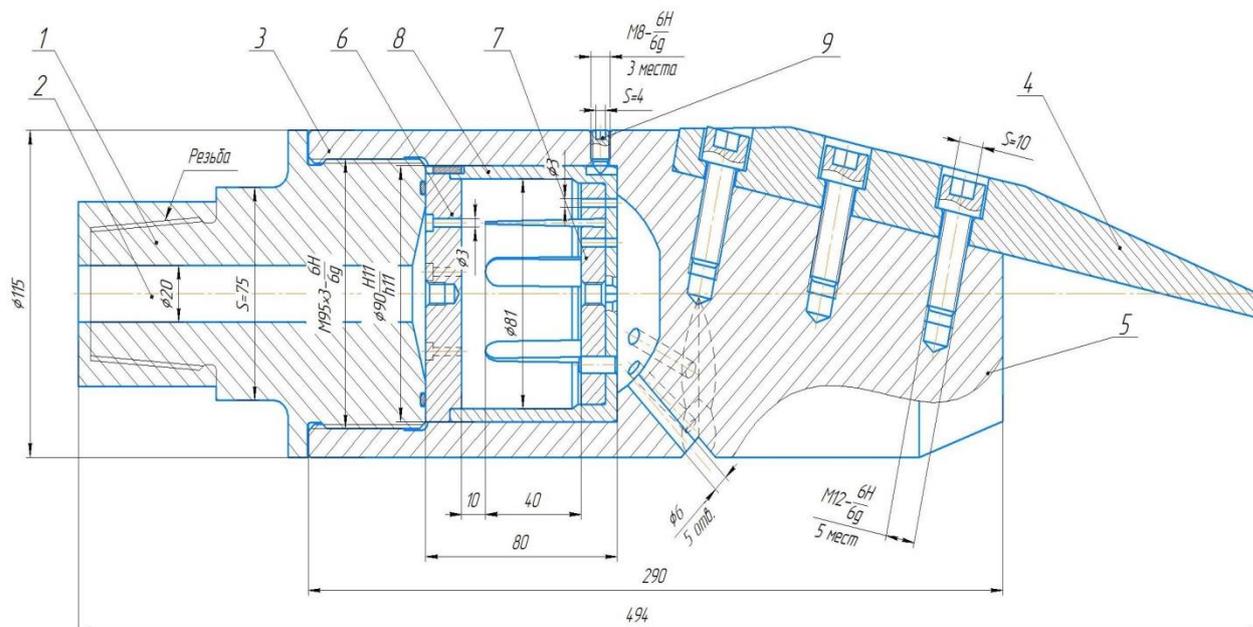
Использование рассматриваемого инструмента увеличивает работоспособность породоразрушающего инструмента по крепким породам при прокладке пилотной скважины через воздействие на массив динамического характера кратковременными ударными импульсами, в частности продольно вибрационных ускорений, возникающих в инструменте при колебаниях жидкости и кавитации, протекающей в буровом растворе.

Однако расположение генератора ГК непосредственно в бурильной головке не позволяет осуществлять регулирование взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин и изменять тем самым параметры динамического воздействия в зависимости от свойств пород. При изменении условий применения потребуются замена всей бурильной головки, что снижает эффективность процесса бурения.

Техническим решением, устраняющим указанные недостатки, является конструкция гидродинамической бурильной головки, предложенная коллективом авторов Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, защищенная Патентом РФ № 2795008, зарегистрированным в Государственном реестре изобретений РФ 27.04.2023 г. Технический результат состоит в расширении технических характеристик породоразрушающего инструмента, а также повышении эффективности его работы.

Поставленная задача и технический результат достигаются тем, что предлагаются способ ГНБ и устройство ГБГ для бурения подземной скважины, включающей средство соединения, центральный канал, корпус бурильной головки с каналами и соплами, управляющей поверхностью, передней поверхностью, диски со струеформирующими насадками и резонирующими пластинами и генератор ГК. Последний отличается тем, что бурильная головка включает закрепляемый в корпусе бурильной головки сменный элемент, который имеет диск со струеформирующими насадками, содержащий по меньшей мере одну струеформирующую насадку, и диск с резонирующими пластинами, содержащий как минимум одну соответствующую струеформирующей насадке резонирующую пластину. Регулировка взаимного расположения струеформирующих насадок по отношению к резонирующим пластинам осуществляется посредством контрольно-измерительного инструмента и фиксируется в корпусе сменного элемента штифтом, а сменные элементы, содержащие различное количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин, подбираются в зависимости от характеристик прочностных свойств грунта и заменяются с учетом конкретных условий выполнения работ по бурению и возможностей насосного оборудования бурильной установки.

Сущность изобретения поясняет рисунок 4.1.



1. Размеры для справок.
2. Для стопорения резьбовых соединений на головках винтов поз.10 нанести клей К153 в соответствии с ОСТ92-1542-83 табл.1 вар.1.
3. Перед сборкой на поверхность резьбы М95×3 нанести слой смазки ЦИАТИМ-201 ГОСТ6267.

Рисунок 4.1 – Чертеж гидромониторной бурильной головки:

1 – средство соединения; 2 – центральный канал; 3 – корпус бурильной головки с каналами и соплами; 4 – управляющая поверхность; 5 – передняя поверхность; 6 – диск со струеформирующими насадками; 7 – диск с резонирующими пластинами; 8 – сменный элемент; 9 – штифт

Конструкция работает следующим образом. При подготовке к выполнению работ по бурению скважины из комплекта, поставляемого с бурильной головкой, выбирается исполнение сменного элемента, в котором количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин соответствует указанным в проектной документации геологическим характеристикам пробуриваемых пород по траектории бурения. Выбранный вариант исполнения сменного элемента, с соответствующим количеством струеформирующих насадок и резонирующих пластин, устанавливается в корпус бурильной головки; при этом регулировки взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин не требуется, что экономит время на подготовку к работе. В процессе выполнения работ, при

переходе на породы с повышенной/пониженной категорией по буримости, для замены сменного элемента на более подходящий достаточно отсоединить корпус 3 от средства соединения 1, вынуть штифт 9, извлечь сменный элемент 8, установить на его место сменный элемент с необходимым количеством струеформирующих насадок и пластин, зафиксировать конструкцию штифтом 9 и завершить сборку головки соединением корпуса 3 со средством соединения 1. Гидромониторная бурильная головка готова к работе. Никаких дополнительных регулировок и настроек не требуется. Кроме того, выполненная в заводских условиях с использованием контрольно-измерительного инструмента регулировка взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин в сменных элементах обеспечивает высокую точность и гарантирует наилучшие условия для эффективного функционирования генератора вибрационных колебаний.

Таким образом, предложенный способ горизонтально направленного бурения с применением гидромониторной бурильной головки со сменными элементами позволяет повысить эффективность работ при изменении свойств пород в процессе бурения подземной скважины.

В таблице 4.1 приведены экспериментально установленные рекомендуемые количества струеформирующих насадок и резонирующих пластин, соответствующие различным категориям пород по буримости.

