

На правах рукописи



Склярова Анастасия Алексеевна

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА МАШИНЫ
ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ
С РАБОЧЕЙ СРЕДОЙ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства
и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

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

Научный руководитель:

Пушкарев Александр Евгеньевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мартюченко Игорь Гаврилович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина
Ю.А.», кафедра «Инженерная геометрия
и основы САПР», профессор;

Вагулин 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
политехнический университет
Петра Великого».**

Защита состоится «16» декабря 2024 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 официальном сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/sklyarova-anastasiya-alekseevna>

Автореферат разослан «07» ноября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Куракина Е. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день в России, и в Санкт-Петербурге в частности, отмечена тенденция к системному обустройству различных по назначению подземных протяженных сооружений бестраншейным способом ведения работ, к которым относится технология горизонтально направленного бурения (ГНБ). Применение указанной технологии позволяет нивелировать в процессе проведения работ ограничение и (или) прекращение движения автомобильного (железнодорожного) транспорта, а также минимизировать отрицательное техногенное воздействие на ландшафт и окружающую среду.

Проведение работ в технологии ГНБ осуществляется путем эксплуатации машин (МГНБ), оснащенных специальным технологическим инструментом. Конструктивные и режимные характеристики работы такого инструмента определяют область рационального применения МГНБ. На сегодняшний день расширение области рационального применения МГНБ и, соответственно, диапазона условий производства работ на объектах за счет повышения ее энергоэффективности, является актуальной научной задачей.

Наиболее перспективным из общеизвестных путей совершенствования МГНБ является оснащение технологического инструмента машины генератором вибрационных колебаний (ГВК), создающим усилия динамического характера за счет производимой энергии работы промывочной жидкости (воды, водного, бентонитового растворов). Рассматриваемый способ повышения энергоэффективности работы МГНБ исключает потребность в увеличении габаритов машины и применении внешних источников, вырабатывающих энергию для увеличения производительности установки.

При этом отсутствие на текущий момент научно обоснованных рекомендаций по эксплуатации МГНБ со встроенным в конструкцию технологического инструмента ГВК, сформированных на базе оценки технического уровня (ТУ) машиностроительной продукции и учитывающих также характеристики рабочей среды, определяет актуальность настоящего исследования.

Степень разработанности проблемы. Специфика проведения комплекса земляных работ с трубопроводами и кабельными линиями, пролегающими под землей, в стесненных городских условиях или условиях повышенной сложности обуславливает применение МГНБ различных категорий («мини», «миди», «макси», «мега»). Производство подобных установок активно развернуто как в зарубежных странах (Китай (Hanlyma, XCMG, FDP), США (Vermeer, Ditch Witch), Германия (Herrenknecht),

и др.), так и функционирует на территории Российской Федерации (Скура-товский машиностроительный завод, группа компаний «Экопром» и др.).

Исследованиями в области динамического воздействия на грунт, развития и совершенствования техники и технологии ГНБ успешно занимались научные школы ФГБОУ ВО «СПбГАСУ», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», ФГБОУ ВО «ТулГУ», ФГБОУ ВО «СГТУ им. Гагарина Ю.А.», ФГАОУ ВО «СПбПУ» и др. Весомый вклад внесли такие ученые как Н.В. Васильев, Н.В. Краснолудский, А.Е. Пушкарев, Д.А. Юнгмейстер, В.М. Земсков, В.В. Колесников, Я.С. Ватулин, И.Г. Мартюченко, Н.Я. Кершенбаум, Г.С. Назаров, А.Б. Рогов, Е.А. Кобелев, В.Д. Сачивка, Б.Б. Данилов, В.В. Червов, А.А. Рогачев и др. Исследования вышеперечисленных научных школ и их отдельных представителей позволили сформировать научную базу в области развития техники и технологии ГНБ и создания и эксплуатации технологического инструмента со встроенным внутрь ГВК, а также обосновать возможности увеличения энерговооруженности рабочего органа МГНБ посредством возбуждения вибрационных колебаний. Теоретические исследования применения ГВК различных конфигураций и конструктивных исполнений запатентованы ФИПС.

При этом в вышеуказанных исследованиях не установлены зависимости между конструктивным исполнением ГВК и оказываемым им воздействием на рабочую среду, обосновывающим область рационального применения МГНБ, что подтверждает актуальность диссертационной работы и обуславливает цель исследования.

Цель исследования. Определить параметры взаимодействия технологического инструмента машины горизонтально направленного бурения, оснащенного генератором вибрационных колебаний, с рабочей средой, способствующие повышению энергоэффективности машины горизонтально направленного бурения.

Задачи исследования.

1. Разработать метод определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой для формирования рекомендаций по ее эксплуатации.

2. Установить зависимость между конструктивными и режимными параметрами встроенного в технологический инструмент ГВК посредством применения имитационного моделирования.

3. Экспериментально подтвердить закономерности, характеризующие работу встроенного в технологический инструмент МГНБ ГВК.

4. Определить энергоэффективность работы МГНБ, в конструкцию технологического инструмента которой встроен ГВК, в зависимости от характеристик рабочей среды.

Объект исследования. Взаимодействие технологического инструмента МГНБ со встроенным в конструкцию ГВК с рабочей средой.

Предмет исследования. Параметры взаимодействия технологического инструмента МГНБ со встроенным в конструкцию ГВК с рабочей средой.

Рабочая гипотеза. Максимальная эффективность работы машины горизонтально направленного бурения обеспечивается посредством подбора оптимальных параметров технологического инструмента машины горизонтально направленного бурения в зависимости от характеристик рабочей среды.

Научная новизна:

1. Разработан метод определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой, основанный на использовании аналитической модели оценки ТУ, позволяющей объективно выполнить сравнительный анализ представленного ряда техники ГНБ, и предложен показатель результативности модернизации МГНБ в рамках применения разработанного метода.

2. Выявлены параметры взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой, и установлены зависимости между конструктивным исполнением встроенным внутрь технологического инструмента ГВК и оказываемым им воздействием на рабочую среду. Определены области параметров, обеспечивающие максимальную энергоэффективность.

Теоретическая значимость работы состоит в создании метода, позволяющего выявить ключевой параметр взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой и определить направление совершенствования техники ГНБ на основе установленных зависимостей.

