

*На правах рукописи*



**ПЕТРОВ Андрей Андреевич**

**МЕТОД РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ БУРИЛЬНОЙ ГОЛОВКИ МАШИНЫ  
ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства  
и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

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

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Пушкарёв Александр Евгеньевич**
- Официальные оппоненты:** **Зорин Владимир Александрович**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический Университет (МАДИ)»,  
кафедра «Производство и ремонт автомобилей и дорожных машин», 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 «18» декабря 2025 года в 11:00 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 сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/petrov-andrey-andreevich>

Автореферат разослан «20» октября 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Репин С. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Создание новых и совершенствование существующих транспортно-технологических средств и их комплексов, и оборудования, обладающих высоким качеством, направлено на развитие и технологичность процессов в области машиностроения, строительной, транспортной отраслей и их инфраструктур, что в свою очередь 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 долговечность, влияет на эффективность и комфортность ее эксплуатации. 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 – бурильных головок. Повышение энерговооруженности бурильной головки за счет подведения к ней вибрационных колебаний, генератор которых встраивается в конструкцию самой головки, а в качестве источника энергии выступает поток промывочной жидкости, подаваемой при бурении, представляет собой перспективное направление расширения области применения машин ГНБ. Гидродинамический инструмент, построенный на базе описанного принципа, имеет существенные преимущества перед традиционным в части повышения производительности бурения и прокола. Однако вибрационные процессы, реализуемые при работе бурильной головки, повышают требования к усталостной прочности механических элементов. Таким образом, возрастает значимость выбора конструктивного исполнения инструмента и рабочих режимов, обеспечивающих, с одной стороны, достижение необходимых показателей выполнения производственной задачи, а с другой – не создающих условий для снижения надежности и долговечности машины в целом. При этом закономерности формирования характеристик вибрационных колебаний встроенного в бурильную головку генератора в зависимости от факторов процесса не установлены. Кроме того, отсутствуют рекомендации по выбору конструктивных параметров и режимов работы встроенного генератора вибрационных

колебаний (ВГВК) с учетом исполнения элементов его конструкции. Поэтому проведение исследований с учетом нового метода расчета и проектирования, определяющих влияние вибрационных характеристик гидродинамической бурильной головки машины 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 ГНБ востребована при бестраншейной прокладке трубопроводов, когда работы выполняются без обустройства траншей и вскрытия дневной поверхности. Мировые лидеры в области создания машин для бестраншейных технологий – это производители США (VERMEER, Ditch Witch), Германии (Herrenknecht) и др. В России современные установки ГНБ производит Скуратовский опытно-экспериментальный завод (Тульская область), Завод Буровой Техники (г. Вологодск), группа компаний «Экопром» (Московская область) и др. Исследованиями в данной области успешно занимались научные школы Тульского государственного университета (ТулГУ), Саратовского государственного технического университета (СГТУ), Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ). Н. В. Васильевым, В. М. Земсковым, Н. В. Краснолудским, Н. Я. Кершенбаумом, И. Г. Мартюченко, А. Е. Пушкаревым и другими учеными сформулированы основы научной базы применения вибрационных инструментов рабочих органов машин ГНБ и прокола. Обоснована возможность повышения энерговооруженности бурильной головки за счет подведения к ней вибрационных колебаний. Основы рабочего цикла генератора вибрационных колебаний, встроенного в бурильную головку, отражены в научных трудах российских ученых: Б. Г. Константинова, Г. С. Назарова, А. Ф. Назаренко, А. Б. Рогова, В. В. Колесникова. На базе кафедры наземных транспортно-технологических машин СПбГАСУ разработан комплект опытного образца бурильной головки ГНБ со встроенным гидродинамическим генератором вибрационных колебаний. Однако в настоящее время нет научно обоснованных рекомендаций как по выбору конструктивных параметров инструмента с ВГВК для эффективной работы, так и по режимам работы генератора с учетом свойств материала резонирующих пластин, а закономерности влияния вибрационных нагрузок на надежность и долговечность элементов конструкции встроенного генератора пока не установлены.

**Цель исследования.** Разработать метод расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ.

**Задачи исследования.** Цель диссертационного исследования достигается с помощью решения ряда последовательных задач, которые перечислены ниже.

1. Провести анализ развития и совершенствования рабочих органов машин ГНБ, а также методов повышения их производительности.

2. Исследовать ресурс работы и разработать имитационную модель функционирования резонирующих пластин генератора вибрационных колебаний для моделирования и экспериментального выявления закономерностей работы резонирующих пластин генератора вибрационных колебаний в зависимости от конструктивного исполнения.

3. Выполнить расчет конструктивных параметров, изготовить и испытать в условиях стенда опытный образец бурильной головки машины ГНБ с встроенным генератором вибрационных колебаний, оснащенным различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых испытаний.

4. Разработать метод расчета и проектирования конструктивных параметров бурильной головки с ВГВК, обосновать конструктивное исполнение гидродинамического инструмента и режимов работы машины ГНБ в конкретных условиях применения, обеспечивающих реализацию технологии ГНБ с максимальной энергоэффективностью.

