

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

Сербин Данил Васильевич



ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБРАЗОВАНИЯ  
ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛОСТЕЙ В ЛЕДОВОМ МАССИВЕ  
ТЕПЛОВЫМ СПОСОБОМ

Специальность 2.8.1. Технология и техника геологоразведочных работ

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Дмитриев А.Н.

Санкт-Петербург – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ЛЕДОВОМ МАССИВЕ ТЕПЛОВЫМ СПОСОБОМ.....	12
1.1 Особенности технологий бурения скважин в ледовом массиве .....	12
1.2 Технологии бурения скважин в ледовом массиве тепловым способом....	14
1.3 Технические средства для бурения скважин во льду тепловым способом.....	22
1.3.1 Колонковые термобуровые снаряды .....	22
1.3.2 Термоиглы.....	26
1.3.3 Технические средства выплавления каверн .....	34
1.3.4 Техника бурения скважин в ледовом массиве горячей водой.....	36
1.4 Аналитический обзор существующих конструкций скважинных расширителей.....	41
1.5 Выводы по главе 1 .....	47
Глава 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ ПРИ БУРЕНИИ СПЛОШНЫМ ЗАБОЕМ С ОДНОВРЕМЕННЫМ РАСШИРЕНИЕМ СКВАЖИН В ЛЕДОВОМ МАССИВЕ ТЕПЛОВЫМ СПОСОБОМ.....	49
2.1 Лед. Теплофизические характеристики льда .....	49
2.2 Призобойная кольцевая циркуляция .....	50
2.3 Математическое моделирование процесса бурения плавлением с одновременным расширением .....	53
2.3.1 Описание процесса бурения льда сплошным забоем тепловым способом .....	58

2.3.2 Описание процесса расширения льда циркулирующим теплоносителем с постоянным его подогревом.....	62
2.4 Выводы по главе 2.....	67
Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ ПЛАВЛЕНИЕМ С ОДНОВРЕМЕННЫМ РАСШИРЕНИЕМ.....	69
3.1 Методика планирования и обработки результатов экспериментальных исследований .....	70
3.1.1 Планирование эксперимента.....	70
3.1.2 Статистическая обработка экспериментальных данных .....	73
3.2 Методика экспериментальных исследований.....	74
3.2.1 Экспериментальный стенд .....	74
3.2.2 Экспериментальная модель термогидравлического бурового снаряда - расширителя.....	76
3.2.3 Принцип работы экспериментального стенда .....	83
3.3 Результаты экспериментальных работ.....	84
3.4 Выводы по главе 3.....	93
Глава 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБРАЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛОСТЕЙ ТЕПЛОМ СПОСОБОМ ..	95
4.1 Разработка технологии образования локальных полостей тепловым способом.....	95
4.2 Разработка термогидравлического бурового снаряда - расширителя.....	98
4.2.1 Разработка принципиальной схемы термогидравлического бурового снаряда - расширителя.....	99
4.2.2 Разработка конструкции термогидравлического бурового снаряда-расширителя.....	103

4.2.3 Принцип работы термогидравлического бурового снаряда– расширителя.....	104
4.2.4 Разработка рабочего органа термогидравлического бурового снаряда– расширителя.....	105
4.3 Выводы по главе 4.....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение .....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения .....	130

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Комплексное исследование всех видов ледников имеет большое значение для целого ряда естественных наук: географии, гляциологии, палеоклиматологии, геологии, геофизики, геохимии, микробиологии и др. Для проведения исследований требуется бурение скважин различных глубин и диаметров, что подразумевает создание специальных технологий и технических средств бурения скважин в ледовом массиве с учетом физико-механических и реологических свойств льда.

Для проведения научно-исследовательских работ на различных стадиях бурения скважин в ледовом массиве возникает необходимость образования локальных полостей с заданными геометрическими размерами. Под понятием «локальная полость» подразумевается участок скважины увеличенного диаметра, имеющий форму различной геометрии: сфероида, цилиндра, усеченного конуса, эллипсоида и т.д.

Анализ современных технологий бурения скважин в ледовом массиве выявил широкую область применения локальных полостей: при бурении горячей водой локальная полость служит каналом сообщения основной и вспомогательной скважин; при отборе проб газа и воды из ледового массива выплавляется локальная полость – каверна; при боковом или параллельном отборе проб осуществляется расширение на интересующем участке; при обеспечении целостности и устойчивости стенок скважины локальная полость служит участком локальной рекристаллизации льда; при контролируемом вскрытии подледниковых водоемов требуется локальное расширение нижнего участка скважины с последующим формированием выхода в водоем.

Образование полостей можно реализовать двумя технологическими процессами – бурением и расширением, причем последнее осуществляется посредством продвижения фронта разрушения, как в вертикальном направлении, так и в горизонтальном. На практике образование локальных полостей в ледовом массиве осуществляется механическим, тепловым или гидродинамическим

способами с прямой, обратной или призабойной циркуляцией технологической жидкости (бурового раствора, очистного агента, теплоносителя, заливочной жидкости и т.д.). Недостатками устройств механического типа являются: дополнительный механизм перевода из транспортного положения в рабочее, относительно низкая рейсовая проходка, высокая аварийность и, зачастую, необходимость бурения пилотной скважины. Недостатками устройств гидродинамического типа являются повышенные требования к насосному оборудованию, меньший диаметр расширения, высокая зависимость от физико-механических свойств технологической жидкости. Преимуществами устройств теплового типа являются простота конструкции, большая рейсовая проходка, возможность оперативного регулирования увеличения диаметра в процессе образования локальной полости и отсутствие выдвижных элементов. Устройства с прямой и обратной циркуляцией заливочной жидкости технически более сложны, так как требуется габаритное насосное оборудование для прокачки жидкости по всему стволу скважины и надежная изоляция снежно-фирнового горизонта, а устройства с призабойной циркуляцией жидкости позволяют существенно уменьшить массу, габариты и мощность оборудования.

Анализ литературных источников и результатов выполненных работ подтверждает актуальность разработки эффективных технологий и технических средств образования локальных полостей в ледовом массиве.

Актуальность работы также обусловлена распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.06.2021 г. № 1767-р «Об утверждении плана мероприятий по реализации Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике до 2030 года». Горный университет принимает участие в реализации 21-го Мероприятия «Комплексные исследования подледникового озера Восток и палеоклимата Земли в районе российской антарктической станции Восток», которое направлено на выполнение поручения Президента Российской Федерации В.В. Путина от 09.05.2020 № Пр-634 о разработке комплекса мероприятий по научному изучению района антарктической станции Восток.

## **Степень проработанности темы исследований**

Изучением вопросов теории, технологии и техники бурения скважин в ледовых массивах тепловым способом начали заниматься в середине XX века. Большой вклад в развитие технологии и техники бурения скважин в ледовом массиве внесли отечественные и зарубежные учёные, из которых можно отметить следующих исследователей: Н.И. Барков, Н.Е. Бобин, Н.И. Васильев, Л.К. Горшков, А.Н. Дмитриев, Э.А. Загривный, А.А. Земцов, И.А. Зотиков, В.М. Зубков, А.П. Капица, А.В. Красилев, Б.Б. Кудряшов, Н.Г. Меньшиков, Б.С. Моисеев, В.А. Морев, В.М. Пашкевич, Л.М. Саватюгин, А.Н. Саламатин, Н.И. Слюсарев, Г.К. Соловьёв, П.Г. Талалай, В.К. Чистяков, А.М. Шкурко, Н.А. Ammot, D. Blythe N., J. Burnett, D. Duling, D. Gibson, Gundestrup, N. Humphrey, Ji.K., Ji.M., C. Lorius, Frank R. Rack, Y. Suzuki и др.

Большой объем теоретических и экспериментальных исследований бурения скважин в ледовом массиве тепловым способом, а также результаты более двух десятков успешно испытанных российских и зарубежных тепловых буровых снарядов в лабораторных и скважинных условиях являются основой для разработки новых технологий и технических средств образования локальных полостей, объединяющих процессы бурения и расширения ледовой скважины.

**Объектом исследований** являются скважины в ледовом массиве, а **предметом исследований** - процесс образования локальных полостей.

**Цель работы** - повышение эффективности процесса образования локальных полостей в ледовом массиве.

**Идея работы** заключается в контроле и оперативном управлении параметрами контактного (кондуктивного) бурения и конвективного расширения скважин в ледовом массиве с использованием термогидравлического бурового снаряда-расширителя на грузонесущем кабеле.

**Задачи исследований:**

1. На основе анализа современных технологий и технических средств бурения и расширения скважин в горных породах выявить актуальное направление исследований по разработке технологии образования локальных полостей в ледовом массиве.
2. Разработка математической модели процесса контактного бурения плавлением сплошным забоем с одновременным конвективным расширением скважин в ледовом массиве.
3. Разработка экспериментального стенда и натурной модели термогидравлического бурового снаряда-расширителя для исследования процесса бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом.
4. Проведение экспериментальных исследований для определения зависимостей механической скорости контактного бурения плавлением и интенсивности конвективного расширения ледовой скважины от физико-механических и структурно-реологических свойств льда, тепловой мощности нагревательных элементов, конструктивных особенностей бурового снаряда и характеристик насоса.
5. Разработка технологии и технических средств бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом.

**Научная новизна**

Установлен механизм эффективного процесса образования локальных полостей в ледовом массиве термогидравлическим буровым снарядом-расширителем на грузонесущем кабеле с контролем и оперативным управлением основными параметрами контактного бурения и конвективного расширения;

Установлена математическая зависимость, связывающая радиус расширения скважины в ледовом массиве от физико-механических свойств льда, механической скорости бурения, подводимой тепловой мощности к нагревательным элементам пенетратора, которая позволяет рассчитать конструкцию термогидравлического бурового снаряда-расширителя.



### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета процесса бурения с одновременным или последующим расширением участка скважин в ледовом массиве тепловым способом с использованием термогидравлического бурового снаряда–расширителя на грузонесущем кабеле, позволяющая определить основные параметры исследуемого процесса.

2. Разработано техническое средство (патент на изобретение РФ №2700143 С1) для бурения сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом на грузонесущем кабеле.

3. Разработанная технология образования локальных полостей тепловым способом с использованием термогидравлического бурового снаряда - расширителя на основе теоретических моделей и экспериментальной методики исследования процесса бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве принята к внедрению при проведении научно–исследовательских работ на станции Восток (Антарктида) (Акт внедрения результатов диссертации в ФГБУ «ААНИИ» от 11.06.2022 г., приложение Б).

### **Методология и методы исследований.**

1. Теоретический анализ и обобщение отечественных и зарубежных литературных источников.

2. Математическое моделирование процессов и параметров режимов бурения сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом с использованием термогидравлического бурового снаряда - расширителя на грузонесущем кабеле.

3. Экспериментальные исследования процесса бурения с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом

с использованием термогидравлического бурового снаряда - расширителя на грузонесущем кабеле.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Образование локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом достигается за счет объединения в один технологический процесс контактного бурения и конвективного расширения с использованием термогидравлического бурового снаряда-расширителя на грузонесущем кабеле.

2. Образование локальной полости в виде усеченного конуса с соотношением диаметров верхнего и нижнего оснований к диаметру бурения 4:1 и 2:1, соответственно, достигается использованием термогидравлического бурового снаряда – расширителя при механической скорости бурения от 0,5 до 0,8 м/ч, производительности насоса 1 м<sup>3</sup>/ч и проходкой 0,5 м.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями, удовлетворительной сходимостью расчётных величин с опытными данными, положительными результатами внедрения разработок в практику бурения ледовых скважин.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались на I и II Международных научно-практических конференциях «Бурение в осложненных условиях» (г. Санкт-Петербург, 5-6 октября 2016 г. и 30 октября – 1 ноября 2017 г.); Международной научно-практической конференции «Technologies of hydrocarbon field development» (г. Санкт-Петербург, 10-11 сентября 2019 г.); Международной научно-практической конференции «Экологически безопасные буровые и технологические жидкости – основа устойчивого развития ТЭК» (г. Санкт-Петербург, 12 декабря 2019 г.); I Международной междисциплинарной научно – практической конференции «Человек в Арктике» (г. Санкт-Петербург, 18 – 19 ноября 2021 г.); Международной научно – практической конференции «Прорывные технологии в

разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург, 15 – 16 ноября 2022 г.).

**Личный вклад автора.** Проведен теоретический анализ технологий и технических средств бурения и расширения скважин в ледовом массиве. Разработано устройство для бурения сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом, защищенное патентом на изобретение №2700143. Разработан экспериментальный стенд для исследования процесса бурения сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом. Проведены полевые испытания модели ТБСР, связанные с реализацией проекта бурения глубокой скважины 5Г в Антарктиде (ст. Восток). На основе теоретических и экспериментальных исследований, были разработаны технологии образования локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования освещены в 15 печатных работах (14, 15, 18, 22, 31 - 34, 79 – 85), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (приложение А).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой их них, заключения, списка литературы, включающего 141 наименование. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка и 6 таблиц, 2 приложения.

## **ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ЛЕДОВОМ МАССИВЕ ТЕПЛОВЫМ СПОСОБОМ**

### **1.1 Особенности технологий бурения скважин в ледовом массиве**

Изучение ледников имеет первостепенное значение для познания формирования планеты Земля, природы ее оледенения, а также других природных явлений [55, 106, 108]. Ледники, как правило, мало изучены, а подледниковые горные породы вовсе не исследованы, но весьма перспективны в качестве возможного освоения в будущем [129]. Условия бурения скважин в районах распространения ледников крайне неблагоприятны: ледяные покровы на суше и тяжелые шельфовые льды, низкие отрицательные температуры, большая удаленность от пунктов снабжения, специфические транспортные условия, полное отсутствие инфраструктуры, высокогорье и др. [16, 103]

Комплексное исследование всех видов ледников имеет большое значение для целого ряда естественных наук: географии, гляциологии, палеоклиматологии, геологии, геофизики, геохимии, микробиологии и др. [14, 22, 25, 136] Для проведения исследований требуется бурение скважин различных глубин и диаметров, что подразумевает создание специальных технологий и технических средств бурения скважин в ледовом массиве с учетом физико-механических и структурно–реологических свойств льда [110, 111].

Бурение скважин является важнейшим и наиболее эффективным способом по проведению гляциологических исследований, геофизических наблюдений, изучения химического состава льда и различных включений [88, 106, 133, 134]. Бурение скважин в ледниках и подледниковых породах в перспективе имеет большое значение для проведения геологоразведочных работ и дальнейшей эксплуатации месторождений полезных ископаемых, скрытых ледовыми толщами, а также является научным заделом для проектирования технологий и технических средств бурения скважин на космических объектах, таких как, Луна, Марс или спутники Юпитера Европа и Энцелад [13, 21, 36, 103, 141].

Суровые условия и отдаленность от населенных пунктов заполярных регионов расширяют требования к технологическому оборудованию, к которым

относятся: минимальные массогабаритные и энергетические характеристики, простота и надежность конструкции; работоспособность при низких температурах ледников (до минус 57°С на станции Восток) и окружающей среды. Таким образом, стандартные технологические и технические решения бурения скважин для реализации их в условиях Арктики и Антарктики требуют значительной модернизации перед началом проведения научно-исследовательских работ [87]. Наибольшее распространение получили механический и тепловой способы бурения скважин в ледовом массиве ввиду осложненных условий сооружения скважин и особенности льда, как горной породы. Механическое бурение в основном происходит за счет резания льда, а тепловое за счет его плавления [9, 104].

Наиболее распространённые технологии бурения скважин в ледовом массиве основываются на использовании буровых снарядов на грузонесущем кабеле или гибкой буровой трубе (шлангокабель, колтюбинг). Использование грузонесущего кабеля и лебедки позволяет существенно уменьшить затраты времени на спускоподъемные операции и массу поверхностного бурового оборудования. Однако, классическое вращательное бурение на трубах в настоящее время находит все большее применение в практике сооружения скважин в ледовом массиве.

Большой вклад в развитие теплового способа бурения скважин и основы горной теплофизики внесли российские ученые, в особенности, Горного университета [122, 123, 124], французские ученые из LGGE (Лаборатория гляциологии и геофизики окружающей среды, Гренобль) и американские исследователи из лабораторий Ice Drilling Program Office (IDPO) и Ice Drilling Design and Operations (IDDO), CRREL [73]. Изучением вопросов теории, технологии и техники бурения скважин в ледовом массиве тепловым способом исследователи начали заниматься в середине XX века, а основоположниками являются отечественные и зарубежные учёные, к которым можно отнести следующих специалистов: Н.И. Барков, Н.Е. Бобин, Н.И. Васильев, Л.К. Горшков, А.Н. Дмитриев, Э.А. Загривный, А.А. Земцов, И.А. Зотиков, В.М. Зубков, А.П.

Капица, А.В. Красилев, Б.Б. Кудряшов, Н.Г. Меньшиков, Б.С. Моисеев, В.А. Морев, В.М. Пашкевич, Л.М. Саватюгин, А.Н. Саламатин, Н.И. Слюсарев, Г.К. Соловьёв, П.Г. Талалай, В.К. Чистяков, А.М. Шкурко, Н.А. Ammot, D. Blythe N., C.R. Bently, J. Burnett, D. Duling, D. Gibson, Gundestrup, N. Humphrey, Ji.K., B.L. Hansen, Ji.M., C. Lorius, Frank R. Rack, Y. Suzuki и др. [55, 93, 98, 103, 114, 115, 132]

## **1.2 Технологии бурения скважин в ледовом массиве тепловым способом**

В основе теплового способа бурения скважин в ледовом массиве лежат специфические свойства льда как горной породы, характеризующие низкую температуру плавления ( $0^{\circ}\text{C}$ ) и невысокие затраты энергии на фазовый переход из твердого тела в жидкое состояние.

Плавление льда осуществляется за счет конвективного теплообмена потоком жидкости или газа высокой температуры и кондуктивного теплообмена за счет контакта с твердой поверхностью нагревательного устройства (тепловые коронки или пенетраторы), также стоит выделить плавление льда излучением (лазерное бурение). Конвективное бурение скважин в ледовом массиве с использованием промежуточного теплоносителя осуществляется с помощью горячих технологических жидкостей (воды, керосина и т.д.), горячего пара [13, 125], высокотемпературных продуктов сгорания, получаемых в специальных горелках (форсунках). Большое распространение получило контактное бурение плавлением с использованием специальных термобуровых снарядов, а в последнее время и бурение излучением (лазерное бурение) становится все более популярнее. На рисунке 1.1 отображена классификация теплового способа бурения.

В процессе бурения жидкостные (вода, керосин и т.д.) и газовые потоки (продукты сгорания, воздух и т.д.), обладающие высокими температурами, плавят или испаряют лед в зоне забоя и выносят продукты фазовых превращений на поверхность. Бурение снежно-фирновых отложений ввиду своей пористости сопровождается проникновением талой воды в стенки скважины с последующей

кристаллизацией и образованием ледовой корки. При тепловом бурении льда потоки нагретой до положительной температуры жидкости или газа воздействуют на стенки скважины, что приводит к плавлению льда и расширению скважины. Этот процесс должен учитываться при разработке технологии бурения скважин в ледовом массиве. На рисунке 1.1 приведена классификация видов теплового бурения льда.

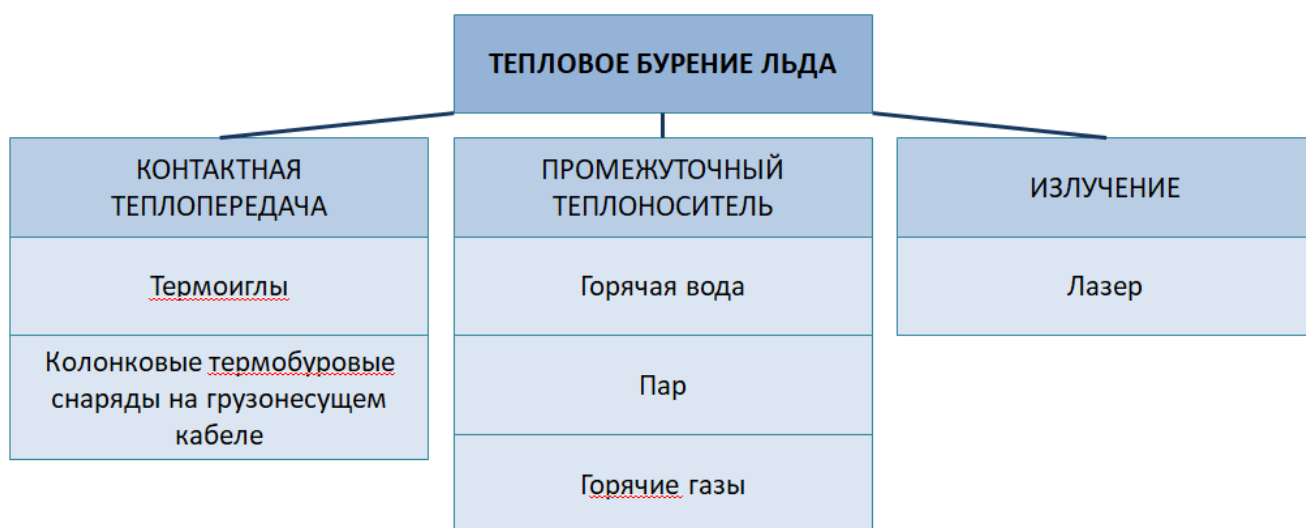


Рисунок 1.1 - Виды теплового бурения

Бурение скважин в ледовом массиве тепловым способом с использованием контактной теплопередачи осуществляется при помощи *колонковых термобуровых снарядов* и *термоигл на грузонесущем кабеле*. Колонковые термобуровые снаряды предназначены для бурения скважин с отбором проб льда, а термоиглы для бурения скважин сплошным забоем. В качестве основного оборудования используется буровой снаряд, лебедка, мачта, грузонесущий кабель, источник электро- и/или тепловой энергии (рисунок 1.2). Лебедка предназначена для осуществления спуска и подъема снаряда в скважину. Мачта имеет небольшую высоту до 15 м и может быть выполнена с возможностью поворота в горизонтальное положение и изготавливается из композитных материалов высокой прочности с устойчивостью к низкотемпературным условиям. Термобуровые снаряды и термоиглы на грузонесущем кабеле имеют ряд преимуществ: минимальные размеры, масса и энергетические затраты при возможности бурения скважин глубиной от нескольких метров до нескольких

километров. Такие буровые снаряды отличаются простотой конструкции и обслуживания, надежностью в эксплуатации и длительным сроком службы [110]. Большинство конструкций тепловых буровых снарядов на грузонесущем кабеле не требуют системы восприятия реактивного крутящего момента, что является дополнительным преимуществом перед механическим способом бурения. Породоразрушающим инструментом (ПРИ) колонковых термобуровых снарядов являются кольцевые тепловые коронки с распределенным источником тепловой энергии в их корпусе. ПРИ термоигл является пенетратор, форма которого представляет тело вращения цепной линии вокруг вертикальной оси. В качестве источника тепловой энергии в ПРИ используются электрические нагревательные элементы (нихромовые спирали, стальные жилы, медные сердечники и т.д.). Мощность нагревательных элементов, как правило, не превышает 5-7 кВт тепловой энергии, а общая электрическая мощность бурового снаряда не превышает 10-12 кВт. В настоящее время при бурении скважин в леднике колонковыми термобуровыми снарядами на грузонесущем кабеле была достигнута максимальная глубина 2755 м при максимальной механической скорости бурения 4 – 5 м/ч [20, 98].

Для неглубоких скважин (до 500м), целью которых является получение керновых проб льда для проведения углеродного анализа или микробиологического опробования и т.д., используется «сухой» метод бурения, при котором талая вода с забоя откачивается турбокомпрессором в специальный бак в верхней части термобурового снаряда на грузонесущем кабеле с последующим ее извлечением и очисткой на поверхности.

При достижении глубин более 500 метров скважину заполняют низкотемпературной жидкостью (фреон, керосин, этанол, полидиметилсилоксан) для поддержания устойчивости ствола скважины, компенсации горного давления, сохранения постоянного диаметра скважины на протяжении необходимого времени для исследований, а технические средства бурения разрабатывают с системой призабойной (местной) циркуляции и системой нагревательных элементов [6, 9, 23]. Неправильный выбор плотности заливочной жидкости и



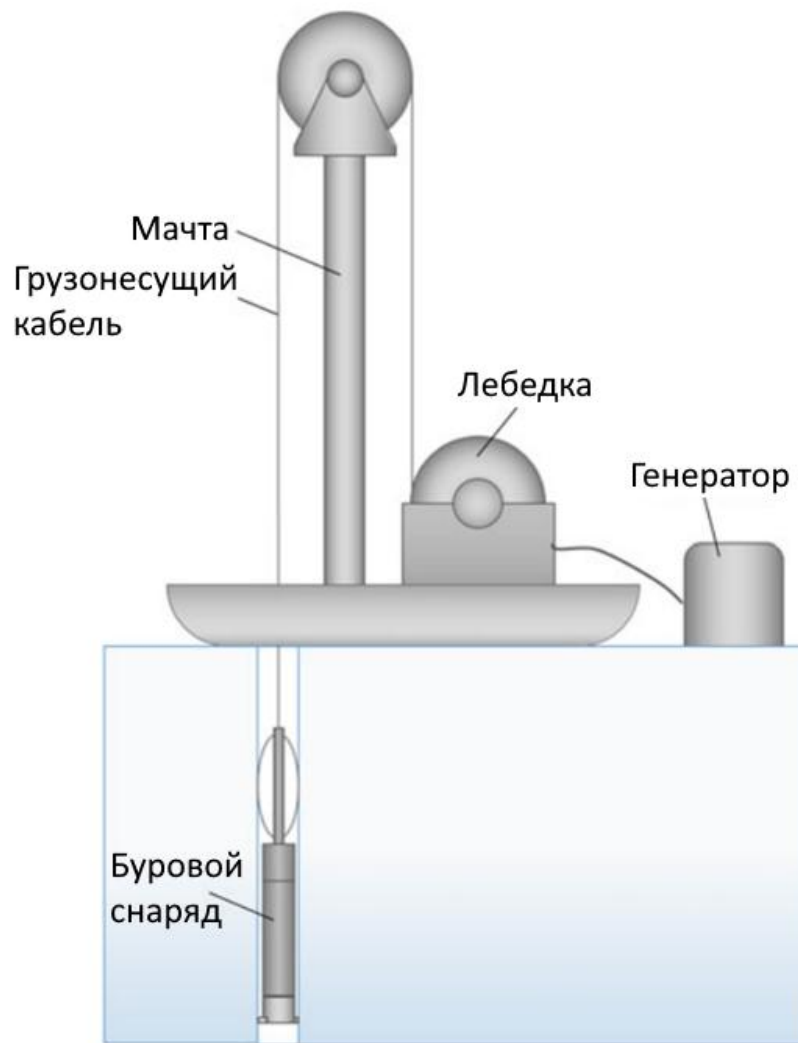


Рисунок 1.2 – Основное оборудование для бурения снарядами на грузонесущем кабеле

высоты ее подъема часто являются причинами заклинивания бурового снаряда при его подъеме [71, 8]. Например, одна из аварий произошла в декабре 1991 года, когда скважина 5Г на российской антарктической станции Восток была пробурена тепловым способом до рекордной глубины 2502 м. Колонковый термобуровой снаряд застрял на глубине 2250 м во время подъема, когда расчетная разность давлений между жидкостью и льдом достигала 2,7 МПа [79]. Тот же самый случай произошел в 1996 году с японским электромеханическим снарядом на куполе DomeF, в Антарктиде, когда уровень жидкости упал до 720 м ниже отметки устья скважины, при этом депрессия в скважине составила более 6 МПа [113].

Талая вода при использовании снарядов на грузонесущем кабеле удаляется с забоя за счет призабойной продувки или промывки скважины,

турбокомпрессором или насосом соответственно. По водоотсасывающим трубкам вода поступает в водосборный отсек и по окончании рейса транспортируется внутри термобурового снаряда на поверхность, где происходит его очистка.