Практическая значимость работы заключается в использовании разработанного метода определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой, имеющего в составе аналитическую модель оценки ТУ МГНБ, реализованную в прикладном программном обеспечении, для обоснования значимых параметров взаимодействия технологического инструмента с рабочей средой и применения при производстве работ профильными организациями разработанных рекомендаций по подбору МГНБ на основе выявленных параметров.

Область исследования отвечает требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы:

– пункт 1 «Теория рабочих процессов транспортно-технологических средств и их комплексов отраслевого назначения, взаимодействующих с рабочими средами (объектами) посредством навесного, прицепного и другого технологического оборудования»;

– пункт 2 «Методы расчета и проектирования, направленные на создание новых и совершенствование существующих транспортно-технологических средств и их комплексов, обладающих высоким качеством, в том числе повышенными показателями экономичности, надежности, производительности, экологичности и эргономичности, обеспечивающих энергоэффективность и безопасность эксплуатации».

Методология и методы исследования базируются на применении комплексного подхода, включающего общенаучные методы синтеза и анализа и экспериментальную проверку выявленных посредством теоретических исследований зависимостей параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой. Метод определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой основан на положениях элементарной теории вероятности и многокритериальной оптимизации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплекс параметров, позволяющих обеспечить работу МГНБ в режиме максимальной энергоэффективности, устанавливается посредством метода определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой, основанного на использовании аналитической модели оценки ТУ представленного ряда исследуемой техники ГНБ.

2. Повышение энергоэффективности работы МГНБ, имеющей в конструкции технологического инструмента ГВК, достигается за счет роста производительности работы МГНБ, выраженного в увеличении скорости проходки пилотной скважины.

Личный вклад в получение результатов, изложенных в диссертации, заключается в анализе существующих методов и способов проведения работ технологии ГНБ посредством эксплуатации МГНБ, оснащенных специальным технологическим инструментом, и синтезе полученных результатов, лежащих в основе настоящей диссертационной работы, в разработке метода определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой, основанного на использовании аналитической модели оценки ТУ, получившей свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, в проведении экспериментальных исследований, направленных на определение ключевого параметра взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой и установление зависимостей между отдельными характеристиками инструмента и рабочей среды.

Степень достоверности результатов исследования обоснована применением комплексного подхода, включающего общенаучные методы синтеза и анализа; подтверждена результатами исследований, отраженными в научных работах, опубликованных в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, путем сопоставления натурных и расчетных данных с высоким

уровнем сходимости значений; обеспечена экспериментальными исследованиями, проведенными с применением сертифицированных средств измерения (стендов).

Практическая ценность и реализация результатов исследования заключается в применении отдельных положений и полученных в рамках диссертационной работы результатов исследования в учебном процессе выпускающей кафедры наземных транспортно-технологических машин автомобильно-дорожного факультета ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» 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».

Результаты научных исследований, полученные в рамках выполнения диссертационной работы, используются профильными организациями (ООО «СЗ Эс Пи Райтерс», ООО «ВелИС», ООО «АКРОСС»), специализирующихся в различных областях профессиональной деятельности.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования докладывались на 1-й и 2-й Международных научно-практических конференциях «Транспортная доступность Арктики: сети и системы» (2021, 2022, Санкт-Петербург), 3-м Всероссийском научном семинаре «Техническое обеспечение доступности арктических регионов» (2023, Санкт-Петербург), 76-й Научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета (2022, Санкт-Петербург), 75-й и 76-й Научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства (2022, 2023, Санкт-Петербург), 19-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики (2023, Тула).

Публикации. Основные положения и научные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 печатных работах (две из них – в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК), одно свидетельство на программу для ЭВМ.

Структура и объем диссертационного исследования. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Материалы диссертационной работы содержат 148 страниц, 66 рисунков, 29 таблиц. Библиографический список литературы включает 108 наименований.

Во введении выполнен анализ разработанности проблемы, обуславливающий актуальность и цель настоящего диссертационного исследования, для достижения которой установлен комплекс задач. Представлены пункты научной новизны и выносимые на защиту положения, а также указана степень достоверности результатов проведенных исследований.

Первая глава посвящена анализу существующих техники и технологии ГНБ, используемых при работе с инженерными коммуникациями различного назначения, научных исследований, проводимых учеными в данной предметной области и способам повышения энергоэффективности работы МГНБ.

Вторая глава содержит комплекс методов, применяемых для оценки ТУ исследуемой техники ГНБ. Основу комплекса составляют метод экспертных оценок, базисом которого является совокупность оценок представленного ряда оцениваемых параметров высококвалифицированными экспертами из теоретической и практической областей деятельности, и метод определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой, в основе которого лежит аналитическая модель оценки ТУ, базирующаяся на положениях классической теории вероятности и позволяющая объективно выполнить сравнительный анализ представленного ряда техники ГНБ.

Третья глава включает результаты имитационного моделирования с использованием вычислительных модулей гидродинамики и механики твердого тела стандартных прикладных комплексов, экспериментальных исследований работы опытного образца ГВК, встроенного в технологический инструмент МГНБ, установление зависимостей, отражающих взаимосвязь между параметрами работы технологического инструмента МГНБ и характеристиками рабочей среды, обоснование повышения ТУ МГНБ и возможности расширения области рационального применения МГНБ при оснащении технологического инструмента ГВК, реализующим эквивалентное силовое воздействие.

Четвертая глава посвящена обоснованию повышения энергоэффективности работы МГНБ путем увеличения производительности МГНБ за счет применения ГВК, способствующего увеличению скорости проходки скважины заданного диаметра, а также экономическому обоснованию предлагаемой к реализации модернизации конструкции МГНБ.

В заключении сформулированы ключевые выводы проведенной диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Комплекс параметров, позволяющих обеспечить работу МГНБ в режиме максимальной энергоэффективности, устанавливается посредством метода определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой, основанного на использовании аналитической модели оценки ТУ представленного ряда исследуемой техники ГНБ.