Таблица 4.1 – Рекомендуемые количества струеформирующих насадок и резонирующих пластин, соответствующие различным категориям пород по буримости

№ п/п	Категория пород по буримости	Рекомендуемое количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин, шт.
1	I	1–2
2	II	2–3
3	III	3–4
4	IV	4–5

4.2. Расчет геометрических параметров бурильной головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний

В работе [6] были исследованы динамические характеристики кавитационных свойств струй, образующихся четырьмя типами струеформирующих насадок. Наилучшие показатели были определены для насадки, имеющей круглый канал. Форма и размеры круглого канала приведены далее на рисунке 4.2. Данная насадка в дальнейшем была использована при расчетах геометрических параметров генератора гидродинамических колебаний.

1. Площадь поперечного сечения канала струеформирующей насадки:

– диаметр насадки $D_n = 3 \cdot 10^{-3}$ м:

$$S_n = 7,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (4.1)$$

2. Расход жидкости через канал струеформирующей насадки:

$$Q_n = 0,62 \cdot 7,07 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,8 \cdot 10^6}{1040}} = 0,00025 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (4.2)$$

3. Общее количество каналов струеформирующих насадок в генераторе гидродинамических колебаний удовлетворяющих производительности насоса машины ГНБ:

$$N = \frac{0,00133}{0,00025} = 5,32. \quad (4.3)$$

Округляем до целых в меньшую сторону, принимаем количество насадок равным 5 шт.

На рисунке 4.2 показано схематическое расположение каналов струеформирующих насадок.

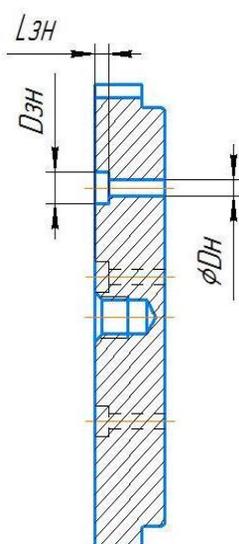


Рисунок 4.2 – Схематическое расположение насадок

Эскиз инструмента представлен на рисунке 4.3.

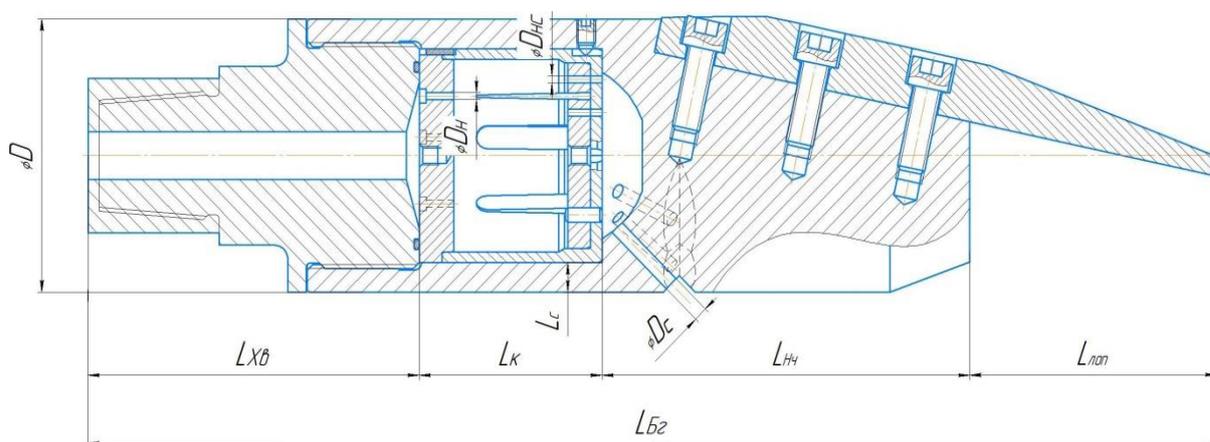


Рисунок 4.3 – Эскиз инструмента

4. Внутренний диаметр камеры генератора D_k определяется из следующих предпосылок. Во-первых, максимальная величина амплитуды поперечных колебаний резонирующей пластины (рисунок 4.4) при отработке была зафиксирована на уровне 15 мм. Таким образом, минимальное расстояние между пластинами должно быть не меньше 30 мм (удвоенное значение амплитуды), а расстояние между пластиной и внутренней стенкой камеры – не

менее 15 мм. Во-вторых, должно быть размещено пять насадок. Графическое решение данной задачи показано на рисунке 4.5.

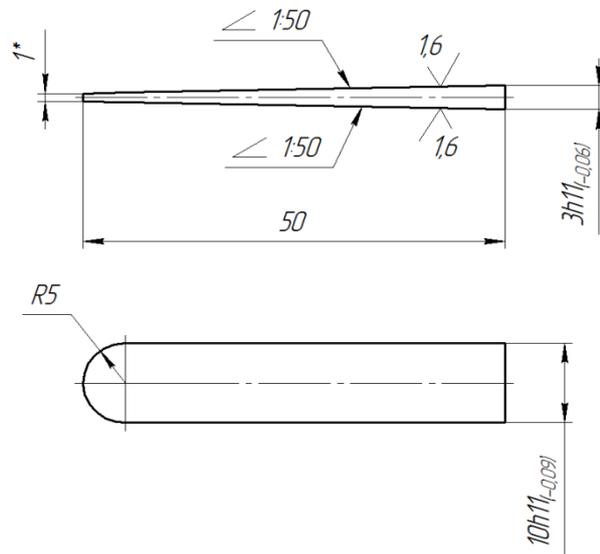


Рисунок 4.5– Резонирующая пластина

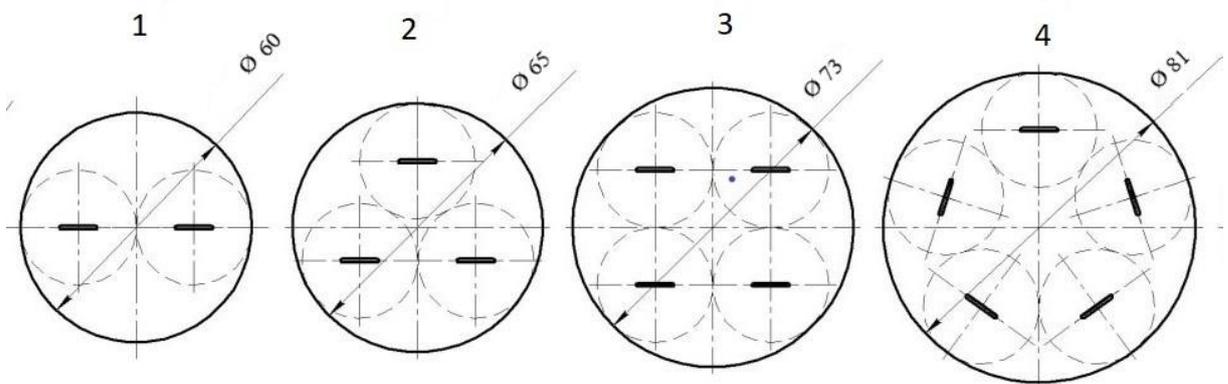


Рисунок 4.5 – Схема расположения резонирующих пластин

Там же приведены значения внутреннего диаметра камеры D_k . Для пяти насадок $D_k = 81$ мм.

Длина генератора гидродинамических колебаний L_{II} определяется (рисунок 4.3) через выражение

$$L_k = L_H + L_3 + L_a + L_d + L_{CT} = 15 + 10 + 40 + 10 + 5 = 80 \text{ мм.}$$

Величины, входящие в данное соотношение, имеют следующие численные значения: $L_H = 15$ мм; $L_3 = 10$ мм; $L_a = 40$ мм; $L_d = 10$ мм, $L_{ст} = 5$ мм.