Также стоит упомянуть о *технологии отбора проб газа CO<sub>2</sub>* на углеродный анализ из ледового массива для определения абсолютного возраста, в которой используется гидротепловой расширитель на грузонесущем кабеле с системой пакеров для выплавления каверны максимальных по простиранию и минимальных по мощности размеров [37, 98] за счет циркуляции теплоносителя с постоянным его подогревом.

*Бурение паром и потоками горячего* газа в настоящее время не практикуется, а *бурение излучением* находит все больше применений, в частности в космических технологиях. Особенностью лазерного бурения является принцип передачи и преобразования энергии – луч света подается по оптоволоконному кабелю (проводнику) и преобразуется в лазерное излучение высокой мощности.

*Бурение горячей водой (Hot Water Drill (HWD))* в настоящее время является технологией с наивысшей механической скоростью бурения до 120 м/ч и обеспечивает экологически чистое бурение и последующее вскрытие подледниковых водоемов [102, 108]. Технология была разработана еще в 70-ых годах и успешно испытана несколькими командами исследователей, включая американскую полярную службу и британскую антарктическую службу (БАС). В настоящее время глубина бурения достигла более 2500 метров на Южном полюсе (программа IceCube). Основой способа является подогрев воды на поверхности с последующим нагнетанием ее по гибкой буровой трубе (шлангу) в буровую головку, расположенную на забое, при этом постоянно осуществляется циркуляция в скважине и подогрев воды на поверхности. Применение данного способа требует больших затрат мощности на работу бурового насоса и подогрев воды. С увеличением глубины тепловые потери растут, происходит вынужденное увеличение диаметра скважины на верхнем участке, возрастает отвод тепла в окружающий массив скважины, что приводит к возрастанию затрат

энергии на поддержание постоянной температуры воды при нагнетании ее на забой скважины [18, 135].

Основная идея бурения скважин в ледовом массиве показана на рисунке 1.3. Для осуществления способа необходимо бурение двух близко расположенных (на расстоянии  $\sim 1$  м) скважин, соединенных каверной [104, 105], или бурение начального участка скважины большим диаметром (более 800 мм). Вода подготавливается на поверхности, проходя через теплообменник нагревается до температуры 80-90°C, затем под давлением 10 – 20 МПа нагнетается по шлангу, на конце которого закреплена насадка (сопло), которая создает направленную мощную струю перед собой [118]. Струя расплавляет ледовый забой с высокой скоростью за счет интенсивного конвективного теплообмена. Шланг и насадка медленно спускаются, образуя вертикальное отверстие близкое к цилиндрической форме, а в качестве направляющего механизма используется сила тяжести (вес бурового снаряда). Вода, нагнетаемая по шлангу и образовавшаяся в результате плавления льда, поступает вверх в затрубном пространстве основного ствола и попадает во вспомогательную водоподъемную скважину с подготовленной на ее конце каверной, сообщающейся с основной скважиной. После поступления воды в каверну вспомогательной скважины погружной скважинный насос, установленный ниже гидрогеологического уровня, подает воду из скважины в большие емкости для ее хранения на поверхности, в которых температуру воды поддерживают на несколько градусов выше нуля. Затем воду подогревают и повторно используют для бурения. Использование расплавленного льда в качестве бурового раствора соответствует критериям чистоты проведения буровых работ, что минимизирует вероятность загрязнения подледниковой среды буровым раствором (заливочной жидкостью). Образование каверны на нижнем участке вспомогательной скважины или бурение начального участка большим диаметром также необходимо для создания гидростатического давления, не превышающего давление ледового массива, предотвратив гидроразрыв массива и проникновение воды в подледниковый водоем [131, 134].

В процессе бурения горячая вода находится в постоянной циркуляции и контактирует со стенками скважины, при этом тепловая энергия рассеивается в ледовый массив. Эти затраты энергии на поддержание постоянного диаметра при бурении скважины глубиной 3500 м и температуре льда - 32 °С составляют 700 кВт, а если сравнивать энергетические затраты на такой способ бурения в Восточной Антарктиде при той же глубине скважины и температуре льда не ниже -50°С, то они увеличатся до 1000 кВт [15, 24]. Так как количество энергии ограничено, то в условиях более низких температур для предотвращения замерзания ствола скважины необходимо либо уменьшить скорость бурения, либо уменьшить диаметр скважины [116, 117, 141].

Соединение двух близко расположенных скважин происходит за счет образования каверны на нижнем участке вспомогательной скважины. Для образования каверны используется вращающийся вокруг оси распылитель горячей воды, причем распыление происходит в горизонтальном направлении как в заполненной водой скважине, так и в сухой. Однако, если требуется большой радиус каверны, то распыление проводится выше скважинного насоса и уровня воды, а распылитель находится в необводненном участке скважины. Формирование каверны проходит с достаточно быстрой скоростью. Испытания на шельфе Ронн проводились в сухой скважине с расходом 100 л/мин, на формирование каверны диаметром 4 метра потребовалось всего 20 мин [137].

Отдельно стоит выделить *тепловой способ подготовки нижнего участка скважины с последующим вскрытием подледниковых водоемов*, разработанный специалистами Санкт-Петербургского горного университета [12, 82, 83]. Предложенная технология с подъемом озерной воды в расширенную нижнюю часть скважины включает несколько этапов, которые представлены на рисунке 1.4 [23]. На первом этапе производится бурение скважины колонковым электромеханическим снарядом на грузонесущем кабеле с призабойной обратной циркуляцией заливочной жидкости на расстоянии 1-2 м до контакта с подледниковым озером (рисунок 1.4 а). Второй этап предполагает местное

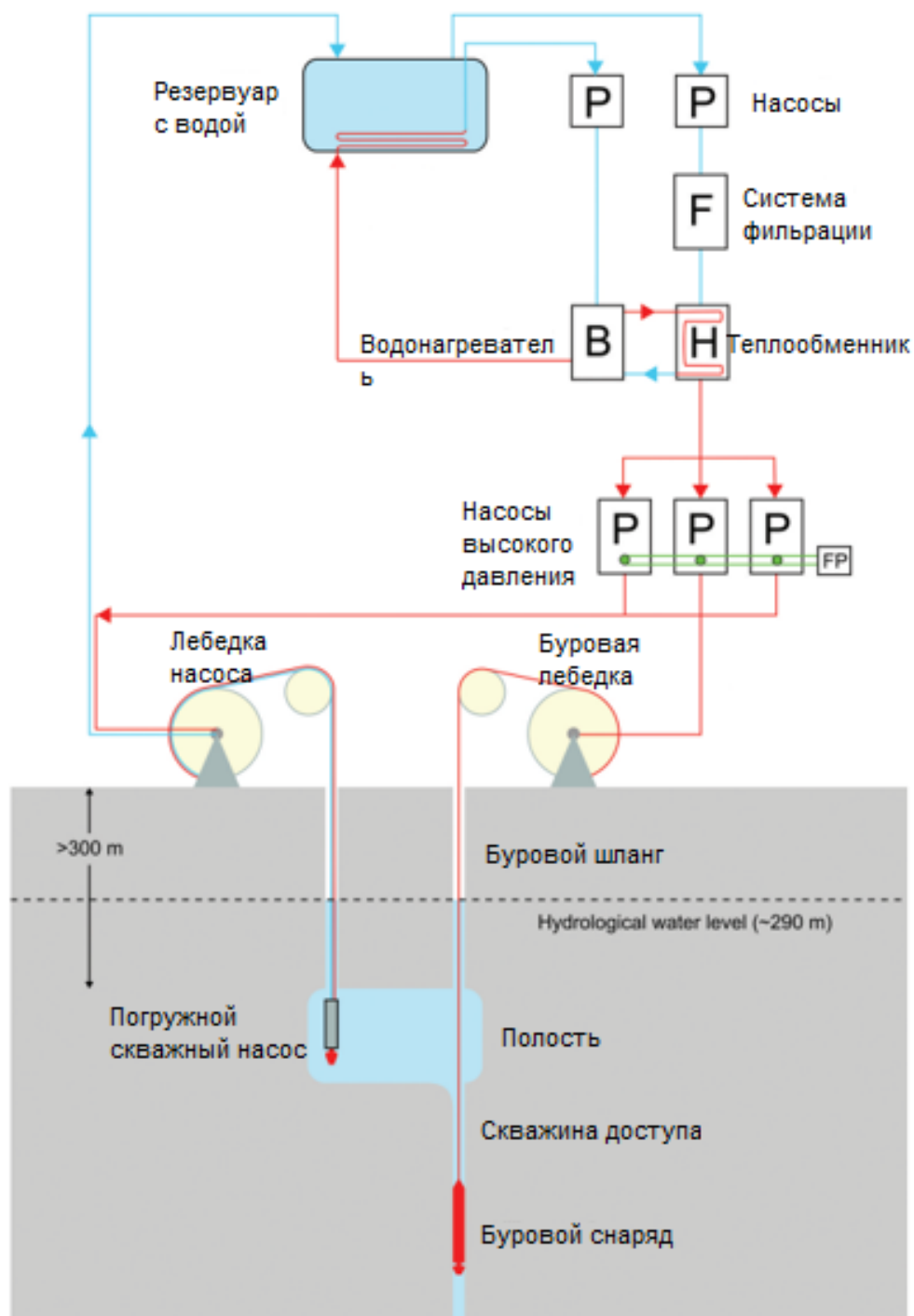


Рисунок 1.3 - Схема бурения горячей водой. Н-нагреватель; Р-насос; F-фильтры; В-водонагреватель [134].

увеличение диаметра скважины механическим расширителем [139] на высоту 8-9 м от забоя (рисунок 1.4 б). Следующие этапы предполагают использование теплового расширителя, посредством которого на третьем этапе будет создана каверна (рисунок 1.4 в), а на четвертом вскрыто подледниковое озеро (рисунок 1.4, г) [83, 84]. Использование в качестве теплоносителя талой воды и создание из нее буферного слоя обеспечивает экологичность проводимых работ [82], что

отвечает международным требованиям [2], а также позволит прогнозировать безопасное время прямых исследований непосредственно в подледниковом водоеме [34, 39]. Разработка эффективного технического средства расширения скважин в ледовом массиве тепловым способом является актуальной задачей в настоящее время [33].

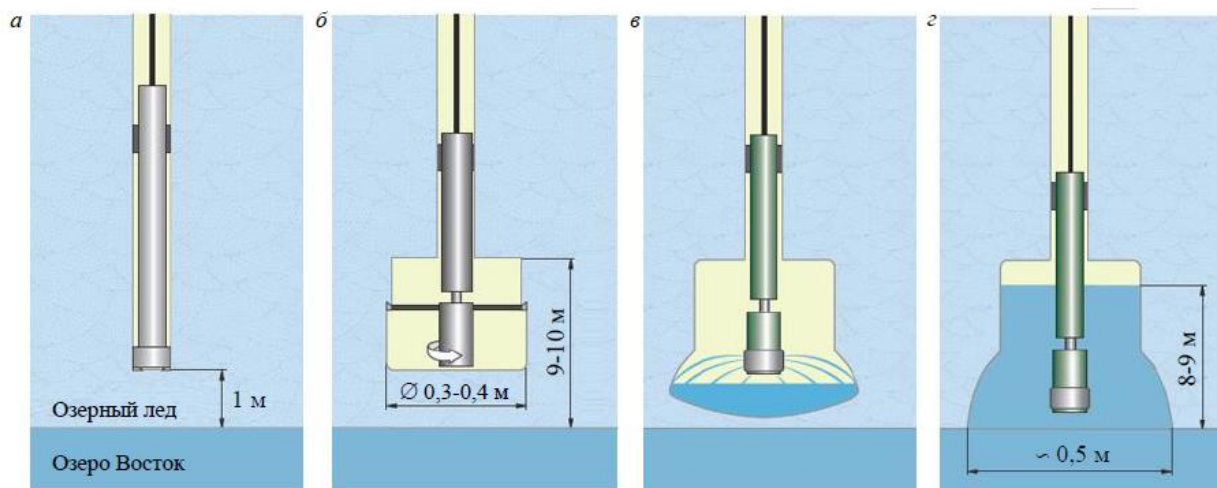


Рисунок 1.4 - Технология вскрытия подледникового озера Восток:

*а*–завершение проходки скважины колонковым электромеханическим снарядом; *б*–местное увеличение диаметра скважины механическим расширителем; *в*–создание каверны тепловым расширителем; *г*–вскрытие подледникового озера [12].

### 1.3 Технические средства для бурения скважин во льду тепловым способом

#### 1.3.1 Колонковые термобуровые снаряды

Колонковые термобуровые снаряды на грузонесущем кабеле представляют собой цилиндрический корпус с электрическим нагревателем на рабочем торце. Спуск термобурового снаряда осуществляется на геофизическом грузонесущем кабеле при помощи лебедки. Нагревательное устройство выполняется в виде кольца. Талая вода удаляется с забоя скважины потоком промывочной жидкости и отделяется от нее в водосборных емкостях или гомогенно смешивается с промывочной жидкостью, заполняющей скважину.

*Термобуровой снаряд ТЭЛГА.* Бурение первой глубокой скважины на станции Восток было начато в 1972 г. термобуровым снарядом ТЭЛГА-14М

(рисунок 1.5, таблица 1.1) после испытаний в районе обс. Мирный в период работы 14 САЭ [4, 79, 122].

Формирование забоя происходит с помощью кольцевой коронки, а талая вода удаляется с забоя за счет призабойной циркуляции воздушного потока. Циркуляционная система снаряда состоит из водоподъемных трубок, водосборного бака, системы обогрева и турбокомпрессора, создающего разрежение в баке для подъема воды. За счет резкого падения скорости потока в водосборном баке происходит гравитационное разделение: вода аккумулируется в нижней части бака, а воздух выбрасывается в затрубное пространство [41, 79].

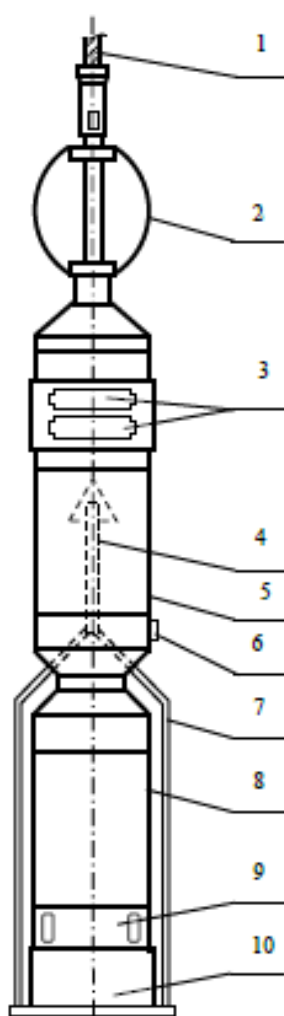


Рисунок 1.5 – Термобуровой снаряд ТЭЛГА-14: 1 – грузонесущий кабель, 2 – центратор, 3 – компрессоры, 4 – центральная водоподъемная труба, 5 – водосборный бак, 6 – сливной клапан, 7 – водоподъемные трубки, 8 – колонковая труба, 9 – кернорвательное устройство, 10 – кольцевая коронка-нагреватель.

Термобуровой колонковый снаряд ТБЗС-152М предназначен для бурения глубоких скважин, заполненных заливочной жидкостью, с чем связан ряд конструктивных отличий отдельных узлов от бурового снаряда ТЭЛГА-14М. На рисунке 1.6 приведена схема ТБЗС-152М [13].

Для обеспечения призабойной циркуляции в буровом снаряде устанавливается насос 3. Талая вода в смеси с заливочной жидкостью (керосин) по водоподъемным трубкам и центральной трубе 5 попадает в водосборный бак. При резком расширении происходит гравитационное разделение: вода опускается вниз и скапливается в водосборном баке, а керосин выбрасывается насосом в затрубное пространство [13, 79].

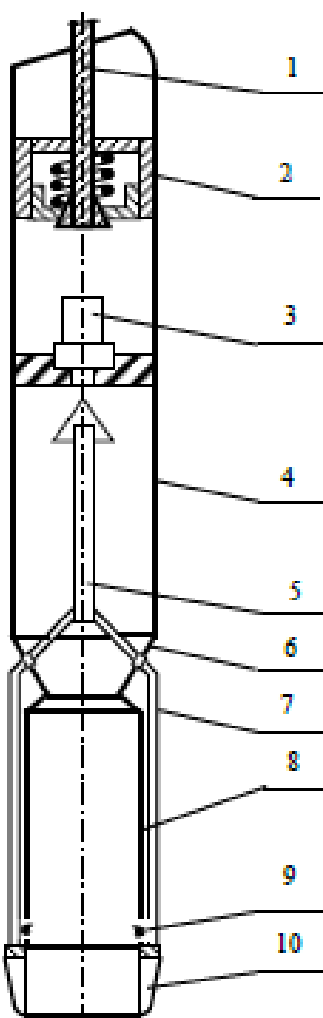


Рисунок 1.6 – Термобуровой снаряд ТБЗС-152М: 1 – грузонесущий кабель, 2 – кабельный замок, 3 – насос, 4 – водосборный бак, 5 – центральная водоподъемная труба, 6 – переходник, 7 – водоподъемные трубки, 8 – колонковая труба, 9 - кернорвательное устройство, 10 – кольцевая коронка-нагреватель



*Высокочастотный термобуровой снаряд ТБС –112ВЧ* (рисунок 1.7) отличается тем, что с целью снижения потерь энергии в грузонесущем кабеле при глубине скважины больше 1000 м электроэнергия к забою подается по схеме «источник питания — повышающий трансформатор — грузонесущий кабель — понижающий трансформатор — электрические потребители снаряда». Для уменьшения габаритных размеров понижающих трансформаторов, устанавливаемых в термобуровом снаряде, используется ток высокой частоты.

Одним из принципиальных отличий снаряда ТБС-112ВЧ от снаряда ТБЗС-152М является работа системы удаления воды из скважины. Талая вода, попадая в бак, замерзает, так как бак не обогревается [41, 79].

На поверхности бак с замерзшей водой отсоединяется от снаряда и заменяется пустым.

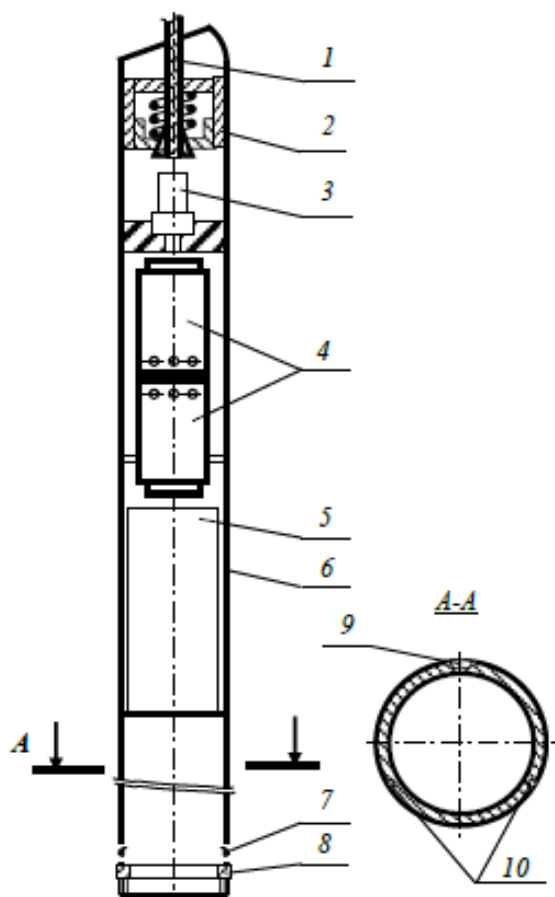


Рисунок 1.7 – Высокочастотный термобуровой снаряд ТБС-112ВЧ:

1 – грузонесущий кабель, 2 – кабельный замок, 3 – насос, 4 – трансформаторы, 5 – съемный водосборный бак, 6 – колонковая труба, 7 – кернорватель, 8 – кольцевая коронка-нагреватель, 9 – коаксиальный токовод, 10 – обогреваемые водоподъемные трубки.

Исследованиями теплового способа бурения ледников и разработками тепловых буровых снарядов за рубежом занимались различные организации. Ведущее место среди них принадлежит лаборатории научных и инженерных исследований холодных районов (CRREL) Армии США, в которой после многолетних экспериментальных работ был создан термобуровой снаряд на грузонесущем кабеле, предназначенный для бурения «сухих» не залитых жидкостью скважин в снежно-фирновых и ледовых отложениях [114].

Интересная конструкция колонкового теплового снаряда основанного на технологии бурения горячей водой разработана в Цзилиньском университете, Китай. Комплекс бурового оборудования прошел стендовые испытания и доказал свою работоспособность. Особенностью китайского теплового бурового снаряда является интеграция в технологию бурения горячей водой, что позволяет отбирать керн без существенных изменений технологических процессов. Для предотвращения прихвата во время подъема и расширения ствола скважин в буровом снаряде предусмотрен механизм, перенаправляющий поток горячей воды вверх [125, 126]. Подобные разработки ранее представляли в научном сообществе и американские исследователи [112].

### **1.3.2 Термоиглы**

Термоиглы являются разновидностью термобуровых снарядов на кабеле или колтюбинге (шланге) для бурения скважин в ледовом массиве сплошным забоем, которые в основном используются для строительства неглубоких скважин, однако разработаны несколько проектов бурения глубоких скважин [66]. Основные характеристики отечественных и зарубежных термоигл представлены в таблице 1.2.

Самый первый снаряд типа «термоигла» был создан итальянским инженером Calciati (рисунок 1.8). Технология предполагала использование горячей воды в качестве промежуточного теплоносителя. Скважинный конический наконечник снаряда был прикреплен к нижнему концу пятиметровой стальной трубы, состоящей из двух концентрических емкостей для циркуляции



Рисунок 1.8 - Тепловое бурение в леднике Миаге, Альпы, 1942 г

воды. Стальная труба была соединена посредством двух шлангов с нагревательным котлом, использующим для нагрева воды тепло, выделяемое в результате сжигания древесины. Циркуляция горячей воды осуществлялась ручным насосом, закрепленным на нагревателе. Нагретая вода, проходя внутри буровой трубы, нагревала наконечник снаряда и поступала обратно к нагревателю [107].

В 1950-1960 годах Калифорнийским институтом технологий была разработана термоигла *Caltech*, впервые примененная для бурения вертикальной скважины диаметром 50 мм на глубину 305 метров летом 1951 года близ центра ледника Malaspina, Аляска. К сожалению, все конструктивные особенности снаряда и технология бурения не были опубликованы. Бурение было приостановлено из-за прекращения функционирования снаряда. Ствол скважины был укреплен обсадными алюминиевыми трубами с внутренним и наружным диаметром трубы, 35 и 40 мм, соответственно [137].

Позже был разработан второй вариант термоиглы *Caltech* диаметром 45 мм, основной целью которого являлось изучение амплитуды и направления скорости движения ледника.

Для бурения глубоких скважин в ледовом массиве группой специалистов из ААНИИ под руководством В.А. Морева была создана технология бурения термоиглой [109] с водным раствором этанола. Испытания «спиртовой термоиглы» проходили весной 1976 г. на 18-м километре северного склона ледника Вавилова (арх. Северная Земля), где была пробурена скважина глубиной 310 м. Из-за загрязнения забоя при отсутствии метода очистки скважин малого диаметра ствол скважины значительно отклонился от вертикали (до 45°), и ее истинная глубина составила всего 180 м. В дальнейшем эта технология не применялась [137].

С целью проникновения в подледниковое озеро Восток из уже существующей скважины 5Г в Горном институте разработан новый вариант

Таблица 1.1 – Основные характеристики колонковых термобуровых снарядов на грузонесущем кабеле для залитых скважин [67, 137]

Снаряд	Тип заливочной жидкости	Период	Тепловая коронка (d/D), мм	Мощность коронки, кВт	Место бурения	T <sub>min</sub> , °C	Механическая скорость бурения, м/ч	Глубина скважины, мм
ТБЗС-152М (ТБЗС-132) (Россия)	DF-A + CFC-11 (HCFC-141b)	1974–1993	114/152 (95/132)	3,5(3,0)	Станция Восток, Антарктида	-57,2	1,8-2,3 (1,8-2,0)	2502.7 (2755.3)
ТБС-112ВЧ (Россия)	DF-A + CFC-11	1981–1986	92/112	4,5	Станция Восток, Антарктида	-57,2	3,7-4,2	2201.7
CRREL fluid-type thermal drill (США)	DF-A + трихлорэтилен	1965	124/162	7,5	Камп Центури, Гренландия	-24,6	1,5	535
LGGE thermal drill (Франция)	DF-A + CFC-11	1984–1989	125/145	5-6	D47, Земля Адели, Антарктида	-25,8	NA	871
ЭТБ-3 (Россия)	Водно-спиртовой раствор	1972–1993	84/108	1-4	Горные ледники Арктики и Антарктики	-28	3,5-5,0	812
ЭТБ-5 (Россия)	Водно-спиртовой раствор	1979–1982	82/100	1,5-3,0	Станция Комсомольская, Антарктида	-54	3,6-3,8	871.5
m-ATED	Водно-спиртовой раствор	1997	105/124	3,3	Мыс Ветряной, Земля Франца Иосифа	-11	2,7	315
ETED	Водно-спиртовой раствор	2002 up to now	102/127	2,25	Горные ледники Антарктики	-24	До 4,3	447.6

Таблица 1.2 – Бурение термоиглами в период 1940-2011 г. [137]

Место бурения	Период	Тип ледника	Мощность, кВт	Диаметр бурения, мм	Скорость проходки, м/ч	Макс. глубина, м
Шельфовый ледник Роса, Антарктида	1940–1941	Полярный	1	57	-	41
Jungfraufirn, Альпы	1948	Теплый	2,5	76	1,5	137
Mer de Glace, Альпы	1948–1949	Теплый	7,8	50	20-25	195
Upper Seward Glacier, Канада	1948–1949	Теплый	1,7	32	11,4 по фирну 2,2 по льду	62,2
Traverse Camp IV – Центральная станция, Гренландия	1949–1950	Полярный	8	80	9	50
Barnes Ice Cap, Canada	1950	Полярный	1,8	76	0,8-0,9	21,4
Ледник Malaspina, Канада	1951	Теплый	-	-	-	305
Bråsvellbreen, Svalbard	1951	Субполярный	-	-	2,4	30
Ледник Saskatchewan, Канада	1952–1953	Теплый	-	45	4,3-4,9	120
Ледник Taku, Аляска	1952–1953	Субполярный	1,5	63,5	1,3	52
Ледник Salmon, Канада	1956	Теплый	1,8	76	1,8	756
Austerdalsbre, Норвегия	1956–1959	Теплый	2,6	81	3,3-3,8	157

Продолжение таблицы 1.2

Ледник McCall, Аляска, США	1957	Теплый	-	-	3,4	91,4
Ледник Blue, США	1957–1964	Теплый	2,5	51	До 9,0	260
Станция Восток, Антарктида	1958–1959	Полярный	2,0	150	0,25-1,6	52
Ледник Athabaska, Канада	1959–1960	Теплый	1,8	50,8	6,5	322
Isfallsglaciären, Швеция	1961	Субполярный	2,5	50	6	NA
Ледник Blue, США	1961–1962	Теплый	0,22	18	5,5-6,0	142
Ледник Black Rapids, Аляска	1967	Субполярный	0,25	20,3	5	62
Ледник Rusty, Канада	1969	Субполярный	2,5	76	1,0-1,5	48,8
Ледник Янкуат, Центральный Кавказ, СССР	1970–1973	Теплый	1-2	40	5-6	111
Ледник Абрамова, Памир, СССР	1971–1972	Теплый	1,5	40	7-11	172
Ледник Blue, Ледник South Cascade, США	1971–1975	Теплый	1,3	50,8	5-6	210
Северный полюс-19, Арктика	1972	Морской лед	1,7	40	7-9	34

Продолжение таблицы 1.2

Mer de Glace, Glaciers of the Sommet de Bellevue	1973	Теплый	0,65	18	12	180
Ледник Обручева, Урал, СССР	1973–1974	Теплый	2,0	40	12-14	137
Ледник Вавилова, Северная земля, СССР	1974–1976	Полярный	-	40	-	310
Barnes Ice Cap, Канада	1974–1978	Полярный	2,0;4,4	40;80	7,6-8,2; 4,9	276
Barnes Ice Cap, Канада	1975	-	2,24	76	4,0	200
Svalbard	1975–1982	Теплый	1-3	40	10-18	368–586
Ледник Hans, Svalbard	1979	Субполярный	0,7	27	2-4	-
Купол С, Антарктида	1981–1982	Полярный	2,25	43	5	180-235
Ледник Давыдова, Тянь Шань	1985	Теплый	-	70	3	109



*Продолжение таблицы 1.2*

Земля Виктории, Антарктида	1992–1994	Полярный	2,5	76	2,2	102
Ледника Гарабаши, Центральный Кавказ, СССР	1987	Теплый	-	40	-	77,7
Шельфовый ледник McMurdo, Антарктида	2011	Субполярный	1,8	40	7,2	190,4-192,9

термоиглы – термобуровой снаряд пробоотборник ТБПО-132, при помощи которого предусматривалась проходка последних 30 метров до выхода в озеро без подъема снаряда на поверхность [57]. Особенности устройства являются бурение двуступенчатым термодолотом и функция клапана, обеспечивая контролируемый подъем озерной воды в скважину [55, 86].