Для определения комплекса значимых параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой первостепенно проведена оценка ТУ ряда МГНБ класса «миди» посредством метода экспертных оценок (рисунок 1). По его результатам из 13 исходных параметров оценки исключены 4 (габаритные размеры, максимальное тяговое усилие, максимальное расширение скважины, ширина типоразмерного ряда по мощности), оказывающие наименьшее влияние на ТУ МГНБ и, заменяемые к сравнению оставшимися 9 параметрами: масса установки (К1), диаметр штанги (К2), мощность двигателя (К3), максимальный крутящий момент (К4), максимальная скорость вращения (К5), усилие продавливания (К6), максимальная длина бурения (К7), объем подачи буровой смеси (К8) и давление рабочей смеси (К9).

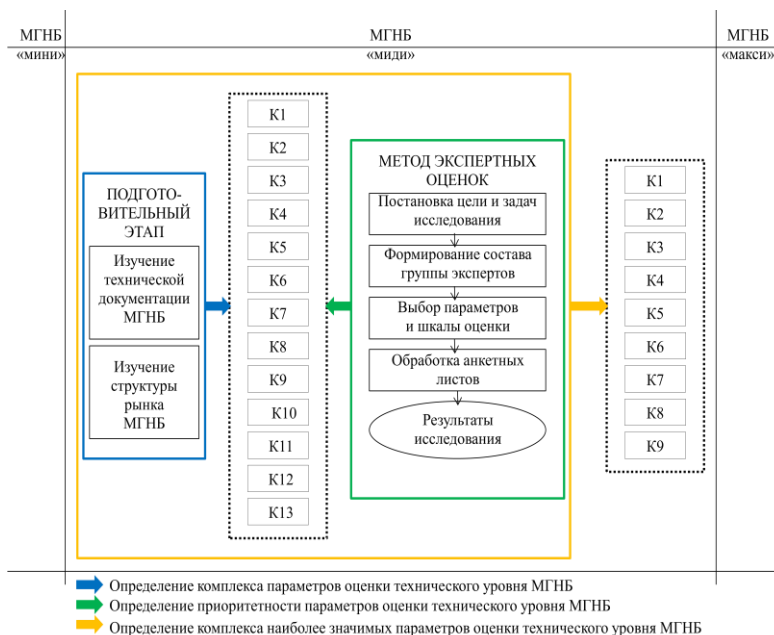


Рисунок 1. Определение комплекса значимых параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой

Для объективного проведения сравнительного анализа представленного ряда техники ГНБ, повышения достоверности результатов исследования и выявления закономерности между изменяющимися рабочими параметрами и энергоэффективностью работы МГНБ, разработана аналитическая модель проведения оценки ТУ МГНБ, реализованная в прикладном программном обеспечении (рисунок 2).

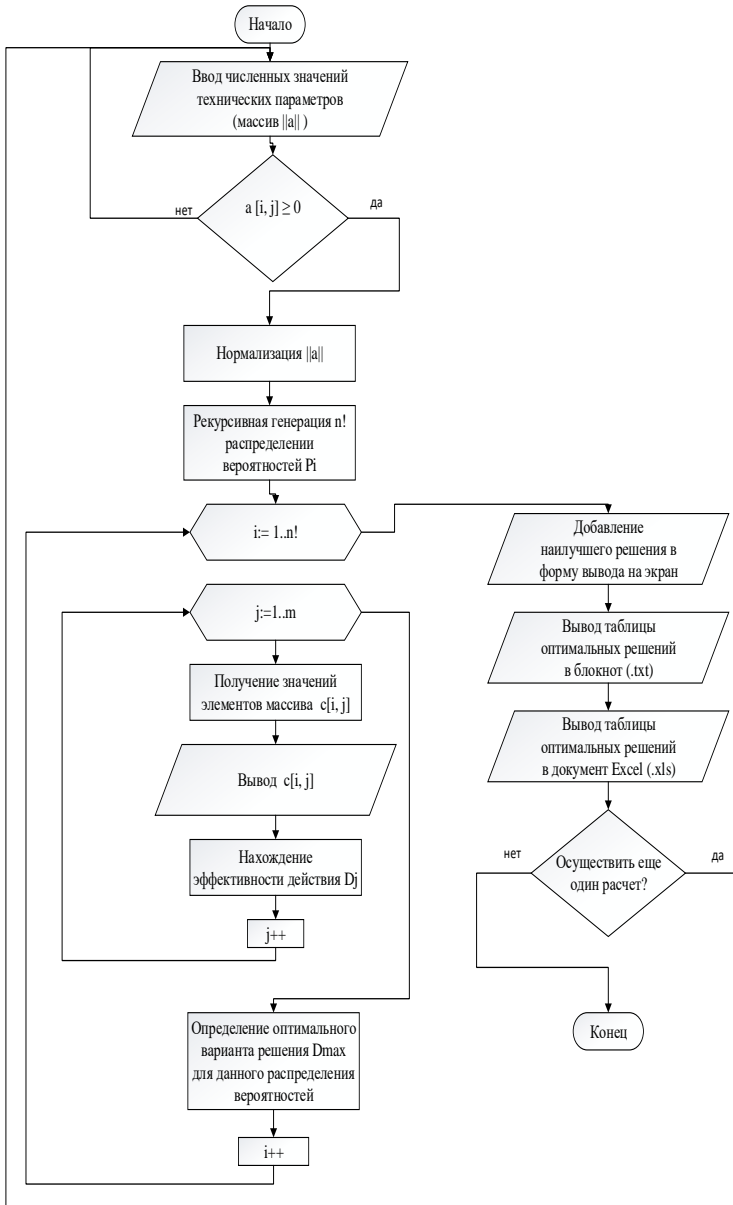


Рисунок 2. Аналитическая модель оценки ТУ МГНБ

Математический аппарат аналитической модели оценки ТУ МГНБ, лежащей в основе метода определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой (метод сравнительного анализа), базируется на решении задачи стохастически неопределенного характера. Разработанная аналитическая модель позволяет учесть взаимосвязь между совокупностью принятых к исследованию параметров и вероятностями их распределения относительно принимаемого уровня приоритетности. Такое распределение параметров (K) относительно их приоритетности для конкретного образца МГНБ лежит в рамках ограничения (1):

$$0 \leq K_j \leq 1; j = \overline{1, 9};$$

$$\sum_{j=1}^9 K_j = 1. \quad (1)$$

Следовательно, определяется как $(n - 1)$ независимых вероятностных величин. Последовательное расположение параметров $K_1 - K_9$ подчиняется условию (2):

$$K_1 \geq K_2 \geq K_3 \geq \dots \geq K_j \geq K_{j-1} \geq K_9. \quad (2)$$

Количество возможных случаев в такой системе равно $n!$ и для исследуемой системы составляет $9! = 362\,880$.

