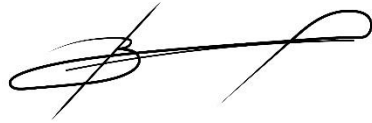


На правах рукописи

Васильев Дмитрий Александрович



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
БУРЕНИЯ СКВАЖИН В СНЕЖНО-ФИРНОВОЙ ТОЛЩЕ С
ОБРАТНОЙ ПРИЗАБОЙНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХА**

*Специальность 2.8.1. Технология и техника
геологоразведочных работ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научные руководители:

доктор технических наук, старший научный сотрудник

Васильев Николай Иванович

кандидат технических наук, доцент

Большунов Алексей Викторович

Официальные оппоненты:

Попов Сергей Викторович

доктор геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», кафедра гидрологии суши, доцент;

Мелехин Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра нефтегазовых технологий, доцент.

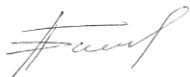
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук, г. Москва.

Защита диссертации состоится **16 октября 2024 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ 2024.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 августа 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БЛИНОВ
Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Верхние слои ледяного покрова Антарктиды и Гренландии представляют собой уникальный объект научных исследований. В снежно-фирновой толще (СФТ), нижняя граница которой в Антарктиде может достигать 115 м, сосредоточены данные о составе и температуре атмосферы в прошлом, вулканических извержениях, лесных пожарах, техногенных загрязнениях, микробиологическом разнообразии. Их изучение проводится в лабораторных условиях по образцам льда, которые были получены в ходе полевых работ.

Метод колонкового бурения является наиболее эффективным и надежным способом непрерывного отбора проб льда по всей толще ледника. Физико-механическими свойствами СФТ, обуславливающими выбор режимов бурения, являются: низкие механическая прочность и плотность, высокие проницаемость и пористость. Вышеописанные свойства определяют два наиболее распространенных способа колонкового бурения: тепловое и шнековое бурение снарядами на грузонесущем кабеле.

Однако данные способы бурения не отвечают в полной мере требованиям по надежности и эффективности эксплуатации в суровых физико-географических условиях внутриконтинентальных областей Антарктиды и Гренландии. Анализ проектов бурения льда показал, что основными недостатками тепловых снарядов являются: низкая механическая скорость бурения; высокая энергоемкость; тепловое воздействие на керн и окружающую среду. Главными недостатками применения шнековых снарядов являются неудовлетворительная величина рейсовой проходки и высокие энергетические затраты на транспортирование шлама.

Разработка технологии механического колонкового бурения снарядами на грузонесущем кабеле с обратной призабойной циркуляцией (ОПЦ) воздуха позволит устранить вышеописанные недостатки и повысить производительность и безаварийность бурения СФТ.

Степень разработанности темы исследования

В развитии технологий бурения горных пород с применением газообразных очистных агентов принимал участие широкий круг ученых.

Теорией и практикой геологоразведочного бурения скважин с продувкой занимались: Б.Б. Кудряшов, А.И. Кирсанов, Б.С. Филатов, Н.С. Макурин, М.Г. Абрамсон, В.Н. Волков, А.М. Магурдумов и др.

Значительный вклад в развитие бурения льда с очисткой забоя сжатым воздухом внесли такие ученые как: А.П. Капица, Л.Д. Базанов, Н.Е. Бобин, Н.И. Васильев, П.Г. Талалай, Г.К. Степанов, Z. Hu, G.R. Lange, R.W. Patenaude, E.W. Marshall, A.J. Gow, E. Tongiorgi, E. Picciotto, Q. Zhao, W. de Breuck, T. Norling, G. Boeckmann, T. Kuhl, C. Gibson, J. Johnson, K. Slawny, Z. Chen, H. Cao, и др.

Ранее проведенные научные изыскания позволили сформулировать технологическую и техническую основы ведения буровых работ с применением воздуха в качестве очистного агента. В то же время вопрос колонкового бурения льда подобным способом до сих пор остается открытым.

Ввиду многочисленных осложнений, таких как потеря циркуляции очистного агента, прихваты бурового снаряда, образование ледяных сальников и прочее, бурение льда с продувкой воздухом не получило широкого распространения. Однако результаты экспериментальных и теоретических исследований, положенные в основу данной диссертации, позволяют говорить о целесообразности создания технологии бурения СФТ с ОПЦ воздуха.

Объект исследования – транспортирование и улавливание ледяного шлама при бурении СФТ с ОПЦ воздуха.

Предмет исследования – процесс аэродинамического взаимодействия потока воздуха с ледяным шламом во внутренних каналах бурового снаряда.

Цель работы – повышение эффективности колонкового бурения СФТ за счет применения технологии бурения с ОПЦ воздуха.

Идея работы заключается в повышении эффективности колонкового бурения СФТ за счет обоснования режимов циркуляции обратного потока воздуха при транспортировании шлама по внутренним каналам бурового снаряда и улавливании его в циклонном

шламосборном фильтре, с учетом термобарических условий Центральной Антарктиды, гранулометрического состава и параметров формы ледяного шлама.

Основные задачи исследования:

1. Научное обоснование необходимости применения технологии колонкового бурения СФТ с ОПЦ воздуха.
2. Аналитический расчет режимов ОПЦ воздуха при бурении снарядом на грузонесущем кабеле.
3. Разработка и создание экспериментального стенда для комплексного исследования процесса бурения СФТ в условиях Центральной Антарктиды.
4. Определение гранулометрического состава, параметров формы, насыпной плотности, скорости витания и скорости транспортирования ледяного шлама, полученного при бурении СФТ в районе станции Восток.
5. Разработка нового колонкового бурового снаряда на грузонесущем кабеле, в конструкции которого реализован принцип ОПЦ воздуха и циклонного шламоулавливания.
6. Разработка технологии бурения СФТ с ОПЦ воздуха, а также системы телеметрии и контроля процесса бурения.

Научная новизна работы:

1. Экспериментально установлены скорости витания (5 м/с для наиболее крупных частиц) и транспортирования (6,2 м/с) ледяного шлама в восходящем потоке воздуха, полученного в ходе бурения СФТ в Центральной Антарктиде.
2. Обосновано применение принципа инерционно-гравитационной очистки при реализации технологии бурения скважин в СФТ с ОПЦ воздуха с учетом изменяющихся с глубиной гранулометрического состава, параметров формы и насыпной плотности ледяного шлама.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.1. Технология и техника геологоразведочных работ по пункту 1 «Бурение скважин: геологоразведочных, инженерно-геологических, гидрогеологических, геотехнологических, технических и др.».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность работы циклонных шламосборных фильтров для улавливания ледяного шлама при бурении СФТ с ОПЦ воздуха.

2. Разработан стенд для определения скоростей витания и транспортирования сыпучих материалов, в том числе ледяного шлама (патент на изобретение РФ №2792401 С1, патент на изобретение РФ №2799953 С1).

3. Разработаны методики экспериментального определения скоростей витания и транспортирования сыпучих материалов, в том числе ледяного шлама.

4. Аналитически определены и экспериментально уточнены режимы циркуляции (объемный расход воздуха и потери давления) при бурении снарядом на грузонесущем кабеле с ОПЦ воздуха, что позволило обосновать конструктивные параметры колонкового бурового снаряда.