**Объект исследования.** Гидродинамическая бурильная головка установки ГНБ с ВГВК.

**Предмет исследования.** Научно-методические основы расчета и проектирования гидродинамических бурильных головок машин ГНБ.

**Рабочая гипотеза.** Эффективная работа гидродинамической бурильной головки машины ГНБ достигается при реализации резонансного режима работы встроенного генератора и обеспечивается обоснованным выбором конструктивных параметров на основе установленных закономерностей влияния исполнения 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, размеров и долговечности резонирующих пластин.

2. Установлена зависимость энергоэффективности применения гидродинамической бурильной головки машины ГНБ от частоты колебаний пластин встроенного генератора, и влияния режима резонансных колебаний

механической системы на характеристики взаимодействия инструмента с массивом.

3. Разработан метод расчета и проектирования конструктивных параметров бурильной головки с ВГВК, обосновано конструктивное исполнение гидродинамического инструмента и режимов работы машины ГНБ в конкретных условиях применения.

**Теоретическая значимость работы** заключается в расширении представлений и выявлении закономерностей формирования резонансных частот в генераторе вибрационных колебаний, встроенном в бурильную головку машины ГНБ, и разработке на их основе научно обоснованных рекомендаций по выбору конструктивных параметров инструмента и режимов его работы, при которых реализация технологий ГНБ происходит с максимальной энергоэффективностью, с учетом особенностей конструкции инструмента и условий ведения работ.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке методики проектирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ (с учетом конструктивного исполнения резонирующих пластин), обеспечивающей энергоэффективность и долговечность ВГВК; создании опытного образца бурильной головки для установки ГНБ с ВГВК, а также в определении эффективности и особенностей его работы.

Получен патент на изобретение № 2795008 «Устройство гидромониторной бурильной головки для горизонтально-направленного бурения» (авторы А. А. Петров, А. Е. Пушкарев, А. Н. Михайлов. Уведомление о приеме и регистрации заявки: регистрационный номер 2022112368 от 04.05.2022).

**Методология и методы исследования** основаны на:

- анализе и обобщении научной и производственной информации об использовании оборудования для установок ГНБ с применением динамического воздействия на пласты;
- проведении теоретических и экспериментальных исследований процессов, происходящих при работе бурильных головок с ВГВК;
- анализе данных, полученных в результате экспериментов, и их сопоставлении с теоретическими исследованиями;
- разработке рекомендаций по оптимизации режимов работы и конструкции ВГВК, обеспечивающих повышение эффективности работы бурильной головки;
- научном анализе и обобщении результатов теоретических исследований работы генераторов вибрационных колебаний, реализующих эффект Польмана-Яновского, с определением энергетических характеристик вибрационного процесса;

– экспериментальных исследованиях функционирования генератора вибрационных колебаний, встроенного в бурильную головку машины ГНБ в стендовых условиях;

– экспериментальных исследованиях взаимодействия гидродинамической бурильной головки машины ГНБ с массивом по обоснованию режимов работы установки, при которых достигается максимальная энергоэффективность;

– разработке рекомендаций по конструктивному исполнению и режимам работы генератора вибрационных 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. Обеспечена долговечность работы гидродинамической бурильной головки машины ГНБ на основе установленных закономерностей функционирования резонирующих пластин, обладающих необходимой прочностью и ресурсом работы в резонансном режиме.

2. Эффективная работа гидродинамической бурильной головки машины ГНБ, выразившаяся в снижении усилия подачи, достигается в резонансном режиме колебаний генератора, встроенного в корпус инструмента, когда колебания пластин, вызванные кавитационными процессами, совпадают с частотой собственных колебаний механической системы.

3. Метод расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ, обеспечивающий энергоэффективность и долговечность встроенного генератора вибрационных колебаний, выбранный с учетом конструктивного исполнения резонирующих пластин.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований** обоснована применением апробированных методов непараметрической статистики 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.

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

**Практическая ценность и реализация результатов исследования** состоит в использовании результатов диссертационной работы «Метод расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки машины горизонтально направленного бурения» в учебном процессе при изучении дисциплин (модулей) «Строительные машины» и «Технология машиностроения» по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование» на кафедре наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета ФГБОУ ВО «СПбГАСУ».

Основные положения диссертационного исследования, позволяют развивать научно-методические подходы к расчету и проектированию бурильных головок с встроенным генератором вибрационных колебаний для эффективной работы, с установленными режимами работы генератора в зависимости от конструктивного исполнения резонирующих пластин, и закономерности влияния вибрационных нагрузок на надежность и долговечность элементов конструкции встроенного генератора, для подготовки специалистов в области строительных машин, обладающих различными компетенциями как исполнителя, так и руководителя

Метод расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ используется предприятием АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург, при проектировании бурильного инструмента.