На сегодняшний день разработано и успешно испытано в полевых условиях несколько десятков конструкций термоигл, наиболее полное описание которых собрано в книге П.Г. Талалая [137].

В настоящее время бурение термоиглами является мало востребованным способом бурения и все меньше находит практическое применение.

### **1.3.3 Технические средства выплавления каверн**

Для определения абсолютного возраста льдов необходимо отобрать и исследовать пробы газа  $\text{CO}_2$ , который в составе углекислого газа входит в воздушные включения во льду, образовавшиеся в процессе формирования ледникового массива.

В 1979-1985 годах в Ленинградском горном институте в Отделе Антарктических исследований и научно-исследовательских лабораториях горной теплофизики был разработан комплекс технических средств и методики для отбора углекислого газа из ледовых толщ. В частности, разработан скважинный газовый пробоотборник, с помощью которого производится плавление большого объема льда на исследуемой глубине ледового массива и одновременно происходит отбор углекислого газа [98].

На полигоне ААНИИ ледник Вавилова (Северная Земля) и на станции Восток в сезоне 31-й советской антарктической экспедиции был испытан скважинный газовый пробоотборник (СГПУ) – полуавтономный снаряд на грузонесущем кабеле с электронагревательными отсеками, служащими для подогрева циркулирующего в зоне пробоотбора теплоносителя [37]. Сложное по конструкции устройство интересно, прежде всего, оригинальным проектированием гидрорасширителя, главной целью которого является

направленное выплавление каверны принудительной циркуляцией воды с вращающимся кольцом по типу «сегнера колеса». Устройство позволяет образовывать каверны с минимальными размерами по высоте и максимальными по радиусу, это достигается за счет выполненных в гидрорасширителе тангенциальных каналов, предназначенных для создания при принудительной циркуляции вихревого потока теплоносителя вокруг оси скважины [94, 98]. Схема устройства представлена на рисунке 1.9.

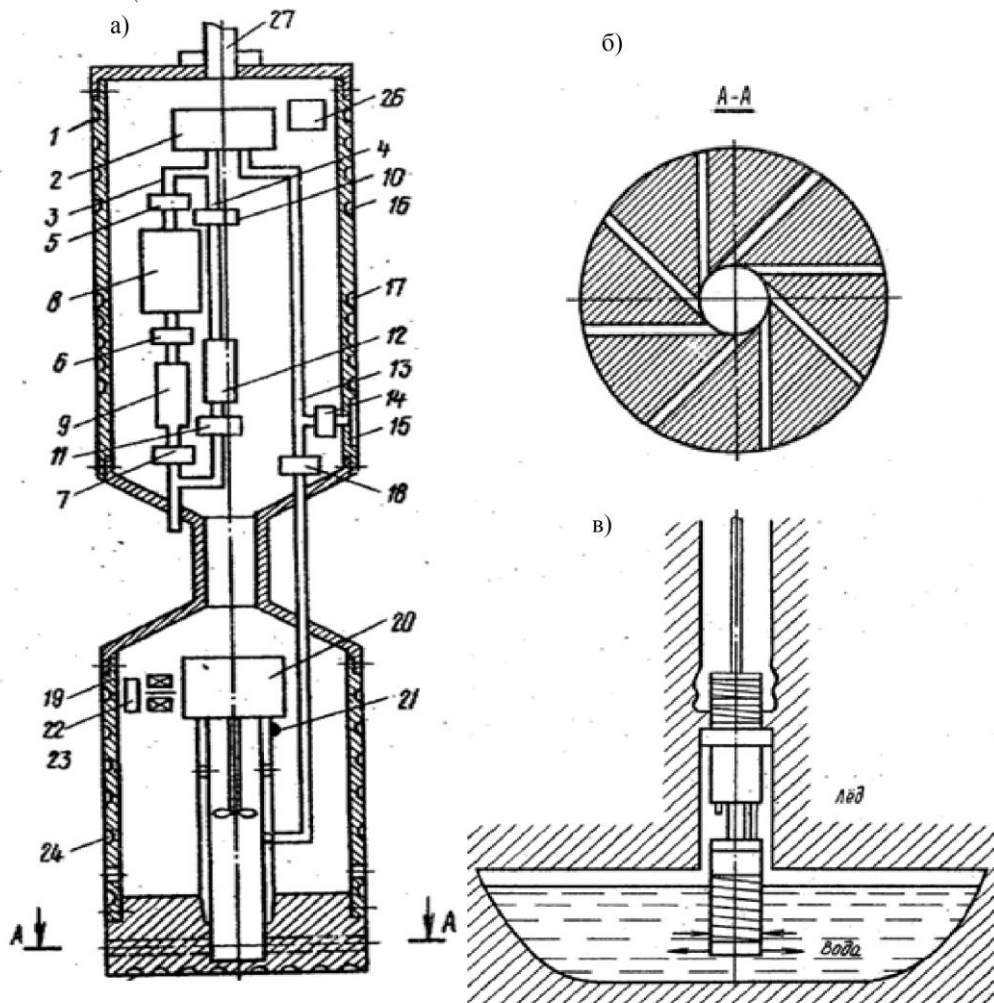


Рисунок 1.9 – а) скважинный газовый пробоотборник, б) разрез А-А гидрорасширитель, в) работа устройства в ледовом массиве. 1-газоотборник, 2-турбокомпрессор, 3 и 4-выпускные клапаны, 5, 6 и 7-электромагнитные клапаны, 8-патрон с адсорбентом, 9-патрон с обезвоживающим веществом, 10 и 11-электромагнитные клапаны, 12-вспомогательный патрон с адсорбентом, 13-выпускной клапан, 14-электромагнитный клапан, 15-пакер, 16 и 17-нашреватели, 18-электромагнитный клапан, 19-гидрорасширитель, 20-насос, 21-датчик воды, 22-емкость с кислотой, 23-соленоид, 24 и 25-нагреватели, 26-электронная схема управления, 27-кабель-трос [98].

### 1.3.4 Техника бурения скважин в ледовом массиве горячей водой

Технологии бурения ледового массива горячей водой отличаются большим разнообразием технических решений. Часто применяются в практике термогидравлические иглы, обладающие высокой скоростью бурения. В такой технологии два шланга-кабеля намотаны на лебедку, а их концы с одной стороны соединяются с буровым наконечником, а с другой с насосной системой. По одному шлангу происходит нагнетание теплоносителя, по-другому его всасывание.

Разработано несколько компоновок низа бурильной колонны (шланга) КНБК [137]. Классическим решением можно считать КНБК проекта AMANDA, как на рисунке 1.10, состоящая из двух секций: балластной - для обеспечения осевой нагрузки и вертикальной стабилизации, и - секция с исследовательским оборудованием. Единственное сопло выпускает струю горячей воды на забой, что обеспечивает бурение.

Заслуживающая рассмотрения конструкция колонкового теплового снаряда (рисунок 1.11) основанного на технологии бурения горячей водой разработана в Цзилиньском университете, Китай. Технология и комплекс оборудования прошли стендовые испытания и доказали свою работоспособность. Их особенностью является интеграция колонкового снаряда в комплекс оборудования для бурения скважин горячей водой, что позволяет отбирать керн с минимальными изменениями технологических процессов. Для предотвращения прихвата во время подъема и расширения ствола скважин в буровом снаряде предусмотрен механизм, перенаправляющий поток горячей воды вверх [125, 126].

Американскими специалистами был разработан конструктивно отличающийся от китайского расширитель скважин в ледовом массиве (рисунок 1.12), состоящий из набора алюминиевых дисков с развитой гидравлической системой и клапаном. Расширитель приводится в действие при заклинивании снаряда в скважине, при этом срабатывает клапан и направляет горячую воду по гидравлическим каналам радиально к стенкам скважины.

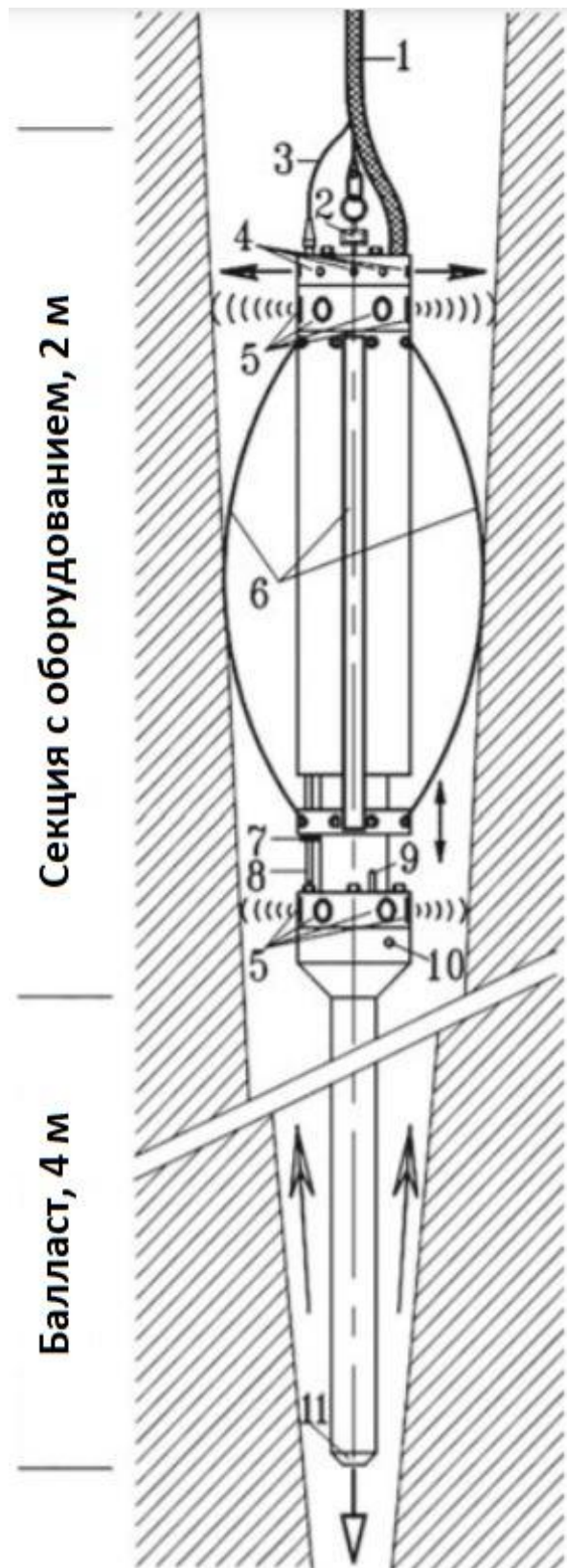


Рисунок 1.10 – Схематичное изображение бурового снаряда AMANDA: 1 – шланг; 2 – кабельный замок; 3 – грузонесущий кабель; 4 – верхнее сопло; 5 – сонар; 6 – распорное устройство; 7 – магнит; 8 – датчик линейного перемещения; 9 – датчик температуры обратного потока воды; 10 – датчик давления; 11 – нижнее сопло

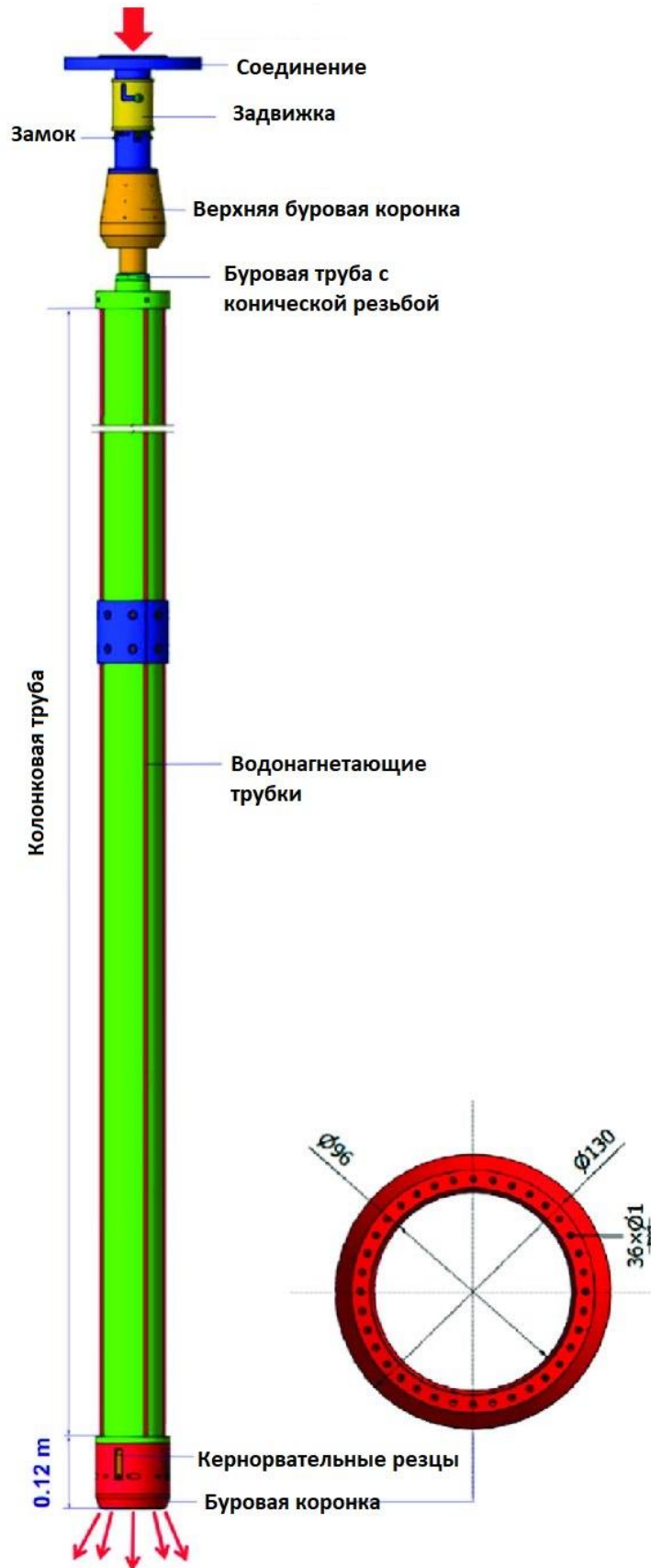


Рисунок 1.11 – Колонковый снаряд для бурения скважин в ледовом массиве горячей водой разработки Цзилиньского университета, Китай [125]



Рисунок 1.12 – Расширитель, включенный в состав КНБК. Иллюстрация внешней поверхности расширителя слева и в поперечном сечении справа. Красными стрелками указаны места, где из расширителя может разбрызгиваться вода, а клапан показан в выключенном положении.

Оригинальное техническое решение (рисунок 1.13) для расширения скважин в шельфовом льду разработал немецкий ученый Эрик Данкер, в основу которой легли методы контактного и конвективного плавления [137]. Бурение шельфового льда необходимо для исследований нижней его части, водной толщи под ним и дна водоема. Комплекс технических средств позволяет бурить скважины достаточно большого диаметра относительно небольшими по диаметру бурильными головками, а в качестве теплоносителя используется горячая вода, подогреваемая на поверхности. Процесс осуществляется путем нагнетания горячей воды в коронку для ее нагрева, и вода контролируемо выходит с боку буровой головки, что обеспечивает комбинированный способ бурения –

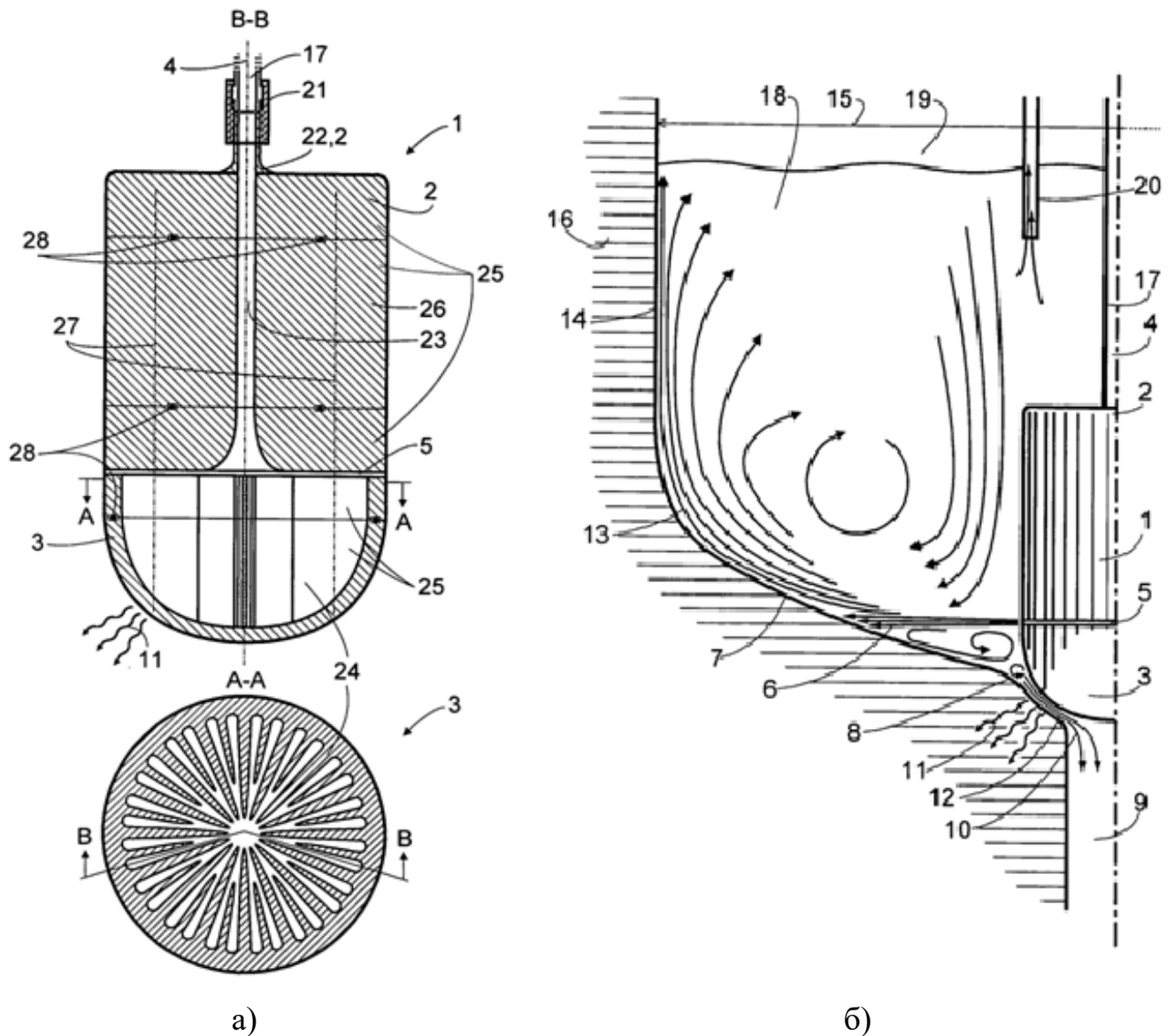


Рисунок 1.13 – а) Схема буровой головки для контактного бурения-плавлением с одновременным расширением скважины горячей водой, б) процесс контактного бурения-плавлением с одновременным конвективным расширением скважины горячей водой

1-буровая головка, 2-осевой входной канал, 3-полукруглые металлические секции, 4-горячая вода, 5-диаметральный щелевой канал, 6-дискообразная струя горячей воды, 7-стенка скважины, 8-забой скважины, 9-пилот-скважина, 10-талая вода, 11-тепловая энергия, 12-тонкая пленка расплавленной воды, 13-струя воды, 14-гладкая поверхность скважины, 15-граница установления постоянного диаметра, 16-ледяной массив, 17-нагнетательный шланг, 18-талая вода, 19-диаметр скважины после расширения, 20-откачивающий шланг, 21-соединитель шланга с буровой головкой, 22-герметизатор, 23-центральный канал, 24-теплопроводные лопасти, 25-радиальное расположение слоев лопаток, 26-центральный радиальный слой, 27-держатель, 28-герметичный уплотнительный элемент.



плавлением с одновременным расширением скважины. Бурение осуществляется контактным плавлением с поверхностью буровой головки, а расширение обеспечивается конвективным теплообменом с помощью теплоносителя. Недостатком рассматриваемого технического решения является то, что для бурения скважин во льду в полярных прибрежных районах необходимо бурение пилотных скважин диаметром от 50 до 100 мм в виде направляющей для основного ствола.

Боковые каналы буровой головки выполнены полусферически, а ее нижний конец закруглен и имеет площадь контактной поверхности достаточную, чтоб перекрыть пилот-скважину. На контакте буровой головки и льда образуется тонкая пленка талой воды и по ней равномерно распределяется тепловая энергия. Плоская струя воды, направленная вверх вдоль стенки ствола скважины, обеспечивает гладкое круглое сечение скважины, исключая образование каких-либо каверн или выступов, при этом диаметр скважины остается постоянным. Следует отметить, что бурение ведется на гибкой буровой трубе (шланг, колтюбинг) с высокой жесткостью.

#### **1.4 Аналитический обзор существующих конструкций скважинных расширителей**

Объектом настоящего исследования являются скважинные расширители и тепловые буровые снаряды, способные обеспечить технологические процессы бурения и/или расширения скважины в ледовом массиве на необходимом горизонте. На рисунке 1.14 представлена классификация скважинных расширителей, применяемых в бурении.

В аналитическом обзоре рассмотрены конструкции и принципы работы расширителей скважин. Данное направление исследования связано с тем, что технология образования локальных полостей подразумевает бурение с одновременным расширением скважины. Для образования локальной полости в ледовом массиве необходимо использовать скважинный расширитель достаточно простой конструкции. В транспортном положении диаметр корпуса расширителя

должен обеспечивать свободный спуск инструмента на заданную глубину скважины. Расширитель должен быть снабжен надежным механизмом перевода из транспортного положения в рабочее и обратно. Кроме того, периодичность процесса расширения предполагает возможность легкой перенастройки рабочих органов расширителя на различный диаметр скважины, а также простоту его монтажа на буровой снаряд.

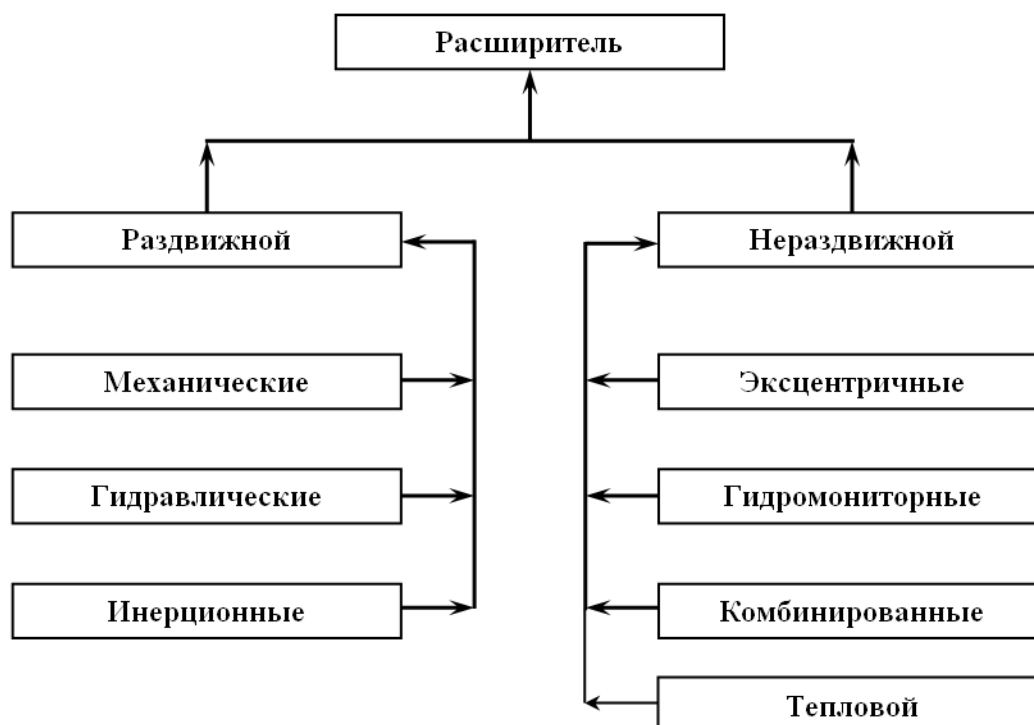


Рисунок 1.14 – Классификация скважинных расширителей

Обзор осуществлялся по информации об изобретениях, раскрытых в охранных документах. Регламент обзора представлен в таблице 1.3.

В соответствии с поставленной задачей наиболее близкими техническими решениями являются:

- Гидромеханические раздвижные расширители, приводимые в рабочее положение давлением, развиваемым в нагнетательной магистрали насоса и корпусе инструмента при промывке;
- Механические раздвижные расширители, основанные на механическом способе выдвижения породоразрушающих органов;

- Инерционные раздвижные расширители, основанные на использовании центробежных сил инерции, действующих на рабочие органы при вращении бурового става.
- Гидравлические расширители, основанные на гидродинамическом способе разрушения горных пород;
- Тепловые расширители, основанные на принципе плавления горных пород;
- Тепловые буровые снаряды для «сухих» и залитых низкотемпературной жидкостью скважин

Таблица 1.3 – Регламент аналитического обзора

Предмет поиска		Источники информации, по которым производился поиск	
Объект исследования	Страна поиска	Наименование	Классификационные рубрики МПК
Расширители	Россия	Электронная база данных ФГУ ФИПС	E21C – Проходка шахтных стволов, выработок или туннелей;
	СНГ	Электронная библиотека e-library	E21B – Бурение грунта или горных пород;
	СССР		7/00 – Особые способы или устройства для бурения;
	США	Электронная библиотека «United States Patent and Trademark Office»	10/26 – Буровые долота для расширения скважин; 23/00, 31/00, 41/00 – Прочее оборудование для бурения; 37/00 – Способы или устройства для очистки буровых скважин 10/00, 11/00, 12/00 – Буровые инструменты; принадлежности.

В практике бурения получили широкое применение раздвижные расширители гидромеханического действия, в которых выдвижение режущих органов в рабочее положение происходит под действием гидравлики, а складывание инструмента в транспортное положение (возврат рабочих органов в корпус) осуществляется механически [97].

Конструкции раздвижных механических расширителей (рисунок 1.15) просты, однако практика эксплуатации данного типа устройств выявила ряд существенных недостатков, а именно низкую надежность перевода рабочих органов из транспортного положения в рабочее и обратно. Кроме того, данный тип расширителя обеспечивает раскрытие рабочих органов только на строго определенный диаметр. Поэтому в условиях расширения скважины для реализации технологии образования полостей в ледовом массиве их применение представляется не целесообразным.

Инерционные раздвижные расширители приводятся в рабочее положение центробежными силами, действующими на породоразрушающие органы при вращении бурового става. Достоинством данного типа устройств, помимо простоты конструкции, является возможность раскрытия режущих органов на требуемый диаметр обрабатываемой скважины, так как угол раскрытия инструмента заданной массы зависит только от частоты вращения бурового става. Закрытие лопастей происходит под действием их собственного веса [138, 139]. Инерционный расширитель по патенту RU №983245 на рисунке 1.16 отличается простотой конструкции.