5. Технические предложения, представленные в работе, подкрепленные результатами теоретических и экспериментальных исследований, запланированы к реализации в рамках 70-й Российской Антарктической экспедиции (2024-2025 гг.) в ходе создания нового бурового комплекса на российской антарктической станции Восток (акт внедрения от 11.04.2023 г.).

Методология и методы исследования. В работе используется комплексный подход к изучению процесса бурения скважин в СФТ с ОПЦ воздуха, включающий теоретические и экспериментальные методы исследований. В ходе теоретических исследований применялись методы синтеза, анализа, математической статистики и математического моделирования, включая метод конечных элементов. При планировании экспериментальных исследований был применен метод полного факторного и однофакторного эксперимента. Экспериментальные работы проводились в натуральных условиях Центральной Антарктиды.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Создание ОПЦ воздуха со скоростью потока не менее 6,2 м/с, что в среднем превышает скорость витания для наиболее крупных частиц шлама на 24%, позволяет осуществлять полную

очистку призабойной части скважины при бурении СФТ во внутриконтинентальных областях Антарктиды и Гренландии.

2. Использование принципа инерционно-гравитационной очистки в технологии бурения СФТ с ОПЦ воздуха обеспечивает эффективность улавливания ледяного шлама более 97% и реализуется за счет применения в конструкции бурового снаряда противоточного циклона цилиндрико-конического типа.

Степень достоверности результатов исследования.

Достоверность защищаемых положений, выводов и рекомендаций обусловлена использованием современных методов теоретических исследований, сходимостью результатов экспериментальных и теоретических исследований, а также проведением полного факторного натурального эксперимента в непосредственных условиях применения разрабатываемой технологии.

Апробация результатов проведена на 4 научно-технических мероприятиях с докладами: Международная междисциплинарная научно-практическая конференция «Человек в Арктике» (Санкт-Петербург, 2021 г.); XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2022 г.); I и II Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке и добыче углеводородных ресурсов» (Санкт-Петербург, 2022 и 2023 гг.).

Личный вклад автора. Проведен обзор и анализ современного состояния науки техники в области бурения СФТ. Разработана методика проведения экспериментальных исследований в условиях антарктической станции Восток. Разработан экспериментальный стенд для исследования процесса очистки скважины при бурении СФТ с ОПЦ. Проведен расчет режимов циркуляции при бурении снарядам на грузонесущем кабеле с ОПЦ воздуха. Проведены сбор и обработка экспериментальных данных, на основании которых обоснована и разработана новая технология бурения СФТ и техническое средство её реализации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента на изобретения

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 166 наименований. Работа изложена на 166 страницах машинописного текста, содержит 120 рисунков и 33 таблицы, 5 приложений.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность своим научным руководителям д.т.н., старшему научному сотруднику Васильеву Николаю Ивановичу и к.т.н., доценту Большунову Алексею Викторовичу. За содействие при проведении диссертационного исследования автор выражает благодарность доценту Игнатьеву С.А., сотрудникам научного центра «Арктика» Ракитину И.В. и Ожигину А.Ю.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены: анализ особенностей бурения СФТ Антарктиды и Гренландии; анализ современных методов колонкового бурения СФТ; анализ международного опыта бурения ледников с очисткой забоя воздухом; анализ существующих методов шламоулавливания при бурении скважин во льду, а также обоснование эффективности механического бурения СФТ с ОПЦ воздуха.

Во второй главе представлен анализ процесса ОПЦ воздуха при бурении снарядом на грузонесущем кабеле. Обоснован выбор методики расчета режимов циркуляции; теоретическое определение скорости витания и скорости транспортирования ледяного шлама. Проведен расчет объемного расхода воздуха, общих потерь и скорости потока в исследуемых точках всасывающей линии бурового снаряда.

В третьей главе приведены методика и методы отбора керна и ледяного шлама СФТ, их анализа, а также проведения натуральных исследований процесса очистки скважины при бурении СФТ с ОПЦ воздуха в условиях станции Восток. Представлена конструкция экспериментального стенда и её возможные компоновки. Проведен обзор испытательного, контрольного и измерительного оборудова-

ния, задействованного в проведении эксперимента. Выполнено планирование экспериментальных работ.

В четвертой главе представлены результаты отбора керна и ледяного шлама СФТ, их анализа, а также проведения натуральных исследований процесса очистки скважины при бурении СФТ с ОПЦ воздуха в условиях станции Восток.

В пятой главе разработаны: технология бурения СФТ с ОПЦ воздуха; конструкция бурового снаряда; система телеметрии и контроля процесса бурения СФТ с ОПЦ воздуха.

В заключении приводятся выводы по результатам теоретических и экспериментальных работ в соответствии с целью и задачами исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Создание ОПЦ воздуха со скоростью потока не менее 6,2 м/с, что в среднем превышает скорость витания для наиболее крупных частиц шлама на 24%, позволяет осуществлять полную очистку призабойной части скважины при бурении СФТ во внутриконтинентальных областях Антарктиды и Гренландии.

Расчет режимов циркуляции очистного агента при бурении с продувкой воздухом начинается с определения скоростей витания (w_v) и транспортирования (w_t) шлама, которые тесно связаны друг с другом и отражают характер и форму взаимодействия аэродинамического взаимодействия среды и тела. На момент проведения исследования, данные о размерах и форме частиц ледяного шлама СФТ, их скоростях витания и транспортирования отсутствовали, что послужило основанием для проведения экспериментальных работ в Центральной Антарктиде.

Исследование процесса очистки скважины при бурении СФТ с ОПЦ воздуха проводилось методом физического моделирования в натуральных условиях. Материалом для экспериментальных исследований являлись образцы ледяного шлама, полученные в результате бурения СФТ в районе станции Восток. Отбор проб осуществлялся из скважин *VK-22* и *VK-23*.

В научном центре «Арктика» и учебно-экспериментальных мастерских Горного университета был разработан и изготовлен

экспериментальный стенд (рисунок 1). Стенд представляет собой аэродинамическую лабораторную установку, имеющую два варианта компоновки. Компоновка №1 предназначена для определения скорости витания ледяного шлама. Компоновка №2 необходима для определения скорости транспортирования ледяного шлама и изучения процесса улавливания ледяного шлама.

Определение скорости витания частиц ледяного шлама проводилось методом активного однофакторного эксперимента. Объектом исследования являлась скорость витания, а фактором эксперимента – класс крупности шлама. Задачей эксперимента являлось измерение скорости восходящего потока воздуха в тот момент, когда исследуемая проба частиц достигала установившегося состояния витания (все частицы пробы были взвешены в восходящем воздушном потоке и не опускаются на нижнюю сетку).

Для проведения экспериментальных исследований были отобраны пробы ледяного шлама с горизонтов бурения: 5, 10, 15, 20, 25, 30 м (скважина VK-22) и 35 м (скважина VK-23). Каждая проба была просеяна на ситах с выходом классов крупности: 1,6-3; 1,25-1,6; 1-1,25; 0,8-1; 0,63-0,8; 0,4-0,63 мм. Классы крупности 0,25-0,4 мм и 0-0,25 мм в исследованиях не участвовали т.к. скорость воздушного потока, при которой они витали, была меньше 1,5 м/с и не регистрировалась микроманометром.