**Личный вклад автора** заключается в проведении информационного поиска по обоснованию направления исследования, постановке его целей и задач, выдвижении рабочей гипотезы исследования. Соискателем разработана конструкция и изготовлен опытный образец бурильной головки с ВГВК, оснащенный наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых испытаний. Соискателем организовано проведение экспериментальных исследований опытного образца бурильной головки машины ГНБ, обработаны и проанализированы результаты. Соискателем научно обоснован и разработан метод расчета и проек-

тирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний, обеспечивающий энергоэффективность и долговечность встроенного генератора вибрационных колебаний с учетом конструктивного исполнения резонирующих пластин в зависимости от возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационного исследования докладывались на 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (4–6 апреля 2018 года, СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург); I Международной научно-практической конференции «Транспортная доступность Арктики: сети и системы» (3–4 июня 2021 года, СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург); II Международной научно-практической конференции «Транспортная доступность Арктики: сети и системы» (1–2 июня 2022 года, СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург); Региональной LXXV научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (11–14 октября 2022 года, СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург).

**Публикации.** Основные положения и научные результаты диссертации опубликованы в десяти печатных работах (четыре из которых представлены в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК), а также нашли отражение в монографии и патенте на изобретение.

#### **Структура и объем диссертационного исследования**

Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список использованной литературы и приложений. Материалы диссертации состоят из 150 страниц основного текста, 68 рисунков, 50 таблиц. Библиографический список литературы включает 120 наименований. Общий объем диссертации составляет 150 страниц.

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

В первой главе выполнен анализ в изучаемой 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 гидродинамической бурильной головки машины ГНБ с ВГВК в комплекте со сменными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых

испытаний. Рассмотрены методики экспериментальных исследований опытного образца гидродинамической бурильной головки машины ГНБ с ВГВК и ресурса работы резонирующих пластин.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований работы опытного образца гидродинамической бурильной головки машины ГНБ с ВГВК; сформулированы рекомендации по методу проектирования и расчету бурильной головки машины ГНБ с ВГВК исходя из возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины. Получена регрессионная модель, которая позволяет рассчитать диаметр пилотной скважины в зависимости от основных факторов, определяющих эффективность бурения.

В четвертой главе разработан метод расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ, обеспечивающий энергоэффективность и долговечность ВГВК с учетом конструктивного исполнения резонирующих пластин в зависимости от возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**1. Обеспечена долговечность работы гидродинамической бурильной головки машины ГНБ на основе установленных закономерностей функционирования резонирующих пластин, обладающих необходимой прочностью и ресурсом работы в резонансном режиме.**

Исследования ресурса работы резонирующих пластин проводились на образцах пластин, выполненных из стали 60С2А, 65Г, 65С2ВА; при этом фиксировались фактические численные значения механических характеристик стали (табл. 1).

*Таблица 1*

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

Характеристика	Исполнения резонирующих пластин из стали		
	65Г	60С2А	65С2ВА
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	1001	1221	1492
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	750	850	1132
Относительное удлинение при разрыве $\delta_4$ , %	1,2	1,1	1,2
Твердость, НRC	42	29–39	40–43

Характеристика	Исполнения резонирующих пластин из стали		
	65Г	60С2А	65С2ВА
Коэффициент пластичности $K_\delta$	0,3656	0,3658	0,3656
Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа	605	739	902
Параметр пластичности $\Pi$	1,33	1,42	1,32

В ходе исследования определялось исполнение резонирующих пластин, для которого, наряду с повышением прочности материала пластин, также повышается их пластичность с целью снижения чувствительности деталей к концентраторам напряжений в виде возникающих в процессе работы трещин. Помимо простых показателей пластичности  $\delta$  и  $\Psi$ , необходимо рассматривать более сложные. Одним из таких показателей является коэффициент пластичности  $K_\delta$ , определяемый из соотношения

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

Значения коэффициента пластичности  $K_\delta$  для различных исполнений резонирующих пластин приведены в табл. 1. Видно, что наибольшее значение коэффициента пластичности наблюдается для образцов пластин из стали 60С2А, которые обладают наименьшей чувствительностью к концентраторам напряжения из числа исследуемых образцов.

Кроме этого, в табл. 1 приведены значения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  для рассматриваемых образцов, величина которого определялась по формуле

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

При определении исполнения резонирующих пластин, обладающих повышенной пластичностью материала с целью снижения чувствительности деталей к концентраторам напряжений, включая возникающие в процессе работы трещины, помимо коэффициента пластичности  $K_\delta$ , использовался показатель более простой в расчете, но учитывающий сопротивление деформации. Таким показателем является параметр пластичности  $\Pi$ , определяемый из соотношения

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

Следует отметить, что оба исследованных показателя пластичности показывают близкую качественную картину для различных марок используемых сталей, но разные численные значения коэффициента.