На рисунке 3 показано одно из решений задачи определения эталонного образца МГНБ посредством функционирования аналитической модели оценки ТУ МГНБ.

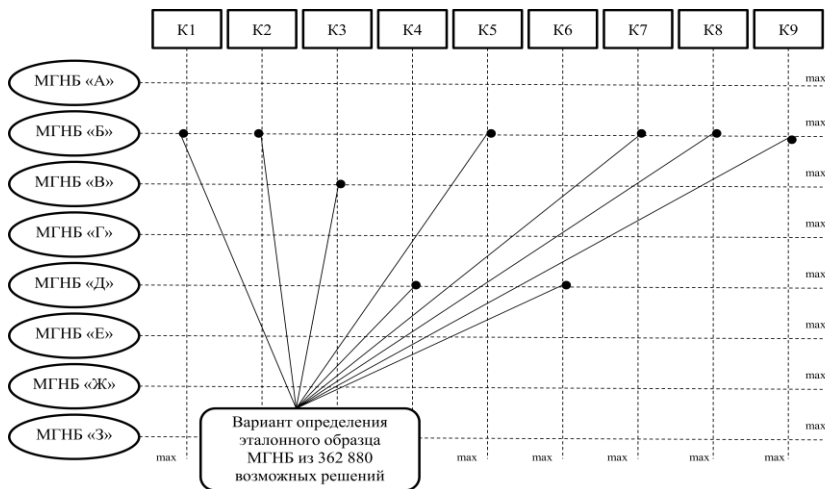


Рисунок 3. Вариант решения задачи определения эталонного образца МГНБ посредством функционирования аналитической модели оценки ТУ МГНБ

Порядок получения оптимального решения D_{KI} (вариант распределения, при котором образец МГНБ признается эталонным (лучшим среди исследуемых образцов)) в заданной области ограничений представляет последовательность этапов, указанных в таблице 1.

Таблица 1. Описание аналитической модели оценки ТУ образцов МГНБ

№ п/п	Описание этапа	Содержание этапа	Математический вид
1	2	3	4
1	Определение стратегической цели как результата достижения	Упорядочивание значений параметров K_j с учетом риска математического ожидания эффektivности \bar{a}_i	$\bar{a}_{i^*} = \max_i \bar{a}_i = \max_i \sum_{j=1}^n K_j a_{ij}$
2	Получение относительного значения для каждого исследуемого параметра МГНБ	Приведение значений отдельного параметра в каждом оценочном кластере q_{ij} к безразмерному виду Q_{ij} с последующим нормированием	$q_{ijH} = \frac{Q_{ij}}{\sum_1^m Q_{ij}}$
3	Определение вариантов приоритетности образцов МГНБ	Решение задачи векторной оптимизации	$\left\{ \begin{array}{l} D_i = \sum_{j=1}^9 q_{ijH} K_j \rightarrow \max \\ \sum_{j=1}^9 K_j = 1, 0 \leq K_j \leq 1, K_j \geq K_9, j = \overline{1,9} \end{array} \right.$
4	Поиск значений параметров (K) с учетом распределения их важности для конкретного образца техники	Поиск и установление параметров K_j	$K_j = \begin{cases} \frac{1}{d}, & \text{если } j \leq d \\ 0, & \text{если } j > d \end{cases}$ $d = \max_j q_{ij}$

Окончание табл. 1

1	2	3	4
5	Оформление матрицы параметров (K) с учетом присвоенной важности и выбор образца МГНБ с максимальным (минимальным) значением	Определение сочетания возможных вариантов (min/max)	$D_i = \begin{pmatrix} K_{11} \cdot q_{11H} & K_{12} \cdot q_{12H} & \dots & K_{1j} \cdot q_{1jH} & \dots & K_{1n} \cdot q_{1nH} \\ K_{21} \cdot q_{21H} & K_{22} \cdot q_{22H} & \dots & K_{2j} \cdot q_{2jH} & \dots & K_{2n} \cdot q_{2nH} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{m1} \cdot q_{m1H} & K_{m2} \cdot q_{m2H} & \dots & K_{mj} \cdot q_{mjH} & \dots & K_{mn} \cdot q_{mnH} \end{pmatrix}$ <p>m – число сравниваемых образцов МГНБ; n – число критериев оценки ТУ; K_{ij} – эффективность j-го показателя для i-го образца для $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$.</p>

Таким образом, посредством метода сравнительного анализа определено, что в принятом ряде техники МГНБ в 343 872 случаях эталонным признается образец МГНБ «Б» (рисунок 4).

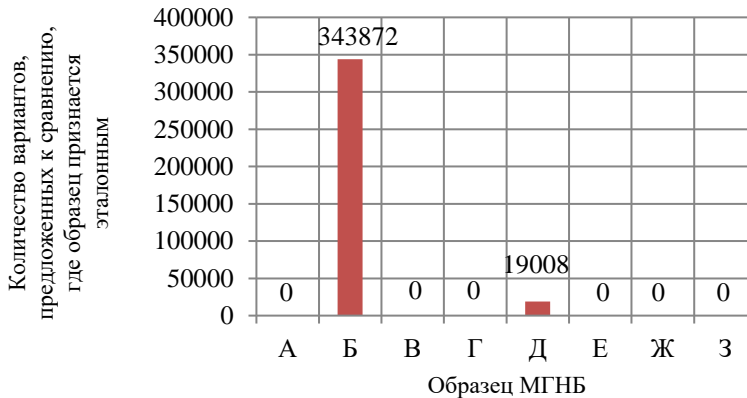


Рисунок 4. Иерархия распределения образцов МГНБ по количеству присвоенного им эталонного значения при всех возможных вариантах распределения приоритетности параметров «К1 – К9»

Путем исследования возможных вариантов повышения эффективности работы МГНБ выявлена возможность оснащения конструкции технологического инструмента МГНБ ГВК, преобразующим энергию потока рабочей жидкости в полезную мощность, используемую в рабочем процессе. Устройство ГВК за счет создания дополнительного вибровоздействия позволяет увеличить усилие продавливания – один из основополагающих параметров, характеризующих работу МГНБ (рисунок 5).