При определении скорости транспортирования объектом исследования являлась скорость потока воздуха, при которой происходил полный вынос ледяного шлама с нижней сетки в шламосборный фильтр. Распределение ледяного шлама по классам крупности в этих исследованиях не производилось.

Результаты экспериментальных работ по определению скорости витания представлены в таблице 1. Скорость витания, вне зависимости от класса крупности, снижается с увеличением глубины скважины. Данный факт можно объяснить изменением формы частиц ледяного шлама, о чем свидетельствует снижение насыпной плотности каждого исследуемого класса крупности (рисунок 2). Используя метод оптической микроскопии, был проведен сравнительный анализ шлама одинокого класса крупности с разных горизонтов бурения (рисунок 3). С увеличением глубины скважины воз-

растает прозрачность и светопропускаемость зерен, а, следовательно, частицы становятся более пластинчатыми. Как известно, чем больше форма частицы отличается от формы идеальной сферы, тем больше площадь её миделевого сечения и, как следствие, ниже скорость восходящего потока воздуха, обеспечивающая витание частицы.

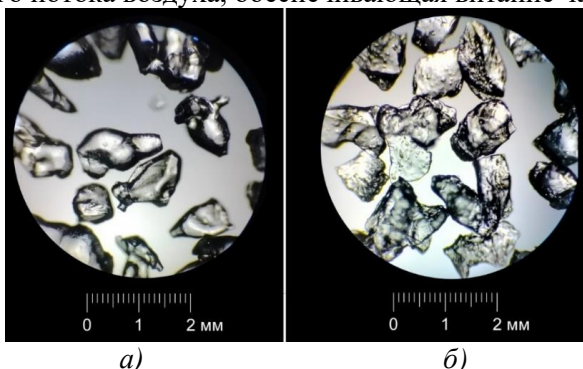


Рисунок 3 – Ледяной шлам класса крупности 0,63-0,8 мм, отобранный при глубине скважины: а) – 5 метров; б) – 30 метров

По полученным в ходе экспериментальных работ данным (таблица 1) и рассчитанными по формулам (таблица 2) значениям были построены графики зависимостей скорости витания от размера частиц ледяного шлама (рисунок 4). В расчетах учитывались параметры: d – эквивалентный диаметр частицы, м, $\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы, кг/м^3 , $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м^3 , ν – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$, $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы (0,6), Ar – параметр Архимеда, Re – критерий Рейнольдса. Значения параметров соответствуют условиям проведения эксперимента на станции Восток. На основании экспериментальных данных было получено уравнение регрессии третьего порядка (1):

$$w_{\text{ч}} = 0,2x^3 - 1,4x^2 + 4,2x + 0,32, \quad (1)$$

где x – размер ледяной частицы, мм.

Высокая корреляционная схожесть графиков позволяет говорить о правильности выбранной методологии проведения экспериментальных работ и достоверности полученных результатов.

В результате экспериментальных работ по определению скорости транспортирования была установлена скорость, при которой весь объем пробы шлама гарантированно выносился в шламоборный

фильтр. Значение скорости воздушного потока составило $w_T = 6,2$ м/с. Согласно Б.Б. Кудряшову, для эффективного бурения скорость восходящего воздушного потока должна превышать скорость витания на 20%. Экспериментально полученные данные соответствуют этому требованию, т.к. полученное значение скорости транспортирования на 24% больше среднего значения скорости витания для наиболее крупных частиц ледяного шлама из скважин VK-22 и VK-23 ($w_{\text{ч}} = 5$ м/с).

Таблица 2 – Формулы расчета скорости витания

Формула	Автор	№
$5,78 \sqrt{\frac{d(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{в}})}{\rho_{\text{в}}}} k_{\text{ф}}$	Олевский В.А.	(2)
$5,7 \sqrt{\frac{d\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{в}}}} k_{\text{ф}}$	Гринев К.М.	(3)
$\frac{v}{d} \exp 10 \left(\frac{\sqrt{\ln Ar} + 2,3}{2,3} - 1 \right) k_{\text{ф}}$	Кудряшов Б.Б.	(4)
$\frac{v}{d} \exp 3 (\sqrt{3} + 1,97 \ln \ln Ar - 3) k_{\text{ф}}$	Кудряшов Б.Б.	(5)
$5\sqrt{d\rho_{\text{ч}}} k_{\text{ф}}$	Страхович А.И.	(6)

2. Использование принципа инерционно-гравитационной очистки в технологии бурения СФТ с ОПЦ воздуха обеспечивает эффективность улавливания ледяного шлама более 97% и реализуется за счет применения в конструкции бурового снаряда противоточного циклона цилиндрико-конического типа.

Исследование процесса шламоулавливания заключалось в обосновании конструкции шламособорного фильтра бурового снаряда с обратной призабойной циркуляцией воздуха, обеспечивающей наибольшую эффективность шламоулавливания. С этой целью была проведена серия экспериментов, объектом исследования которых была эффективность улавливания шлама, а факторами – конструкционные параметры фильтров.

Наиболее очевидной конструкцией шламособорного фильтра для улавливания ледяного шлама является сетчатый фильтр, зарекомендовавший себя при бурении глубоких скважин на станции Восток. Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена модель сетчатого шламособорного фильтра, конструкция которого, аналогична конструкции шламособорного фильтра

КЭМС-132 (рисунок 5). Работа данного фильтра основана на принципе механической очистки воздуха.

Также было проведено исследование эффективности циклонного улавливания шлама, основанного на принципе инерционно-гравитационной очистки воздуха. С этой целью были испытаны три модели шламособорных фильтров циклонного типа (таблица 3). Циклонный фильтр №1 представлял собой классический цилиндро-конический циклон с одним входным патрубком, устанавливаемый в сборе на экспериментальный стенд (рисунок 6). Циклонные фильтры №2 (2 подвода) и №3 (3 подвода) представляют собой цилиндро-конические циклоны (рисунок 7), устанавливаемые внутри прозрачной трубы витания (рисунок 1 б), подача воздуха к которым осуществляется по специальным направляющим (подводам).

Исследование эффективности циклонных фильтров проходило в формате одной серии экспериментов, при этом факторами являлись: X_1 (к.ф.) – конструкция циклонного фильтра; $X_2(h_{бур})$ – интервал бурения (интервал глубин скважины, с которого производился отбор проб шлама для эксперимента), м.

Факторы варьировались на трех уровнях: для X_1 (к.ф.) – фильтр №1 (нижний уровень, -1), фильтр №2 (основной уровень, 0), фильтр №3 (верхний уровень, +1); для $X_2(h_{бур})$ – 0-10 м (нижний уровень, -1), 10-20 м (основной уровень, 0), 20-30 м (верхний уровень, +1).