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

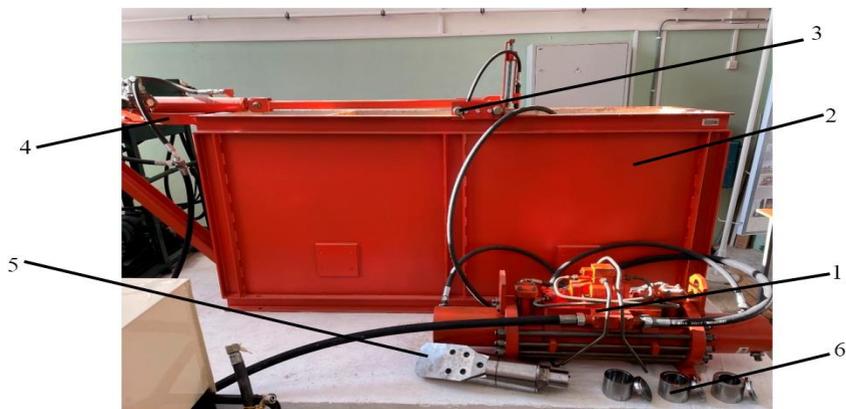


Рис. 1. Стенд для испытаний опытного образца бурильной головки с ВГВК в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами резонирующих пластин: 1 – насосная станция высокого давления мультипликаторного типа; 2 – емкость с грунтом; 3 – подвижная каретка; 4 – гидроцилиндр; 5 – испытуемый образец бурильной головки; 6 – генераторы вибрационных колебаний различного исполнения

Проведенные испытания подтвердили работоспособность породоразрушающего инструмента с ВГВК в комплекте со сменными корпусами, оснащенными различными наборами резонирующих пластин, и позволили определить резонансные режимы их работы (табл. 2).

Таблица 2

Резонансные режимы работ резонирующих пластин

№ 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 от резонансной частоты колебаний пластины генератора вибрационных колебаний при подаче бурового раствора.

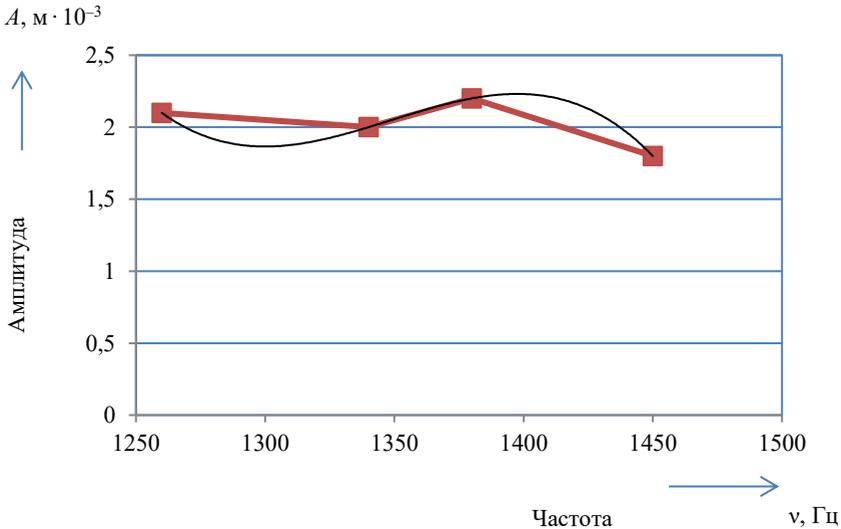


Рис. 2. Зависимость амплитуды от резонансной частоты колебаний пластины

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

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

где  $A$  – амплитуда колебаний пластины, м · 10<sup>-3</sup>;  $v$  – резонансная частота, Гц.

При моделировании колебаний бурильной головки со 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. Схема нагружения конечно-элементной модели приведена на рис. 3.

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

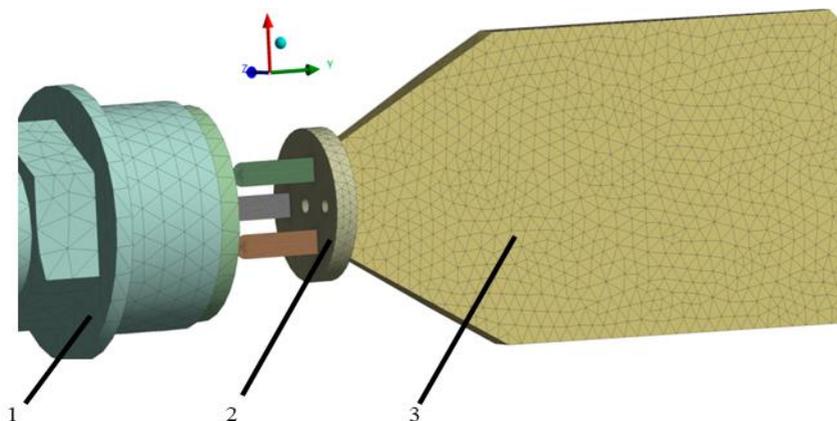


Рис. 3. Конечно-элементная модель бурильной головки: 1 – корпус; 2 – диск с резонирующими пластинами; 3 – лопатка

Как показывают результаты оценки долговечности резонирующей пластины, наиболее целесообразным решением исходя из анализа табл. 3 представляется доработка конструкции резонирующих пластин 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		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	$\leq 10$	
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	$\infty$	
8	2,2	1,18		406	122	206

Частота колебаний лопатки лежит в диапазоне от 1550 до 1750 Гц. Модель была выполнена с использованием программного комплекса ANSYS Workbench.

