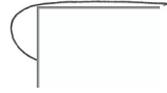


На правах рукописи



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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пушкарев Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
горный университет», кафедра
машиностроения, профессор;

Ватулин Ян Семенович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора
Александра I», кафедра «Наземные
транспортно-технологические комплексы»,
доцент.

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный политехнический
университет Петра Великого».**

Защита состоится 26 сентября 2023 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.05 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на официальном сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/retrov-andrey-andreevich>

Автореферат разослан «29» июня 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Е. В. Куракина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 прочность и живучесть дороги, 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, повышают 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 Польшмана – 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 Польмана – 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 стеновых 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 энергоемкость 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» 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 натуральных 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-практических конференция «Транспортная доступность Арктики: сети и системы» (3–4 июня 2021 года, г. Санкт-Петербург).

4. 2-я Международная научно-практических 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; одной монографии и одном патенте на изобретение).

Структура и объем диссертационного исследования

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. 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.

Исследования ресурса работы колебателей в зависимости от свойств материала и режимов термической обработки проводились на пластинах колебателя, выполненных из стали 60С2А, 65Г, 65С2ВА.

При оценке ресурса работы пластин определялись характеристики стали 60С2А, 65Г, 65С2ВА (табл. 1) и оценивались численные значения следующих показателей: фактический химический состав плавки стали, используемой для исследований; микротвердость; глубина обезуглероженного слоя; содержание неметаллических включений; макроструктура; степень полосчатости; величина зерна; предел текучести; предел прочности; относительное удлинение.

В целях сравнения в табл. 1 приведены данные для пластин колебателя из сталей 60С2А, 65Г, 65С2ВА, прошедших термическую обработку.

Механические характеристики пластин колебателя из сталей 60С2А, 65Г, 65С2ВА

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, HRC	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

Задача данного исследования состояла в определении режима термической обработки (ТО), который обеспечивал бы, наряду с повышением прочности материала пластин колебателя, также повышение 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

$$K_\delta = (1 - \delta)^{1/6}. \quad (1)$$

Значения коэффициента пластичности K_δ для различных состояний материала приведены в табл. 1. Видно, что наибольшее значение параметра пластичности реализуется при ТО пластин колебателя из стали 60С2А с отжигом в электропечи, последующей закалкой в соляной ванне и отпуском в электропечи. То есть термически обработанные пластины колебателя из стали 60С2А обладают наименьшей чувствительностью к концентраторам напряжения из числа исследуемых образцов. ТО по ГОСТ 14959–16 дает наименьшее значение коэффициента пластичности.

Кроме этого, в табл. 1 приведены значения предела выносливости σ_{-1} для рассматриваемых режимов ТО, величина которого определялась по формуле

$$\sigma_{-1} = K_\delta^{0,5} \cdot \sigma_b. \quad (2)$$

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. Таким показателем является параметр Π , определяемый из соотношения

$$\Pi = \frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}} - \delta. \quad (3)$$

Следует отметить, что оба исследованных показателя пластичности показывают близкую графическую картинку, но разные численные значения коэффициента.

Стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительной оценке резонансных характеристик бурильной головки машины ГНБ с встроенным генератором вибрационных колебаний в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами колебателей и струеформирующих насадок, были проведены на стенде (рис. 1), 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.



Рис. 1. Стенд для испытаний опытного образца бурильной головки с встроенным генератором гидродинамических колебаний в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами колебателей

Проведенные испытания подтвердили работоспособность бурильной головки с встроенным генератором гидродинамических колебаний в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами

колебателей, и позволили определить резонансные режимы работы колебателей (табл. 2).

Таблица 2

Резонансные режимы работ колебателей

№ п/п	Количество насадок	Резонансная частота, Гц	Амплитуда колебаний, м
1	2	1340	$2,0 \cdot 10^{-3}$
2	3	1450	$1,8 \cdot 10^{-3}$
3	4	1260	$2,1 \cdot 10^{-3}$
4	5	1380	$2,2 \cdot 10^{-3}$

На рис. 2 представлена зависимость амплитуды для различных резонансных частот пластины колебателя, генератора гидродинамических колебаний при подаче бурового раствора.

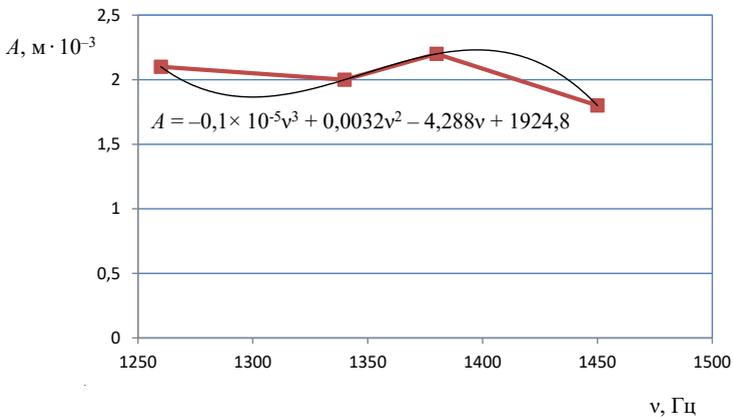


Рис. 2. Зависимость амплитуды для различных резонансных частот пластины колебателя

Анализ представленных на рис. 2 экспериментальных данных позволил получить уравнение аппроксимирующей кривой, имеющее вид полинома третьей степени:

$$A = -0,1 \cdot 10^{-5} \nu^3 + 0,0032 \nu^2 - 4,288 \nu + 1924,8, \quad (4)$$

где y – амплитуда колебаний пластины, $\text{м} \cdot 10^{-3}$; x – резонансная частота, Гц.