Общая длина бурильной головки $L_{ИГ}$ согласно рисунку 1 равна:

$$L_{БГ} = L_{ХВ} + L_K + L_{Нч} + L_{Лоп} = 145 + 80 + 161 + 108 = 494 \text{ мм},$$

где $L_{ХВ}$ – длина хвостовой части, $L_{ХВ} = \text{от } 1,5 L_K \text{ до } 2,5 L_K$ мм;

L_K – длина гидродинамического излучателя, мм;

$L_{Нч}$ – длина носовой части корпуса, $L_{Нч} = \text{от } 1,5 L_K \text{ до } 3,5 L_K$ мм.

$L_{Лоп}$ – длина вылета лопатки, $L_{Лоп} = \text{от } 1 L_K \text{ до } 1,5 L_K$ мм.

Толщина стенки принята $L_c \geq 12,5$ мм.

На рисунке 4.6 показан эскиз встроенного генератора гидродинамических колебаний.

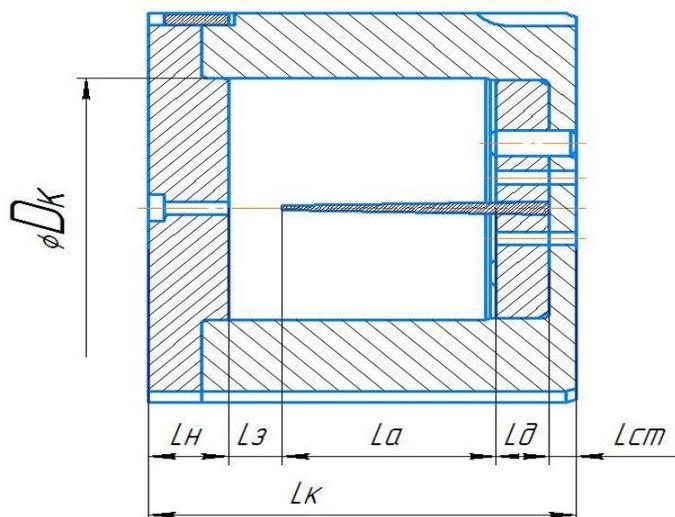


Рисунок 4.6 – Генератор гидродинамических колебаний

Аналогичным образом определяем количество струеформирующих насадок во встроенном генераторе вибрационных колебаний для ряда гидравлических мощностей насосов, установленных на машинах ГНБ (таблица 4.2), а также внутренний диаметр и конструктивные размеры корпуса колебателя (таблица 4.3).

Таблица 4.2 – Выбор гидравлических характеристик насоса исходя из количества насадок

Количество насадок	Макс. объем подачи регулируется бесступенчато, л/мин	Макс. давление буровой жидкости, МПа
2	30	8
3	45	8
4	60	8
5	80	8

Таблица 4.3 – Геометрические параметры колебателей

Количество насадок	D_n , мм	L_{II} , мм	L_{In} , мм	D
2	60	50	494	115
3	65	50	494	115
4	73	50	494	115
5	81	50	494	115

На основе результатов выполненных исследований разработана методика выбора конструктивного исполнения и режимов работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ в зависимости от физико-механических свойств колебателей, возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

Перечислим основные положения методики.

1. Конструктивное исполнение (см. рисунок 4.1) отличается тем, что бурильная головка содержит закрепляемый в корпусе бурильной головки сменный элемент – колебатель, который имеет диск со струеформирующими насадками, содержащий по меньшей мере одну струеформирующую насадку, и диск с резонирующими пластинами, содержащий как минимум одну соответствующую струеформирующей насадке резонирующую пластину. Регулировка взаимного расположения струеформирующих насадок по отношению к резонирующим пластинам осуществляется в производственных условиях с применением контрольно-измерительного инструмента

и фиксируется в корпусе колебателя. При этом сменные элементы, содержащие различное количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин, подбираются в зависимости от характеристик прочностных свойств грунта и заменяются с учетом конкретных условий выполнения работ по бурению и возможностей насосного оборудования бурильной установки.

2. При подготовке к выполнению работ по бурению скважины из комплекта, поставляемого с бурильной головкой, выбирается исполнение колебателя, в котором количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин соответствует возможностям насосной установки машины ГНБ и указанным в проектной документации геологическим характеристикам пробуриваемых пород по траектории бурения. Выбранный вариант исполнения сменного элемента, с соответствующим количеством струеформирующих насадок и резонирующих пластин, устанавливается в корпус бурильной головки; при этом регулировки взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин не требуется, что экономит время на подготовку к работе. В процессе выполнения работ, при переходе на породы с повышенной/пониженной категорией по буримости, для замены сменного элемента (см. рисунок 4.1) на более подходящий достаточно отсоединить корпус 3 от средства соединения 1, вынуть штифт 9, извлечь сменный элемент 8, установить на его место сменный элемент с необходимым количеством струеформирующих насадок и пластин, зафиксировать конструкцию штифтом 9 и завершить сборку головки соединением корпуса 3 со средством соединения 1. Гидромониторная бурильная головка готова к работе. Никаких дополнительных регулировок и настроек не требуется. Кроме того, выполненная в заводских условиях с использованием контрольно-измерительного инструмента регулировка взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин в сменных элементах обеспечивает высокую точность и гарантирует наилучшие условия для эффективного функционирования генератора вибрационных колебаний.

3. При комплектации колебателя резонирующими пластинами учитываются физико-механические свойства материала и режим термообработки, в зависимости от которых задаются режим работы пластин и ресурс работы колебателя до замены.

4.3. Выводы по главе 4

1. Обосновано конструктивное исполнение гидродинамического инструмента, предусматривающее наличие сменных элементов: колебателей, содержащих различное количество струеформирующих насадок, и резонирующих пластин, которые подбираются в зависимости от характеристик прочностных свойств грунта и заменяются с учетом конкретных условий выполнения работ по бурению и возможностей насосного оборудования бурильной установки, обеспечивающих реализацию технологии ГНБ в энергоэффективном режиме.

2. Разработана методика выбора конструктивного исполнения и режимов работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ в зависимости от физико-механических свойств колебателей, возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных и теоретических исследований решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ и обоснованного выбора конструктивных параметров и режимов работы встроенного генератора вибрационных колебаний. Это было выполнено на основании установленных закономерностей влияния свойств материала и режимов термообработки резонирующих пластин на усталостную прочность и ресурс их работы в зависимости от возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины, что является важным вкладом в развитие средств механизации строительных работ.

Получены следующие основные научные и практические результаты исследований.

1. Разработана конструкция и изготовлен опытный образец бурильной головки машины ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых и натурных испытаний.

2. Проведены стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительной оценке резонансных характеристик опытного образца бурильной головки машины ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок. Подтверждена работоспособность предложенной конструкции бурильной головки.

3. Экспериментально определены закономерности функционирования и выявлены режимы работы генератора вибрационных колебаний, встроенного в инструмент установки горизонтально направленного бурения, при которых реализация технологии ГНБ происходит при минимальной энергоемкости.

Установлено, что при частоте в диапазоне от 1340 до 1450 Гц для всех вариантов исполнения колебателей возникает резонанс, а амплитуда достигает $1,5...2,2 \cdot 10^{-3}$ м.