**2. Эффективная работа гидродинамической бурильной головки машины ГНБ, выразившаяся в снижении усилия подачи, достигается в резонансном режиме колебаний генератора, встроенного в корпус инструмента, когда колебания пластин, вызванные кавитационными процессами, совпадают с частотой собственных колебаний механической системы..**

Как уже было отмечено выше, одним из направлений развития метода ГНБ может служить повышение производительности данных машин за счет применения более совершенного породоразрушающего инструмента, что может быть достигнуто через использование энергии бурового раствора проходящего через породоразрушающий инструмент для повышения эффективности его работы.

Наиболее перспективным следует признать применение в конструкции породоразрушающего инструмента ВГВК. Так, известна конструкция, где в корпус бурильной головки встроен диск с входными струеформирующими отверстиями, напротив которых расположены резонирующие элементы в виде пластин, консольно закрепленные 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 генератора в режиме резонанса обеспечивает максимальные значения амплитуды колебания пластин.

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 нее возникает кавитационная область, возбуждающая ее колебания, за счет чего вибрация передается на ГБГ.

Коллективом ученых кафедры НТТМ Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, предложено новое техническое решение, защищенное Патентом РФ № 2795008, зарегистрированным в Государственном реестре изобретений РФ 27.04.2023 г. (рис. 4).

Опытный образец бурильной головки предусматривал четыре исполнения генератора с различным количеством резонирующих пластин и струеформирующих насадок (табл. 4).

Таблица 4

Выбор гидравлических характеристик насоса исходя из количества насадок

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

а)



б)

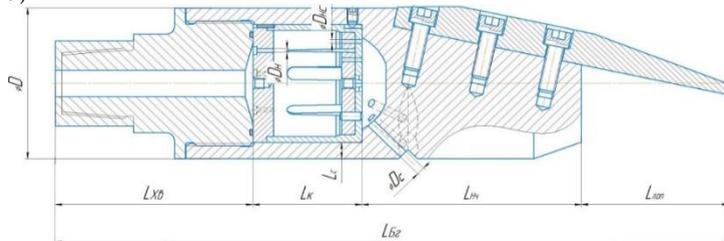


Рис. 4. Бурильная головка: а – конструктивная схема; б – общий вид опытного образца

Проведенные испытания опытного образца бурильной головки показали, что при реализации выявленных резонансных режимов работы встроенного генератора наблюдается снижение усилия подачи в среднем на 22–27 % (рис. 5), что подтверждает эффективность выполненной конструкции.

Кроме того, сравнение полученных значений с данными из литературных источников, содержащих результаты подобных исследований, выполненных другими учеными (в частности, В. В. Колесниковым), показывает, что качественно картина изменения усилия подачи, возникающего при взаимодействии бурильной головки с грунтовым массивом, аналогична как для экспериментального образца с одной пластиной, исследованного В. В. Колесниковым, так и для образца с пятью пластинами. Численные значения усилий существенно разнятся: в эксперименте Колесникова использовалась бурильная головка с внешним диаметром 22 мм, тогда как в нашем эксперименте опытная бурильная головка имела внешний диаметр 110 мм. Однако ярко выраженное снижение усилия подачи при давлении 2 МПа, соответствующем резонансному режиму работы пластин генератора, свидетельствует об адекватном понимании механизма наблюдаемого процесса.