При моделировании колебаний бурильной головки с встроенным генератором в качестве модели выступает гармоническое кинематическое воздействие на элементы геометрии конечно-элементной модели (КЭМ), а в качестве критерия соответствия физике процесса принимается отклик лопатки бурильной головки, который, согласно экспериментальным данным, составляет по амплитуде перемещений 1,5–2,2 мм.

Показатель степени m , принятый в расчете линеаризованной КЭМ, вычислен на основании поочередных сопоставлений пределов выносливости (исходный параметр) с экспериментальными значениями напряжений за цикл, полученный при испытаниях на многоцикловую усталость (вторичный параметр).

Как показывают результаты оценки долговечности пластины колебателя, наиболее целесообразным решением исходя из анализа табл. 3 представляется доработка конструкции пластин колебателя в плане равномерного уменьшения их толщины, что обеспечивает их максимальную долговечность независимо от схемы приложения воздействия и расчетной модели долговечности.

Таблица 3

Сводная таблица результатов

КЭМ	Амплитуда колебаний, мм		Собственная частота колебаний пластины по первой изгибной форме, Гц	Максимальное расчетное значение эквивалентного напряжения в пластине, МПа	Расчетная долговечность с 50%-ной обеспеченностью, ч	
	лопатки	пластины			$m = 17,9$, $N_0 = 10 \cdot 10^6$ циклов	$m = 13,4$, $N_0 = 3 \cdot 10^6$ циклов
1	2,1	2,54	1550	800	≤ 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

Собственная частота колебаний лопатки лежит в диапазоне от 1550 до 1750 Гц, что может свидетельствовать о целесообразности снижения собственной частоты первой формы колебаний пластин. Модель была выполнена с использованием программного комплекса ANSYS Workbench.

2. Эффективная работа породоразрушающего инструмента установки горизонтально направленного бурения 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.

Один из путей совершенствования способа горизонтально направленного бурения – 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 является применение в конструкции породоразрушающего инструмента встроенных генераторов вибрационных колебаний. Так, известна конструкция, в которой 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. При этом функционирование колебателя в режиме резонанса обеспечивает максимальные значения амплитуды колебания пластин. Таким образом реализуется работа конструкции с минимальной энергоемкостью.

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.

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.

Бурильная головка представлена на рис. 3.

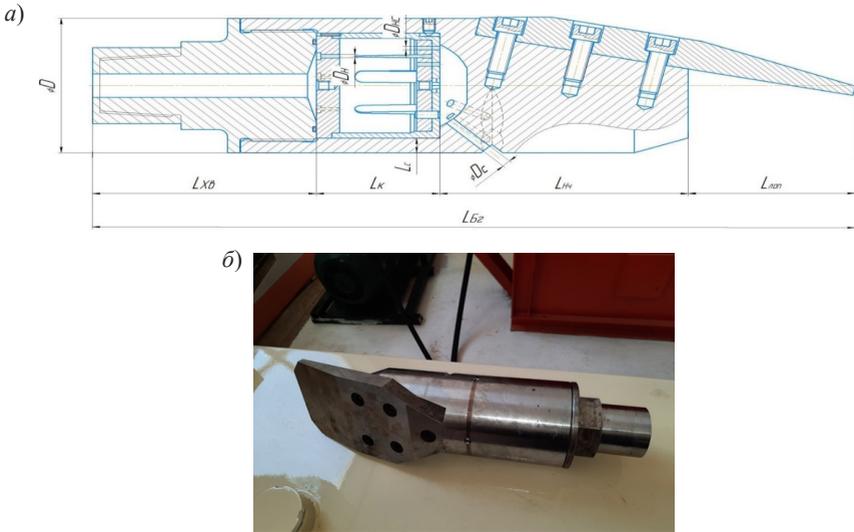


Рис. 3. Бурильная головка:

a – эскиз инструмента; *б* – опытный образец инструмента

Опытный образец бурильной головки предусматривал четыре исполнения колебателей с различным количеством струеформирующих насадок во встроенном генераторе вибрационных колебаний (табл. 4), а также конструктивные размеры корпуса колебателя (табл. 5).

Таблица 4

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

Геометрические параметры колебателей

Количество насадок	D_n , мм	$L_{И}$, мм	$L_{Ив}$, мм	D
2	60	80	494	115
3	65	80	494	115
4	73	80	494	115
5	81	80	494	115

Проведенные испытания опытного образца бурильной головки показали, что при реализации выявленных резонансных режимов работы колебателя, встроенного в бурильную головку, функционирование породоразрушающего инструмента происходит с наименьшей энергоемкостью; при этом процесс обеспечивается возможностями насосного оборудования установки ГНБ.