4. Исследовано влияние свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин на ресурс работы колебателей. Установлено, что при изготовлении резонирующей пластины из стали 60С2А с отжигом в электропечи, последующей закалкой в соляной ванне и отпуском в электропечи (режим 2) долговечность работы резонирующей пластины в резонансном режиме при амплитуды колебаний $1,2 \cdot 10^{-3}$ м составит не менее 5000 ч. Получена зависимость долговечности работы резонирующей пластины в резонансном режиме от амплитуды колебаний.

5. Обосновано конструктивное исполнение гидродинамического инструмента, предусматривающее наличие сменных элементов: колебателей, содержащих различное количество струеформирующих насадок, и резонирующих пластин, которые подбираются в зависимости от характеристик прочностных свойств грунта и заменяются с учетом конкретных условий выполнения работ по бурению и возможностей насосного оборудования бурильной установки, обеспечивающих реализацию технологии ГНБ в энергоэффективном режиме.

6. Разработана методика выбора конструктивного исполнения и режимов работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ в зависимости от физико-механических свойств колебателей, возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 249.1325800.2016. Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытыми способами. – М., 2016. – 98 с.
2. Колесников В. В. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы бурильной головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Колесников Владимир Владимирович [Место защиты: Тул. гос. ун-т]. – Тула, 2013. – 154 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/1535.
3. Мартюченко И. Г., Бойков И. В., Рожкова О. В., Жадов И. В. Обзор способов образования горизонтальных скважин // Техническое регулирование в транспортном строительстве / СГТУ им. Гагарина Ю. А. С. 206–212.
4. Методика по бестраншейной прокладке и санации инженерных коммуникаций. – Республика Казахстан: Казахстан Су Арнасы, 2012. – 83 с.
5. Бестраншейная прокладка коммуникаций с применением микротоннелепроходческих комплексов и реконструкция трубопроводов с применением специального оборудования / МГСН 6.01-03, ТСН 40-303-2003. – М., 2004. – 41 с.
6. Прокалывающая установка ПУ-2 (для бестраншейной прокладки) [Электронный ресурс] – 2019. – Режим доступа: <https://www.mrmz.ru/tehnika/proch/spisok11/igla2.htm>
7. Установка управляемого прокола Ditch Witch P80 (для бестраншейной прокладки) [Электронный ресурс] – 2020. – Режим доступа: http://www.ditchwitch.ru/catalog/11-rod_pushers/ditchwitch-p80.htm
8. Установка направленного прокалывания УНП-40Б (для бестраншейной прокладки) [Электронный ресурс] – 2020. – Режим доступа: <https://www.enerprom.ru/prod/276>
9. Храменков С. В., Алифренков А. Д., Примин О. Г. Трубы из высокопрочного чугуна для систем водоснабжения и водоотведения:

монография. – М.: Московский государственный строительный университет, 2015. – 192 с.

10. Земсков В. М. Теоретические основы взаимодействия рабочего наконечника с грунтом при проколе горизонтальных скважин: монография. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. – 104 с.

11. Горизонтальное бурение теория и практика [Электронный ресурс]. – 2020. Режим доступа: <http://www.dattis.info/theorypm/310-gnbvsprokolst.html>

12. Установки для бестраншейной прокладки минитоннелей типа УМТ [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <http://www.dattis.info/theorypm/310-gnbvsprokolst.html>

13. Рогачев А. А. Установка для проведения микротоннелей УМТ-0,6 / А. А. Рогачев, Ю. В. Антипов, И. И. Браккер, Д. П. Бессолов. – Тула: ТулГУ, 2004. – 10 с.: ил. – Деп. в ВИНТИ 29.04.2004 № 736 – В2004.

14. Буровая установка PERFORATOR PBA 20 [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <http://perforator.su/burovie-ustanovki/nachalnogo-urovnya/pba-20.html>

15. Классификация установок представлена в таблице [Электронный ресурс] // Вып. № 28. Ст. № 2 – Режим доступа: <https://www.mrmz.ru/article/v28/print/2.htm>

16. Установка горизонтально направленного бурения Grundodrill JCS 130 [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <https://www.tracto-technik.com/Products/GRUNDODRILL-THE-NEUGENERATION/GRUNDODRILL-JCS130>

17. Руководство по прокладке подземных трубопроводов способом горизонтально направленного бурения с применением труб из ВЧШГ. – М.: ООО «Аквадизайн-А», 2007. – 66 с.

18. Bentonit. Теория и практика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dattis.info/theorypm/306-bentonitst.html>

19. Назаренко А. Ф. Об одном механизме гидродинамического звукообразования // Акустический журнал. – 1978. – Т. 24, № 4. С. 573.

20. Петров А. А. Влияние кавитации на процессы, протекающие в гидромониторной бурильной головке со встроенным генератором гидродинамических колебаний // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: материалы 73-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: СПбГАСУ, 2020. – С. 26–33.
21. Константинов Б. Г. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченной среде. – Л.: Наука, 1974. – 144 с.
22. Гершгал Д. А., Фридман В. М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. – М.: Энергия, 1976. – 318 с.
23. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. М.: Мир, 1964. – 467 с.
24. Пирсол И. Кавитация. М.: Мир, 1975. – 93 с.
25. Арзуманов Э. С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. – 304 с.
26. Неволин В. Г. Опыт применения звукового воздействия в практике нефтедобычи Пермского края. – Пермь, 2008. – 54 с.
27. Назаренко А. Ф. Гидродинамические излучающие системы и проблема интенсификации некоторых технологических процессов: дис. ... д-ра техн. наук. – Одесса, 1980. – 383 с.
28. Пат. № 74317, РФ. Гидродинамический диспергатор и резонансная пластина для него / Аистов Н. М., Щучкин А. С. Заявл. 14.02.2008; опубл. 27.06.2008.
29. СТО НОСТРОЙ 2.27.17-2011. Прокладка подземных коммуникаций методом горизонтального направленного бурения. – М.: БСТ, 2012. – 145 с.
30. Пат. № 2169625, РФ. Гидродинамический генератор для обработки суспензий / Фрейдин А. М., Шалауров В. А., Анушенков А. Н. Заявл. 10.01.2000; опубл. 27.06.2001.
31. Бреховских Л. М., Гончаров В. В. Введение в механику сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 336 с.

32. Powell A. Concerning the noise of turbulent jets // J. Acoust. Soc. Amer. – 1960. – Vol. 32, No. 12. – Pp. 1609–1612.
33. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М: ИИЛ, 1956. – 726 с.
34. Janovski W., Pohiman R. Schall und Ultraschallerzeugung in Flüssigkeiten für industrielle Zwecke, Zs. angew. Phys, 1, 222 (1948).
35. Ши-Го-Бао. Исследование гидродинамических излучателей: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 1961. – 93 с.
36. Рогов А. Б. Обоснование технологических решений и параметров машин и комплексов оборудования для разрушения крепких пород, повышающих долговечность горной техники: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Рогов Александр Борисович. – Тула, 2004. – 308 с.
37. Земсков В. М. Развитие научных основ создания вибрационных рабочих наконечников машин для прокола горизонтальных грунтовых скважин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.04 / Земсков Владимир Михайлович. – Новочеркасск, 2011. – 273 с.
38. Земсков В. М. Определение рациональных параметров виробурильной установки для бестраншейной прокладки трубопроводов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.04 / Земсков Владимир Михайлович. – Саратов, 2002. – 153 с.
39. Белецкий Б. Ф. Технология и механизация строительного производства: учебник. – Изд. 3-е. – Ростов/Д: Феникс, 2004. – 752 с.
40. Пат. № 2330928, РФ. Гидромониторная бурильная головка / Ермолин Д. А., Зайнашев М. М. Заявл. 17.01.2007; опубл. 10.08.2008.
41. Петров А. А., Шаронов А. А. Современное состояние и перспективы развития техники и технологий бестраншейной прокладки // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: СПбГАСУ, 2018. – С. 83–88.