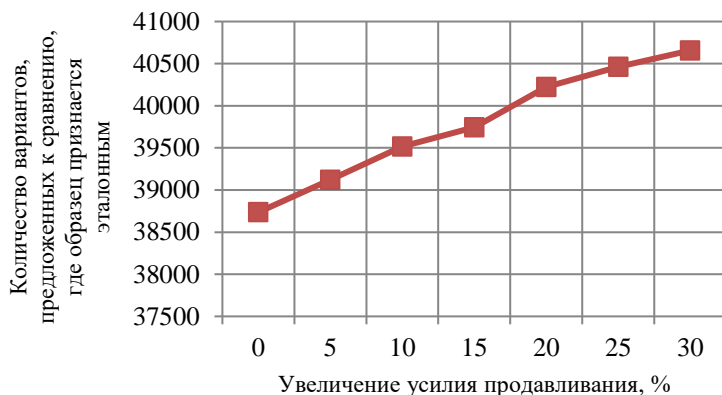


Рисунок 5. Результаты проведения расчетов путем применения аналитической модели оценки ТУ МГНБ с учетом внесения изменений в параметр «усилие продавливания»

Посредством определения аналитической моделью числа исходов, при которых образец МГНБ признается лучшим (эффективные исходы), по формуле (3) рассчитывается среднее значение показателя значимости параметров ($K_{\text{ср}}$):

$$K_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \quad (3)$$

где K_i – количество эффективных исходов по каждому заданному значению исследуемого параметра оценки ТУ; n – количество исследуемых образцов МГНБ.

Показатель, характеризующий изменение количества эффективных исходов в зависимости от величины изменения исследуемого параметра ($K_{\text{мод}}$) (усилия продавливания), определяется по формуле (4):

$$K_{\text{мод}} = \frac{K_{\text{ср}}^i * 100\%}{K_{\text{ср}}^{\text{исх}}}, \quad (4)$$

где $K_{\text{ср}}^i$ – среднее значение количества эффективных исходов, при которых образец МГНБ признается эталонным по отдельно взятому значению исследуемого параметра оценки ТУ; $K_{\text{ср}}^{\text{исх}}$ – среднее значение количества эффективных исходов, при которых образец МГНБ признается эталонным без модификации конструкции.

Результаты расчетов представлены в таблице 2. Для чистоты проводимых расчетов образец МГНБ «Б» ввиду существенного отклонения значения ТУ от иных образцов техники ГНБ исключен.

Таблица 2. Результаты расчетов результативности вводимых в конструкцию МГНБ модификаций

Образцы МГНБ							Показатели оценивания		
А	В	Г	Д	Е	Ж	З	$K_{изм}, \%$	$K_{ср}, ед.$	$K_{мод}, \%$
Число эффективных исходов, ед.									
38034	87182	40802	163362	2508	0	30992	0	51840	0
38842	87878	40952	165690	2560	12	31894	5	52547	1,4
40152	88444	41548	168384	5204	12	32914	10	53808	3,8
41946	88822	41792	170810	5568	1860	33286	15	54869	5,8
43632	89686	42072	173176	6312	2184	34544	20	55944	7,9
45432	90750	42342	175502	6732	2436	34934	25	56875	9,7
47928	91430	42472	179310	7570	16438	35542	30	60099	15,9

Графическое отображение представленных в таблице 2 расчетов показано на рисунке 6.

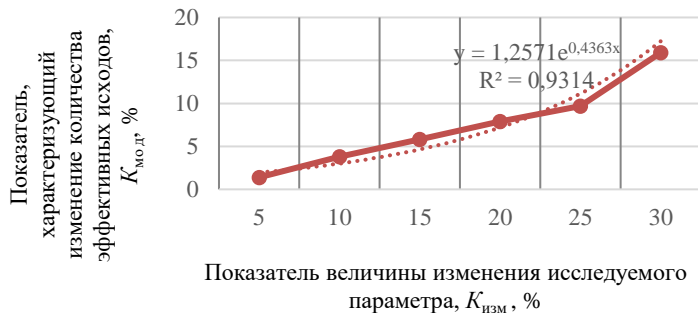


Рисунок 6. Зависимость изменения количества эффективных исходов от величины изменения исследуемого параметра («силы продавливания»)

Выявленная зависимость позволила разработать формулу расчета показателя результативности модернизации МГНБ посредством изменения отдельного исследуемого параметра оценки ТУ (K_p) в рамках применения метода сравнительного анализа, принимающую вид (5):

$$K_p = \frac{K_{мод}}{K_{изм}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{изм}}$ – показатель величины изменения исследуемого параметра.

Результаты расчетов по формуле (5) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчета показателя результативности модернизации МГНБ посредством изменения исследуемого параметра «усилие продавливания»

Показатель величины изменения исследуемого параметра, $K_{\text{изм}}$, %	Показатель, характеризующий изменение количества эффективных исходов, $K_{\text{мод}}$, %	Показатель результативности модернизации МГНБ посредством изменения исследуемого параметра, $K_{\text{р}}$
5	1,4	0,28
10	3,8	0,38
15	5,8	0,39
20	7,9	0,40
25	9,7	0,39
30	15,9	0,53

Графическое отображение представленных расчетов показано на рисунке 7.

По результатам анализа графиков, представленных на рисунках 6 и 7, отмечен резкий рост числа эффективных исходов, при которых определенный образец МГНБ признается эталонным, и повышение результативности проведенной модернизации МГНБ в случае увеличения значения исследуемого параметра на 25% и более. При этом результативность модернизации техники в случае повышения усилия продавливания в диапазоне от 10% до 25% равнозначна.