Экспериментальные работы по определению эффективности улавливания шлама выполнялись в следующей последовательности. Исследуемый шламособорный фильтр устанавливался на стенд. Регулируя скорость вращения мотор-турбины, подбиралась скорость транспортирования (6,2 м/с). Далее на нижнюю сетку подавалась проба шлама. Когда проба без остатка перемещалась в шламособорный фильтр – эксперимент прекращался. Зная массу пробы и массу уловленного шлама, оценивалась эффективность шламособорного фильтра (7):

$$\eta = \frac{m_y}{m_{п}} \cdot 100\% , \quad (7)$$

где m_y – масса уловленного шлама, кг; $m_{п}$ – масса пробы, кг.

Испытания сетчатого шламоборного фильтра продемонстрировали его низкую эффективность при применении воздуха в качестве очистного агента (наибольшее значение показателя эффективности составило $\eta = 57,8\%$). Частицы ледяного шлама благодаря вытянуто-округлой форме, малой шероховатости их поверхностей, а также низкой влажности окружающей среды имеют низкую силу сцепления, что позволяет им, попадая в полость сетчатого фильтра, повторно подниматься в воздух и пребывать во взвешенном состоянии. Витая в воздухе, частицы соударяются друг с другом и сеткой фильтра, тем самым разрушаясь и измельчаясь. Измельченные частицы, ранее не способные проникнуть сквозь сетку, свободно пролетают сквозь неё, оседают на прозрачной трубе, накапливаются сальниками на фильтре и выбрасываются в атмосферу через мотор-турбину (рисунок 5 в).

Результаты экспериментальных работ по исследованию эффективности циклонных шламоборных фильтров представлены в таблице 4. Наибольшую эффективность продемонстрировал циклонный фильтр №3 при улавливании шлама с горизонта скважины 10-20 м, в среднем фильтр улавливал 97,4% массы пробы шлама. Высокая эффективность работы циклонных фильтров обуславливает целесообразность их применения в конструкции бурового снаряда с ОПЦ воздуха.

Таблица 4 – Результаты экспериментального исследования эффективности улавливания шлама циклонными фильтрами

X_1	X_2	Результат, %
+1	+1	97,3
+1	0	97,4
+1	-1	96,8
0	+1	93,6
0	0	91
0	-1	91,6
-1	+1	96,5
-1	0	96,1
-1	-1	95,9

Технология бурения СФТ с ОПЦ воздуха реализуется следующим образом. Бурение скважины снарядом на грузонесущем кабеле начинается с поверхности ледника и продолжается до нижней границы СФТ. В конструкции бурового снаряда реализован принцип ОПЦ, а в качестве очистного агента применяется воздух. Ледяной шлам увлекается с забоя потоком воздуха, движется по внутренним каналам бурового снаряда, не контактируя с затрубным пространством скважины, что исключает потери в проницаемой СФТ. Рейсовая проходка определяется длиной колонковой трубы и объемом шламособорного отсека. По заполнении колонковой трубы керном, производится его отрыв и подъем снаряда из скважины. На поверхности колонковая труба отсоединяется при помощи трубоповорота, где из неё извлекается керн. Далее от снаряда отсоединяется труба шламособорного отсека, заполненная ледяным шламом, который удаляется из трубы вручную или при помощи средств механизации. Затем, в обратной последовательности, к снаряду присоединяется пустые шламособорная и колонковая трубы, после чего снаряд спускается в скважину для следующего бурового рейса.

Выгодными отличиями бурового снаряда с ОПЦ воздуха от тепловых снарядов являются: отсутствие теплового воздействия на керн и окружающую среду, высокая механическая скорость бурения, низкая энергоёмкость. По сравнению с шнековыми снарядами, предлагаемая конструкция бурового снаряда имеет более совершенный механизм очистки скважины от шлама, способствующий повышению рейсовой проходки, а также меньшую металлоёмкость, что снижает энергетические затраты на бурение.

Схема бурового электромеханического снаряда с ОПЦ воздуха представлена на рисунке 8 а. Основные геометрические характеристики колонкового набора представлены в таблице 5. Буровой электромеханический снаряд с ОПЦ воздуха работает следующим образом. Снаряд спускается в скважину на грузонесущем кабеле 18, закреплённом в кабельном замке 17. В конструкции кабельного замка предусмотрен токосъёмник, что позволяет снаряду поворачиваться вокруг своей оси. Распорное устройство 16 служит для предотвращения вращения верхней части снаряда в скважине.

Перед постановкой бурового снаряда на забой, питающее напряжение из электроотсека 15 подается на электродвигатель с частотным управлением 29 и через полый вал 27 и щеточный коллекторный узел 26 на мотор-турбину 25. Вращающий момент от бурового электродвигателя 29 через муфту 28 передается на буровую коронку 1 (рисунок 8 б). При разрушении ледяной горной породы резцами 19 ограничители 20 предотвращают чрезмерную углубку бурового снаряда. Процесс бурения идет до заполнения колонковой трубы 3 керном, после чего вращение бурового электродвигателя 29 останавливается, производится отрыв керна кернорвательными ножами 21, останавливается вращение мотор-турбины 25 и снаряд извлекается на поверхность. В процессе бурения шлам с забоя удаляется за счет разности давлений, создаваемой мотор-турбиной 25. Шлам увлекается потоком воздуха и последовательно поднимаясь по ниппелю буровой коронки 2, внешним воздуховодам 11 и ниппелям 4,5,7,8,10 через воздухоподвод 11 попадает в цилиндрическую часть циклонного фильтра 23.

В цилиндрической части циклонного фильтра 23 шлам под действием центробежной силы и гравитации опускается в конусную часть циклонного фильтра 22, где замедляется и попадает в трубу шламосборного отсека 6 (рисунок 8 в). Ниппель 5 отделяет внутренне пространство трубы шламосборного отсека от колонковой трубы 3 (рисунок 8 г). Очищенный воздух через выхлопную трубу проходит через датчик расхода воздуха 24, мотор-турбину 25 и через воздухоотводящие окна попадает обратно в затрубное пространство скважины.

Проведенный расчет методом конечных элементов в ПО *SolidWorks Flow Simulation* позволил определить необходимый объемный расход воздуха и величину потерь давления во всасывающей линии предлагаемого бурового снаряда (рисунок 9, таблица 6).

Общие потери определялись как сумма потерь давления в конструктивных элементах бурового снаряда, с учетом потерь давления на разгон ледяного шлама (8):

$$P = P_{\text{к}} + P_{\text{воз}} + P_{\text{ц}} + P_{\text{р}}, \quad (8)$$

где $P_{\text{к}}$ – потери давления на буровой коронке, Па, $P_{\text{воз}}$ – потери давления во внешних воздуховодах, Па, $P_{\text{ц}}$ – потери давления в циклонном фильтре, Па, $P_{\text{р}}$ – потери давления на разгон, Па.

Расход воздуха определялся исходя из условий соблюдения скорости транспортирования ($w_T = 6,2$ м/с) во внутренних каналах бурового снаряда. Для эффективной очистки скважины, работа мотор-турбина должна обеспечивать объемный расход воздуха 33 м³/ч при разряжении более 667 Па.