42. Пат. № 2081988, РФ. Гидромониторная бурильная головка / Рольф Дан. Заявл. 25.03.1991; опубл. 20.06.1997.

43. Пат. № 2249083, РФ. Устройство для бестраншейной прокладки трубопроводов мегодом проката / Ромакин Н. Б., Ромакин Д. Н., Краснолудский К. В. Заявл. 05.12.2002; опубл. 27.03.2005.

44. Меламед Ю. А. Гидроимпульсная технология: большие возможности и широкий спектр применения // Разведка и охрана недр. – 1993. – № 6. – С. 17–19.

45. Дзоз Н. А., Жулай Ю. А. Интенсификация процессов бурения с использованием гидродинамической кавитации. Горный информационный аналитический бюллетень. – М.: Горная книга, с. 290–296.

46. Дзоз Н. А., Жулай Ю. А. Оценка эффективности бурения гидрогеологических скважин с наложением вибронагрузки на породоразрушающий инструмент. Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках // Матер. XVI Междунар. науч. школы. – Симферополь: Таврич. нац. ин-т, 2006. – С. 86–93.

47. Колесников В. В., Лежебоков А. В., Пушкарев А. Е. Особенности конструкции гидромониторной бурильной головки // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 4. – С. 240–246.

48. Колесников В. В. Повышение эффективности работы породоразрушающего инструмента установки горизонтально направленного бурения // VII Региональная молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов / под общ. ред. д-ра техн. наук, профессора Е. А. Ядыкина: в 3 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – Ч. I. – С. 144.

49. Колесников В. В., Лежебоков А. В., Пушкарев А. Е. Повышение эффективности работы породоразрушающего инструмента для машин ГНБ // Вопросы образования и науки в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научной-практической конференции 29 апреля

2013 г.: в 11 частях. Часть 6 / Мин-во обр. и науки РФ. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес – Наука – Общество», 2013. – С. 57–59.

50. Пат. № 2013135577 RU. Гидромониторная бурильная головка / Качурина Н. М., Колесникова В. В., Пушкарева А. Е. Уведомление о поступлении документов заявки 29.07.2013. Решение о выдаче патента от 01.10.2013.

51. Натапов Б. С. Термическая обработка металлов: учебное пособие для вузов. – Киев: Вища школа, 1980. – С. 39–41.

52. Ребрик Б. М. Вибрационное бурение скважин. – М.: Недра, 1974. – 192 с.

53. Кершенбаум Н. Я. Виброметод в проходке горизонтальных скважин / Н. Я. Кершенбаум, В. И. Минаев. – М.: Недра, 1968. – 158 с.

54. Копылов В. Е. Бурение?.. Интересно! – М.: Недра, 1981. – 160 с.

55. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий. Теория и практика. – М.: ПрессБюро, 2005. – 304 с.

56. Сулакшин С. С. Техника и технология направленного бурения скважин. – М.: Недра, 1967. – 310 с.

57. Васильев Н. В. Закрытая прокладка трубопроводов. – М.: Недра, 1964. – 264 с.

58. Техническое руководство по горизонтальному направленному бурению. – 2-е изд. / Европейская Ассоциация подрядчиков по горизонтально направленному бурению DCA – Europe. – Аахен, 2001.

59. Справочник строителя транспортных тоннелей / под ред. П. А. Часовитина. – М.: Транспорт, 1965. – 765 с.

60. Термическая обработка углеродистой стали [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: <https://all4study.ru/proizvodstvo/termicheskaya-obrabotka-stalej-2-chast.html>

61. Корнеев А. А. Выбор температуры закалки стали ЭИ347-Ш. – Курск: Университетская книга. – С. 157–158.

62. Печь для отжига, нормализации и закалки ПВП 300/12,5 Накал [Электронный ресурс]. – 2022. Режим доступа: <https://www.nakal.ru/catalog/pechi-s-vydvizhnym-podom/>

63. Петров А. А. Анализ напряженно-деформируемого состояния пластины колебателя буровой головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 12. – С. 26–30.

64. Ванна закалочная ВЗ 21.18.9/0,8 [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https://www.nakal.ru/catalog/elektropechi/termoobrabotka-chernykh-metallor/maslyanye-i-vodyanye-zakalochnye-vanny/>

65. Ванна закалочная ВМ 26.22.15/0,6 [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.nakal.ru/catalog/elektropechi/termoobrabotka-chernykh-metallor/maslyanye-i-vodyanye-zakalochnye-vanny/>

66. Твердомер Роквелла (HRC) Wilson R574T [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://buehler.ru/tverdomery/tverdomeryi-rokvella/wilson-rockwell-574>

67. Петров А. А., Пушкарев А. Е., Манвелова Н. Е. Расчет геометрических параметров буровой головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 12. – С. 21–25.

68. Машины для испытаний конструкционных материалов И11М [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: https://www.tochpribor-kb.ru/%D0%A0%D0%B0%D0%B7%D1%80%D1%8B%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D0%981158%D0%9C

69. Микродвердомер ПМТ-3М [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа: <https://www.lomo-microsystems.ru/Pmt-3M.html>

70. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1973. – 697 с.

71. Справочник по проектированию и бурению скважин на воду / под ред. А. С. Белецкого. – М.: Недра, 1983.
72. Колесников В. В., Лежебоков А. В., Пушкарев А. Е. Экспериментальные исследования характеристик насадок // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 4. – С. 211–216.
73. Колесников В. В., Лежебоков А. В., Пушкарев А. Е. Экспериментальные исследования характеристик насадок гидродинамических излучателей // Ударно-вибрационные системы, машины и технологии: материалы V Международного научного симпозиума / под ред. д-ра техн. наук, профессора Л. С. Ушакова. – Орел: Госуниверситет-УНПК, 2013. – С. 237–240.
74. Назаров Г. С. Экспериментальное исследование кавитационных характеристик сужающихся насадков // Инженерно-физический журнал. – 1968. – Т. XIV, № 3. – С. 423–429.
75. Назаров Г. С. К расчету параметров кавитационного течения в гидравлических системах // Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т. XVII, № 3. – С. 397–406.
76. Сиов Б. Н. Истечение жидкости через насадки в среды с противодействием. – М.: Машиностроение, 1968. – 140 с.
77. Котоусов Л. С. Исследование скорости водяных струй на выходе сопелс различной геометрией // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, вып. 9. – С. 8–14.
78. Вецкий И. Г., Кильдищев Г. С., Вененицкий И. Г. Теория вероятности математической статистики. – М.: Статистика, 1975. – 264 с.
79. Маркович Э. С. Курс высшей математики с элементами теории вероятности и математической статистики. – М.: Высшая школа, 1972. – 258 с.
80. Иванов В. А., Калинина В. Н., Нешумова Л. А. [и др.]. Математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1982. – 371 с.
81. Барон Л. И. О познавательной ценности экспериментально-статистического метода в науке о разрушении горных пород. – 1973. – Вып. 113. – С. 3–21.

82. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. – М.: Наука, 1967. – 428 с.
83. Леман Э. Проверка статистических гипотез. – М., Мир, 1975. – 450 с.
84. Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. – 243 с.
85. Тутубалин В. Н. Статистическая обработка рядов наблюдений. М.: Знание, 1973. – 301 с.
86. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1965. – 256 с.
87. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экспериментальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
88. Ключев В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.
89. Минацкий В. Г., Гусынин А. Б., Садовникова Н. А., Шмойлова Р. А. Курс лекций по теории статистики / Московский международный институт экономики, информатики, финансов и права. – М., 2003. – 189 с.
90. Барон Л. И. Горнотехническое породоведение. – М.: Наука, 1977. – 323 с.
91. Гнурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.
92. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное пособие. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
93. Пушкарев А. Е. Обоснование и выбор параметров гидроабразивного инструмента исполнительных органов горных машин с разработкой модулей высоконапорного оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Пушкарев Александр Евгеньевич. – Тула, 1999. – 347 с.

94. Король В. И. Обоснование параметров и определение нагруженности гидромеханических резцов струговой установки: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Король Валерия Валерьевна. – Тула, 2011. – 155 с.

95. Леонтьева Н. С. Выбор и обоснование конструктивных параметров и режимов работы гидросъемника гидроструйной бурильной машины: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Леонтьев Николай Сергеевич. – Тула, 2013. – 125 с.

96. Рогачева А. А. Обоснование конструктивных параметров и режимов работы исполнительного органа управляемой прокалывающей установки: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Рогачев Алексей Александрович. – Тула, 2007. – 192 с.

97. Жабина А. Б. Обоснование параметров взаимодействия агрегированного механогидравлического инструмента с массивом для эффективного разрушения крепких горных пород: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Жабин Александр Борисович. – Тула, 1984. – 177 с.

98. Головин К. А. Обоснование параметров и создание оборудования для гидроструйной цементации неустойчивых пород в горном производстве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Головин Константин Александрович. – Тула, 2007. – 336 с.

99. Поликов Ан. В. Обоснование рациональных параметров импульсных струй воды высокого давления и разработка метода расчета эффективности процесса резания ими горных пород: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Поляков Андрей Вячеславович. – Тула, 2006. – 162 с.

100. Поликов Ал. В. Разработка метода расчета эффективности процесса резания горных пород струями воды сверхвысокого давления и обоснование параметров устройства для их получения применительно к проходческим комбайнам: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Поляков Алексей Вячеславович. – Тула, 2006. – 184 с.

101. Густов Ю. И., Аллаттуф Х. Исследование взаимосвязи коэффициентов пластичности и предела текучести сталей стандартных категорий прочности // Вестник МГСУ. – 2013. – № 7. – С. 22–26.

102. Трощенко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 512+701 с.

103. Орлов П. И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. – В 2-х кн. Кн. 1 / под ред. П. Н. Учаева. – Изд. 3-е, испр. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.: ил.

104. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий: теория и практика. – М.: ПрессБюро № 1, 2005. – 304 с.

105. Фомичева Е. М. Исследование зависимости твердости ленты из стали 60С2А от режимов термической обработки // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2016. – № 3 (51). – С. 144–150.

106. Густов Ю. И., Аллаттуф Х. Исследование взаимосвязи коэффициентов пластичности и предела текучести сталей стандартных категорий прочности // Вестник МГСУ. – 2013. – № 7. – С. 22–26.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ» – ОБУХОВСКИЙ ЗАВОД»

192012, Россия, Санкт-Петербург, вн.тер.г. муниципальный округ Рыбацкое, пр-кт Обуховской Обороны, д. 120, стр. 19, помещ. 1-Н, №708
тел.: (812) 363-93-40, тел./факс: (812) 363-98-11, e-mail: dou@goz.ru
ОКПО 07513234, ОГРН 1037825058732, ИНН/КПП 781144648/785050001

10.03.2023 № 4098/011

На № _____ от _____

АКТ

О внедрении результатов диссертационного исследования
«Обоснование режимов работы породоразрушающего инструмента установки горизонтально направленного бурения с встроенным генератором гидродинамических колебаний, в зависимости от конструктивного исполнения»

В Диссертационный совет Д 24.2.380.05
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет
Россия, 190005, Санкт-Петербург,
2-я Красноармейская ул., д.4

Результаты диссертационного исследования А.А. Петрова на тему «Обоснование режимов работы породоразрушающего инструмента установки горизонтально направленного бурения с встроенным генератором гидродинамических колебаний, в зависимости от конструктивного исполнения», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в практической деятельности АО «Обуховский завод», наиболее существенными из которых являются:

1. Проведены расчеты конструктивных параметров и изготовлен опытный образец бурильной головки машины ГНБ с встроенным генератором вибрационных колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых и натурных испытаний.
2. Проведены стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительной оценке резонансных характеристик опытного образца бурильной головки машины ГНБ с встроенным генератором вибрационных колебаний в комплекте со сменными колебателями, оснащенными различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок.
3. Экспериментально определены закономерности функционирования генератора вибрационных колебаний, встроенного в инструмент установки горизонтально направленного бурения, и выявлены конструктивные параметры инструмента и режимы его работы, при которых реализация технологии ГНБ происходит при минимальной энергоёмкости.
4. Исследован ресурс работы колебателей в зависимости от свойств материала и режимов термической обработки резонирующих пластин.
5. Обосновано конструктивное исполнение гидродинамического инструмента и режимов работы установки горизонтально направленного бурения в конкретных условиях применения, обеспечивающих реализацию технологии ГНБ в энергоэффективном режиме.
6. Разработана методика выбора конструктивных параметров инструмента с встроенным генератором вибрационных колебаний для эффективной работы.

В целом, использование результатов диссертационной работы А.А. Петрова, позволило повысить эффективность и долговечность функционирования породоразрушающего инструмента установки ГНБ с встроенным генератором вибрационных колебаний. Полученные результаты могут быть использованы при внедрении в производство.

Первый заместитель генерального директора-
технический директор



В.В. Шафранский

013596

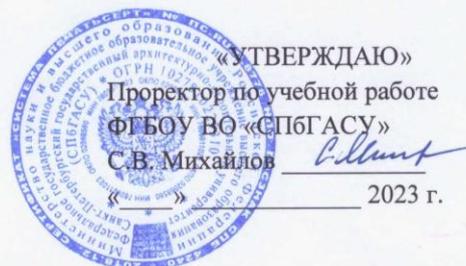
ПРИЛОЖЕНИЕ Б



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)
 ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

№ _____

[Акт внедрения материалов диссертации
 в учебный процесс]



АКТ

внедрения материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Обоснование режимов работы породоразрушающего инструмента установки горизонтально направленного бурения с встроенным генератором гидродинамических колебаний в зависимости от конструктивного исполнения» Петрова Андрея Андреевича, в учебный процесс Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета.

Учебно-методическая комиссия автомобильно-дорожного факультета:

Председатель:

кандидат технических наук, доцент А.В. Зазыкин – декан автомобильно-дорожного факультета.