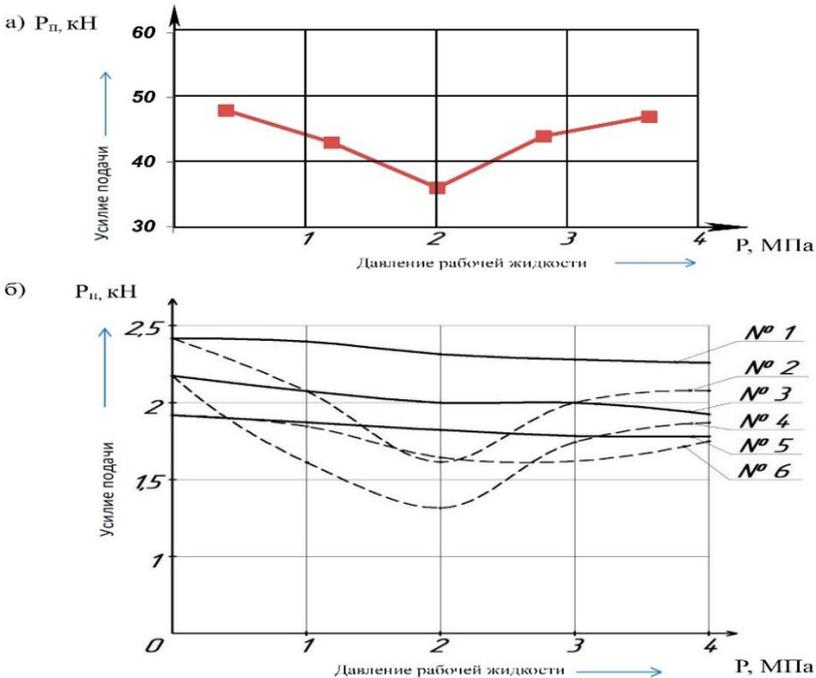


Рис. 5. Графики зависимости усилия подачи  $P_{п}$  от давления рабочей жидкости  $P$ : а – для опытного образца с встроенным генератором, оснащенный пятью пластинами; б – данные В. В. Колесникова (№ 1, 2:  $\delta_{упл} = 430$  кПа; № 3, 4:  $\delta_{упл} = 250$  кПа; № 5, 6:  $\delta_{упл} = 180$  кПа; — — — прямая промывка; - - - - с ВГВК

Высокая сходимость данных, представленных в таблице 5, и факт адекватности полученной зависимости ДПС от сопротивляемости массива уплотнению  $\delta_{упл}$ , скорости потока рабочей жидкости  $V_{ж}$  и усилия подачи  $P_{п}$  подтверждаются рассчитанными критерием Фишера  $F = 4,25$  и индексом корреляции  $R^2 = 0,97$ .

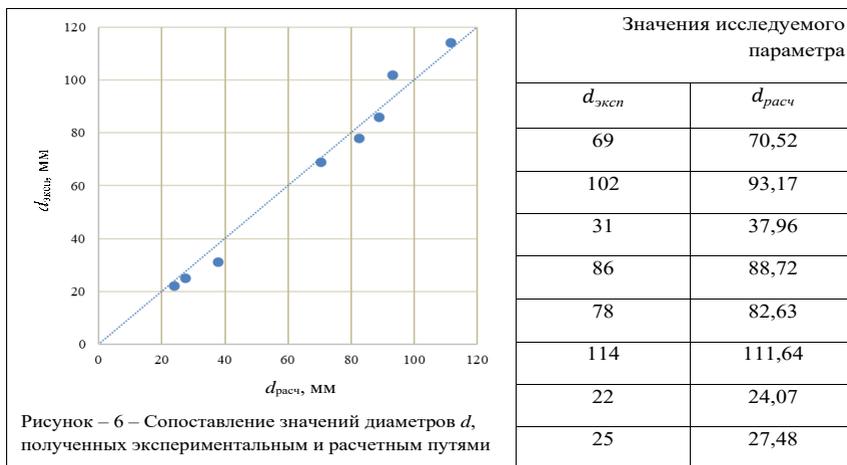
Уравнение в натуральном виде с указанием факторов влияния выглядит следующим образом:

$$d = 0,0707\delta_{упл} + 2,15V_{ж} + 0,33P_{п} - 0,2 \cdot 10^{-2} \delta_{упл} V_{ж} - 0,5 \cdot 10^{-2} \cdot V_{ж} P_{п} - 0,5 \cdot 10^{-3} \delta_{упл} P_{п} + 0,7 \cdot 10^5 \delta_{упл} V_{ж} P_{п} - 35,45, \quad (5)$$

Важно отметить, что функционирование бурильной головки в резонансном режиме работы встроенного генератора происходит с наименьшей энергоемкостью. При этом процесс обеспечивается возможностями насосного оборудования установки ГНБ.

Таблица 5

Сопоставление значений диаметра  $d$ , полученных экспериментальным и расчетным путями



**3. Метод расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ, обеспечивающий энергоэффективность и долговечность встроенного генератора вибрационных колебаний, выбранный с учетом конструктивного исполнения резонирующих пластин.**

На основе результатов выполненных исследований разработан метод расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ, который включает:

1) исходные данные для расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки;

2) рекомендации по определению конструктивного исполнения гидродинамической бурильной головки с ВГВК, указывающие:

– количество резонирующих пластин/струеформирующих насадок в генераторе вибрационных колебаний исходя из паспортных возможностей заданной базовой машины ГНБ;

– геометрические размеры ВГВК с учетом принятого количества резонирующих пластин;

– материал для изготовления резонирующих пластин;

3) рекомендации по организации работ с использованием гидродинамической бурильной головки машины ГНБ в зависимости от условий применения машины на грунтах разной категории по буримости.

Для практического использования предложенного метода разработана расчетная программа для ПК. Алгоритм расчета представлен на рис. 6. Программа позволяет производить расчет геометрических параметров и режимов работы ВГВК для конкретных условий применения и возможностей машины ГНБ. Кроме того, в программе реализована возможность расчета и оценки энергоэффективности применения исполнения генератора вибрационных колебаний для конкретного исполнения бурильной головки, что позволяет обоснованно давать рекомендации по формированию комплекта оборудования для наиболее энергоэффективного выполнения проекта в конкретных условиях.