Таблица 5 – Геометрические характеристики колонкового набора

Параметр	Ед. изм.	Значение
Диаметр бурения / диаметр керна	мм	150 / 115
Передний / задний угол резания резцов	град.	50 / 5
Площадь поперечного сечения воздухопроводов	м ²	$3 \times 0,00353$
Толщина стенки воздухопроводов	мм	1
Диаметр описанной окружности по внешним стенкам воздухопроводов	мм	142
Длина колонковой трубы и трубы шламоборного отсека	м	2,1
Наружный / внутренний диаметр колонковой трубы	мм	127 / 117
Внешний диаметр по ниппелю	мм	146
Наружный / внутренний диаметр трубы шламоборного отсека	мм	127 / 117
Внутренний диаметр цилиндрической части циклона	мм	100
Длина цилиндрической части циклона	мм	127
Диаметр выходного отверстия	мм	36
Длина конусной части циклона	мм	180
Количество подводов воздуха	шт.	3
Угол наклона подводов воздуха	град.	15
Эквивалентный диаметр подводов	мм	3×18
Длина выхлопной трубы циклона	мм	44
Диаметр выхлопной трубы циклона	мм	40

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается новое решение актуальной научной задачи повышения эффективности бурения скважин в СФТ во внутриконтинентальных областях Антарктиды и Гренландии за счет разра-

ботки технологии бурения с ОПЦ воздуха и технического средства её реализации.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Наиболее распространенные на сегодняшний день методы теплового и шнекового бурения СФТ не отвечают в полной мере требованиям надежности и эффективности в суровых физико-географических условиях внутриконтинентальных областей Антарктиды и Гренландии.

2. Проведен аналитический расчет режимов ОПЦ методом конечных элементов в ПО *SolidWorks Flow Simulation*, что позволило определить необходимый объемный расход воздуха и величину потерь давления во всасывающей линии бурового снаряда. Для эффективной очистки скважины, работа мотор-турбина должна обеспечивать объемный расход воздуха $33 \text{ м}^3/\text{ч}$ при разряжении более 667 Па .

3. Разработан экспериментальный стенд для комплексного исследования процесса бурения СФТ в условиях Центральной Антарктиды (патент на изобретение РФ №2792401 С1, патент на изобретение РФ №2799953 С1) и методики определения скоростей витания и транспортирования сыпучих материалов, в том числе ледяного шлама.

4. Установлены значения гранулометрического состава, насыпной плотности и параметров формы ледяного шлама из скважин VK-22 и VK-23, пробуренных в районе станции Восток, а также их зависимости от механической скорости бурения и плотности СФТ.

5. Экспериментально установлены скорости витания (среднее значение для наиболее крупных частиц – 5 м/с) и транспортирования ($6,2 \text{ м/с}$) для ледяного шлама, полученного в ходе бурения СФТ.

6. Разработан новый колонковый буровой снаряд на грузонесущем кабеле с тремя внешними воздуховодами, расположенными вдоль колонкового набора, и циклонным шламосборным фильтром. Ледяной шлам увлекается с забоя потоком воздуха и движется по внутренним каналам бурового снаряда, не контактируя с затрубным пространством скважины, тем самым, исключая потери в проницаемой СФТ. Улавливание ледяного шлама происходит за счет применения в конструкции бурового снаряда противоточного циклона цилиндро-конического типа. Результаты экспериментальных работ по исслед-

дованию процесса улавливания ледяного шлама продемонстрировали низкую эффективность сетчатых шламосборных фильтров (наибольшее значение показателя эффективности составило 57,8%). В то же время, эффективность работы циклонных фильтров при улавливании ледяного шлама достигает 97,4%.

7. Разработана технология бурения скважин в СФТ, реализация которой достигается применением бурового снаряда на грузонесущем кабеле с ОПЦ воздуха. Предлагаемая технология позволит повысить эффективность бурения СФТ путем снижения энергоемкости и повышения производительности процесса бурения за счет применения более совершенного механизма очистки забоя от шлама и снижения массы колонкового набора.

Перспективными направлениями темы исследований являются установление параметров бурения (частота вращения, осевая нагрузка, крутящий момент и т.д.) и оптимальных геометрических характеристик породоразрушающего инструмента при бурении СФТ снарядом на грузонесущем кабеле с ОПЦ воздуха.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

1. Turkeev, A.V. Drilling the new 5G-5 branch hole at Vostok Station for collecting a replicate core of old meteoric ice / A.V. Turkeev, N.I. Vasilev, V.Ya. Lipenkov, A.V. Bolshunov, A.A. Ekaykin, A.N. Dmitriev, **D.A. Vasilev** // *Annals of Glaciology*. – 2021. – №62. – С. 305-310.

2. Большунов, А.В. Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом / А.В. Большунов, **Д.А. Васильев**, С.А. Игнатьев, А.Н. Дмитриев, Н.И. Васильев // *Лёд и Снег*. – 2022. – №1. – С. 35-46.

3. Игнатьев, С.А. Экспериментальные исследования переноса ледяного шлама воздухом при бурении снежно-фирновой толщи / С.А. Игнатьев, **Д.А. Васильев**, А.В. Большунов, М.А. Васильева, А.Ю. Ожигин // *Лёд и Снег*. – 2023. – №1. – С. 141-152.

Публикации в прочих изданиях:

4. Большунов, А.В. Механический способ бурения скважин в ледниках / А.В. Большунов, С.А. Игнатьев, Е.В. Шишкин, **Д.А. Ва-**

ильев, И.В. Ракитин // Материалы Международной междисциплинарной научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2021. – С. 15-22.

5. **Васильев, Д.А.** Экспериментальные исследования процесса бурения снежно-фирнового горизонта с продувкой воздухом в районе станции Восток / **Д.А. Васильев** // Материалы Международного форум-конкурса студентов и молодых ученых. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2022. – С. 124-126.

6. **Васильев, Д.А.** Экспериментальные исследования процесса бурения снежно-фирнового горизонта с продувкой воздухом в районе станции Восток / **Д.А. Васильев, А.В. Большунов, С.А. Игнатъев, А.Р. Молчанова** // Международная научно-практическая конференция – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2022. – С. 29.

7. **Туркеев, А.В.** Бурение мелких (до 70 м) фирновых скважин в районе станции восток с целью изучения палеоклимата за последние 2000 лет / **А.В. Туркеев, А.А. Екайкин, В.Я. Липенков, А.Н. Верес, В.Н. Заровчатский, А.В. Большунов, С.А. Игнатъев, Д.А. Васильев** // Международная научно-практическая конференция – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2022. – С. 132.

8. **Васильев, Д.А.** Экспериментальное исследование процесса улавливания шлама при бурении ледников с продувкой воздухом / **Д.А. Васильев, А.В. Большунов** // Международная научно-практическая конференция – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. – 2023. – С. 31.

Патенты:

9. Патент №2792401 Российская Федерация, МПК G01P 5/16 (2006.01), G01P 5/16 (2006.01). Стенд для определения скорости витания сыпучих материалов: № 2022119518: заявл. 18.07.2022: опубл 21.03.2023 / **А.В. Большунов, Д.А. Васильев, С.А. Игнатъев, М.А. Васильева, А.Ю. Ожигин**; заявитель СПбГУ. – 9 с. : ил.