Секретарь:

кандидат технических наук, доцент Т.В. Виноградова

Настоящим подтверждает внедрение материалов, содержащихся в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук «Обоснование режимов работы породоразрушающего инструмента установки горизонтально направленного бурения с встроенным генератором гидродинамических колебаний в зависимости от конструктивного исполнения» главного технолога АО «Обуховский завод» Петрова Андрея Андреевича (научный консультант: доктор технических наук, профессор Пушкарев Александр Евгеньевич), в учебный процесс выпускающей кафедры Наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета в рабочую программу дисциплины (модуля) «Строительные машины» по специальности 23.05.01 Наземные транспортно-технологические средства, специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование».

Внедрение результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук обсуждено на заседании учебно-методической комиссии автомобильно-дорожного факультета Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета 20 февраля 2023 года (протокол № 4).

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Установлены закономерности формирования резонансных частот резонирующих пластин встроенного в бурильную головку генератора вибрационных колебаний в зависимости от возможностей насосной установки конкретной машины, количества и размеров струеформирующих насадок, что позволило выявить рациональные сочетания

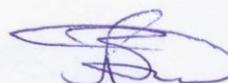
конструктивных параметров, при которых реализация технологии ГНБ происходит при минимальной энергоемкости.

2. Определены закономерности изменения физико-механических свойств и усталостной прочности резонирующих пластин в зависимости от использованного материала и термической обработки, позволили установить режимы, при соблюдении которых ресурс их работы достигает максимальных значений.

В ходе выполнения научно-исследовательской (диссертационной работы) опубликованы следующие учебно-методические пособия:

1. А.А. Петров. Определение и расчет технологических, рабочих и эксплуатационных параметров инструментов и исполнительных механизмов дорожно-строительных машин: учебное пособие / А.Е. Пушкарев, И.И. Воронцов, А.П. Щербаков, В.И. Новиков, А.А. Петров - Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2023. – 236 с.

Председатель УМК АДФ:
Декан АДФ, к.т.н., доцент



А.В. Зазыкин

Секретарь УМК АДФ:
к.т.н., доцент кафедры НТТМ



Т.В. Виноградова

ПРИЛОЖЕНИЕ В

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2795008**УСТРОЙСТВО ГИДРОМОНИТОРНОЙ БУРИЛЬНОЙ
ГОЛОВКИ ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНО-
НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ**

Патентообладатели: *Петров Андрей Андреевич (RU), Пушкарев
Александр Евгеньевич (RU), Михайлов Александр
Николаевич (RU)*

Авторы: *Петров Андрей Андреевич (RU), Пушкарев
Александр Евгеньевич (RU), Михайлов Александр
Николаевич (RU)*

Заявка № 2022112368

Приоритет изобретения 04 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 27 апреля 2023 г.Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 04 мая 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



УСТРОЙСТВО ГИДРОМОНИТОРНОЙ БУРИЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ
ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ

E21B 7/04

E21B 10/18

E21B 10/61

E21B 10/62

Изобретение относится к способам и устройствам бурения и может быть использовано для бурения скважин при прокладке инженерных коммуникаций подземных кабелей или подземных линий с минимальным воздействием на окружающий массив методом горизонтально направленного бурения.

Одним из путей совершенствования способа горизонтально направленного бурения является повышение работоспособности используемой техники путем совершенствования конструкций рабочих наконечников, формирования на рабочем инструменте машин горизонтально направленного бурения динамических усилий и применения устройств, использующих для увеличения эффективности работы породоразрушающего инструмента энергию потока струй промывочной жидкости и рабочих растворов.

Известна гидромониторная бурильная головка (RU 2330928), содержащая двускатную фронтальную поверхность с лобовым породоразрушающим выступом на сопряжении скатов, калибрующую часть с продолговатым контуром поперечного сечения, направляющую часть с асимметричным скосом, средство соединения с колонной бурильных труб и нагнетательный канал с вводами в гидромониторные сопла, отличающаяся тем, что скаты фронтальной поверхности с лобовым породоразрушающим выступом на сопряжении скатов расположены на скосе направляющей части, при этом лобовой породоразрушающий выступ ориентирован по продольному направлению скоса направляющей части, по меньшей мере, два гидромониторных сопла расположены на прилегающих к скатам противоположных участках калибрующей части, а, по меньшей мере, одно гидромониторное сопло расположено на калибрующей части с ориентацией по продольному направлению скоса направляющей части в сторону расположения фронтальной поверхности.

Известна гидромониторная бурильная головка (RU 64254), содержащая двускатную фронтальную поверхность с лобовым породоразрушающим выступом на сопряжении скатов, калибрующую часть с продолговатым контуром поперечного сечения, направляющую часть с асимметричным скосом, средство соединения с колонной

бурильных труб и нагнетательный канал с вводами в гидромониторные сопла, отличающаяся тем, что скаты фронтальной поверхности с лобовым породоразрушающим выступом на сопряжении скатов расположены на скосе направляющей части, при этом лобовой породоразрушающий выступ ориентирован по продольному направлению скоса направляющей части, по меньшей мере, два гидромониторных сопла расположены на прилегающих к скатам противоположных участках калибрующей части, а, по меньшей мере, одно гидромониторное сопло расположено на калибрующей части с ориентацией по продольному направлению скоса направляющей части в сторону расположения фронтальной поверхности.

Недостатком названных гидромониторных бурильных головок является статическое воздействие на массив, что снижает эффективность работы бурильного инструмента на крепких породах. В таких условиях процесс направленной проходки скважины становится неэффективным и требует применения дополнительного ударного воздействия на породоразрушающие элементы.

Известны гидромониторные бурильные головки (RU 2081988, US 6209660, US 5148880, US 4993503) содержащие соединенный с бурильной установкой с возможностью вращения вокруг центральной оси головки корпус с фронтальной поверхностью, включающей породоразрушающие элементы, калибрующей частью с продолговатым контуром поперечного сечения, направляющей частью с асимметричным скосом и нагнетательные каналы, сообщенные с вводами в гидромониторные сопла.

Применение упомянутых устройств обеспечивает эффективное как гидромониторное, так и механическое вытесняющее воздействие на буримую породу. Однако при бурении такими устройствами имеют место осложнения в управлении смещением бурового снаряда по заданной траектории горизонтально-направленной скважины, особенно при наличии в породе значительных по размеру монолитных включений.

Наиболее близким к заявленному техническому решению является устройство гидромониторной бурильной головки для бурения подземной скважины (RU 137300), включающей средство соединения, центральный канал, корпус бурильной головки с каналами и соплами, управляющей поверхностью и передней поверхностью, отличающееся тем, что хвостовая часть соединена с корпусом бурильной головки штифтами и обжимным кольцом, внутри которого расположен фиксирующийся посредством винтов диск с входными струеформирующими отверстиями, напротив которых расположены

резонирующие элементы в виде пластин, консольно закрепленных во втором диске с выходными струеформирующими отверстиями, фиксирующемся винтами.

Использование данной головки увеличивает работоспособность породоразрушающего инструмента по крепким породам при прокладке пилотной скважины, путем придания воздействию на массив динамического характера кратковременными ударными импульсами, в частности продольно вибрационных ускорений, возникающих в инструменте при колебаниях жидкости и кавитации протекающей в буровом растворе.