Интерес представляют гидравлические расширители, которые за счет гидродинамического воздействия разрушают горную породу, но известно, что расширение такими устройства не достигает увеличения диаметра более чем на 50%.

При выборе технологии бурения и/или расширения скважин в ледовом массиве целесообразно использовать физические особенности льда, как горной породы, а именно относительно невысокие затраты энергии на его плавление [79, 128].

По фонду охранных документов СССР и России в процессе обзора было отобрано для дальнейшего анализа более 150 конструкций скважинных механических, гидравлических и тепловых расширителей, а также термобуровых снарядов на грузонесущем кабеле разработок российских и зарубежных специалистов. В Приложении 1 отобраны 88 конструкций устройств, на основе

которых производится дальнейшее создание и проектирование новой конструкции устройства для бурения и одновременного или последовательного расширения скважин в ледовом массиве.

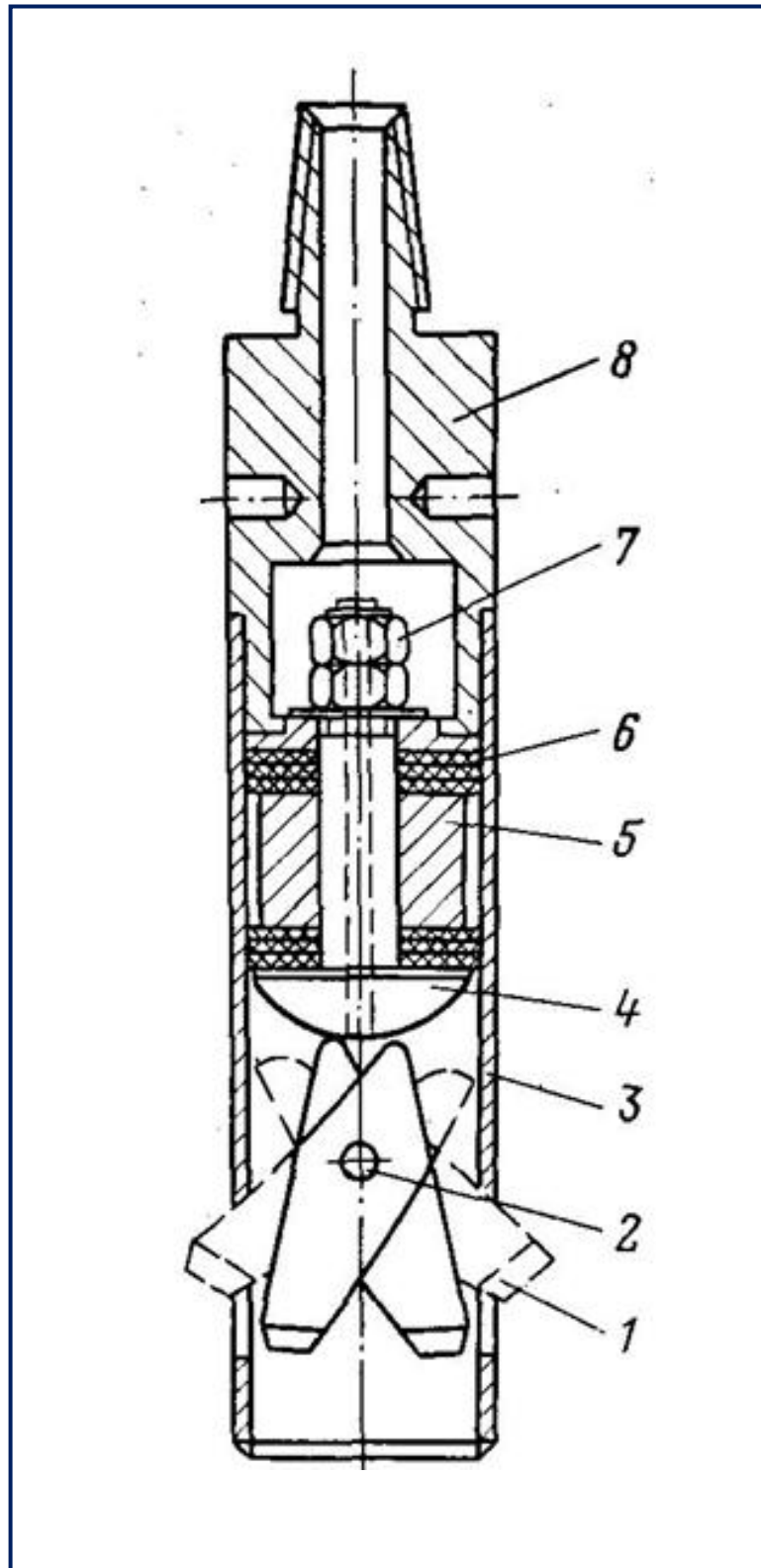


Рисунок 1.15 – Механический расширитель

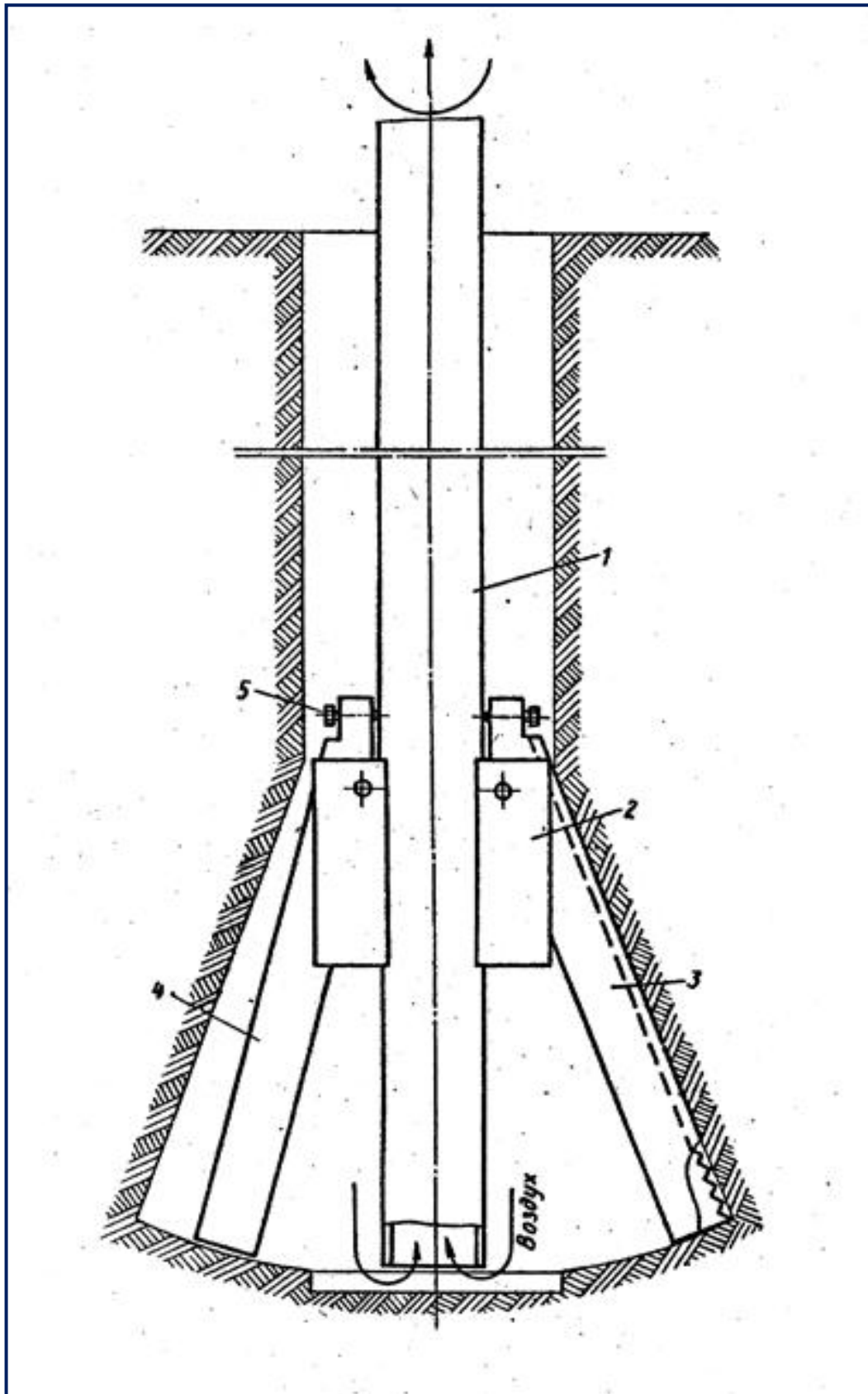


Рисунок 1.16 – Инерционный расширитель

## 1.5 Выводы по главе 1

1. Современные разработки по созданию технологий и технических средств бурения скважин в снежно-фирновых и ледовых отложениях тепловым способом выполнены на высоком уровне и имеют высокую проработанность вопросов по данной теме, однако практически отсутствуют исследования технологий и техники образования локальных полостей в ледовом массиве.

2. Проведенный анализ технологий и технических средств бурения скважин выявил ряд задач, для решения которых необходимо образование локальных полостей, к которым относятся:

А. Разработанный специалистами Санкт-Петербургского горного университета комплекс технологических решений направленный на создание «чистого» входа в подледниковое пространство включает этап образования локальных полостей:

- бурение с одновременным расширением одного метра льда на контакте подледниковое озеро – ледовый массив;
- калибровка ствола расширенного участка;
- создание колоколообразного входа в подледниковое озеро;

Б. Технология бурения скважин в ледовом массиве горячей водой реализуется посредством сообщения основной и вспомогательной скважин или бурения направления большого диаметра (до 800 мм). В первом случае, в качестве канала сообщения служит локальная полость – каверна. Во втором, направление, диаметр которого в три-четыре раза больше диаметра бурения, что необходимо для свободного прохода скважинного оборудования;

В. Локальное увеличение рабочего пространства скважины для реализации технологии бокового отбора проб или бурения дополнительных стволов;

Г. Разбуривание ледового моста;

Д. Локальная рекристаллизация трещиноватого участка для обеспечения целостности и устойчивости стенок скважины;

Е. Выплавление каверны для отбора проб газа и воды из ледового массива на изотопный, геохимический анализы, микробиологический анализ;

Ж. Поддержание в рабочем состоянии верхнего участка скважины при бурении горячей водой;

З. Расширение «сухих» скважин во льду пенетратором большого диаметра;

И. Расширение залитых низкотемпературной жидкостью скважин на необходимом участке.

3. Теоретические и экспериментальные исследования процесса бурения плавлением сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве является актуальной научной задачей, решение которой позволит создать новую технологию образования локальных полостей в ледовом массиве.



**ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В  
ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ СКВАЖИНЫ ПРИ БУРЕНИИ СПЛОШНЫМ  
ЗАБОЕМ С ОДНОВРЕМЕННЫМ РАСШИРЕНИЕМ СКВАЖИН В  
ЛЕДОВОМ МАССИВЕ ТЕПЛОМ СПОСОБОМ**Лед. Теплофизические  
характеристики льда

Лед представляет собой особую горную породу, образующуюся при кристаллизации воды в условиях низких температур [53].

Теоретическому и экспериментальному изучению физико-механических свойств льда в зависимости от условий образования и залегания посвящены работы К.Ф. Войтковского, Н.И. Баркова, В.В. Богородского, С.С. Вялова, В.П. Гаврило, В.П. Епифанова, В.В. Лаврова, В.Я. Липенкова, С.В. Колесникова, В.А. Савельева, Э. Паундера, И.Г. Петрова, Н.Х. Флетчера, П.А. Шумского, И.С. Песчанского, В. Michel, P.V. Hobbs, P. Duvale и других [24, 27, 28, 52, 54, 77, 99].

Низкая температура плавления льда позволяет с высокой эффективностью использовать тепловой метод разрушения горных пород, при котором основная часть тепловой энергии затрачивается на плавление. Термическое разрушение уменьшает прочность льда, изменяет его структуру и текстуру, сокращает горизонтальные размеры и др. [10].

*Плотность льда*, образовавшегося при кристаллизации пресной воды при 0°C и нормальном давлении, составляет в среднем 917 кг/м<sup>3</sup>. Следовательно, плотность пресноводного льда меньше плотности воды. Плотность льда зависит от его структуры, температуры и в большей степени от его пористости. С понижением температуры плотность льда увеличивается, а объем уменьшается. В зависимости от температуры плотность и удельный объем льда можно рассчитать по формулам Вейнберга [23].

*Температура плавления* льда ( $t_{пл}$ ) зависит от давления окружающей среды и описывается уравнением Клапейрона—Клаузиуса. Температура плавления льда при атмосферном давлении равна 0,01°C (в практических расчетах принимают 0°C) [10, 63].

Количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг льда, находящемуся при температуре плавления, для превращения его в воду, называют *удельной теплотой плавления*  $\psi_{пл}$ . Удельная теплота плавления пресноводного льда при нормальных условиях равна удельной теплоте кристаллизации воды  $33,3 \cdot 10^4$  Дж/кг [28].

*Теплопроводность льда (коэффициент теплопроводности)  $\lambda$*  – величина, характеризующая процесс переноса тепловой энергии в неравномерно нагретом льду, приводящий к выравниванию температуры. Теплопроводность является коэффициентом пропорциональности между плотностью теплового потока  $q$  и градиентом температуры  $T$ , входящих в известное уравнение Фурье. *Коэффициент теплопроводности льда  $\lambda$*  принимают в среднем равным 2,24 Вт/(м·°С). Теплопроводность льда численно равна плотности теплового потока при разности температуры 1 градус на единицу расстояния. С повышением температуры  $\lambda$  уменьшается незначительно и линейно [77].

*Удельную теплоемкость льда* вычисляют по формуле Б.П. Вейнберга. Учитывая, что при  $t=0^\circ\text{C}$  плотность льда  $\rho = 917$  кг/м<sup>3</sup>, а удельная теплоемкость его  $c = 2,12$  кДж/(кг·°С), получаем *коэффициент температуропроводности льда* при нормальных условиях  $a = \lambda/(c\rho) = 2,24/(2,12 \cdot 917) = 4,1 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/ч. [10, 25, 63].

## 2.2 Призабойная кольцевая циркуляция

Призабойную кольцевую циркуляцию, создаваемую в процессе бурения скважин во льду с одновременным ее расширением с использованием термогидравлического бурового снаряда-расширителя, можно отнести к закрученному инертному течению [62]. В процессе движения температура жидкости изменяется как во времени, так и в поле скоростей течения. Неизотермический характер тепломассопереноса сопровождается интенсивным теплообменом со стенками ледовой скважины и, вследствие этого, фазовым переходом льда в воду. В теории и практике закрученных потоков течение с фазовым переходом относят к промежуточному виду между гомогенным и гетерогенным. Из-за наличия в структуре льда пузырьков газов, газовых гидратов и твердых включений, например, вулканической пыли, такое течение, отнести к

какому-либо виду однозначно нельзя. Тогда следует считать, что в зависимости от природы образования и физико-механических свойств льда рассматриваемый инертный поток может быть гомогенным, гетерогенным или промежуточным [11, 119, 121].

Из литературных источников известны четыре способа создания закрученных потоков [3, 69]:

1. тангенциальный ввод газа или жидкости в канал;
2. использование неподвижных направляющих элементов (лопаток, шнеков, скрученных лент, внутренней нарезке каналов и т.п.);
3. использование вращающихся механических устройств;
4. непосредственное вращение канала.

В нашем случае комбинированы первый и второй способы. В пенетраторе термогидравлического бурового снаряда-расширителя гидравлические каналы выполнены дугообразной формы, выходящие под углом  $\alpha$  (рисунок 2.1) к касательной его наружной поверхности, и позволяют подвести жидкость тангенциально к стенке скважины, от которой струя отражается и движется вдоль нее. В совокупности термогидравлический пенетратор и стенки скважины являются завихрителем. Закручивание потока происходит в два этапа: направленное истечение струи из гидравлических каналов пенетратора под углом  $\alpha$  к его касательной и последующее тангенциальное движение струи по касательной вдоль стенки скважины. Завихритель преобразует движение потока жидкости, истекающей из гидравлических каналов во вращательное, вокруг оси устройства. Циркуляция рабочей жидкости в ограниченном кольцевом пространстве между буровым снарядом и стенками скважины способствует движению жидкости по винтовой линии вдоль оси скважины на высоту от гидравлических каналов пенетратора до заборных окон бурового снаряда.

Для математического и физического описания процесса призабойной кольцевой циркуляции необходимо определить ее физические характеристики [3, 7, 72]:

- скорость истечения затопленной струи в подвижную однородную среду в кольцевом пространстве между снарядом и стенкой скважины;
- осевое перемещение струи за один оборот;
- радиальное распределение тангенциальной скорости;
- степень завихренности (ротор вектора скорости);
- циркуляция вдоль concentрических траекторий вращательного движения;
- угловую скорость жидкости относительно оси симметрии потока.

Процесс расширения скважины в ледовом массиве реализуется конвективным методом плавления. Для описания этого процесса необходимо изучение механизма истечения струй жидкости из гидравлических каналов в однородную жидкую среду, а также ее гидродинамическое воздействие на массив и способность переноса тепловой энергии в струе. [5, 78, 101].

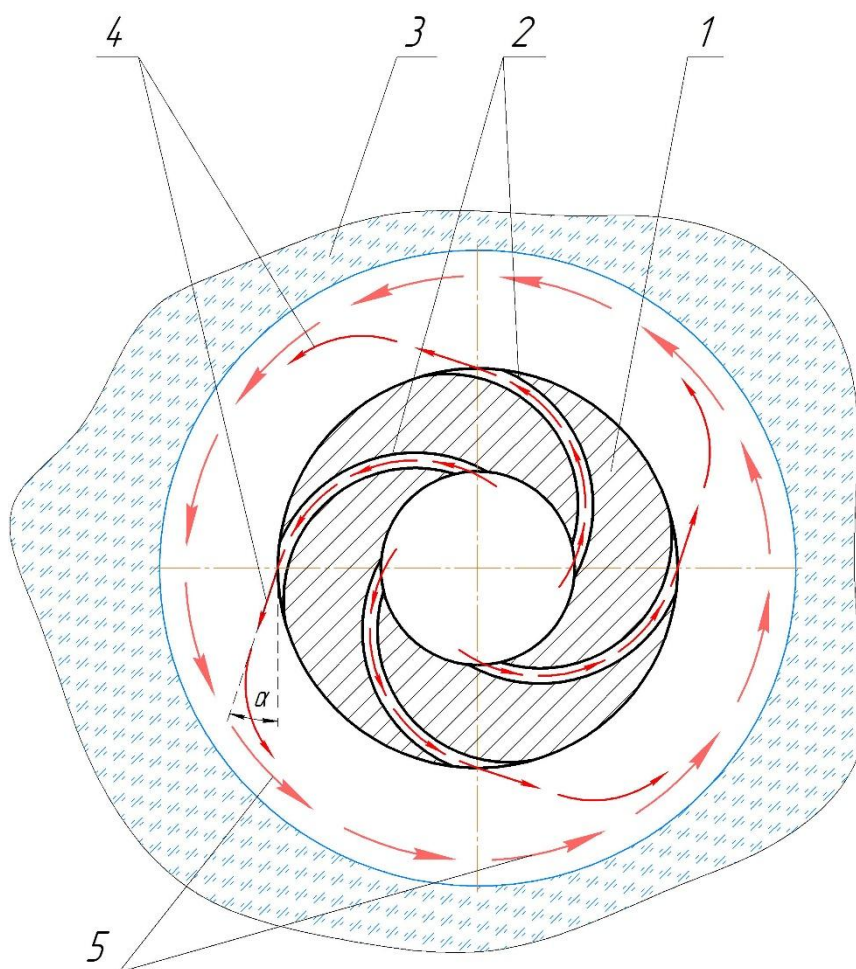


Рисунок 2.1 – Призабойная кольцевая циркуляция. 1 – корпус penetrатора, 2 – гидравлические каналы, 3 – стенки ледовой скважины, 4 – струи теплоносителя, 5 – кольцевое движение жидкости на забое скважины.

Давление по длине струи сохраняется постоянным, равным давлению «внешней» жидкости. Количество движения струи жидкости по ее длине не изменяется [64]. Результаты исследования характеристик затопленных струй, определенных по известным расчетным формулам [38, 101] при различных объемных расходах в зависимости от расстояния между выходными отверстиями гидравлических каналов и стенками скважины представлены на рисунке 2.2.

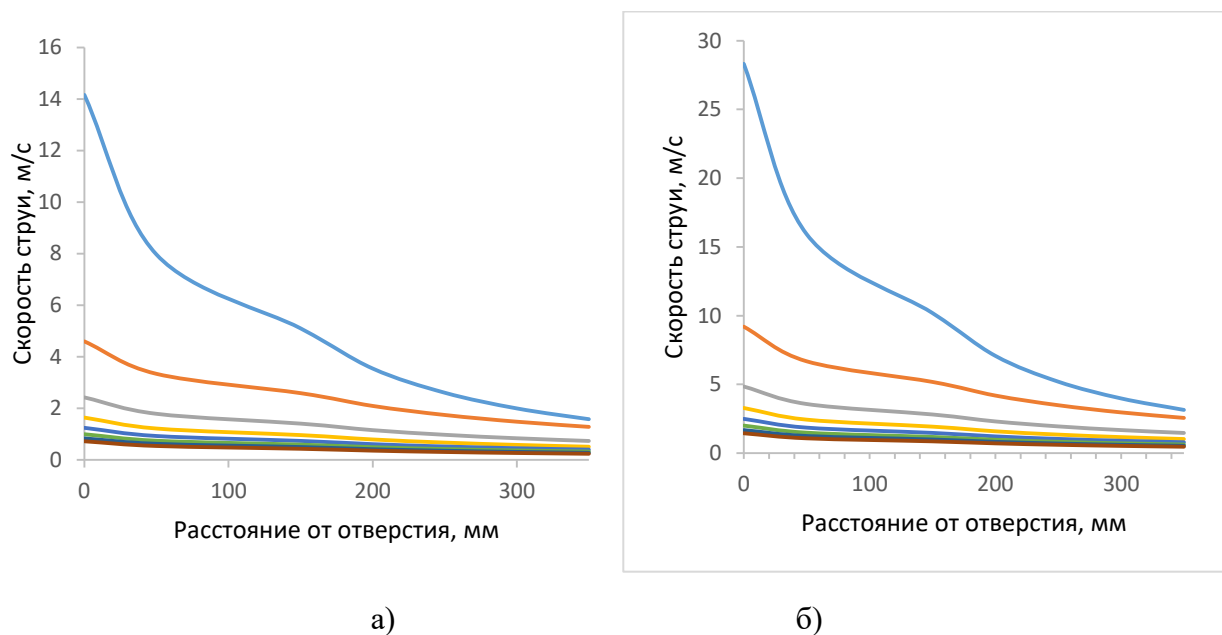


Рисунок 2.2 – Графики изменения скорости, затопленной струи при:

а)  $Q=0,0001 \text{ м}^3/\text{с}$ ; б)  $Q=0,0002 \text{ м}^3/\text{с}$

Из рисунке 2.2 видно, что минимальный радиус выходного отверстия канала позволяет достигать максимальных скоростей струи на выходе из пенетратора. На расстоянии более 100 мм от выходных отверстий каналов скорость струи падает и в меньшей степени зависит от диаметра канала.

### 2.3 Математическое моделирование процесса бурения плавлением с одновременным расширением

С 1967 года в рамках хозяйственного договора Санкт-Петербургский горный институт начал решение задач бурения скважин в ледовом массиве тепловым способом, и с этой целью была создана специальная группа специалистов. В результате выполненных исследований была разработана теория бурения льда методом плавления [40], в которой описаны теплообменные

процессы: колонкового контактного бурения сухих скважин в снежно-фирновом горизонте [44] и ледовом массиве [48], энергоэффективного глубокого колонкового контактного бурения скважин в ледовом массиве залитых низкотемпературной жидкостью [45], образования каверны [37], бурения скважин с промывкой холодоносителем и опережающим замораживанием забоя [43, 49], стерильного отбора проб из ледового керна для микробиологических исследований [44], контактного бурения сплошным забоем ступенчатым долотом [55], колонкового бурения с использованием промежуточного теплоносителя [50, 51], колонкового бурения паровым конденсатором сухих скважин в снежно-фирновом горизонте и ледовом массиве [47] и высокоэффективного контактного бурения скважин сплошным забоем [58, 32]. Зарубежные специалисты тоже занимались разработками математических моделей процесса бурения плавлением скважин во льду [120].

Большой объем выполненных теоретических и экспериментальных исследований является научным заданием для моделирования процесса бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве методом плавления, который заключается в совместном описании кондуктивного и конвекционного теплообмена в призабойной зоне бурения.

Описание процессов теплообмена при бурении плавлением с одновременным расширением отличается большой сложностью, поэтому представляется рациональным рассмотреть отдельные составляющие этого процесса:

- 1) Кондуктивный теплообмен в ледовом массиве;
- 2) Кондуктивный теплообмен между электронагревателями и корпусом пенетратора;
- 3) Конвективный теплообмен между пенетратором и водяной прослойкой (из-за относительно тонкой толщины водяной прослойки данный процесс рассматривают как кондуктивный)
- 4) Конвективный теплообмен при движении теплоносителя в призабойной зоне скважины;

5) Конвективный теплообмен при нагреве теплоносителя в циркуляционной системе, в коллекторе и проточных каналов пенетратора.

Кондуктивный теплообмен в твердых телах определяется его теплофизическими свойствами, градиентом температуры и описывается законом Фурье. Конвективный теплообмен зависит от специфики движения теплоносителя, его теплофизических свойств и омываемого тела и описывается законами термо- и гидродинамики.

Основными параметрами, характеризующими процесс бурения плавлением с одновременным расширением скважин во льду, являются скорость бурения и соответствующая ей интенсивность расширения, а главная задача исследования - установление аналитической зависимости между основными параметрами и влияющими факторами, которые рассматриваются в разделах 2.3.1. и 2.3.2.

Аналитическое описание исследуемого процесса заключается в составлении системы уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, а также уравнений состояния, учитывая граничные условия Стефана [48]. Такой подход требует разработки сложной математической модели, а решение системы уравнений даже численными методами представляет сложную и трудоемкую задачу. С учетом принятых допущений, указанных ниже по тексту, и результатов экспериментальных работ, существенно упрощающих как разработку, так и исследование модели всего процесса, предложена одна из возможных математических моделей бурения плавлением с одновременным расширением ледовой скважины, приведенная к инженерным расчетам.

Контактное (кондуктивное) бурение плавлением осуществляется за счет передачи тепловой энергии от пенетратора бурового снаряда ледовому массиву, а конвективное расширение за счет циркуляции постоянно подогреваемого теплоносителя в призабойной зоне [81]. В качестве источников тепла используются электрические нагревательные элементы, а теплоносителем является расплавленная вода. В процессе бурения регулируются осевая нагрузка, мощность тепловой энергии пенетратора и температура нагрева теплоносителя, а также его скорость движения.

В данной работе принята следующая постановка задачи: на забой пробуренной ледовой скважины устанавливается устройство для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением. Устройство включает в себя пенетратор и установленные в нем нагревательные элементы, а в корпусе пенетратора выполнены дугообразные каналы. При нагреве пенетратор плавит под собой лед, осуществляя процесс контактного (кондуктивного) бурения плавлением сплошным забоем. Происходит углубление скважины с постоянной скоростью и с одновременно включенным насосом для прокачки теплоносителя (таяя вода) в циркуляционной системе. При этом теплоноситель подогревается и подается в коллектор пенетратора, откуда через дугообразные гидравлические каналы попадает в призабойную зону. Созданный при этом вихревой поток, омывает (плавит) поверхность льда и возвращается в циркуляционную систему, после чего процесс повторяется [80, 81].