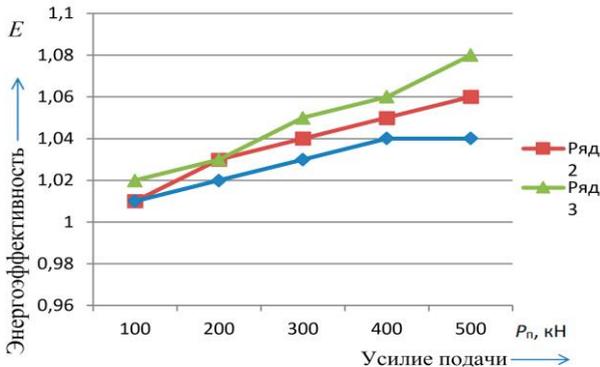


Рис. 6. Зависимость энергоэффективности  $E$  от усилия подачи  $P_{п}$

Так, например, расчет энергоэффективности использования бурильной головки машины ГНБ с ВГВК при прокладке скважины диаметров 100 мм в массиве с показателем сопротивления уплотнению  $\delta_{упл}$ , равном 180, 250 и 430 кПа при частоте вращения бурового инструмента  $n = 50$  об/мин, скорости прокладки  $v = 1$  м/мин, машиной с крутящим моментом на инструменте  $T = 5$  кН·м, показал, что для всех рассмотренных условий применения энергоэффективность  $E$  инструмента с ВГВК увеличивается при переходе на массивы с большей сопротивляемостью уплотнению  $\delta_{упл}$  (рис. 7) и составляет от 1,01 до 1,08. При этом с увеличением усилия подачи  $P_{п}$  энергоэффективность также возрастает с 1,01 до 1,04 (для массивов с  $\delta_{упл} = 180$  кПа) и с 1,02 до 1,08 (для массивов с  $\delta_{упл} = 430$  кПа).

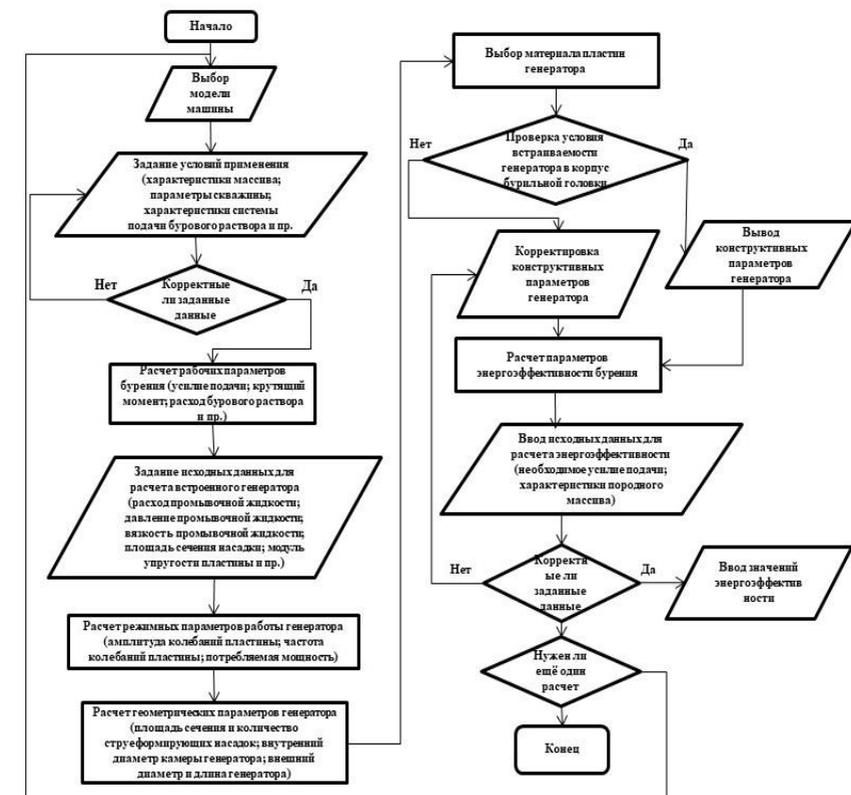


Рис. 7. Алгоритм расчета и проектирования гидродинамического технологического инструмента установки ГНБ

Для практического использования предложенного метода разработана расчетная программа для ПК. Алгоритм расчета представлен на рис. 6. Программа позволяет производить расчет геометрических параметров и режимов работы ВГВК для конкретных условий применения и возможностей машины ГНБ. Кроме того, в программе реализована возможность расчета и оценки энергоэффективности применения исполнения генератора вибрационных колебаний для конкретного исполнения бурильной головки, что позволяет обоснованно давать рекомендации по формированию комплекта оборудования для наиболее энергоэффективного выполнения проекта в конкретных условиях.