Однако, расположение генератора гидродинамических колебаний непосредственно в бурильной головке не позволяет осуществлять регулирование взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин и изменять тем самым параметры динамического воздействия в зависимости от свойств пород. При изменении условий применения потребуется замена всей бурильной головки, что снижает эффективность процесса бурения.

Задачей, на решение которой направлено заявленное изобретение состоит в совершенствовании способа горизонтально направленного бурения. Техническим результатом является расширение технических характеристик породоразрушающего инструмента, а также повышение эффективности его работы.

Поставленная задача и технический результат достигаются тем, что предлагается устройство гидромониторной бурильной головки для горизонтально направленного бурения, включающее средство соединения, центральный канал, корпус бурильной головки с каналами и соплами, управляющей поверхностью, передней поверхностью, генератор вибрационных колебаний, отличающееся тем, что бурильная головка содержит закрепляемый в корпусе бурильной головки и выполненный с возможностью замены сменный элемент, включающий диск, содержащий по меньшей мере одну струеформирующую насадку, и диск, содержащий по меньшей мере одну соответствующую струеформирующей насадке резонирующую пластину, причем взаимное расположение струеформирующих насадок по отношению к резонирующим пластинам в сменном элементе регулируется с использованием контрольно-измерительного инструмента и фиксируется в корпусе сменного элемента штифтом, а сменные элементы, содержащие необходимое количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин, заменяются с учетом характеристик прочностных свойств грунта и возможностей насосного оборудования бурильной установки.

Сущность изобретения поясняется чертежами:

Фиг. 1 – чертеж гидромониторной бурильной головки, где

- 1 - средство соединения,
- 2 - центральный канал,
- 3 - корпус бурильной головки с каналами и соплами,
- 4 - управляющая поверхность
- 5 - передняя поверхность
- 6 - диск со струеформирующими насадками
- 7 - диск с резонирующими пластинами
- 8 - сменный элемент
- 9 - штифт.

Изобретение осуществляется следующим образом. При подготовке к выполнению работ по бурению скважины из комплекта, поставляемого с бурильной головкой, выбирается исполнение сменного элемента, в котором количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин соответствует указанным в проектной документации геологическим характеристикам пробуриваемых пород по траектории бурения. Выбранный вариант исполнения сменного элемента, с соответствующим количеством струеформирующих насадок и резонирующих пластин устанавливается в корпус бурильной головки, при этом регулировки взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин не требуется, что экономит время на подготовку к работе. В процессе выполнения работ, при переходе на породы с повышенной/пониженной категорией по буримости, для замены сменного элемента на более подходящий достаточно отсоединить корпус 3 от средства соединения 1, вынуть штифт 9, извлечь сменный элемент 8, установить на его место сменный элемент с необходимым количеством струеформирующих насадок и пластин, зафиксировать конструкцию штифтом 9 и завершить сборку головки соединением корпуса 3 со средством соединения 1. Гидромониторная бурильная головка готова к работе. Никаких дополнительных регулировок и настроек не требуется. Кроме того, выполненная в заводских условиях с использованием контрольно-измерительного инструмента регулировка взаимного расположения струеформирующих насадок и резонирующих пластин в сменных элементах

обеспечивает высокую точность и гарантирует наилучшие условия для эффективного функционирования генератора вибрационных колебаний.

Таким образом, предложенный способ горизонтально направленного бурения с использованием гидромониторной бурильной головки со сменными элементами, позволяет повысить эффективность работ при изменении свойств пород в процессе бурения подземной скважины.

В таблице 1 приведены установленные экспериментально рекомендуемые количества струеформирующих насадок и резонирующих пластин соответствующие различным категориям пород по буримости.

Таблица 1.

№№ п/п	Категория пород по буримости	Рекомендуемое количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин, шт.
1	I	1-2
2	II	2-3
3	III	3-4
4	IV	4-5

ФОРМУЛА

Устройство гидромониторной бурильной головки для горизонтально направленного бурения, включающее средство соединения, центральный канал, корпус бурильной головки с каналами и соплами, управляющей поверхностью, передней поверхностью, генератор вибрационных колебаний, отличающееся тем, что бурильная головка содержит закрепляемый в корпусе бурильной головки и выполненный с возможностью замены сменный элемент, включающий диск, содержащий по меньшей мере одну струеформирующую насадку, и диск, содержащий по меньшей мере одну соответствующую струеформирующей насадке резонирующую пластину, причем взаимное расположение струеформирующих насадок по отношению к резонирующим пластинам в сменном элементе регулируется с использованием контрольно-измерительного инструмента и фиксируется в корпусе сменного элемента штифтом, а сменные элементы, содержащие необходимое количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин, заменяются с учетом характеристик прочностных свойств грунта и возможностей насосного оборудования бурильной установки.

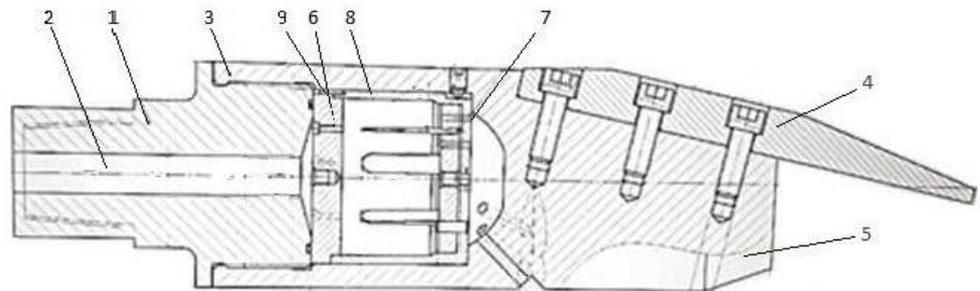
РЕФЕРАТ

Изобретение относится к способам и устройствам бурения и может быть использовано для бурения скважин при прокладке инженерных коммуникаций подземных кабелей или подземных линий с минимальным воздействием на окружающий массив методом горизонтально направленного бурения.

Задачей, на решение которой направлено заявленное изобретение состоит в совершенствовании способа горизонтально направленного бурения. Техническим результатом является расширение технических характеристик породоразрушающего инструмента, а также повышение эффективности его работы.

Поставленная задача и технический результат достигаются тем, что предлагается устройство гидромониторной бурильной головки для горизонтально направленного бурения, включающее средство соединения, центральный канал, корпус бурильной головки с каналами и соплами, управляющей поверхностью, передней поверхностью, генератор вибрационных колебаний, отличающееся тем, что бурильная головка содержит закрепляемый в корпусе бурильной головки и выполненный с возможностью замены сменный элемент, включающий диск, содержащий по меньшей мере одну струеформирующую насадку, и диск, содержащий по меньшей мере одну соответствующую струеформирующей насадке резонирующую пластину, причем взаимное расположение струеформирующих насадок по отношению к резонирующим пластинам в сменном элементе регулируется с использованием контрольно-измерительного инструмента и фиксируется в корпусе сменного элемента штифтом, а сменные элементы, содержащие необходимое количество струеформирующих насадок и резонирующих пластин, заменяются с учетом характеристик прочностных свойств грунта и возможностей насосного оборудования бурильной установки.

УСТРОЙСТВО ГИДРОМОНИТОРНОЙ
БУРИЛЬНОЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ
ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННОГО
БУРЕНИЯ



Фиг.1