В качестве внешней формы пенетратора принято тело вращения цепной линии вокруг ее вертикальной оси, корпус пенетратора с расположенным внутри тепловым электронагревателем рассматривается как тело с распределенным тепловым источником. Верхний торец пенетратора в теплообмене не участвует. Процесс бурения плавлением с одновременным расширением считаем установившимся и рассматривается для конечной глубины. Скорость бурения-расширения, тепловая мощность нагревателя и массовый расход насоса являются постоянными ( $v_{бр} = const$ ;  $Na_{бр} = const$ ;  $G = const$ ). Теплофизические свойства льда изотропны и усреднены. Поверхность забоя изотермическая. Рассматривается двумерная тепловая задача, упрощенная по принципу суперпозиции.

Для процесса бурения с одновременным расширением рассмотрено уравнение теплового баланса (2.1):

$$Na_{бр} = Na_{б} + Na_{р} = \quad (2.1)$$

$$= Q_{плб} + Q_{пб} + Q_{вб} + Q_{плр} + Q_{пр} + Q_{вр} + Q_{пк} + Q_{плк} + Q_{вк} + Q_{вб'} + Q_{пот},$$

где  $Na_{бр}$  – суммарная активная электрическая (тепловая) мощность теплового бурового снаряда расширителя ТБСР, Вт,



$Na_{\delta}$  – активная электрическая (тепловая) мощность пенетратора, Вт,

$Na_p$  – активная электрическая (тепловая) мощность циркуляционной системы бурового снаряда, Вт,

$Q_{нлб}$  – тепловой поток, затрачиваемый на плавление льда при бурение, Вт,

$Q_{лб}$  – тепловой поток, затрачиваемый на создание температурного поля впереди забоя при бурении, Вт,

$Q_{вб}$  – тепловой поток, затрачиваемый на нагрев воды в прослойке между торцевой поверхностью пенетратора и ледовым забоем, Вт,

$Q_{нлр}$  – тепловой поток, затрачиваемый на плавление льда при расширении, Вт,

$Q_{лр}$  – тепловой поток, затрачиваемый на создание температурного поля впереди забоя при расширении, Вт,

$Q_{вр}$  – тепловой поток, затрачиваемый на нагрев воды на забое расширения, Вт,

$Q_{нлк}$  – тепловой поток, затрачиваемый на плавление боковых стенок, Вт,

$Q_{лк}$  – тепловой поток, затрачиваемый на создание температурного поля при плавлении боковых стенок, Вт,

$Q_{вк}$  – тепловой поток, затрачиваемый на нагрев воды на участке плавления боковых стенок, Вт,

$Q'_{вб}$  – тепловой поток, затрачиваемый на нагрев воды на участке расширения, образовавшейся при бурении, Вт,

$Q_{пот}$  – потери тепла на границе «талая вода-заливочная жидкость», Вт.

На рисунке 2.2 представлена схема призабойной зоны с основными тепловыми потоками для дальнейшего моделирования процесса.

Задачу можно разбить на две отдельные части: бурение и расширение. Решаем задачи по отдельности с общим параметром: скорость бурения-расширения  $v_{\delta p}$ . Поверхность ледового массива считать изотермической в течение всего процесса плавления.

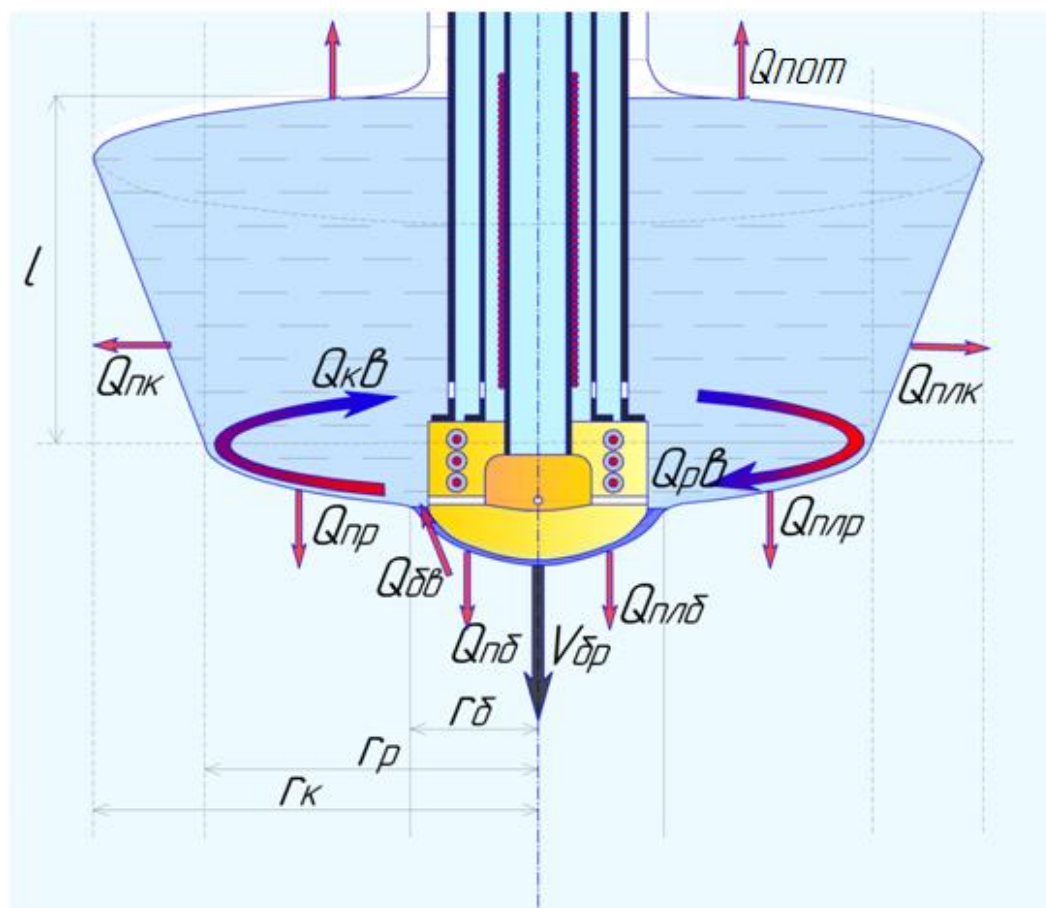


Рисунок 2.2 – Распределение тепловых потоков при бурении плавлением с одновременным расширением ледовой скважины.  $r_{\delta}$ ,  $r_p$ ,  $r_k$  – радиус бурения, расширения, расширения за счет естественной конвекции, м;  $l$  – проходка, м.

### 2.3.1 Описание процесса бурения льда сплошным забоем тепловым способом

Математическое описание процесса бурения плавлением скважин сплошным забоем подробно изложено в работах В.С. Литвиненко и Б.Б. Кудряшова [48, 58]. Аналогичный алгоритм решений принят и в данной работе, но отличием существующей модели от разрабатываемой является отсутствие тепловых потоков на прогрев и оплавление боковых стенок скважины.

Основными факторами теплового контактного способа бурения скважин в ледовом массиве, влияющими на механическую скорость бурения, являются тепловая мощность, подводимая к забою, осевая нагрузка на забой, геометрическая форма и теплофизические свойства пенетратора, характер удаления продуктов бурения, а также физико-механические и структурно-реологические свойства льда.

Процесс бурения осуществляется пенетратором, формой которого принято тело вращения цепной линии вокруг ее вертикальной оси. Рассматривается установившийся процесс бурения, фронт плавления продвигается в безграничной среде с постоянной скоростью  $v_{\text{бп}}$ . Ось  $Z$  совпадает с осью скважины и направлена к забою, начало координат совмещено с верхним торцом пенетратора. Нижний торец пенетратора имеет параболическую форму. Рабочий торец пенетратора взаимодействует с ледовым забоем через непрерывно образующуюся в процессе бурения водяную прослойку толщиной  $\delta$ . В процессе бурения активная электрическая мощность  $Na_{\text{б}}$  преобразуется в тепловую мощность  $Q_{\text{б}}$ , которая расходуется с поверхности пенетратора на плавление льда  $Q_{\text{нлб}}$ , создание температурного поля впереди движущегося забоя  $Q_{\text{нб}}$  и прогрев воды в прослойке между нижней торцевой поверхностью пенетратора и ледовым забоем  $Q_{\text{вб}}$ .

Уравнение теплового баланса для процесса бурения в призабойной зоне (2.2) имеет вид:

$$Na_{\text{б}} = Q_{\text{б}} = Q_{\text{нб}} + Q_{\text{нлб}} + Q_{\text{вб}} \quad (2.2)$$

Тепловой поток, затраченный на плавление льда  $Q_{\text{нлб}}$  (2.3):

$$Q_{\text{нлб}} = \pi \cdot (r_{\text{б}} + 2\delta)^2 \cdot \psi_{\text{л}} \cdot \rho_{\text{л}} \cdot v_{\text{бп}}, \quad (2.3)$$

где  $\psi_{\text{л}}$  – скрытая теплота плавления, Дж/кг,

$\rho_{\text{л}}$  – плотность льда, кг/м<sup>3</sup>.

Температурное поле  $t$ , °C впереди забоя скважины в условиях установившегося режима бурения плавления определяется из выражения (2.4) [45, 98]:

$$t = t_0 + \sigma \cdot H + \frac{\frac{q_n}{\pi \cdot (r_{\text{б}} + 2\delta)^2} \cdot \alpha_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}} \cdot v_{\text{бп}}} \cdot e^{-\frac{v_{\text{бп}}}{\alpha_{\text{л}}} \cdot z}, \quad (2.4)$$

где  $t_0$  – условно постоянная температура ледника, °C,

$\sigma$  – геотермический градиент, °C/м,

$H$  – глубина скважины, м,

$z$  – текущая координата забоя,

$\alpha_{\text{л}}$  – коэффициент температуропроводности льда, Вт/(м·°C).

Полагая, что  $z = 0$ ,  $t = t_{a2p}$ , из выражения (2.4) получим аналитическую зависимость для количества тепла, затраченного на создание температурного поля впереди движущегося забоя, которая определяется из выражения 2.5 [98]:

$$Q_{n\bar{o}} = \pi \cdot (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 (t_{a2p} - t_0 + \sigma \cdot H) \cdot \frac{\lambda_l}{\alpha_l} \cdot v_{\bar{o}p} \quad (2.5)$$

Подставив значение  $\alpha_l = \frac{\lambda_l}{c_l \cdot \rho_l}$  в (2.5) получим выражение (2.6):

$$Q_{n\bar{o}} = \pi \cdot (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 (t_{a2p} - t_0 + \sigma \cdot H) \cdot c_l \cdot \rho_l \cdot v_{\bar{o}p}, \quad (2.6)$$

где  $c_l$  – удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·°C).

Тепловая мощность через водяную пленку передается от пенетратора в ледовый массив. Течение воды в пленке имеет ламинарный характер движения. Учитывая малую толщину водяной пленки  $\delta$ , характер изменения температуры в ней можно принять прямолинейным, тогда температура в пленке  $t'$  определяется из выражения (2.7) как среднее значение температур на поверхности пенетратора  $t_k$  и агрегатного перехода льда  $t_{a2p}$ :

$$t' = \frac{t_k + t_{a2p}}{2} \quad (2.7)$$

Тепловой поток, затраченный на нагрев воды в прослойке имеет вид (2.8):

$$Q_{e\bar{o}} = \pi \cdot (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 \cdot c_e \cdot \rho_l \cdot \frac{t_k + t_{a2p}}{2} \cdot v_{\bar{o}p}, \quad (2.8)$$

где  $c_e$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C),

$t_k$  – температура на поверхности пенетратора, °C.

Полагая, что  $t_{a2p} = 0^\circ\text{C}$ , тогда  $t' = \frac{t_k}{2}$ , а (2.8) примет вид (2.9):

$$Q_{e\bar{o}} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 \cdot c_e \cdot \rho_l \cdot t_k \cdot v_{\bar{o}p} \quad (2.9)$$

Раскрывая тепловые потоки  $Q_{n\bar{l}\bar{o}}$ ,  $Q_{n\bar{o}}$  и  $Q_{e\bar{o}}$  в (2.2) и решая относительно  $t_k$ , получим новое выражение (2.10):

$$t_k = t_{a2p} + \frac{2 \cdot (N_{a\bar{o}} - Q_{n\bar{l}\bar{o}} - Q_{n\bar{o}})}{\pi \cdot (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 \cdot c_e \cdot \rho_e \cdot v_{\bar{o}p}} \quad (2.10)$$

Для теплового потока от рабочей поверхности реального пенетратора  $F_{\delta}$  в окружающий массив через слой расплава толщиной  $\delta$  справедлив также система уравнений (2.11):

$$\begin{cases} Q_{\text{пен}} = F_{\delta} \cdot \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta} (t_{\text{к}} - t_{\text{азр}}) \\ Q_{\text{пен}} = Q_{\text{нл}\delta} + Q_{\text{н}\delta} \end{cases}, \quad (2.11)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности воды в прослойке между пенетратором и ледовым забоем, Вт/(м·°С),

$F_{\delta}$  – площадь рабочей поверхности реального пенетратора, м<sup>2</sup>.

Решая систему уравнений (2.11) относительно температуры поверхности пенетратора  $t_{\text{к}}$  имеем выражение (2.12):

$$t_{\text{к}} = t_{\text{азр}} + \frac{\delta \cdot (Q_{\text{нл}\delta} + Q_{\text{н}\delta})}{\lambda_{\text{в}} \cdot F} \quad (2.12)$$

Определение средней толщины прослойки  $\delta$ , ее гидравлической и тепловой составляющей описывается теорией смазки и уравнениями теплопроводности. Выражение для определения средней толщины водяной прослойки было получено В.С. Литвиненко [58] и рассчитывается по формуле (2.13):

$$\delta = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{\lambda \cdot \rho_{\text{л}} \cdot v_{\text{бр}}^2 \cdot b \cdot \left[ (r_{\delta} + 2 \cdot b^2) \cdot \text{sh} \frac{r_{\delta}}{b} - 2b \cdot r_{\delta} \cdot \text{ch} \frac{r_{\delta}}{b} \right]}{2\rho_{\text{в}} \left[ 2p - g\rho_{\text{в}} b \left( \text{ch} \frac{r_{\delta}}{b} - 1 \right) \right]}}, \quad (2.13)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлических сопротивлений при ламинарном режиме течения воды в прослойке [78] определяется из выражения (2.14):

$$\lambda = 384 \frac{\nu}{d_{\delta} \cdot v_{\text{бр}}}, \quad (2.14)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Имея два уравнения (2.10) и (2.12) с двумя неизвестными  $v_{\text{бр}}$  и  $t_{\text{к}}$ , приравниваем, раскрываем тепловые потоки  $Q_{\text{нл}\delta}$ ,  $Q_{\text{н}\delta}$  и, решаем относительно  $v_{\text{бр}}$ , получаем аналитическое выражение (2.15) для скорости бурения реального пенетратора:

$$v_{\delta p} = \frac{2 \cdot F_{\delta} \cdot \lambda_{\delta}}{\pi \cdot (r_{\delta} + 2\delta)^2 \cdot c_{\delta} \cdot \rho_{\delta} \cdot \delta} \cdot \left[ \frac{Na_{\delta}}{\pi \cdot (r_{\delta} + 2\delta)^2 \cdot (\psi + (t_{aep} - t_0 - \sigma \cdot H) \cdot c_{\delta}) \cdot \rho_{\delta} \cdot v_{\delta p}} - 1 \right] \quad (2.15)$$

Результаты расчетов затрат тепловой мощности на процесс бурения представлены на рисунке 2.3.

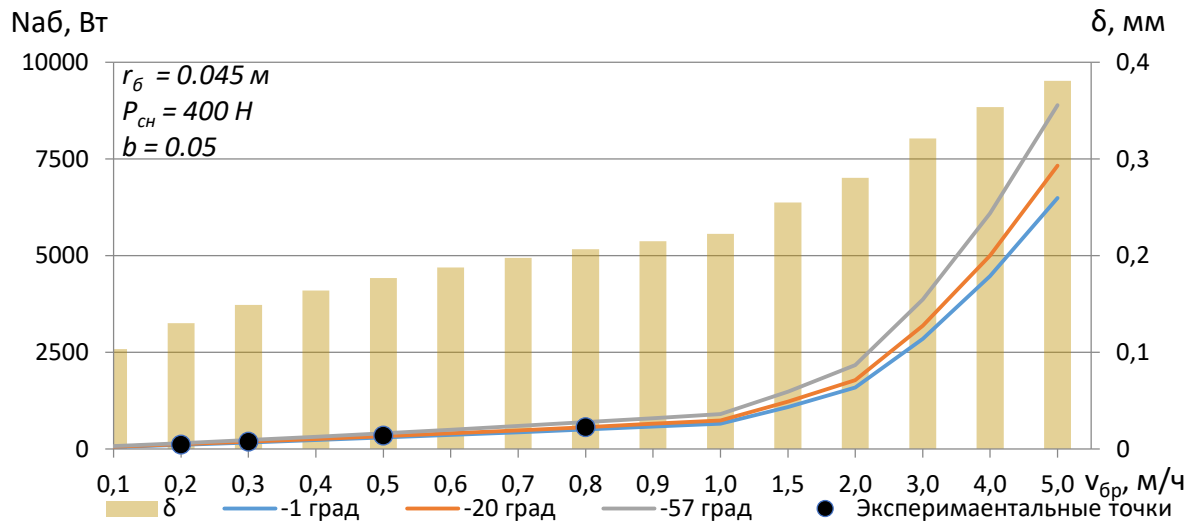


Рисунок 2.3 – Затраты тепловой мощности на процесс бурения и толщина прослойки воды между пенетратором и забоем

### 2.3.2 Описание процесса расширения льда циркулирующим теплоносителем с постоянным его подогревом

Расширение скважины представляет собой увеличение диаметра скважины на заданную величину. Продвижение фронта расширения по оси  $Z$  должно соответствовать скорости бурения-расширения  $v_{\delta p}$ , которая аналитически была получена в разделе 2.3.1. для процесса бурения. Начальная форма участка расширения представляет собой разрезанный пополам по длинной оси сплюснутый эллипсоид вращения, так как  $x = y = r_p$ ,  $r_p > z_p$ ,  $z_p = z_0$  [98].

При выходе из гидравлических каналов теплоноситель омывает поверхность льда. Тепловая энергия от теплоносителя передается в ледовый массив. На первом этапе лед нагревается до температуры агрегатного перехода, а дальнейшая передача тепловой энергии от теплоносителя ко льду приводит к его плавлению, при этом теплосодержание теплоносителя уменьшается. В процессе

циркуляции потока теплоносителя в снаряде расширителе он подогревается и возвращается в гидравлические каналы пенетратора снаряда-расширителя.

При тепловом конвективном способе расширения влияющими факторами являются: тепловая мощность нагревательных элементов, производительность насоса, реологические и плотностные свойства теплоносителя, ориентация и геометрические характеристики гидравлических каналов, теплофизические свойства льда [68, 98]. Примем допущение, что по всей площади поверхности участка расширения тепловая энергия распределяется равномерно.

В рамках принятых допущений и упрощений для теплового баланса процесса расширения справедливо уравнение (2.16):

$$Na_p = Q_{плр} + Q_{пр} + Q_{вр} + Q_{пк} + Q_{плк} + Q_{вк} + Q_{вб'} + Q_{пот}, \quad (2.16)$$

где  $Q_{плр}$  – тепловой поток, затрачиваемый на плавление льда при расширении, Вт (2.17):

$$Q_{плр} = \pi \cdot (r_p^2 - (r_{\sigma} + 2\delta)^2) \cdot \psi_l \cdot \rho_l \cdot v_{\sigma p}, \quad (2.17)$$

$Q_{пр}$  – тепловой поток, затрачиваемый на создание температурного поля впереди забоя при расширении, Вт (2.18):

$$Q_{пр} = \pi \cdot (r_p^2 - (r_{\sigma} + 2\delta)^2) \cdot |t_l| \cdot c_l \cdot \rho_l \cdot v_{\sigma p}, \quad (2.18)$$

$Q_{вр}$  – тепловой поток, затрачиваемый на нагрев воды на забое расширения, Вт (2.19):

$$Q_{вр} = \pi \cdot (r_p^2 - (r_{\sigma} + 2\delta)^2) \cdot c_w \cdot \rho_w \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \cdot v_{\sigma p}, \quad (2.19)$$

$Q_{плк}$  – тепловой поток, затрачиваемый на плавление боковых стенок, Вт (2.20):

$$Q_{плк} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_k^2 - r_p^2) \cdot \psi_l \cdot \rho_l \cdot v_{\sigma p}, \quad (2.20)$$

$Q_{пк}$  – тепловой поток, затрачиваемый на создание температурного поля при плавлении боковых стенок, Вт (2.21):

$$Q_{пк} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_k^2 - r_p^2) \cdot |t_l| \cdot c_l \cdot \rho_l \cdot v_{\sigma p}, \quad (2.21)$$

$Q_{вк}$  – тепловой поток, затрачиваемый на нагрев воды на участке плавления боковых стенок, Вт (2.22):

$$Q_{\text{вк}} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{\text{к}}^2 - r_{\text{р}}^2) \cdot c_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{л}} \cdot t_2 \cdot v_{\text{бр}}, \quad (2.22)$$

$Q'_{\text{вб}}$  – тепловой поток, затрачиваемый на нагрев воды на участке расширения, образовавшейся при бурении, Вт (2.23):

$$Q'_{\text{вб}} = \pi \cdot (r_{\text{б}} + 2\delta)^2 \cdot c_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{л}} \cdot \left| t_2 - \frac{t_{\text{к}}}{2} \right| \cdot v_{\text{бр}}, \quad (2.23)$$

где  $t_1$  – температура воды на выходе из циркуляционной системы, °С,

$t_2$  – температура воды на входе в циркуляционную систему, °С,

$Q_{\text{ном}}$  – потери тепла на границе «талая вода-заливочная жидкость», Вт (2.24):

$$Q_{\text{ном}} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{\text{к}}^2 - r_{\text{б}}^2) \cdot \alpha_{\text{в}} \cdot (t_2 - \frac{t_{\text{л}}}{2}). \quad (2.24)$$

Введем безразмерный коэффициент расширения  $K_p$ , который характеризует отношение радиуса расширения  $r_p$  к радиусу бурения  $r_{\text{б}}$  и рассчитывается из выражения (2.25):

$$K_p = \frac{r_p}{r_{\text{б}}}. \quad (2.25)$$

Безразмерный коэффициент расширения  $K_p$  определяется требованием к технологическим операциям и, очевидно,  $K_p \geq 1$ .

В процессе бурения – расширения тепловая энергия будет расходоваться не только на процесс расширения на забое, а также на прогрев и оплавление боковых стенок, перегрев талой воды. Без откачки с забоя объем талой воды и площадь ее контакта с ледовым массивом постоянно увеличиваются, и, соответственно, расход тепловой энергии на подогрев воды также увеличивается, что приводит к экспоненциальному возрастанию тепловых потерь с увеличением проходки. При бурении – расширении происходит конвективный теплообмен, теплая талая вода поднимается в скважине к границе раздела с заливочной жидкостью, при этом стенки скважины постоянно оплавляются. Такое взаимодействие движущейся теплой воды и стенок скважины приводит к увеличению диаметра скважины, а продольное сечение расширенного участка приобретает трапецеидальную форму с большим верхним основанием, что подтверждается результатами экспериментальных работ. Потери тепловой энергии на прогрев и оплавление



боковых стенок, а также перегрев талой воды, можно учесть, введя безразмерный опытный коэффициент увеличения радиуса расширения  $K_\kappa$ , который характеризует отношение радиуса расширения при оплавлении стенок на верхней границе участка расширения  $r_\kappa$  к радиусу расширения  $r_p$  и рассчитывается из выражения (2.26.1):

$$K_\kappa = f(r_\delta, r_p, r_\kappa, l, \tau, \rho_l, \rho_\delta, c_l, c_\delta, t_l, t_{\text{апр}}, t_2, \Psi_l),$$

$$K_\kappa = \frac{r_\kappa}{r_p}, \quad (2.26.1)$$

или относительно времени операции (2.26.2):

$$K'_\kappa = \frac{v_{\delta p} \left( \frac{r_\kappa}{r_p} \right)}{l} = \frac{v_{\delta p} \left( \frac{r_\kappa}{K_p \cdot r_\delta} \right)}{l}. \quad (2.26.2)$$

Безразмерный опытный коэффициент увеличения радиуса расширения  $K_\kappa \geq 0$ . Определив опытным путем  $K_\kappa$  можно найти радиус  $r_\kappa$  оплавления боковых стенок относительно проходки  $l$  (2.27.1):

$$r_\kappa = r_p \cdot K_\kappa = K_p \cdot r_\delta \cdot K_\kappa, \quad (2.27.1)$$

или относительно времени операции (2.27.2):

$$r'_\kappa = r_p \cdot \left( \frac{l}{v_{\delta p}} \cdot K_\kappa \right) = K_p \cdot r_\delta \cdot \left( \frac{l}{v_{\delta p}} \cdot K_\kappa \right). \quad (2.27.2)$$

При определении тепловых потоков  $Q_{\text{нлк}}, Q_{\text{лк}}, Q_{\text{вк}}$  принимается среднее значение радиуса оплавления боковых стенок  $\frac{r_\kappa + r_p}{2}$ , так как вычисление  $r_\kappa$  проводится для максимального радиуса, а при  $l = 0 \text{ м} \Rightarrow K_\kappa = 0$  и  $r_\kappa = r_p$ .

Суммарное количество теплоты, затраченное в единицу времени при установившемся процессе расширения, также можно выразить через изменение энтальпии циркулирующей жидкости, постоянный подогрев которой осуществляется в циркуляционной системе бурового снаряда [68] и определить из выражения (2.28):

$$Na_p = Q_{\text{ис}} = G \cdot c_\delta \cdot (t_1 - t_2), \quad (2.28)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя, кг/с.

Приравнявая (2.16) и (2.28) и раскрывая в них входящие тепловые потоки  $Q_{нлр}$ ,  $Q_{нр}$ ,  $Q_{вр}$ ,  $Q_{нлк}$ ,  $Q_{нк}$ ,  $Q_{вк}$ ,  $Q'_{вб}$ ,  $Q_{плот}$  получены два выражения для температуры жидкости на выходе и входе в циркуляционную систему  $t_1$  (2.29) и  $t_2$  (2.30):

$$t_1 = \frac{2 \cdot (Q_{нлр} + Q_{нр} + Q_{нлк} + Q_{нк} + Q_{вк} + Q'_{вб} + Q_{плот}) - \pi \cdot (r_p^2 - (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2) \cdot c_{\bar{e}} \cdot \rho_{\bar{a}} \cdot t_2 \cdot v_{\bar{o}p} + 2 \cdot G \cdot c_{\bar{e}} \cdot t_2}{2 \cdot G \cdot c_{\bar{e}} \cdot t_2 + (r_p^2 - (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2) \cdot c_{\bar{e}} \cdot \rho_{\bar{a}} \cdot v_{\bar{o}p}} \quad (2.29)$$

$$t_2 = \frac{2 \cdot \left[ N_{ap} + Q_{нлр} + Q_{нр} + Q_{нлк} + Q_{нк} - \pi \cdot (r_p^2 - (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2) \cdot c_{\bar{e}} \cdot \rho_{\bar{a}} \cdot \frac{t_1}{2} \cdot v_{\bar{o}p} + \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 \cdot c_{\bar{e}} \cdot \rho_{\bar{a}} \cdot t_k \cdot v_{\bar{o}p} + \frac{1}{2} \pi \cdot (r_k^2 + (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2) \cdot \alpha_{\bar{e}} \cdot \frac{t_{\bar{a}}}{2} \right]}{c_{\bar{e}} \cdot \rho_{\bar{a}} \cdot v_{\bar{o}p} \cdot \pi \cdot \left[ 2 \cdot (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 + (r_p^2 - (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2) + (r_k^2 - r_p^2) \right]} \quad (2.30)$$

Одна из величин  $t_1$  или  $t_2$  определяется экспериментально, а на основании измеренного значения другая рассчитывается по (2.29) или (2.30).