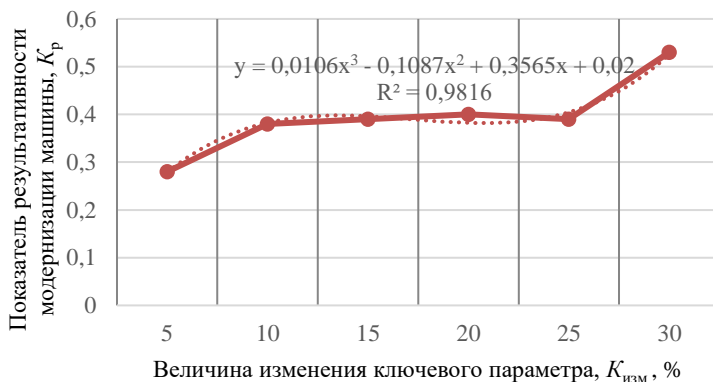


Рисунок 7. Зависимость изменения показателя результативности модернизации МГНБ посредством изменения исследуемого параметра «усилие продавливания»

Также следует отметить, что формула расчета показателя результативности модернизации МГНБ применима для различных типов машин, учтенных в пункте 1 паспорта защищаемой научной специальности.

2. Повышение энергоэффективности работы МГНБ, имеющей в конструкции технологического инструмента ГВК, достигается за счет роста производительности работы МГНБ, выраженного в увеличении скорости проходки пилотной скважины

Для получения теоретического механизма процесса работы ГВК, встроенного в технологический инструмент МГНБ, и установления зависимости между конструктивными и режимными параметрами ГВК и оказываемого им влияния на усилие продавливания – параметр, ранее принятый в качестве наиболее значимого при расчете ТУ МГНБ, проведено моделирование рабочего процесса ГВК различных конструктивных исполнений. Расчетная модель использовала вычислительные модули гидродинамики и механики твердого тела стандартных прикладных комплексов. В качестве основных входных параметров учтены геометрические параметры ГВК и расход рабочей жидкости.

По результатам моделирования определена скорость потока рабочей жидкости, составляющая от 15 м/с до 79 м/с в зависимости от конфигурации ГВК, а также проведена оценка прикладываемых на торец резонирующей пластины напряжений, показывающая способность противостоять разрушению от набегания струи рабочей жидкости.

На основе полученных значений и закономерностей проведен эксперимент (рисунок 8) по выявлению взаимосвязи между характеристиками рабочей среды (сопротивляемость массива уплотнению (кПа)) и рабочего процесса (площадь поперечного сечения пилотной скважины (m^2)), а также влияния ГВК (скорость потока рабочей жидкости (м/с)) на изменение исследуемого параметра («усилие продавливания»). При проведении стендовых испытаний гидросистема МГНБ работала в режиме установленной постоянной скорости, что позволило изменять усилие продавливания и выявить зависимость изменения исследуемого параметра от показателей технологического инструмента и рабочей среды.

Уравнение (6), описывающее выявленную экспериментально зависимость, определено посредством проведения полного факторного эксперимента (ПФЭ):

$$P = 60,83 - 0,007 \delta + 5,02 V_{ж} - 1925S - 0,002 \delta V_{ж} + 162,49 V_{ж} S, \quad (6)$$

где δ – сопротивляемость массива уплотнению, (кПа); $V_{ж}$ – скорость потока рабочей жидкости (м/с); S – площадь поперечного сечения пилотной скважины (m^2).



Рисунок 8. Фотоматериал проведенных экспериментальных исследований:
 а-в – испытательный стенд, г – технологический инструмент, д – ГВК

Индекс корреляции для уравнения (6) составляет 0,97, критерий Фишера – 2,97 при критическом значении критерия Фишера для выражения (6) и значимости, составляющей 5%, – 3,63, подтверждают адекватность полученной зависимости экспериментальным данным и высокую сходимость расчетных и экспериментальных значений (рисунок 9).

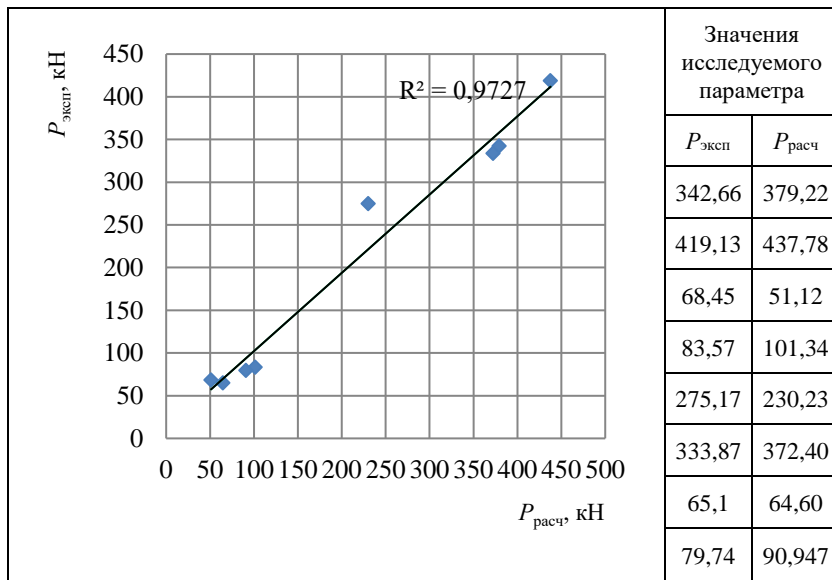


Рисунок 9. Сопоставление значений усилия продавливания P , полученных экспериментальным ($P_{\text{эсп}}$) и расчетным ($P_{\text{расч}}$) путями

Эффективность работы МГНБ может быть определена путем расчета трех составляющих – производительность, экономичность и энергоэффективность.

В технологии ГНБ производительность выражается в количестве пройденных метров скважины заданного диаметра за единицу времени. Сокращение времени производства работ путем увеличения скорости проходки скважины и сопутствующее снижение затрат на заработную плату рабочих, расход рабочих жидкостей и амортизацию представляют собой экономическую составляющую процесса бурения. При этом повышение энергоэффективности работы МГНБ возможно за счет снижения энергоемкости, составляющей которой является скорость проходки пилотной скважины.

Таким образом, ключевым показателем энергоэффективности работы МГНБ является скорость проходки пилотной скважины, представляющая собой результат взаимодействия прикладываемого усилия и характеристик рабочей среды (рисунок 10).