10. Патент №2799953 Российская Федерация, МПК G01P 5/16 (2006.01), G01P 5/16 (2006.01). Стенд для определения скорости витания сыпучих материалов: № 2023109183: заявл. 12.04.2023: опубл 14.07.2023 / **А.В. Большунов, Д.А. Васильев, С.А. Игнатъев, А.Ю. Ожигин**; заявитель СПбГУ. – 10 с. : ил.

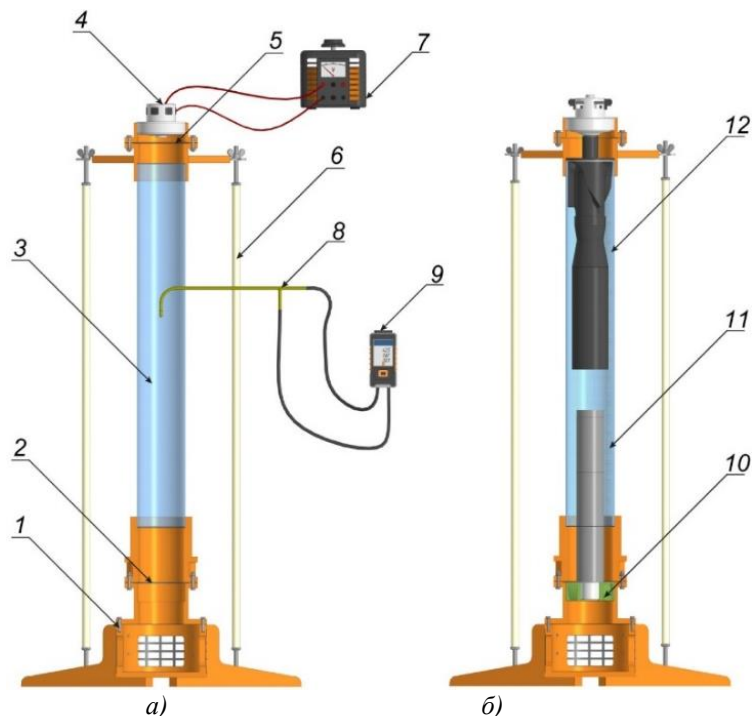


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд по исследованию процесса транспортирования ледяного шлама: а) – компоновка №1: 1 – разборное основание стенда; 2 – нижняя сетка; 3 – прозрачная труба витания; 4 – мотор-турбина; 5 – верхняя сетка; 6 – шпильки; 7 – автотрансформатор; 8 – трубка Пито-Прандтля; 9 - электронный дифференциальный микроманометр *testo440 dP*, б) – компоновка №2: 10 – турбодизель; 11 – разборный набор цилиндров; 12 – циклонный фильтр в сборе

Таблица 1 – Таблица значений $w_{\text{ч}}$ (м/с) исследуемых классов крупности на различных горизонтах бурения

Класс крупности, мм	Глубина скважины, м						
	VK-22						VK-23
	5	10	15	20	25	30	
1,6-3	5,3	5,2	5,3	5,0	5,0	4,6	4,5
1,25-1,6	4,3	4,3	4,3	4,1	3,8	3,7	3,7
1-1,25	3,5	3,8	3,6	3,8	3,5	3,5	3,4
0,8-1	3,2	3,3	3,3	3,0	2,9	2,7	2,6
0,63-0,8	2,8	2,8	3,0	2,6	2,5	2,6	2,5
0,4-0,63	2,5	2,5	2,3	2,2	2,0	2,0	1,9

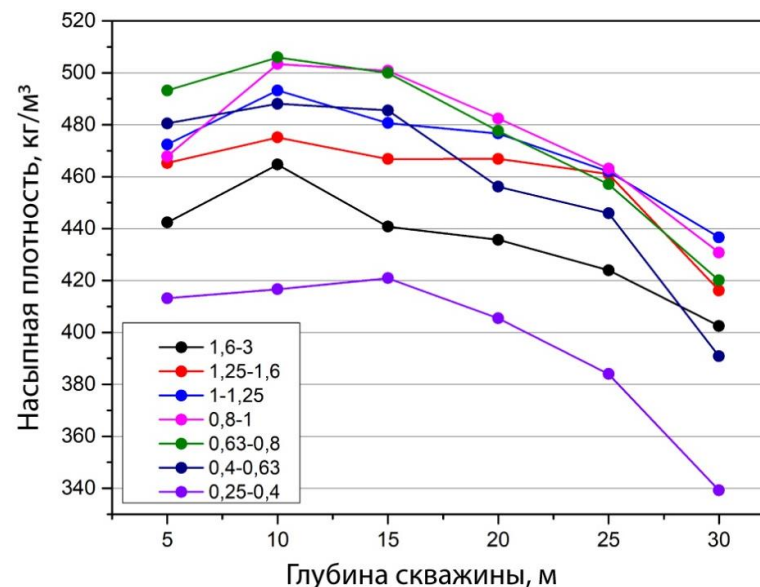


Рисунок 2 – Зависимость значений насыпной плотности отдельных классов крупности от глубины скважины

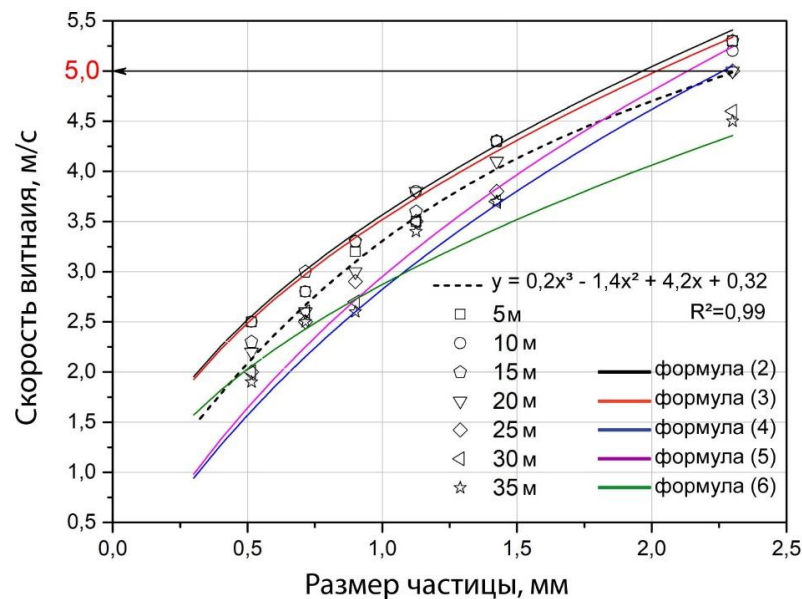


Рисунок 4 – Экспериментальные и теоретические зависимости скорости витания от размера частиц ледяного шлама