Решая уравнение (2.16) относительно скорости бурения-расширения (для расширения)  $v_{\bar{o}p}$  получим (2.31):

$$v_{\bar{o}p} = \frac{Na_p}{\rho_{\bar{a}} \cdot \pi \cdot (A + B + C)}, \quad (2.31)$$

где  $A = (r_p^2 - (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2) \cdot (c_{\bar{e}} \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} + \psi + |t_{\bar{a}}| \cdot c_{\bar{a}})$ ;

$B = ((\frac{1}{2} r_p \cdot \frac{l}{v_{\bar{o}p}} \cdot K_{\kappa})^2 - r_p^2) \cdot (c_{\bar{e}} \cdot t_2 + \psi + |t_{\bar{a}}| \cdot c_{\bar{a}})$ ;

$C = (r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 \cdot c_{\bar{e}} \cdot \rho_{\bar{a}} \cdot \left| t_2 - \frac{t_{\bar{a}}}{2} \right|$ .

Приравнявая (2.2) и (2.31) и решая относительно активной тепловой мощности на процесс расширения  $Na_p$ , необходимой для соответствия скорости бурения и интенсивности расширения заданного диаметра, получим выражение (2.32):

$$Na_p = \frac{Na_{\bar{o}} \cdot (A + B + C)}{(r_{\bar{o}} + 2\delta)^2 \cdot (\frac{1}{2} \cdot c_{\bar{e}} \cdot t_{\bar{a}} + \psi + |t_{\bar{a}}| \cdot c_{\bar{a}})} \quad (2.32)$$

Активная тепловая мощность, расходуемая на процесс бурения с одновременным расширением, является суммой (2.2 и 2.32) из выражения (2.33):

$$Na_{\delta p} = Na_{\delta} \left( \frac{(A + B + C)}{(r_{\delta} + 2\delta)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot c_{\delta} \cdot t_{\kappa} + \psi + |t_{\lambda}| \cdot c_{\lambda}\right)} + 1 \right) \quad (2.33)$$

Разработанная методика расчета позволяет определить основные параметры процесса бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве.

## 2.4 Выводы по главе 2

1. По результатам теоретического исследования были получены математические зависимости, позволяющие определить основные технологические параметры процесса бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением:

- а. Скорость бурения плавлением  $v_{\delta p}$  сплошным забоем ледовых скважин - (2.15);
- б. Интенсивность расширения  $v_{\delta p}$  закрученным потоком теплоносителя - (2.31);
- в. Активная тепловая мощность  $Na_{\delta}$  для бурения плавлением сплошным забоем ледовых скважин – (2.2);
- г. Активная тепловая мощность  $Na_p$  для расширения закрученным потоком теплоносителя на забое ледовых скважин – (2.16) и (2.31);
- д. Суммарная активная мощность  $Na_{\delta p}$  ТБСР при заданной скорости бурения – (2.33);
- е. Температура воды на выходе из циркуляционной системы ТБСР  $t_1$  - (2.28);
- ж. Температура воды на входе в циркуляционную систему ТБСР  $t_2$  - (2.30);
- з. Радиус оплавления боковых стенок  $r_{\kappa}$  относительно проходки  $l$  – (2.27).

2. Предложенная математическая модель процесса контактного бурения плавлением сплошным забоем с одновременным конвективным расширением

ледовой скважины включает исходные данные, определяемые опытным путем, такие как коэффициент увеличения радиуса расширения  $K_k$ , температуры жидкости на выходе или входе в циркуляционную систему  $t_1$  или  $t_2$ , поэтому окончательное решение математического описания процесса бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве возможно только после проведения экспериментальных исследований.

3. Постоянство диаметра участка расширения тепловым способом можно обеспечить регулированием механической скорости бурения, что требует дополнительных исследований методов контроля и управления процессами контактного бурения плавлением с одновременным конвективным расширением скважин в ледовом массиве. Тогда начальный диаметр расширения рассчитывается таким образом, чтоб к окончанию проведения технологической операции расширение ствола скважины за счет естественной конвекции достигло величины равной конечного диаметра расширения, что требует дополнительных теоретически-экспериментальных исследований.

### **ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ ПЛАВЛЕНИЕМ С ОДНОВРЕМЕННЫМ РАСШИРЕНИЕМ**

В сезонные работы 64-ой Российской Антарктической Экспедиции (РАЭ) гляцио-буровой отряд, в состав которого входят специалисты из Санкт-Петербургского горного университета и НИИ Арктики и Антарктики, на буровом комплексе им. Б.Б. Кудряшова станции Восток в Антарктиде выполнил ряд экспериментальных исследований, что было предусмотрено планом диссертационного исследования и программой буровых работ.

Цель экспериментальных исследований - оценка эксплуатационных возможностей бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве с использованием термогидравлического бурового снаряда - расширителя (ТБСР) [85].

Достижение цели позволит определить зависимость скорости контактного бурения плавлением и интенсивности конвективного расширения от мощности нагревательных элементов, производительности насоса и геометрических характеристик бурового снаряда для проверки теоретических исследований, описывающих тепломассообменные процессы, происходящие на забое и в призабойной зоне скважины. Результаты данных исследований станут научным обоснованием для разработки эскизного проекта реального термогидравлического бурового снаряда-расширителя [35, 85]. Основные задачи экспериментальных исследований поставлены следующие:

1. Создание стенда и разработка методики экспериментальных исследований;
2. Разработка конструкции модели ТБСР и обоснование конструктивных элементов;
3. Изготовление и сборка модели ТБСР;
4. Стендовые испытания модели ТБСР на блоках льда.

### 3.1 Методика планирования и обработки результатов экспериментальных исследований

По результатам экспериментальных исследований необходимо определить зависимости скорости контактного бурения и интенсивности конвективного расширения от мощности нагревательных элементов, производительности насоса и геометрических характеристик бурового снаряда для проверки теоретических исследований, описывающих тепломассообменные процессы, происходящие на забое и в призабойной зоне при бурении плавлением с одновременным расширением скважин с использованием снаряда ТБСР. Также необходимо проверить технические возможности реализации технологии бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве, определить рациональные значения технологических параметров; определить зависимости коэффициента  $K_k$  от основных технологических параметров; определить температуру рабочей жидкости на входе в циркуляционную систему  $t_2$  для конкретных геолого-технических условий.

#### 3.1.1 Планирование эксперимента

Планирование эксперимента основано на построении математической модели оптимизации процессов с целью повышения эффективности экспериментальных исследований и достоверности их результатов [96].

Учитывая сложность теоретического решения задачи по бурению плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве, в качестве метода экспериментального изучения выбран *метод физического моделирования*. Изучение конкретного процесса бурения плавлением с одновременным расширением, протекающего в ледовой скважине, для определения физических свойств на стадии научного исследования в нашем случае обеспечивается стендовыми экспериментами. Задачи для определения модели объекта учитывают локальную область пространства параметров объекта, соответствующую экстремуму критерия оптимальности при отсутствии временного изменения параметров, а также учитывают степень влияния входных

переменных на выходные переменные, и рассчитанные на прогнозирование поведения объекта [61, 75, 100]. Активный эксперимент обеспечивает построение математического описания в виде совокупности статистических и динамических выходных характеристик объекта и позволяет установить закономерности между тепловыми мощностями и конструктивными особенностями снаряда для оптимального режима его функционирования.

В качестве факторов выступают измеряемые величины: напряжение питания нагревательных элементов рабочего органа  $U_{PO}$ , напряжение питания нагревательных элементов циркуляционной системы  $U_{ЦС}$  и производительность насоса  $Q_H$ . Все три фактора управляемые и независимые:

$x_1$  - напряжение питания нагревательных элементов рабочего органа  $U_{PO}$ , В;

$x_2$  - напряжение питания нагревательных элементов циркуляционной системы  $U_{ЦС}$ ; В,

$x_3$  - производительность насоса  $Q_H$ , м<sup>3</sup>/с.

Каждый фактор имеет область определения. Границы областей факторов  $U_{PO}$  и  $U_{ЦС}$  определяются исходя из принципиальных ограничений и конструктивных особенностей нагревательных элементов рабочего органа и циркуляционной системы снаряда. Границы областей факторов:

$$0 < U_{PO} < U_{PO.max}$$

$$0 < U_{ЦС} < U_{ЦС.max}$$

$$0 < Q_H \leq Q_{H.max}$$

где  $U_{PO.max}$ ,  $U_{ЦС.max}$  – максимальные значения напряжения, при котором нагревательные элементы выходят из строя из-за выделения мощности больше допустимой, в этот момент сила тока в нагревателе выше критического значения, В,

$Q_{H.max}$  – максимальная производительность насоса, м<sup>3</sup>/с.

Параметр оптимизации принимаем  $V_6 \sim I_p$ . Скорость бурения плавлением должна соответствовать интенсивности расширения. Диаметр расширения  $D_p$  определяется исходя из технологических потребностей. При заданной скорости бурения  $V_6$  фактический диаметр расширения  $D_{p.факт}$  может принимать значение равное или большее расчетного диаметра расширения  $D_{p.расч}$ , но никак не меньше.

$D_{p,факт.} \geq D_{p,расч.}$ . Необходимо определить оптимальные значения скорости бурения, обеспечивающие соответствие  $D_{p,факт.} \geq D_{p,расч}$  при заданных конструктивных характеристиках ТБСР, производительности насоса и тепловой мощности, затрачиваемой на бурение и расширение.

Модель эксперимента имеет вид [29]:

$$X_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + C_k + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \varepsilon_{ijk}$$

В этой модели  $i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$  и  $k=1, 2, 3$ .

Для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов (3 уровня) найдем число опытов (таблица 3.1):

$$N = 3^k = 3^3 = 27$$

Таблица 3.1 – Комбинации условий факторного эксперимента типа  $3^3$

X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>		
		0	1	2
0	0	000	001	002
	1	010	011	012
	2	020	021	022
1	0	100	101	102
	1	110	111	112
	2	120	121	122
2	0	200	201	202
	1	210	211	212
	2	220	221	222

Для полного факторного эксперимента (с пересекающимися факторами) применяем дисперсионный анализ [96].

Осуществление перехода от экспериментальных исследований к скважинным испытаниям за счет использования при моделировании процесса бурения расширения следующих критериев подобия [26, 65, 60]:

Критерий Рейнольдса  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$  ;

Критерий Прандтля  $Pr = \frac{a \cdot l}{\lambda}$  ;



Критерий Пекле  $Pe = f(Nu, k)$ ;

Критерий Нуссельта  $Nu = f(Re, Pr)$ ;

Критерий геометрического подобия  $\frac{d_m}{d_n} = 1; \frac{l_n}{d_n} = \frac{l_m}{d_m}$ ,

где  $k$ –критерий теплового подобия при агрегатных переходах,

$d$  – эквивалентный диаметр сечения, м;  $v$ –скорость движения теплоносителя, м/с,

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с,

$Q$  – количество теплоты, Дж/м<sup>3</sup>,

$c$  – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·°С),

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>,

$t$  – температура льда, °С,

$a$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С),

$l$  – линейный размер нагревателя, м,

$d_m$  – диаметральные размеры модели, м,

$d_n$  – диаметральные размеры натуры, м,

$l_m$  – линейные размеры модели, м,

$l_n$  – линейные размеры модели и натуры, м.

Согласно второй теореме подобия решение любого дифференциального уравнения может быть представлено в виде зависимости между критериями подобия [30]. Такая зависимость имеет степенной вид, а для математического описания тепломассопереноса в процессе бурения, таким критерием является критерий Нуссельта [65]:

$$Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n \left( \frac{l}{d} \right)^k.$$

### 3.1.2 Статистическая обработка экспериментальных данных

Для исключения грубых ошибок измерений производилась оценка «выскакивающих» значений по критерию Стьюдента  $t_n(P)$  [76].

$$t = \frac{(x_* - \bar{x})}{s} > t_n(P),$$

Надежность вывода «выскакивающих» значений принята 0,95.

Результаты экспериментальных данных обрабатываются в ПО «Statistic».

Обработка экспериментальных исследований производится по методу общего дисперсионного анализа, главной задачей которого является исследование влияния тех или иных факторов на изменчивость средних значений наблюдаемых величин на основе анализа выборочных дисперсий [96].

## 3.2 Методика экспериментальных исследований

### 3.2.1 Экспериментальный стенд

Основная цель экспериментов – оценка реальных возможностей применения, специально спроектированного сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета, термогидравлического бурового снаряда-расширителя, объединяющего два технологических процесса: бурение и расширение скважины в ледовом массиве методом плавления [85].

Для проведения экспериментальных исследований на базе бурового комплекса им Б.Б. Кудряшова станции Восток в Антарктиде был собран специальный экспериментальный стенд (рисунок 3.1), который имитирует работу термогидравлического бурового снаряда-расширителя в призабойной зоне с системой нагревательных элементов и принудительной циркуляцией теплоносителя, способного производить необходимые технологические процессы и с возможностью независимого регулирования основных параметров, таких как электрическая мощность нагревательных элементов, производительность насоса, скорость подачи снаряда на забой. Все необходимое оборудование имелось в наличии и размещалось в здании бурового комплекса. Стоит отметить, что на буровых комплексах 3Г и 2Г законсервировано старое оборудование, где раньше проводились испытания новых технологий бурения [17, 46, 95].

Экспериментальный стенд (рисунок 3.1) состоит из модели термогидравлического бурового снаряда-расширителя 1, блока льда 2, заливочной

жидкости 3, обсадной трубы, блока 4, ручной лебедки 5, троса 6, трёх автотрансформаторов переменного тока 7, 8, 9, лабораторного автотрансформатора переменного тока с выпрямителем 10, токоведущих жил 11, пульта управления 12 и термометров 13.

Ручная лебедка 5 жестко болтовым соединением закреплена в основании помещения бурового комплекса и с ее помощь осуществляется спуск, подъем и поддержание в вертикальном положении модели ТБСР 1 в скважине. Модель ТБСР 1 через блок 4 подвешивается на трос 6, другой конец троса закреплен в барабане лебедки 5 и намотан на нее.

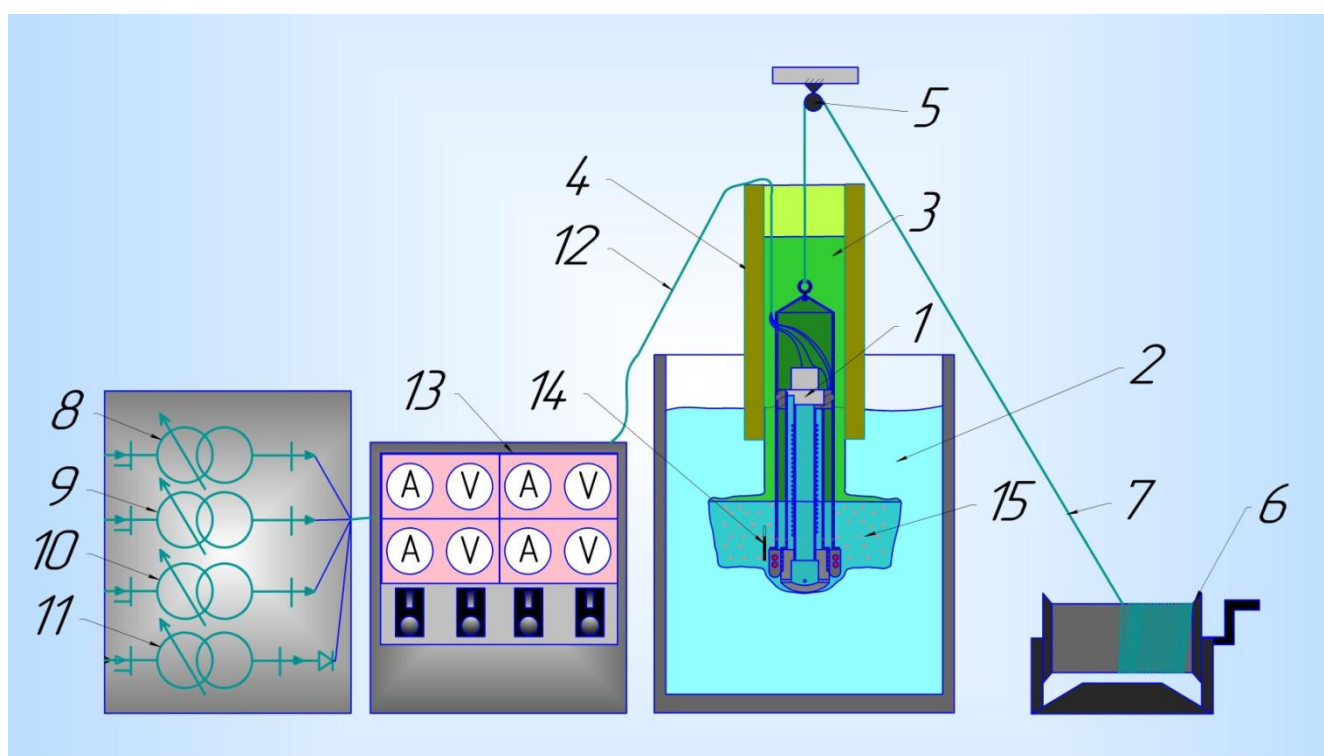


Рисунок 3.1 - Схема экспериментального стенда для исследования процесса бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве.

1 - модель термогидравлического бурового снаряда – расширителя; 2 - блок льда; 3 - заливочная жидкость; 4 - обсадная труба; 5 – блок; 6 - ручная лебедка; 7 – трос; 8, 9, 10 - автотрансформаторы переменного тока; 11 - лабораторный автотрансформатор переменного тока с выпрямителем; 12 - токоведущие жилы; 13 - пульт управления; 14 – термометр; 15 – талая вода.

Блоки льда 2 цилиндрической формы были заготовлены зимовочным составом 63-ей РАЭ станции Восток путем постепенного искусственного замораживания воды в металлических бочках, произведенных согласно ГОСТ

13950-91, объемом 216,5 литров, высотой 878 мм и диаметром 585 мм. Для увеличения проходки по льду и приближения к реальным скважинным условиям перед каждым опытом в блок льда вмораживалась труба из стеклотекстолита длиной 1 м на глубину 0,2 м. Такая труба используется в качестве обсадной трубы в скважине 5Г и имеет внутренний диаметр 165 мм, что позволяет обеспечить беспрепятственный спуск ТБСР на забой. Внутреннее пространство трубы после заморозки заполняется заливочной жидкостью 3 в объеме 13 - 15 литров, что соответствует столбу жидкости высотой 0,5 - 0,6 м. В качестве заливочной жидкости 3 применялось авиационное топливо марки ТС-1 (керосин), используемое для бурения скважины 5Г, и кремнийорганическая жидкость марки ПМС-10 (полиметилсилоксан) [1, 79], заготовленной для экспериментальных исследований [85].

### **3.2.2 Экспериментальная модель термогидравлического бурового снаряда - расширителя**

Разработаны, изготовлены и собраны две модели термогидравлического бурового снаряда – расширителя по патенту на изобретение RU №2700143 С1 [31, 81], которые предназначены для экспериментального бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве. Модель ТБСР I (рисунок 3.2) включает рабочий орган, состоящий из коронки 16 и пенетратора 17. Коронка изготовлена из алюминия в лаборатории LGGE (Франция) и использовалась в снаряде ТБЗС-132 при бурении глубоких скважин в Антарктиде [45, 46, 98]. Внутри коронки жестко закреплены кольцевые электрические нагреватели 18, которые представляют собой нихромовые спирали [98]. Пенетратор 17, изготовлен в форме цилиндра с закруглённой нижней частью из металла с высокой теплопроводностью – алюминия, внутри которого выполнен коллектор 19 диаметром равным наружному диаметру водонагнетательной трубки 20 и глубиной 50 мм для посадки в натяг. В нижней части пенетратора 17 из коллектора 19 выполнены гидравлические каналы 21, выходящие по периметру нижнего торца пенетратора 17 и расположенные диаметрально противоположно

относительно друг друга. Гидравлические каналы 21 позволяют направить поток теплоносителя к стенке скважины тангенциально, что инициирует закручивание потока теплоносителя вокруг оси ТБСР [81]. Создание кольцевой циркуляции на забое обеспечивает образование полости, близкой к цилиндрической форме [80]. На внешней стороне пенетратора 17 выполнены канавки для возможности кольцевой укладки электрического нагревательного элемента 22. В качестве нагревательного элемента 22 был выбран зарекомендовавший себя в условиях бурения при низких температурах ледового массива (до минус 60<sup>0</sup>С) кабель нагревостойкий с минеральной изоляцией из периклаза, в оболочке из нержавеющей стали и однопроволочной токопроводящей жилой из нихрома марки Х20Н80-Н (КНМС НХ). Выбранная конструкция и геометрическая форма рабочего органа не предполагает достижения высоких значений скорости бурения, а должна обеспечивать нагрев теплоносителя в коллекторе и гидравлических каналах и минимальные затраты тепловой энергии на процесс бурения при малых значениях скорости проходки (до 1 м/ч) [85].

Верхняя часть коронки 16 жестко болтовым соединением закреплена с корпусом 23. В качестве корпуса 23 использовались укороченные колонковые трубы с наружным диаметром 108 мм и толщиной стенки 4.5 мм согласно ГОСТ Р 51682-2000. Внутри корпуса 23 установлена центральная двойная труба 24, состоящая из внутренней трубы 20, соединенной с коллектором 19, и наружной трубы 24. В качестве труб 20 и 24 использовались стандартные стальные трубы БХ-48х4-А-ГОСТ и БХ-26х3-А-ГОСТ согласно ГОСТ 32678-2014. Соединение труб циркуляционной системы осуществлялось с использованием соединительных муфт стандартных типоразмеров промышленного выпуска.

На внутренней трубе 20 закреплен электрический нагревательный кабель КНМС НХ 26. Верхняя часть центральной двойной трубы 20 закреплена к насосу отсеку, состоящего из корпуса насоса 27 и установленного в нем насоса 28. Рациональным выбором механизма прокачки теплоносителя в модели ТБСР стал успешно эксплуатируемый электроцентробежный насос ЭЦН-91С

(рисунок 3.4), который входит в состав снарядов ТБЗС-132, ТБЗС-152М и работает от постоянного тока напряжением до 27 В [13, 31].

Модель ТБСР II (рисунок 3.3.а) конструктивно отличается от модели ТБСР I (рисунок 3.3.б) отсутствием в рабочем органе коронки 16 с нагревательными элементами 18 и корпуса 23, все остальные конструктивные элементы без изменений. Технические характеристики моделей ТБСР I и II представлены в таблице 3.2.

*Подключение модели ТБСР.* Питание нагревательных элементов КНМС НХ 22 и 26, нагревательного элемента 18 коронки 16 осуществляется через автотрансформаторы переменного тока 8, 9 и 10 подключенных к бытовой сети по разработанной схеме подключения (рисунок 3.5). Подключение насоса 27 осуществляется через лабораторный автотрансформатор переменного тока с выпрямителем 11, также подключенного к бытовой сети. Оперативный контроль осуществляется при помощи адаптированного автором под проводимые исследования пульта управления 13 от малогабаритной буровой установки, разработанной для колонкового электромеханического бурения ледников на Алтае, с выводом измерительных приборов на переднюю панель, с которой в процессе проведения опытов фиксируются электрические характеристики энергопотребителей. Управление и регулирование технологическими параметрами бурения осуществляется вручную. Включение и выключение всех энергопотребителей (КНМС НХ 22 и 26, нагревательного элемента 18 и насоса 28) осуществляется пультом управления 12 [85].

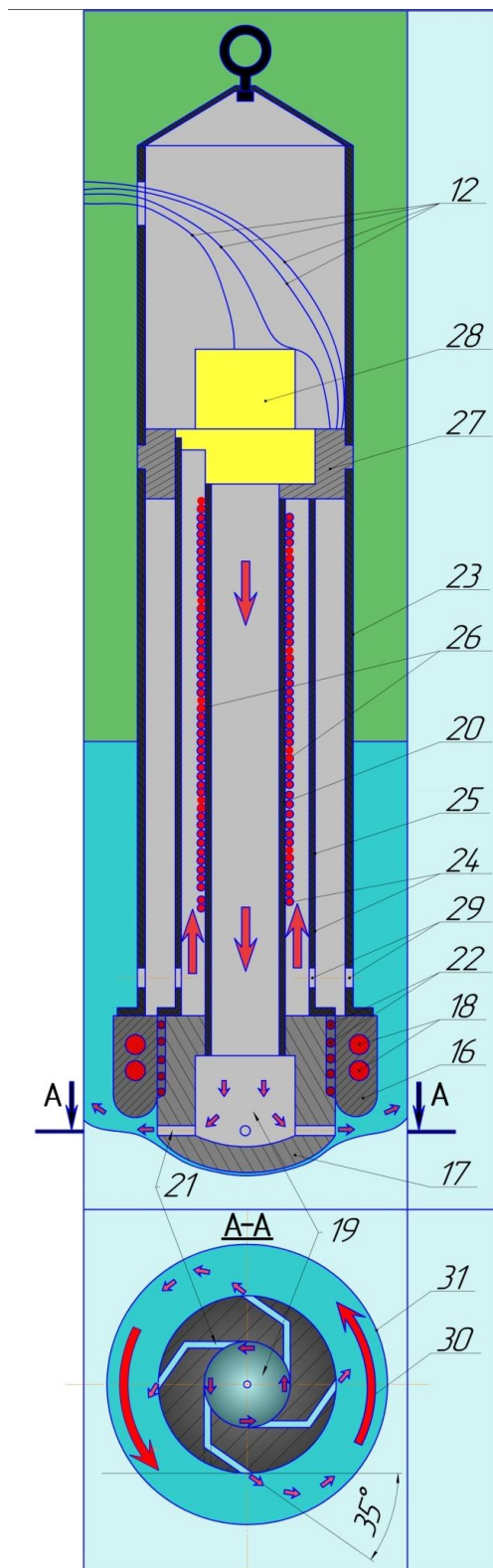


Рисунок 3.2 – Схема модели термогидравлического бурового снаряда расширителя. 12 – токоведущие жилы; 16 – коронка; 17 – пенетратор; 18 – кольцевые электрические нагреватели; 19 – коллектор; 20 – внутренняя водонагнетательная трубка; 21 – гидравлические каналы; 22 – нагревательный элемент (КНМС НХ); 23 – корпус; 24 – центральная двойная труба; 25 – наружная труба; 26 – нагревательный элемент (КНМС НХ); 27 – корпус насоса; 28 – насос; 29 – заборные окна; 30 – кольцевая циркуляция; 31 – стенки скважины.

Таблица 3.2 – Технические характеристики моделей ТБСР

	ТБСР I	ТБСР II
Диаметр коронки, мм		
наружный	132	-
внутренний	90	-
Диаметр пенетратора, мм	90	90
Номинальная мощность коронки, кВт	3,0	-
Номинальная мощность пенетратора, кВт	1,5	
Номинальная мощность нагревателей циркуляционной системы, кВт	1	2,5
Циркуляционная система:		
внешняя труба, длина, м	0,4	
диаметр наружн./внутр.	48/40	
Внутренняя труба, длина, м	0,4	
диаметр наружн./внутр.	26,8/20	
Насос тип	ЭЦН-91С	
мощн. прив. двиг., кВт	0,2	
производительность, л/мин	63,3	
Электропитание,		
ТЭНы коронки, тип напряжение, В	~1ф 0-220	
КНМСНХ, тип напряжение, В	~1ф 0-220	
Насос, тип напряжение, В	– 27	
Номинальная мощность снаряда, кВт	5,7	4,2
Длина снаряда, м	1,07	
Масса снаряда, кг	35,4	31,0





**а)**

**б)**

Рисунок 3.3 – Модели термогидравлического бурового снаряда-расширителя.