Результаты исследования внедрены в учебный процесс СПбГАСУ при изучении дисциплин «Строительные машины» (23.05.01 НТТС, «Наземные транспортно-технологические средства»). Этот опыт был использован предприятием АО «Обуховский завод» при проектировании бурового инструмента. Конструкция разработанной бурильной головки машины ГНБ с ВГВК защищена патентом РФ на изобретение.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате выполненных экспериментальных и теоретических исследований решена актуальная научно-техническая задача разработки метода расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки машины ГНБ, обеспечивающего повышение долговечности и эффективности функционирования ВГВК с учетом возможностей насосной установки конкретной машины. Это было достигнуто на основе установленных закономерностей влияния исполнения резонирующих пластин на усталостную прочность и ресурс их работы в зависимости от возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины, что вносит важный вклад в развитие средств механизации строительных работ.

Основные научные и практические результаты исследований были следующими:

1. Разработана конструкция и изготовлен опытный образец гидродинамической бурильной головки машины ГНБ с ВГВК в комплекте со сменными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок для проведения стендовых испытаний. Проведены стендовые испытания по проверке работоспособности и сравнительной оценке резонансных характеристик опытного образца гидродинамической бурильной головки машины ГНБ с ВГВК в комплекте с различными наборами резонирующих пластин и струеформирующих насадок. Подтверждена работоспособность предложенной конструкции бурильной головки.

2. Экспериментально определены закономерности функционирования и выявлены режимы работы генератора вибрационных колебаний, встроенного в гидродинамическую бурильную головку машины ГНБ. Установлено, что при частоте в диапазоне от 1340 до 1450 Гц для всех вариантов исполнения ВГВК возникает резонанс, а амплитуда достигает  $(1,5...2,2)10^{-3}$  м. Исследован ресурс работы резонирующих пластин различного конструктивного исполнения. Установлено, что для резонирующих пластин, изготовленных из стали 60С2А с отжигом в электропечи, последующей закалкой в соляной ванне и отпуском в электропечи, долговечность работы резонирующей пластины в резонансном режиме при амплитуде колебаний  $1,2 \cdot 10^{-3}$  м составит не менее 5000 часов.

3. Обосновано конструктивное исполнение бурильной головки с встроенным генератором гидродинамических колебаний, предусматривающее наличие сменных элементов: генераторов вибрационных колебаний, 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. Экспериментально подтверждена эффективность применения гидродинамической бурильной головки машины ГНБ с ВГВК, выразившаяся в снижении усилия подачи на 22–27 % при реализации резонансного режима работы ВГВК в диапазоне от 1340 до 1450 Гц с амплитудой  $2,2 \cdot 10^{-3}$  м и при давлении промывочной жидкости 2 МПа.

4. Разработан метод расчета и проектирования гидродинамической бурильной головки с ВГВК машины ГНБ, который в зависимости от возможностей насосного оборудования бурильной установки и условий применения машины позволяет обосновать конструктивное исполнение встраиваемого генератора вибрационных колебаний и режимы его работы, обеспечивающие повышение эффективности процесса бурения и проведение работ с максимальной энергоэффективностью. Показано, что для всех рассмотренных условий применения при переходе с массивов  $\delta_{\text{упл}} = 180$  кПа на массивы с большей сопротивляемостью уплотнению ( $\delta_{\text{упл}} = 430$  кПа) энергоэффективность инструмента с ВГВК увеличивается и составляет от 1,01 до 1,08.

5. Построена регрессионная модель, отражающая зависимость ДПС от трех основных параметров, оказывающих влияние на результативность работы машины ГНБ и процесса бурения в целом: сопротивляемость массива уплотнению, скорость потока рабочей жидкости и усилие подачи. Адекватность модели подтверждена рассчитанными значениями критерия Фишера (4,25) и индекса корреляции (0,97).

## 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. 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 (0,31/0,15 п. л.).

3. 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.).

4. Петров А. А. Обоснование параметров гидродинамической буровой головки машины ГНБ со встроенным генератором вибрационных колебаний / А. Е. Пушкарев, А.А. Склярова., А. А. Петров. // Известия Тульского государственного университета. – 2025. – № 7. – С. 3–10 (0,92/0,4 п. л.).

### Патент на изобретение

5. Петров А. А. Патент № 2795008. Устройство гидромониторной буровой 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

6. 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

7. 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 (0,375/0,25 п. л.).

8. 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.).

9. Петров А. А. Методика подбора режимов работы насоса установки ГНБ в зависимости от конструктивных параметров бурильной головки со встроенным генератором гидродинамических колебаний / А. А. Петров // Актуальные проблемы безопасности дорожного движения: материалы 75-й Научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: СПбГАСУ, 2023. – С. 407–411 (0,312 п. л.).

10. Петров А.А. Решение задачи построения математической модели колебания пластины встроенного генератора вибрации в рабочую головку машины ГНБ / Пушкарев А.Е., Петров А.А., Складова А.А. // Строительные и дорожные машины. – 2023. – № 7. – С.20-24. (0,31/0,12 п.л.)

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 07.10.2025. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 109.

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