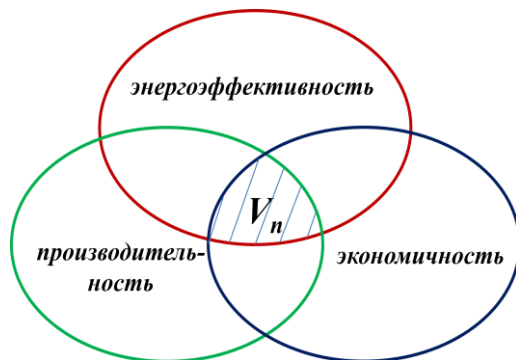


Рисунок 10. Обоснование скорости проходки скважины как ключевого параметра в повышении эффективности работы машины ГНБ (V_n – скорость проходки скважины, м/с)

При проведении стендовых испытаний гидросистема МГНБ осуществляла работу в режиме постоянного давления, что обеспечивало постоянное значение усилия продавливания. В ходе эксперимента было изучено влияние характеристик рабочей среды (сопротивляемость массива уплотнению (кПа)), рабочего процесса (усилие продавливания (кН)) и конструктивных параметров ГВК (скорость потока рабочей жидкости (м/с)) на величину скорости проходки скважины (м/мин).

Уравнение (7), описывающее выявленную зависимость, определено посредством проведения ПФЭ:

$$V = 0,74 - 0,0001\delta + 0,03V_{ж} + 0,0003P - 0,0001V_{ж}P, \quad (7)$$

где δ – сопротивляемость массива уплотнению, (кПа); $V_{ж}$ – скорость потока рабочей жидкости (м/с); P – усилие продавливания (кН).

Индекс корреляции для зависимости (7) составляет 0,96, критерий Фишера – 3,04 при критическом значении критерия Фишера для выражения (7) и значимости, составляющей 5%, – 3,24, свидетельствуют об адекватности полученной зависимости экспериментальным данным и о высоком уровне сходимости расчетных и экспериментальных значений (рисунок 11).

Установив зависимость между ключевым параметром, оказывающим влияние на повышение производительности работы МГНБ, и характеристиками рабочей среды, рабочего процесса и параметров работы ГВК, определена энергоэффективность работы МГНБ. Принимая энергоэффективность как отношение энергоемкости МГНБ без ГВК к энергоемкости

МГНБ с ГВК, а также проведя ряд преобразований, формула расчета энергоэффективности работы МГНБ приобретает вид (8) и представляет собой отношение скорости проходки пилотной скважины МГНБ, в конструкцию технологического инструмента которой встроен ГВК, к скорости проходки скважины МГНБ базовой комплектации.

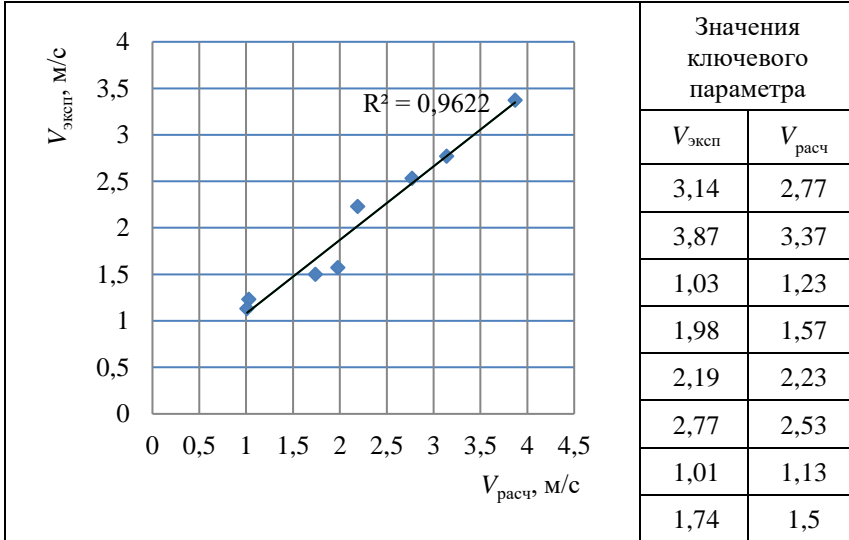


Рисунок 11. Сопоставление значений скорости проходки пилотной скважины V экспериментальным ($V_{\text{эксп}}$) и расчетным ($V_{\text{расч}}$) путями

$$E = \frac{e_{\text{т}}}{e_{\text{п}}} = \frac{\frac{P_{\text{т}}V_{\text{т}} + 2nT}{SV_{\text{т}}}}{\frac{P_{\text{т}}V_{\text{т}} + 2nT}{SV_{\text{п}}}} = \frac{SV_{\text{п}}}{SV_{\text{т}}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{т}}}, \quad (8)$$

где E – энергоэффективность; $e_{\text{п}}$ – энергоемкость с использованием ГВК (кДж/м^3); $e_{\text{т}}$ – энергоемкость без использования ГВК (кДж/м^3); $P_{\text{т}}$ – усилие продавливания, необходимое для прокладки скважины (кН); $V_{\text{п}}$ – скорость проходки скважины с использованием ГВК (м/мин); $V_{\text{т}}$ – скорость проходки скважины без использования ГВК (м/мин); S – площадь поперечного сечения скважины; n – частота вращения (об/мин); T – крутящий момент ($\text{кН}\cdot\text{м}$).

Результаты расчетов отражены в таблице 4 и на рисунке 12.

Таблица 4. Результаты расчетов энергоэффективности работы МГНБ при бурении скважины диаметром 0,1 м

№ п/п	Сопротивляемость массива уплотнению, кПа	Скорость проходки без использования ГВК, м/мин	Скорость проходки с использованием ГВК, м/мин	Энергоэффективность
1	180	1	1,23	1,23
2	250	1	1,21	1,21
3	370	1	1,17	1,17
4	430	1	1,12	1,12
5	540	1	1,08	1,08



Рисунок 12. Влияние характеристики рабочей среды на энергоэффективность работы МГНБ

Анализ представленных результатов показывает, что для всех рассмотренных условий применения МГНБ с ГВК энергоэффективность увеличивается по мере снижения показателя сопротивляемости массива уплотнению, что обуславливается возможностью проведения работы с большей скоростью проходки и обеспечением большей производительности. Полученный результат подтверждает перспективность расширения области рационального применения МГНБ с ГВК на более твердые грунты с точки зрения повышения энергоэффективности, а также демонстрирует эффективность работы МГНБ с ГВК в мягких и средних грунтовых массивах. Количественная оценка повышения энергоэффективности в зависимости от сопротивляемости массива уплотнению находится в диапазоне от 8% до 23%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Посредством выполнения теоретических исследований и проведенных на их базе экспериментальных опытов решена актуальная научная задача повышения энергоэффективности работы МГНБ путем оснащения ее технологического инструмента ГВК, обоснованного выбором его конструктивных параметров и режимов работы.