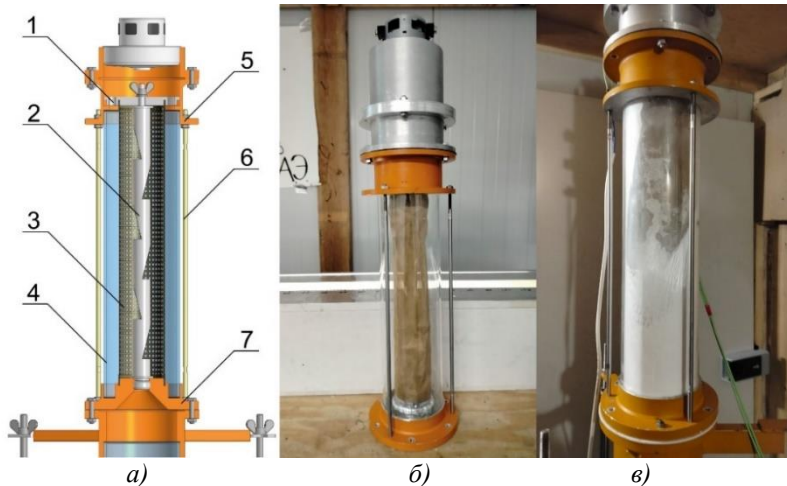


Рисунок 5 – а) – конструкция сетчатого шламосборного фильтра: 1 – фланец сетчатого фильтра; 2 – шламоподъемная трубка; 3 – сетчатый фильтр; 4 – прозрачная труба из оргстекла; 5 – верхний фланец; 6 – шпильки; 7 – нижний фланец, б) – общий сетчатого шламосборного фильтра, в) – прошедшие сквозь сетчатый фильтр ледяные частицы

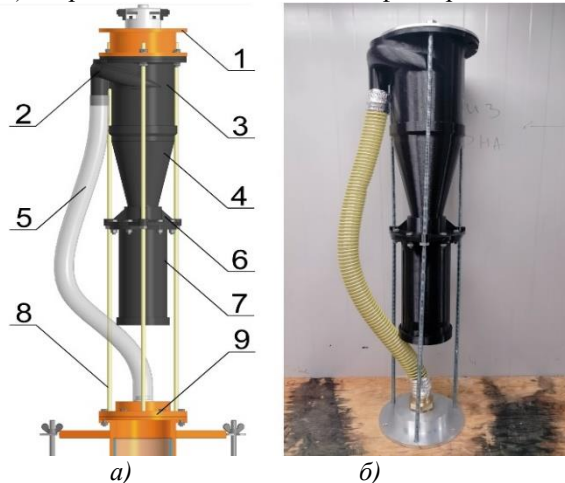


Рисунок 6 – а) – конструкция циклонного фильтра №1: 1 – верхний фланец; 2 – входной патрубок; 3 – цилиндрическая часть; 4 – конусная часть; 5 – шламоподъемный шланг; 6 – переходник; 7 – шламосборный бак; 8 – шпильки; 9 – нижний фланец, б) – общий вид циклонного фильтра №1

Таблица 3 – Основные геометрические характеристики моделей циклонных фильтров

Параметр	Ед. изм.	Значение		
		Циклон №1	Циклон №2	Циклон №3
Внутренний диаметр цилиндрической части циклона	мм	135	76	76
Длина цилиндрической части циклона	мм	200	140	140
Диаметр выходного отверстия	мм	43	32	32
Длина конусной части	мм	205	143	143
Внутренний диаметр шламосборного бака	мм	100	95	95
Длина шламосборного бака	мм	253	250	250
Количество входных патрубков (подводов)	шт	1	2	3
Диаметр входного патрубка (эквивалентный диаметр подвода)	мм	34	39,4	39,8
Длина выхлопной трубы	мм	120	77	77
Диаметр выхлопной трубы	мм	80	36	36
Угол наклона подвода воздуха	град	14	16	15

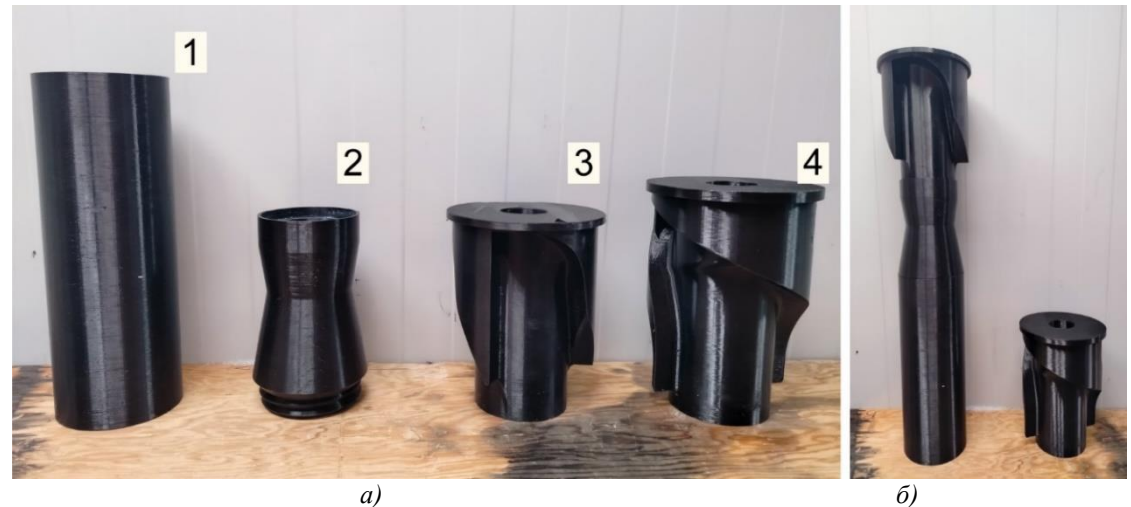


Рисунок 7 – а) – составные части циклонных фильтров №2 и №3: 1 – шламосборный бак; 2 – конусная часть циклона; 3 – цилиндрическая часть циклона с тремя подводами (фильтр №3); 4 – цилиндрическая часть циклона с двумя подводами (фильтр №2), б) – циклонный фильтр №3 в сборе, справа цилиндрическая часть фильтра №2