а – модель ТБСР II; б – модель ТБСР I



Рисунок 3.4 – Электроцентробежный насос ЭЦН-91С

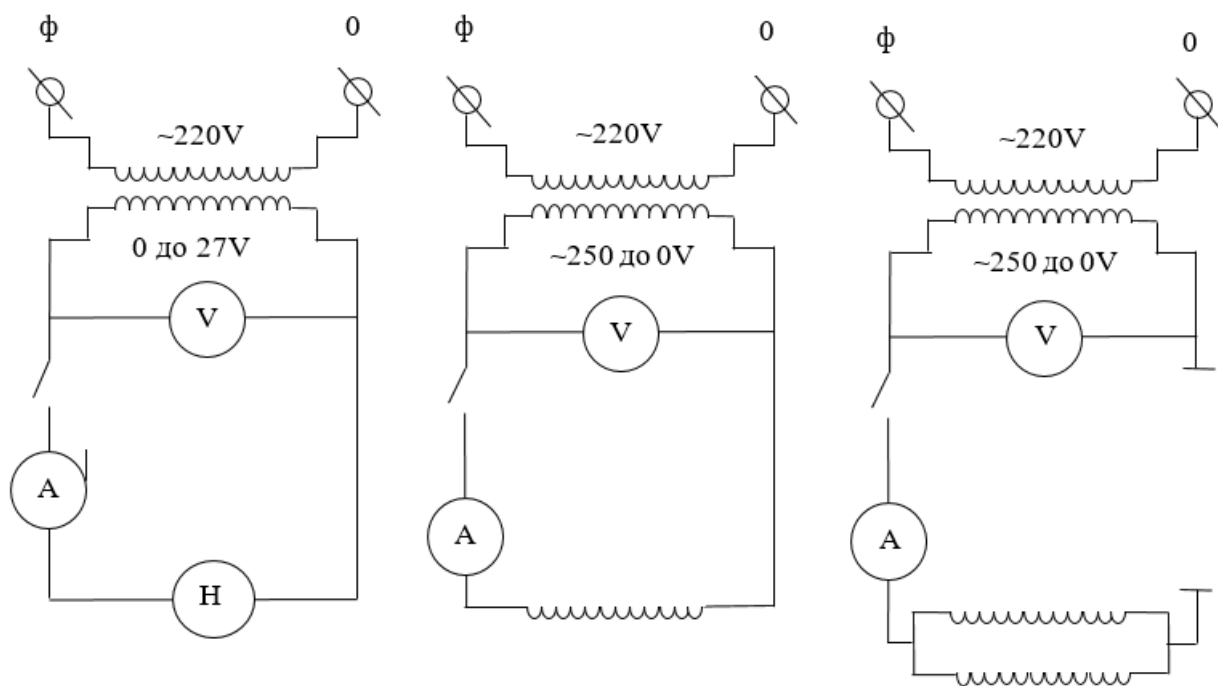


Рисунок 3.5 – Схема подключения теплового прибора:

1 – подключение насоса, 2 – подключение КНМС, 3 – подключение коронки.

### 3.2.3 Принцип работы экспериментального стенда

Стенд работает следующим образом. Один конец троса 7 через блок 5 крепится к верху модели ТБСР 1 (рисунок 3.6), другой конец троса 7 закреплен в лебедке 6 и намотан на ее барабан. Модель ТБСР 1 поднимается на максимальную высоту, под него устанавливается заготовленный блок льда 2 цилиндрической формы, центрируют вертикальные оси модели ТБСР и блока льда. Заполняют внутритрубное пространство заливочной жидкостью. Модель ТБСР 1 спускается в обсадную трубу 4, производится остановка спуска по достижению пенетратором 17 блока льда 2. После постановки на блок льда 2 модели ТБСР 1 через АТР 8 и 9 подается регулируемый переменный электрический ток по токоведущим жилам 12 к нагревательным элементам 22 и 18. Пенетратор 17 и коронка 16 постепенно нагреваются, по достижению положительной температуры рабочего органа происходит плавление льда, образуется забой скважины. Процесс бурения продолжается до тех пор, пока объем талой воды (теплоносителя) 15 не достигнет необходимого объема для заполнения циркуляционной системы, затем включаются нагревательный элемент 26 и насос 28. Талая вода 15 через заборные окна 29 попадает в пространство между наружной 25 и внутренней 20 трубами, поднимается по ней и прокачивается насосом 28, откуда нагнетается по внутренней трубе 20 в коллектор 19, где равномерно распределяется по четырем гидравлическим каналам 21 малого диаметра. Тангенциальная ориентация каналов позволяет создать на выходе кольцевую циркуляцию 30 в призабойной зоне [85].

За счет создания кольцевой циркуляции 30 в призабойной зоне, стенки скважины 31 оплавляются в радиальном направлении, при этом осуществляется технологический процесс - расширение. Во время циркуляции талой воды 15 в центральной двойной трубе 24 осуществляется постоянный ее подогрев, что количественно можно оценить как энтальпию за счет использования показаний термометров. Рейс бурения плавлением с одновременным расширением скважины в ледовом массиве производится, как правило, на всю мощность блока льда.



Рисунок 3.6 – Проведение экспериментальных исследований

### 3.3 Результаты экспериментальных работ

Проведение запланированного количества экспериментов в условиях станции Восток затруднительно и обладает своей спецификой, которая заключается в больших затратах времени на монтажные работы, подготовку (намораживанию) блоков льда, замену нагревательного кабеля КНМС НХ при выходе его из строя, изменения конструкции рабочего органа и циркуляционной системы, настройка и подготовка оборудования. Учитывая сложности проведения экспериментальных исследований и короткий сезонный рабочий период, были проведены три серии экспериментов, включающие 23 успешных опыта.

Исследования велись при одинаковых постоянных условиях: температуры льда -  $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ , температура окружающей среды  $-20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ , атмосферное давление 450 мм.рт.ст.

В ходе проведения экспериментальных исследований были испытаны основные узлы и система энергообеспечения экспериментального стенда, произведена отработка технологии приготовления блоков искусственного льда с вмораживанием обсадной колонны в ледовый массив и последующей заливкой низкотемпературной жидкостью. Эксперименты, проведенные на стенде, показали, что вмораживание обсадной трубы на глубину 150 мм в блок искусственного льда позволяет провести эксперимент с проходкой 0,5 - 0,6 м, что соответствует 0,5 - 2 ч времени бурения, обеспечивая полную герметизацию внутрискважинного пространства. По окончании каждого опыта из скважины в течении 2-3 минут при помощи ручного насоса производилась полная откачка заливочной жидкости и талой воды.

Конструкция модели ТБСР I оказалась непригодна к проведению экспериментальных исследований, так как она не обеспечила процесс расширения. Таким образом, только модель ТБСР II позволила успешно провести эксперименты, обеспечив заявляемые к ней требования [81, 85].

Первая серия экспериментальных исследований проводилась с целью определения влияния активной тепловой мощности рабочего органа на скорость бурения плавлением сплошным забоем скважин в ледовом массиве. Осевая нагрузка рабочего органа на забой достигалась собственным весом модели и составляла  $17,0 \text{ кН/м}^2$ . В конструкции рабочего органа модели ТБСР имеются три ТЭНа: КНМС НХ и две нихромовые жилы в коронке, суммарная мощность которых в процессе проведения опытов изменялась от 1,2 до 3,2 кВт. Откачка талой воды с забоя в процессе бурения не производилась.

Анализ полученных результатов (рисунок 3.7) показывает, что тепловая мощность, подводимая на забой, имеет сильное влияние на скорость бурения плавлением. Из диаграммы зависимости влияния скорости бурения плавлением от мощности нагревательных элементов (рисунок 3.6) видно, что с увеличением

мощности нагревательных элементов пропорционально увеличивается скорость бурения плавлением, а с увеличением проходки, наоборот, уменьшается, что заметно по линиям тренда. Снижение скорости бурения плавлением объясняется возрастанием потерь тепловой энергии, затраченной на рассеивание и оплавление боковых стенок, объем теплотерь пропорционально возрастает с глубиной скважины. Откачка талой воды с забоя скважины не производилась. Отсечки времени проводились каждые 100 мм проходки.

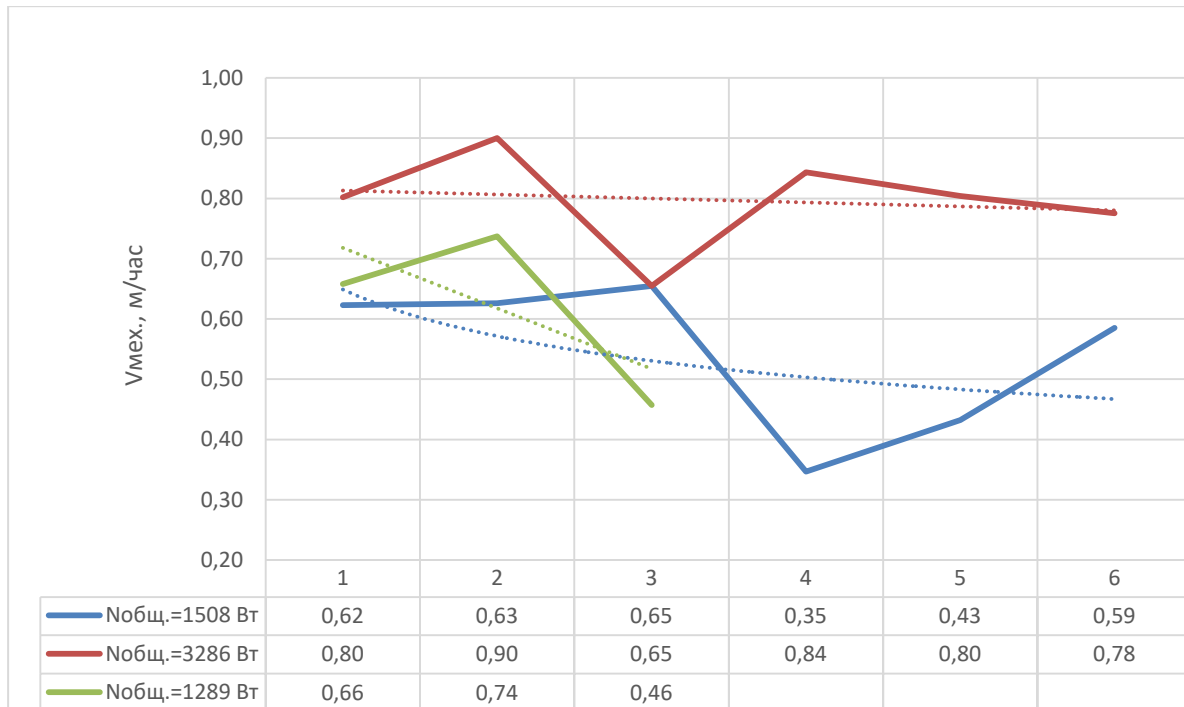


Рисунок 3.7 – Диаграмма зависимости скорости бурения плавлением от мощности нагревательных элементов

Вторая серия экспериментальных исследований проводилась с целью определения влияния осевой нагрузки бурового снаряда на забой на скорость бурения плавлением. При постоянных условиях бурения изменялся один фактор – осевая нагрузка бурового снаряда на забой. Осевая нагрузка в процессе бурения достигается собственным весом бурового снаряда, а при помощи системы подвеса с лебедкой поддерживается только его осевое вертикальное направление. Вес снаряда изменялся за счет подвешивания груза на корпус снаряда. Исследования проводились при суммарной мощности нагревательных элементов  $N_{\text{общ}} = 1201$  Вт и температурой льда  $T_{\text{льда}} = -20$  °С. Осевая нагрузка снаряда во время проведения экспериментов составляла:  $17,0$  кН/м<sup>2</sup>;  $22,8$  кН/м<sup>2</sup> и  $30,0$  кН/м<sup>2</sup>. Откачка талой

воды с забоя в процессе бурения не производилась. Из работ по исследованию влияния осевой нагрузки на забой известно, что по достижении определенного значения нагрузки ее увеличение не оказывает заметного влияния [41, 45, 49], что подтверждает результаты экспериментальных исследований (рисунок 3.8), проведенных автором. Таким образом, в процессе бурения скважины с использованием модели ТБСР I при удельных осевых нагрузках  $17,0 \text{ кН/м}^2$ ;  $22,8 \text{ кН/м}^2$  и  $30,0 \text{ кН/м}^2$  скорость бурения составила 0,48, 0,46 и 0,46 м/час соответственно.

При подаче модели бурового снаряда на забой под собственным весом и без поддержания равновесного состояния при помощи лебедки, ввиду неравномерности распределения тепловой энергии в рабочем органе и не совпадении центра масс модели с ее центральной осью происходило отклонение от вертикального направления. Рациональным выбором способа подачи ТБСР на забой, является дискретный способ, обеспечивающий строго вертикальное продвижение снаряда.

Третья серия экспериментальных исследований проводилась с целью определения влияния суммарной активной тепловой мощности рабочего органа и циркуляционной системы, а также механической скорости бурения на интенсивность расширения скважины в ледовом массиве. Механическая скорость бурения при проведении исследований изменялась в пределах от 0,2 до 0,8 м/ч. В конструкции рабочего органа модели ТБСР II два ТЭНа КНМС НХ, суммарная мощность которых в процессе проведения опытов изменялась от 1,2 до 3 кВт. Осевая нагрузка достигается собственным весом модели и составила  $17,0 \text{ кН/м}^2$ , лебедкой поддерживается только осевое вертикальное направление модели. Откачка талой воды с забоя в процессе проведения опыта не производилась, а только по его завершению. В качестве показателя расширения введен безразмерный коэффициент расширения  $K_p$ , который численно равен отношению радиуса расширения к радиусу бурения [85].

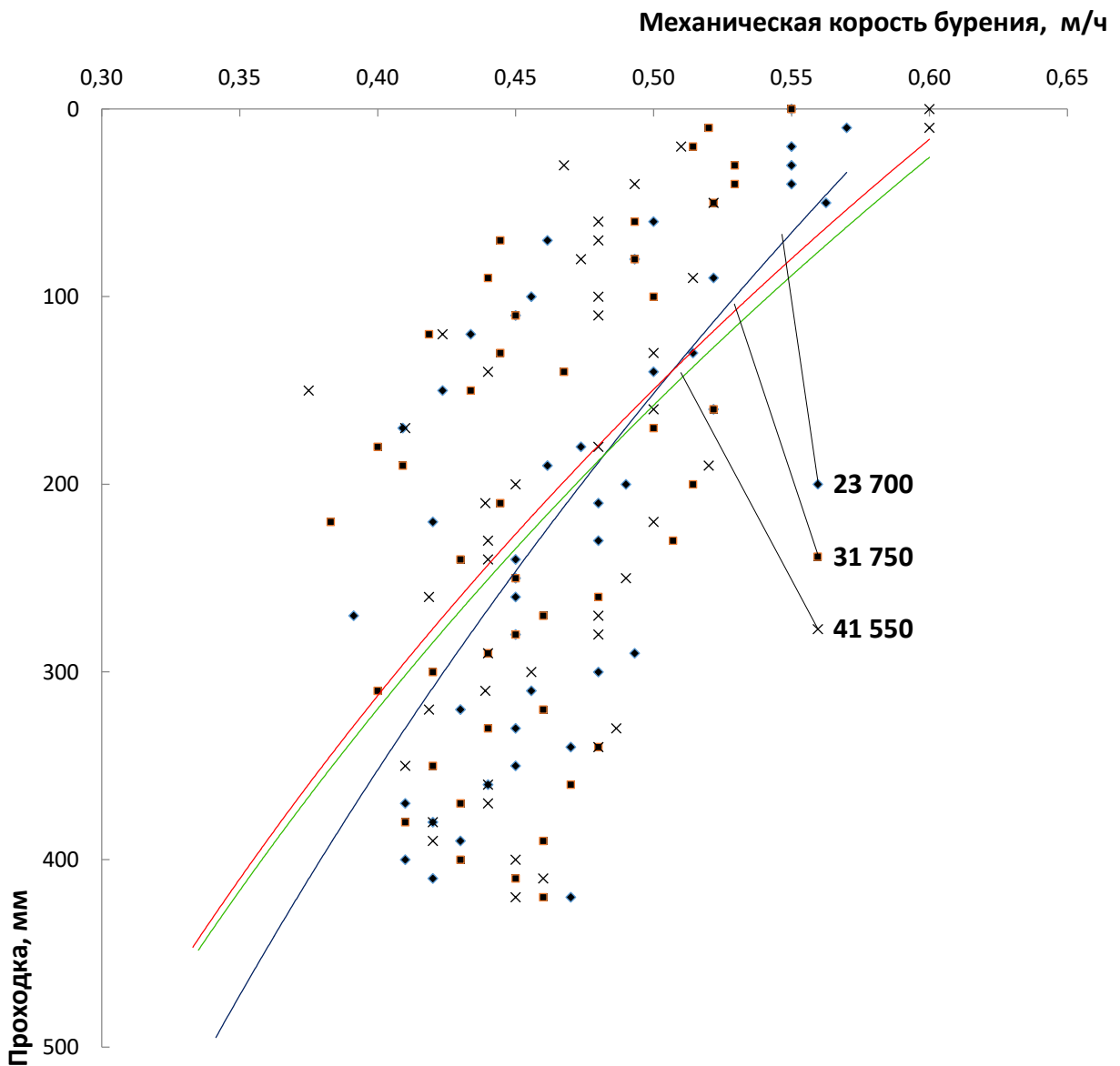


Рисунок 3.8 – Скорости бурения плавлением при различной осевой нагрузке бурового снаряда ТБСР

Основные результаты серии экспериментального бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве:

1. Разработанная и изготовленная модель термогидравлического бурового снаряда-расширителя конструкции по патенту на изобретение RU №2700143 С1 для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве работоспособна и пригодна для экспериментального бурения.



2. Технологию бурения сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве возможно реализовать при комбинации контактного плавления для процесса бурения и создания принудительной призабойной кольцевой циркуляции подогретого теплоносителя для процесса расширения, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

3. Основными факторами, определяющими радиус расширения скважины, являются механическая скорость бурения, активная тепловая мощность рабочего органа и циркуляционной системы, рабочие характеристики насоса (давление и производительность).

4. В процессе бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве при постоянных параметрах механической скорости бурения, производительности насоса и активной тепловой мощности образуется полость усеченной конусоидальной формы с закругленными углами и большим верхним основанием.

5. В процессе бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве при постоянной активной тепловой мощности и увеличении механической скорости бурения уменьшаются радиус расширения, средняя температура талой воды в призабойной зоне и потери тепла на рассеивание и оплавлением боковых стенок скважины.

6. В процессе бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве при постоянной механической скорости бурения и увеличении активной тепловой мощности увеличиваются радиус расширения, средняя температура талой воды в призабойной зоне и потери тепла на рассеивание и оплавлением боковых стенок скважины.

7. Конструкция модели ТБСР II, состоящая из пенетратора и двойной центральной трубы с намотанными на них нагревательным кабелем КНМС НХ суммарной мощностью 4 кВт, корпуса и насоса ЭЦН-91С, а также выполненные в пенетраторе коллектор и горизонтальные гидравлические каналы, образующие с

касательной пенетратора угол  $30^{\circ}$ , обеспечивает бурение сплошным забоем диаметром 90 мм и расширение ледовой скважины до 180 мм.

Уменьшение первоначального угла выходящей струи из гидравлического канала с  $70^{\circ}$  до  $30^{\circ}$  позволило закрутить талую воду вокруг оси скважины, что создало кольцевую призабойную циркуляцию. По рисунку 3.9.а и 3.9.б видно, что при угле  $70^{\circ}$  образуется горизонтальное сечение скважины квадратной формы с закругленными углами, а при угле  $30^{\circ}$  (рисунок 3.9.в) образуется горизонтальное сечение скважины круглой формы.

8. Рациональные эксплуатационные параметры для процесса бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве с использованием модели ТБСР II достигается в интервале скоростей бурения - расширения 0,5-0,8 м/ч, отношением радиуса бурения к радиусу расширения 1:2 и проходкой до 1 м, при этом затрачиваемая тепловая мощность экспоненциально растет с увеличением проходки и радиус скважины на верхней границе участка расширения до двух раз больше конечного радиуса расширения.

В таблице 3.3 представлены параметры, характеризующие процесс бурения плавлением с одновременным расширением при проходке 0,5 м и  $K_p = 1,6$ .

По результатам исследований (рисунок 3.10) сделан вывод, что нижний предел скорости бурения находится на отметке 0,5 м/ч, при снижении скорости бурения с 0,5 до 0,2 м/ч затраты энергии увеличиваются на 40,8%, причем это увеличение расхода энергии можно отнести к бесполезным потерям тепла. Верхний предел скорости бурения зависит от активной тепловой мощности прибора и характеристик насоса. Так с увеличением скорости бурения с 0,3 до 0,8 м/ч и суммарной активной тепловой мощности с 1,24 до 2,56 кВт и при постоянной производительности насоса, затрачиваемой энергии, обеспечивающей расширение на 60%, требуется на 22,3% меньше.

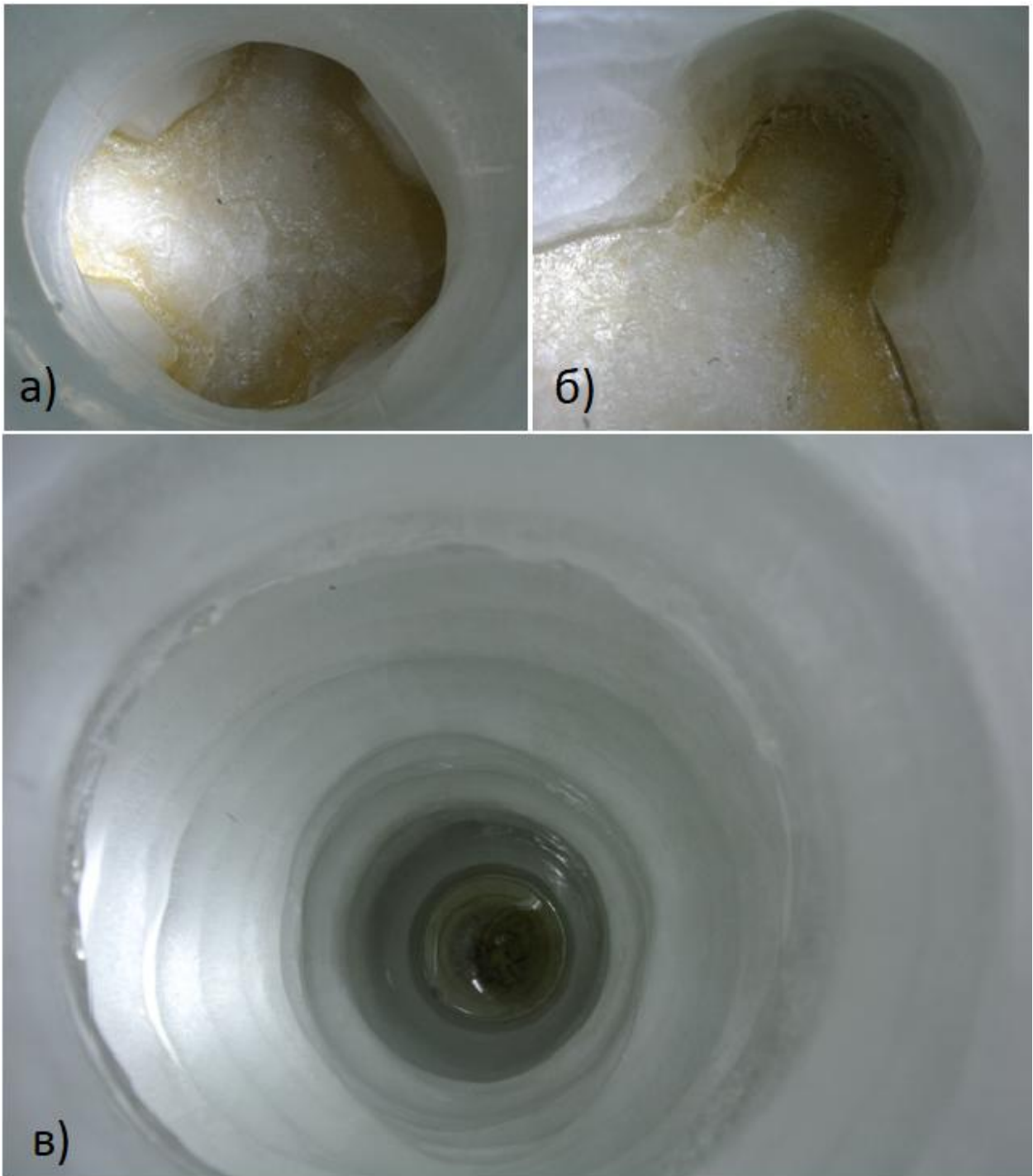


Рисунок. 3.9 - Скважины, образованные в ходе экспериментов

Таблица 3.3 – Сравнение экспериментальных данных

Параметры	Скорость бурения, м/ч			
	0,20	0,30	0,50	0,80
Активная тепловая мощность, кВт	1,08	1,24	1,91	2,56
Затраченное время, ч	2,50	1,67	1,00	0,63
Затраченная энергия, кДж	2,69	2,06	1,91	1,60
$\frac{Q_i - Q_{\min}}{Q_{\min}} \cdot 100\%$	+67,97	+28,65	+19,06	0

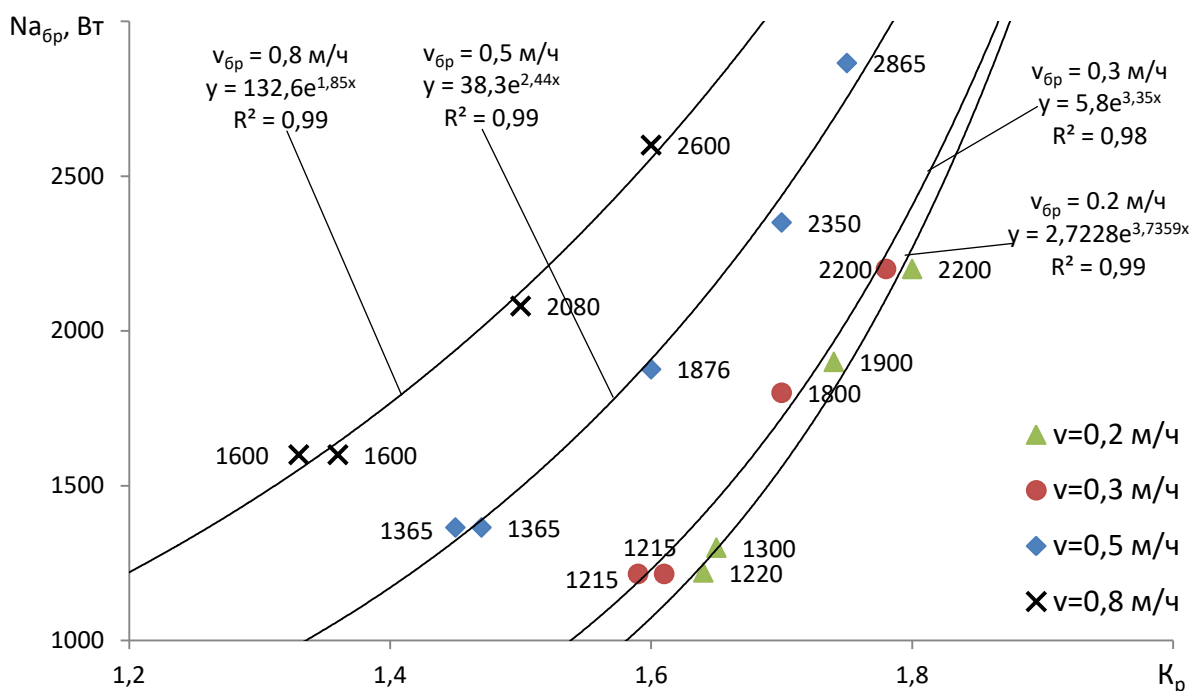


Рисунок 3.10 – Опытные значения зависимости коэффициента расширения от суммарной активной тепловой мощности

9. Потери тепловой энергии на прогрев и оплавление боковых стенок, а также перегрев талой воды учитываются введением опытного коэффициент увеличения радиуса расширения  $K_k$ . В результате обработки экспериментальных данных получена плоскость для определения  $K_k$  в диапазоне изменения коэффициента расширения  $K_p$  от 1 до 2 и механической скорости бурения расширения  $v_{6p}$  от 0,2 до 0,8 м/ч. Коэффициент  $K_k$  имеет экспоненциальную зависимость, что приводит к экспоненциальному росту затрачиваемой тепловой энергии на процесс бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве. Рациональный диапазон скорости бурения – расширения составляет 0,5 - 0,8 м/ч, при этом  $K_k$  не превышает 1 (при проходке 0,5 м), что наглядно изображено на рисунке 3.11 и свидетельствует о минимальных тепловых потерях и, соответственно, минимальной разработке радиуса расширения. При значении  $v_{6p} \leq 0,3$   $K_k$  резко возрастает, и его величина превышает 1, что ведет к экспоненциальному росту бесполезных тепловых потерь.