По результатам диссертационного исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработан метод определения параметров взаимодействия технологического инструмента МГНБ с рабочей средой, основанный на использовании аналитической модели оценки ТУ, позволяющей объективно выполнить сравнительный анализ представленного ряда техники ГНБ, и сформированы рекомендации по эксплуатации данных машин.

2. Доказана результативность модернизации МГНБ за счет внесения изменений в конструкцию технологического инструмента и изменения величины ключевого параметра, определен показатель результативности модернизации техники и разработана формула для его расчета. Формула расчета показателя результативности модернизации техники применима для различных типов машин в рамках заданной совокупности принятых к исследованию параметров.

3. Экспериментально определена зависимость между усилием продавливания и характеристиками рабочей среды (сопротивляемостью массива уплотнению ($\kappa\Pi a$)), конструктивными параметрами ГВК (скоростью потока рабочей жидкости (m/c) и характеристиками рабочего процесса (площадью поперечного сечения скважины (m^2)). Наиболее сильное влияние на величину усилия продавливания оказывают площадь поперечного сечения скважины, скорость течения рабочей жидкости и их сочетание. Минимальное влияние оказывает сочетание сопротивляемости массива уплотнению и скорости потока рабочей жидкости. В данном исследовании усилие продавливания представляет собой эквивалентное силовое воздействие, складывающееся из усилия продавливания, предусмотренного паспортными характеристиками машины ГНБ и вибровоздействия, создаваемого ГВК.

4. Экспериментально определена зависимость между скоростью проходки пилотной скважины и характеристиками рабочей среды (сопротивляемостью массива уплотнению ($\kappa\Pi a$)), конструктивными параметрами ГВК (скоростью потока рабочей жидкости (m/c) и характеристиками рабочего процесса (усилием продавливания (κH)). Определено уравнение регрессии, согласно которому наибольшее влияние на ключевой параметр оказывает усилие продавливания. Минимальное влияние

оказывает сочетание скорости потока рабочей жидкости и усилия продавливания. Скорость проходки пилотной скважины возрастает с увеличением скорости потока рабочей жидкости и усилия продавливания и уменьшается по мере увеличения сопротивляемости массива уплотнению.

5. Увеличение усилия продавливания, как одного из значимых параметров работы МГНБ, способствует повышению ТУ образца техники и расширению его области рационального применения, что также стимулирует потребительскую привлекательность данной машины на рынке.

6. Повышение энергоэффективности МГНБ достигается за счет роста ее производительности, выраженного в возможности увеличения скорости проходки скважины заданного диаметра. В зависимости от характеристик рабочей среды повышение энергоэффективности работы МГНБ составляет от 8% до 23%, при этом оснащение технологического инструмента ГВК составляет 1,6–2,2% от общей стоимости машины, что при объеме выполненных работ 1 тыс. п.м. составит около 100 тыс. руб. (сокращение времени производства работ на 8 ч) или 4,8 млн руб./год. Полученный результат подтверждает перспективность расширения области рационального применения машин ГНБ с ГВК на более твердые грунты, а также демонстрирует эффективность работы МГНБ подобных конструкций в мягких и средних грунтовых массивах.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. *Склярова А.А.* Исследование влияния конструктивных параметров на область рационального применения машины горизонтально направленного бурения в заданной системе ограничений // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 68-73. – doi.org/10.26160/2658-3305-2024-24-68-73. (0,38 п.л.).

2. *Склярова А.А.* Оценка технического уровня установок горизонтально направленного бурения / Склярова А.А., Дружинин П.В., Максимов С.Е., Пушкарев А.Е. // Грузовик – 2023. – № 11. – С. 13–17 (0,31/0,08 п.л.).

Программа для ЭВМ, имеющая государственную регистрацию

3. *Склярова А.А.* Аналитическая модель оценки технического уровня техники горизонтально направленного бурения в заданной системе ограничений / Склярова А.А., Пушкарев А.Е.: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024612706, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.02.2024.

Публикации в других изданиях

4. *Склярова А.А.* Научно обоснованный подход к оценке технического уровня машин ГНБ в заданной системе ограничений / Склярова А.А., Пушкарев А.Е. // Строительные и дорожные машины – 2023. – № 8. – С. 25–30 (0,38/0,25 п.л.).

5. *Склярова А.А.* Решение задачи построения математической модели колебания пластины встроеного генератора вибрации в рабочую головку машины ГНБ / Пушкарев А.Е., Склярова А.А., Петров А.А. // Строительные и дорожные машины. – 2023. – № 7. – С.20–24. (0,31/0,1 п.л.).

6. *Склярова А.А.* Перспективы применения технологии горизонтально направленного бурения в Арктических регионах / Склярова А.А., Пушкарев А.Е., Сулей Г.О. // Техническое обеспечение доступности арктических регионов: материалы III Всероссийского научного семинара [02.10.2022]. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2022. – С. 130–137 (0,5/0,3 п.л.).

7. *Склярова А.А.* Обоснование выбора комплекта технологических машин при технологии ГНБ / Куракина Е.В. Склярова А.А. // Мир транспорта и технологических машин. № 3(66) 2019 Июль-Сентябрь. – С.34–43. (0,63/0,52 п.л.)

8. *Склярова А.А.* Совершенствование механизации производства работ технологии ГНБ / Склярова А.А., Скляров Р.А., Хайров В.В. // Сборник 72-ой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства». – 2019. – С. 129–135 (0,44/0,20 п.л.).

9. *Склярова А.А.* Комплексная механизация работ технологии бестраншейной прокладки инженерных коммуникаций / Скляров Р.А., Склярова А.А., Куракина Е.В. // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ № 6(71). – 2018. – С. 163–168. (0,38/0,27 п.л.).

Компьютерная верстка *Смирновой М. В.*

Подписано к печати 10.10.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 126.

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.