3. 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.

На основе результатов выполненных исследований разработана методика выбора конструктивного исполнения, которая включает:

1) режимы работы породоразрушающего инструмента установки ГНБ в зависимости от физико-механических свойств колебателей.

2) рекомендации по выбору конструктивного исполнения породоразрушающего инструмента установки ГНБ в зависимости от возможностей насосного оборудования бурильной установки.

3) рекомендации по выбору конструктивного исполнения породоразрушающего инструмента установки ГНБ в зависимости от условий применения машины на грунтах разной категории по буримости.

В табл. 6 приведены установленные экспериментально рекомендуемые количества струеформирующих насадок и резонирующих пластин, соответствующие различным категориям пород по буримости.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс СПбГАСУ при изучении дисциплин «Строительные машины» (23.05.01 НТТС, «Наземные транспортно-технологические средства»), «Исследования и испытания, наземных транспортно-технологических машин» (15.04.03 ПМХ, «Вычислительная механика транспортных систем»). Используются предприятием АО «Обуховский завод» при проектировании бурового

инструмента. Конструкция разработанной бурильной головки машины ГНБ с встроенным генератором гидродинамических колебаний защищена патентом РФ на изобретение.

Таблица 6

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Петров А. А.** Анализ напряженно-деформируемого состояния пластины колебателя буровой головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний / А. А. Петров // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 12. – С. 26–30 (0,31 п. л.).

2. **Петров А. А.** Оценка влияния режимов термической обработки стали 60С2А на ее механические характеристики и повышение работоспособности генератора

гидродинамических колебаний / А. А. Петров // Грузовик – 2023. – № 1. – С. 10–15 (0,37 п. л.).

3. **Петров А. А.** Расчет геометрических параметров буровой головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний / А. А. Петров, А. Е. Пушкарев, Н. Е. Манвелова // Строительные и дорожные машины. – 2022. – № 12. – С. 21–25 (0,31 п. л.).

Публикации, опубликованные в изданиях, индексируемых международной базой данных научного цитирования Scopus

4. **Petrov A. A.** Destruction of Welded Metal Structures of Construction Machines Operated in Corrosive Environments / A. Scherbakov, A. Sklyarova, A. Pushkarev, A. Petrov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 247. – P. 557–573. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_50 (1,0 п. л. / 0,1 п. л.).

5. **Petrov A. A.** Experimental Studies of the Effect of Heat Treatment on the Properties of Welded Assemblies of Working Bodies of Road Construction Machines / A. Scherbakov, A. Sklyarova, A. Pushkarev, A. Petrov // Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. NN 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 509. – Cham: Springer, 2023 (published 16 November 2022). – https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_100 (0,81 п. л. / 0,2 п. л.).

6. **Petrov A. A.** Calculation of maximum allowable capacity coefficient for urban passenger transport / A. Scherbakov, A. Pushkarev, O. Kuzmin, T. Vinograsova, A. Petrov // International Scientific Conference “Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East” (AFE-2022), vol. 371. – Cham: E3S Web Conf, 2023 (published 28 February 2023). – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337103024> (1,16 п. л. / 0,25 п. л.).

7. **Petrov A. A.** Effects of bulk cargo displacements on changes in truck axle loads / A. Scherbakov, A. Sklyarova, A. Pushkarev, A. Petrov // International Scientific and Practical Conference “Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering” (ERSME-2023), vol 376. – Cham: ERSME-2023, 2023 (published 31 March 2023). – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337604027> (0,81 п. л. / 0,2 п. л.).

Патент на изобретение

8. **Петров А. А.** Патент № 2795008. Устройство гидромониторной бурильной головки для горизонтально-направленного бурения / Петров А. А., Пушкарев А. Е., Михайлов А. Н. // Уведомление о приеме и регистрации заявки регистрационный номер 2022112368 от 04.05.2022 г.

Монография

9. **Петров А. А.** Повышение надежности, долговечности и износостойкости рабочих органов дорожно-строительных машин: монография / А. П. Щербаков, О. В. Кузьмин, А. А. Абросимова, А. А. Петров / Издат. дом «Петрополис», Санкт-Петербург, 2022. – 230 с. – ISBN 978-5-9676-1447-7 (14,375 п. л.).

Работы, опубликованные в других изданиях

10. **Петров А. А.** Современное состояние и перспективы развития техники и технологий бестраншейной прокладки / А. А. Петров, А. А. Шаронов // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: СПбГАСУ, 2018. – С. 83–88 (0,375 п. л.).

11. **Петров А. А.** Влияние кавитации на процессы, протекающие в гидромониторной бурильной головке с встроенным генератором гидродинамических колебаний / А. А. Петров // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: материалы 73-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: СПбГАСУ, 2020. – С. 26–33 (0,5 п. л.).

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 22.06.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 99.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.