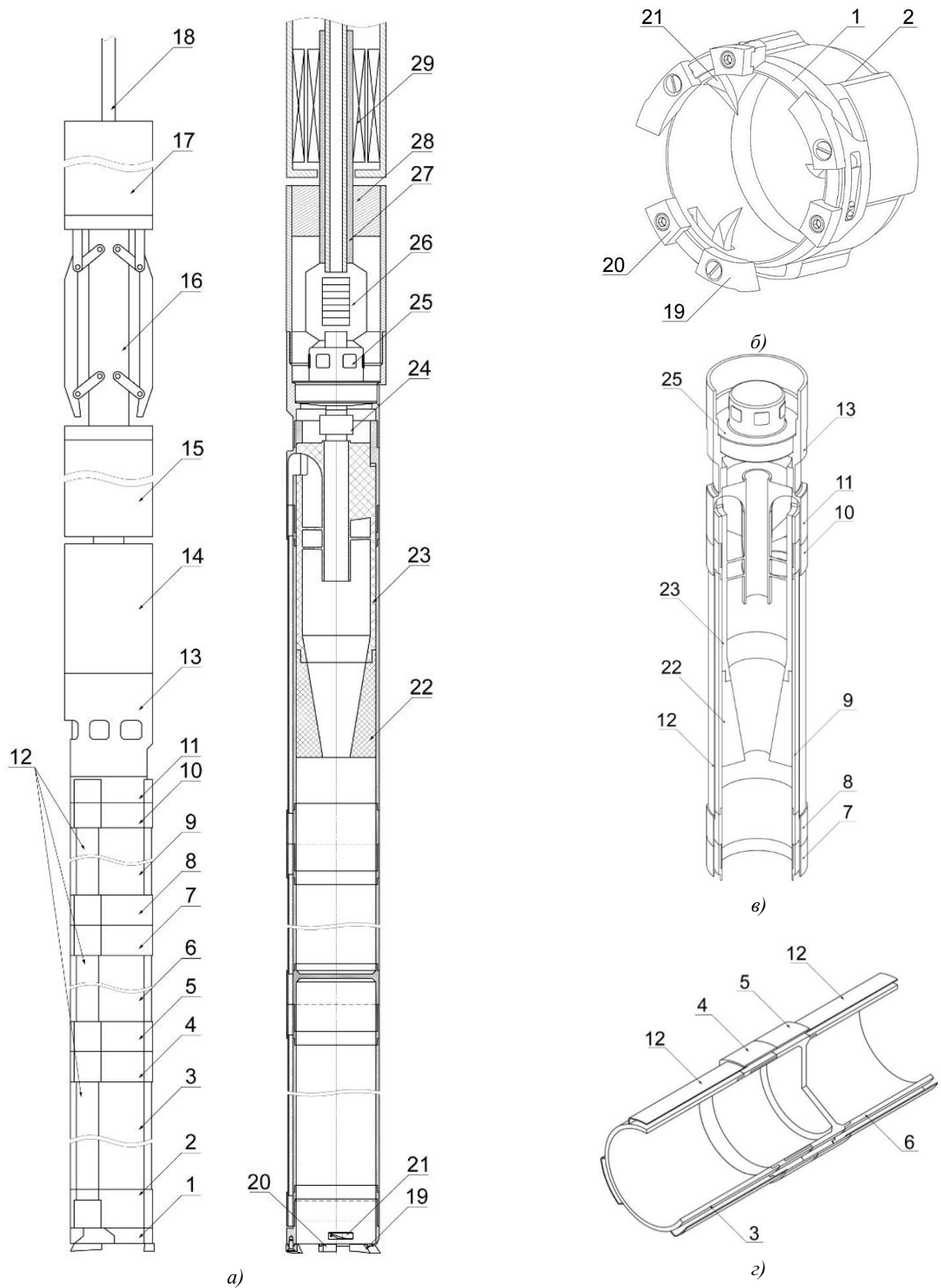


Рисунок 8 – а) – схема бурового электромеханического снаряда с ОПЦ; 1 – буровая коронка; 2 – nipple буровой коронки; 3 – колонковая труба; 4,5 – nipple; 6 – труба шламособорного отсека; 7,8 – nipple; 9 – труба циклонного фильтра; 10 – nipple; 11 – воздухоподвод; 12 – внешние воздуховоды; 13 – nipple; 14 – корпус; 15 – корпус электродвигателя; 16 – распорное устройство; 17 – кабельный замок; 18 – грузонесущий кабель; 19 – резцы; 20 – ограничители; 21 – кернорвательные ножи; 22 – конусная часть циклонного фильтра; 23 – цилиндрическая часть циклонного фильтра; 24 – расходомер; 25 – мотор-турбина; 26 – щеточный коллекторный узел; 27 – полый вал электродвигателя; 28 – муфта; 29 – буровой электродвигатель, б) – схема ПРИ, в) – схема сечения шламособорного отсека, г) – схема сечения nipple соединения колонковой трубы и трубы шламособорного отсека

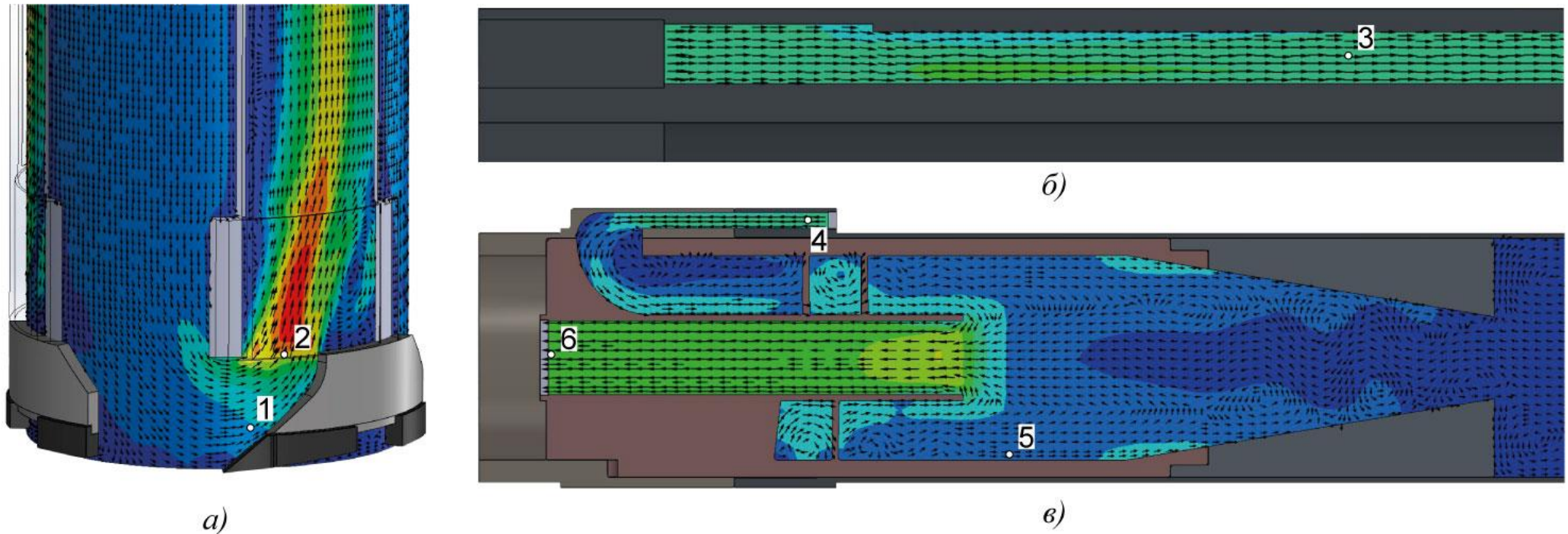


Рисунок 9 – Распределение местных скоростей по сечению потока воздуха в конструктивных элементах бурового снаряда, при объёмном расходе воздуха 33 м³/ч: *а)* – профиль скоростей в каналах буровой коронки, *б)* – профиль скоростей во внешнем воздуховоде, *в)* – профиль скоростей в циклонном фильтре. Цифрами показаны точки измерения скорости потока

Таблица 6 – Результаты расчета методом конечных элементов

	Коронка		Внешние воздуховоды	Циклонный фильтр		
Скорости в точках, м/с	1	2	3	4	5	6
	3,37	12,98	10,05	6,49	2,70	8,16
Потери давления, Па	159		413		91	
Цветовая индикация скорости потока, м/с						