Значение коэффициента можно определить из уравнения плоскости  $K_k$ , полученного после обработки экспериментальных данных в ПО Statistika:

$$K_k = 4,30 - 11,88x - 0,23y + 8,57x^2 + 0,28xy - 0,09y^2 \quad (3.1)$$

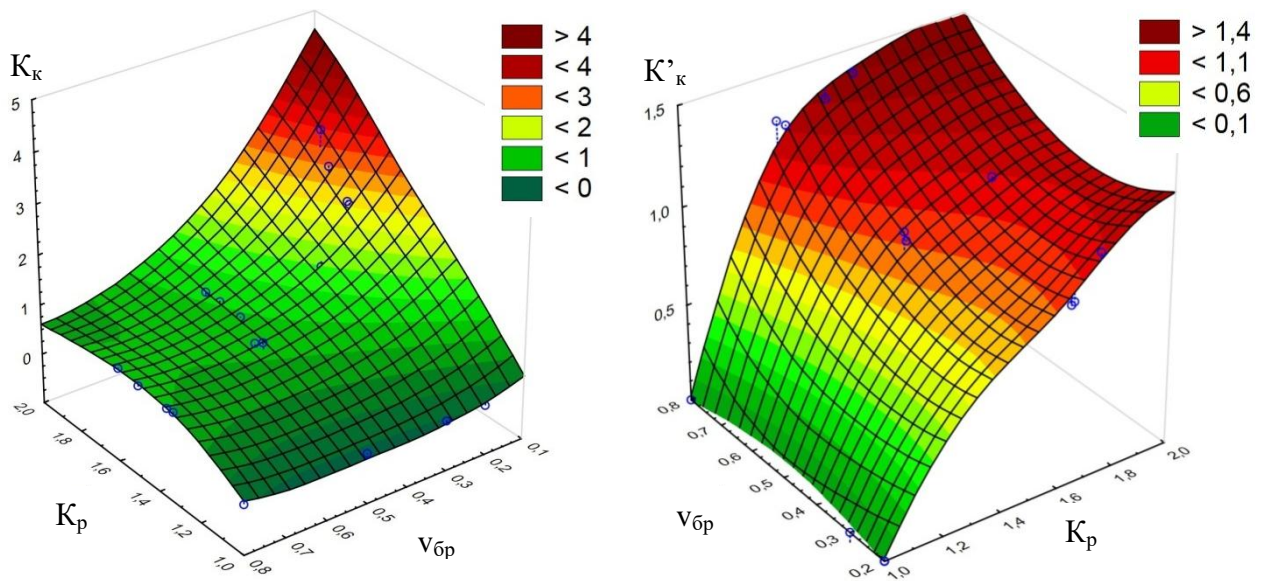


Рисунок 3.11 – Результаты экспериментальных исследований процесса бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве: а – эмпирические зависимости коэффициента увеличения радиуса расширения  $K_k$  от механической скорости бурения - расширения  $v_{бр}=0,2\div 0,8$  м/ч и коэффициента расширения  $K_p=1\div 2$  при диаметре бурения 90 мм и проходке 0,5 м; б – эмпирические зависимости коэффициента увеличения радиуса расширения  $K_k$  от механической скорости бурения - расширения  $v_{бр}=0,2\div 0,8$  м/ч и коэффициента расширения  $K_p=1\div 2$  при диаметре бурения 90 мм и времени бурения – расширения 1 ч.

### 3.4 Выводы по главе 3

1. На созданном стенде для проведения экспериментальных исследований процесса бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве проведены три серии опытов по определению влияния: активной тепловой мощности рабочего органа на скорость бурения плавлением сплошным забоем; осевой нагрузки ТБСР на забой на скорость бурения плавлением; суммарной активной тепловой мощности рабочего органа и циркуляционной системы, механической скорости бурения и производительности насоса на интенсивность расширения скважины в ледовом массиве.

2. Разработанная и изготовленная модель термогидравлического бурового снаряда-расширителя конструкции (патент на изобретение RU

№2700143 С1) для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве работоспособна и пригодна для экспериментального бурения.

3. По результатам экспериментальных данных была получена поверхность для определения коэффициента увеличения радиуса расширения  $K_k$  в диапазоне изменения коэффициента расширения  $K_p$  от 1 до 2 и механической скорости бурения-расширения  $v_{\text{бр}}$  от 0,2 до 0,8 м/ч. Установлена зависимость температуры талой воды на входе в циркуляционную систему  $t_2$  от скорости бурения-расширения  $v_{\text{бр}}$ .

4. Рациональные эксплуатационные параметры процесса бурения плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве с использованием модели ТБСР II достигаются в интервале скоростей бурения – расширения  $v_{\text{бр}}$  0,5-0,8 м/ч, отношением радиуса бурения  $r_{\text{б}}$  к радиусу расширения  $r_p$  1:2 и проходкой  $l$  до 1 м, при этом затрачиваемая тепловая мощность  $Na_{\text{бр}}$  экспоненциально растет с увеличением проходки  $l$  и радиус скважины на верхней границе участка расширения  $r_k$  до двух раз больше конечного радиуса расширения  $r_p$ .

## **ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБРАЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛОСТЕЙ ТЕПЛОВЫМ СПОСОБОМ**

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана технология образования локальных полостей тепловым способом и техническое средство для её реализации [70, 83, 85].

### **4.1 Разработка технологии образования локальных полостей тепловым способом**

Под понятием «образование локальных областей» подразумевается процесс выплавления объема льда необходимой геометрической формы в заданном направлении и исследуемом интервале, а радиус расширения и проходка не превышают одного метра. Выплавление полости в ледовом массиве возможно осуществить за счет контактного бурения плавлением с одновременным или последующим конвективным расширением скважины (участка скважины), либо за счет кавернообразования. В нашем случае, технология бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве реализуется посредством объединения контактного бурения плавлением и конвективного расширения в термогидравлическом буровом снаряде–расширителе [83, 127].

Технология образования локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом реализуется следующим образом. ТБСР спускают в скважину на забой, подается напряжение только на нагревательный элемент пенетратора, при этом происходит процесс контактного бурения плавлением льда. Когда талая вода в процессе углубки снаряда перекроет заборные окна над верхним торцом пенетратора, включается насос и нагревательный элемент центральной двойной трубы. Талая вода всасывается в межтрубном пространстве, при этом происходит ее активный подогрев нагревательным элементом, затем вода попадает в насос, после чего нагнетается им в водонагнетательную трубу, из которой попадает в коллектор и выходит в затрубное пространство через дугообразные каналы. Подогретая вода, выходя из каналов, передает энергию движения талой воде в затрубном пространстве, при этом инициируется закручивание потока, который равномерно оплавляет стенки скважины в радиальном направлении. После чего,

вода попадает в снаряд через заборные окна и цикл повторяется. По завершению процесса электропотребители выключают и транспортируют ТБСР из скважины на поверхность без извлечения талой воды с забоя [80, 81].

Технология бурения с последующим расширением скважин в ледовом массиве подразумевает на первом этапе контактное бурение сплошным забоем, при этом электроэнергия подается только на пенетратор ТБСР, после достижения необходимой проходки пенетратор выключается и начинается второй этап – конвективное расширение, при котором электроэнергия подается на нагревательные элементы циркуляционной системы и насос. Расширение скважин целесообразно производить с малой скоростью подъема ( $v_{\delta} \leq 1 \text{ м/ч}$ ) в направлении снизу-вверх, так как учитывается физическое явление естественной конвекции, при котором более нагретая вода поднимается вверх, что уменьшает теплопотери на рассеивание в боковых стенках и их оплавление. Выбор технологических параметров процесса расширения осуществляется из рекомендаций, данных выше, только необходимо учесть отсутствие затрат тепловой мощности на бурение. Технологические параметры можно определить по методике расчета представленной в разделе 2.3.2.

ТБСР способно в стационарном положении ( $v_{\delta} = 0 \text{ м/ч}$ ) образовывать (выплавлять) каверну, для этого необходимо подать электрическую энергию на нагревательные элементы циркуляционной системы и насос, а нагревательные элементы пенетратора остаются отключенными. Для образования каверны на любой глубине скважины залитой низкотемпературной жидкостью первоначально требуется сооружение ледового моста, что технологически также можно достичь стационарным положением ( $v_{\delta} = 0 \text{ м/ч}$ ) ТБСР, причем плавление боковых стенок производится за счет передачи тепловой энергии в радиальном направлении от пенетратора или подогреваемого циркулирующего теплоносителя либо обоими способами одновременно. В процессе работы ТБСР талая вода (при условии, что низкотемпературная заливочная жидкость гидрофобна и ее плотность меньше плотности воды) будет стекать по стенке скважины и намерзать, постепенно уменьшая диаметр скважины, а в конечном итоге полностью разобьет нижний и



верхний интервалы относительно нижнего торца пенетратора. Время сооружения ледового моста имеет обратную зависимость от температуры ледового массива и прямую от температуры талой воды. После сооружения ледового моста выполняется намеченное выплавление каверны необходимой геометрической формы и объема. Геометрическая форма каверны зависит от времени плавления, тепловой мощности, производительности насоса, расстояния между заборными окнами и гидравлическими каналами, а также от ориентации последних.

Устройство может быть использовано для бурения скважин в ледовом массиве, вскрытия подледниковых водоемов, выплавления каверны для отбора проб газа из ледовой толщи, увеличения рабочего пространства в скважине при боковом отборе керна или забурировании дополнительного ствола, забутовки ствола скважины, нагрева жидкости на отдельном участке скважины, при реализации технологии бурения горячей водой для создания каверны сообщения вспомогательной и основной скважины, рекристаллизации участка скважины в ледовом массиве с нарушенной целостностью (например, трещин гидроразрыва) и других основных или вспомогательных технологических операциях.

При проведении экспериментальных исследований процесса бурения плавлением с одновременным расширением параметры  $v_{\delta} = const$ ;  $Na_{\delta p} = const$ ;  $G = const$  принимались постоянными величинами. С увеличением проходки потери тепловой энергии на рассеивание и оплавление боковых стенок также увеличиваются, а радиус расширения уменьшается. Для достижения заданного радиуса расширения в конечной точке участка бурения-расширения мощность нагревательных элементов пенетратора и циркуляционной системы выбираются исходя из заданной  $l$ . Подбрав мощность циркуляционной системы можно вычислить первоначальный радиус расширения  $r'_p$  (4.1):

$$r'_p = \sqrt{\frac{Na_{\delta p} - Q'_{вб} + (r_{\delta} + 2\delta)^2 \cdot \pi \cdot \rho_l \cdot v_{\delta p} \cdot (\psi_l + c_l \cdot |t_l| + c_e \cdot \frac{t_1 + t_2}{2})}{\pi \cdot \rho_l \cdot v_{\delta p} \cdot (\psi_l + c_l \cdot |t_l| + c_e \cdot \frac{t_1 + t_2}{2})}} \quad (4.1)$$

Определив первоначальный радиус расширения  $r'_p$  можно оценить затраты тепловой мощности на процесс бурения – расширения.

Последовательное решение математического описания, разработанного в Главе 2, с использованием эмпирических данных из Главы 3 позволяет произвести оценку затрат тепловой мощности. В процессе бурения с одновременным расширением скважины в ледовом массиве, как видно из примера на рисунке 4.1, наибольшие затраты тепловой мощности (68,1%) приходятся на расширение, на бурение затрачивается всего 8,22%, потери тепла на границе «талая вода-заливочная жидкость» составляют 23,66%. Анализ расчетных и опытных данных показал, что при изменении температуры льда от  $-60$  до  $0$  °С суммарные затраты тепловой мощности уменьшаются на 20%. На само плавление льда приходится от 50 до 64% от суммарной тепловой мощности в зависимости от температуры льда. С увеличением проходки экспоненциально растет тепловая мощность на расширение, а тепловая мощность на бурение остается постоянной.

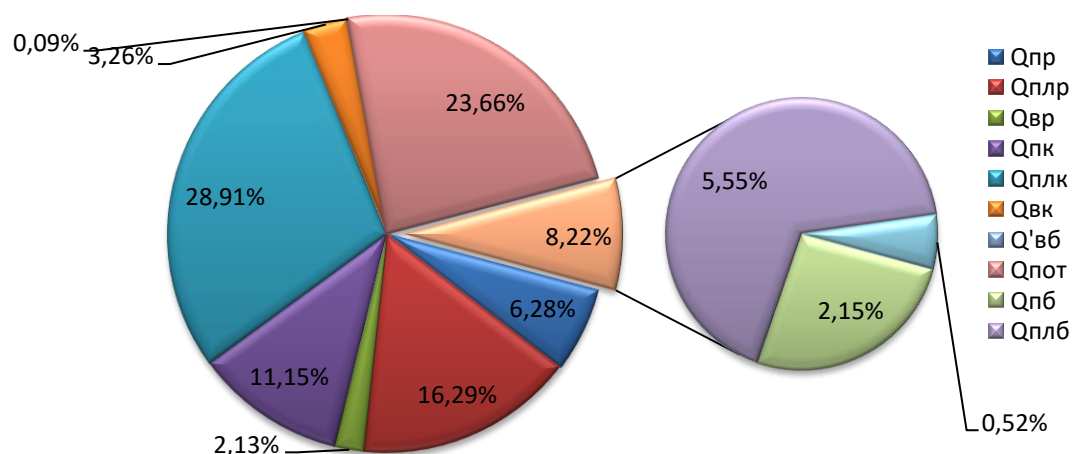


Рисунок 4.1 – Затраты тепловой мощности при бурении плавлением сплошным забоем с одновременным расширением скважины в ледовом массиве при  $r_0=0,045$  мм,  $v_0=0,5$  м/ч,  $l=1$  м,  $K_p = 2$ ,  $G= 0,00028$  м<sup>3</sup>/с,  $P_{сн}=400$  Н,  $t_2=9$  °С,  $t_l= -57$  °С,  $K_k = 0,91$ .  
а – процесс бурения с одновременным расширением; б – бурение.

## 4.2 Разработка термогидравлического бурового снаряда - расширителя

Анализ результатов обзора серийно выпускаемых расширителей и патентного поиска, успешно эксплуатируемых термобуровых и жидкостных снарядов на грузонесущем кабеле, проведенный с учетом специфики технологии ведения буровых работ и используемого оборудования, показал, что ни одна из

известных конструкций не отвечает в полной мере предъявляемым техническим требованиям и не может быть применена при для реализации технологии образования локальных полостей в ледовом массиве.

Основным недостатком рассмотренных технических средств бурения скважин в ледовом массиве является выполнение лишь одной функции (бурения, расширения или кавернообразования), а недостатком механических расширителей является сложность и высокая аварийность механизма перевода расширителя из транспортного положения в рабочее положение и обратно, которое не гарантирует надежность процесса раскрытия и закрытия рабочих органов расширителя. Отсутствие требуемой надежности не исключает возможности застревания расширителя в скважине, а мероприятия по ликвидации аварии приведут к экологическому загрязнению (загрязнение жидкостями растворяющие лед, обрыв оборудования, обрыв грузонесущего кабеля и т.д.) [19]. Образование локальной полости на участке скважины тепловым способом может быть значительно эффективней, чем механическим, но при этом необходимо извлекать на поверхность образующуюся воду. Для того, чтобы вода в водосборном баке снаряда не замерзла во время подъема, ее необходимо постоянно греть электронагревателями. Существует определенная вероятность, что нагревательные элементы могут выйти из строя или произойдет аварийное отключение электропитания всего бурового комплекса. Если снаряд будет находиться на глубинах выше 2000 м, даже при кратковременном прекращении нагрева может произойти замерзание воды и разрушение труб снаряда, что выразится в осложнении или аварии [41, 46]. Поэтому была поставлена задача – спроектировать термогидравлический буровой снаряд-расширитель, отвечающий нижеуказанным техническим требованиям и обеспечивающий технологию ведения работ.

#### **4.2.1 Разработка принципиальной схемы термогидравлического бурового снаряда - расширителя**

Термогидравлический буровой снаряд - расширитель должен отвечать следующим техническим требованиям [80, 81]:

- простота и надежность конструкции;
- легкость монтажа и демонтажа снаряда;
- расширение диаметра скважины в 2-3 раза;
- постоянство диаметра расширенного участка скважины по всей длине;
- скорость бурения плавлением соответствует интенсивности расширения скважины;
- рабочий интервал глубин до 4 000 м;
- потребляемая мощность электроэнергии до 10 кВт;
- количество токоведущих жил – до 8 шт;
- возможность контроля и оперативного управления параметрами бурения и расширения.

Процесс бурения льда осуществляется контактным бурением плавлением сплошным забоем за счет передачи тепловой энергии от нагревателя ледовому массиву [90, 98], а процесс расширения за счет плавления при передаче тепловой энергии от теплоносителя ледовому забою [68]. За конструктивные основы взяты созданные и успешно зарекомендовавшие себя тепловые снаряды ТЭЛГА-14М, ТБЗС, ТБЖС, СГПУ [37, 41, 122]. Основным отличием ТБСР от вышеупомянутых снарядов является применение специального рабочего органа (пенетратора) и циркуляционного отсека с разделенными системами электрического нагрева. Для принудительной циркуляции теплоносителя в призабойной зоне скважины необходим насос [104].

Термогидравлический буровой снаряд–расширитель предназначен для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве [81] и состоит из пяти отсеков, как показано на рисунке 4.2: кабельного замка 1, электрического отсека 2, насосного отсека 3, циркуляционного отсека 4 и рабочего органа 5.

Для крепления снаряда к грузонесущему кабелю используется стандартный кабельный замок. В электрическом отсеке выполняется соединение токоведущих жил грузонесущего кабеля с энергопотребителями снаряда. Так же в нем

закреплен датчик осевой нагрузки на забой и электронный блок для оперативного управления снарядом [81].

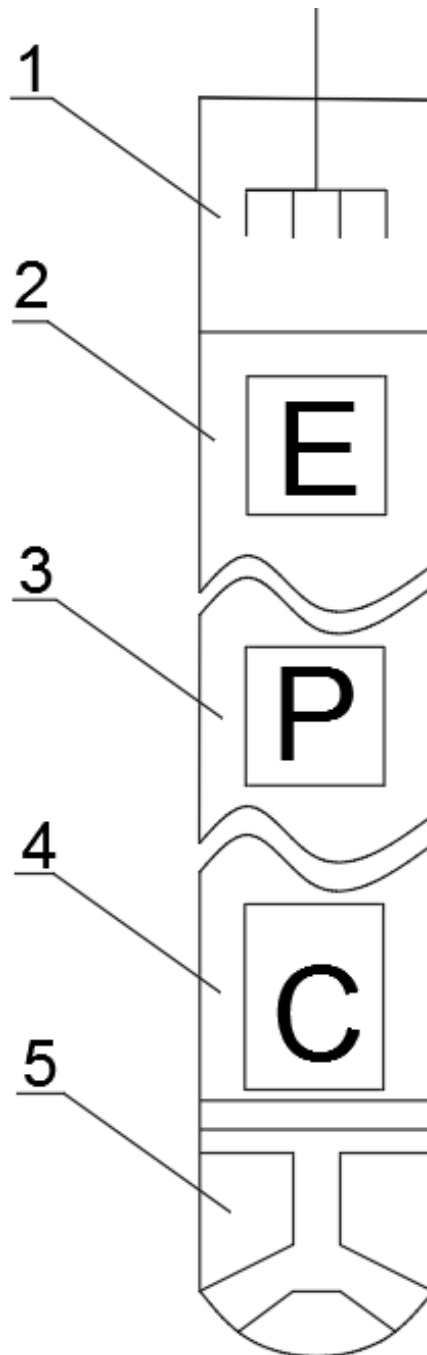


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема термобурового снаряда  
(рисунок выполнен без соблюдения масштаба)

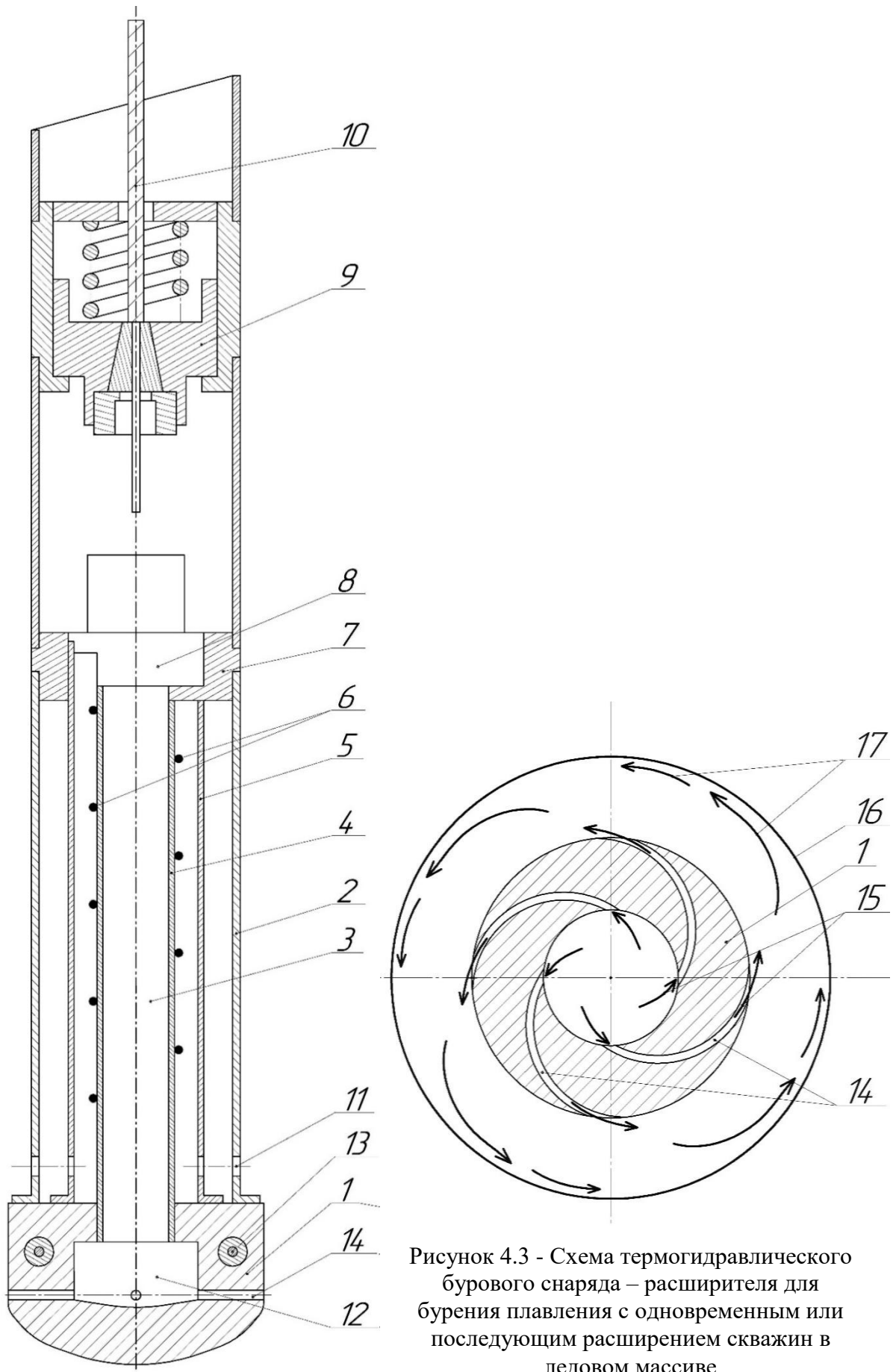


Рисунок 4.3 - Схема термогидравлического бурового прибора – расширителя для бурения плавления с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве

#### 4.2.2 Разработка конструкции термогидравлического бурового снаряда-расширителя

Термогидравлический буровой снаряд–расширитель для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве (рисунок 4.3) включает кабельный замок 9 для крепления его на грузонесущем кабеле 10, цилиндрический корпус 2, в нижней части которого выполнены заборные горизонтальные окна 11. В корпусе 2 размещён насосный отсек 7, с установленным в нем насосом 8. Нижняя часть насосного отсека 7 жестко закреплена с центральной двойной трубой 3, состоящей из наружной водоподъемной трубы 5 и внутренней водонагнетательной трубы 4 с закрепленными на ее внешней стороне нагревательным элементом 6, который представляет собой нагревательный кабель.

Формирующий забой рабочий орган 1 жестко болтовыми соединениями крепится к корпусу 2. Рабочий орган 1 выполнен в форме цилиндра с закругленными нижними краями и сплошной торцевой поверхностью. Внутри рабочего органа 1 выполнен коллектор 12. В нижней части рабочего органа 1 из коллектора 12 выполнены дугообразные каналы 14, выходящие на поверхность рабочего органа 1, расположенные диаметрально противоположно относительно друг друга. Внутри рабочего органа 1 жестко закреплён кольцевой нагревательный элемент 13.

Дугообразные каналы 14 малого диаметра (4-5 мм) выполнены таким образом, что подвод нагретого теплоносителя 15 к стенкам скважины 16 осуществляется тангенциально. Наличие коллектора 12 и выполненные в нем дугообразные каналы 14 способствуют созданию вихревого потока 17 по типу «сегнерова колеса» и равномерной подачи нагретого теплоносителя 15 к стенкам скважины 16, что обеспечивает постоянство диаметра по всем радиальным направлениям [70, 80, 81]. Именно закрученный вихревой поток позволяет обеспечить кольцевую призабойную циркуляцию теплоносителя.

### 4.2.3 Принцип работы термогидравлического бурового снаряда–расширителя.

Работа термогидравлического бурового снаряда–расширителя осуществляется следующим образом. После постановки ТБСР на забой подается напряжение на нагревательный элемент 13 рабочего органа 1 при выключенном насосе 8, при этом происходит контактное плавление льда. Когда талая вода в процессе проходки снаряда перекроит заборные окна 11 над верхним торцом рабочего органа 1, включается насос 8 и нагревательный элемент 6 центральной двойной трубы 3. Вода поднимается по водоподъемной трубе 5, при этом нагревается за счет отдачи тепловой энергии нагревательным элементом 6, и попадает в насос 8, после чего подается насосом 8 в водонагнетательную трубу 4, из которой попадает в коллектор 12, также забирая часть тепловой энергии от рабочего органа 1, и выходит в затрубное пространство через дугообразные каналы 14. Подогретая вода, выходя из каналов 14, оплавляет стенки скважины 16, при этом тепловая энергия затрачивается на прогрев льда до температуры фазового перехода и его плавление. После чего вода попадает в снаряд через заборные окна 11 и цикл повторяется. Таким образом осуществляется призабойная циркуляция теплоносителя 15, при этом происходит его постоянный нагрев [80, 81].

Ориентация именно дугообразных каналов 14 обеспечивает закручивание потока теплоносителя 15 вокруг оси скважины по типу «сегнерова кольца», что приводит к равномерному воздействию и распространению гидродинамических и тепловых потоков в призабойной зоне [83, 85].

При выключенном насосе 8 устройством можно производить только бурение плавлением скважины без ее расширения, в этом случае скорость проходки достигает максимальных значений, так как затраты тепловой энергии направлены на процесс бурения, а нагревательный элемент 6 и насос 8 отключены. При стационарном размещении теплового снаряда на заданной глубине можно производить образование локальной полости (каверны) минимальной по высоте и максимальной по простиранию.



Интенсивность расширения скважины во время бурения-расширения зависит от температуры ледника, мощности нагревательных элементов и производительности насоса. При известных значениях названных параметров объём расплавленного льда за единицу времени определяется по разности температур выходящего и входящего теплоносителя. Температура выходящего потока медленно падает во времени, а температура входящего теплоносителя зависит от диаметра расширения и определяется аналитически. Производительность насоса влияет на время плавления, форму и объём каверны, поскольку от интенсивности циркуляции теплоносителя в снаряде зависит его температура. Поэтому во внимание принимается не температура входящего потока, а разность температур [98].

На данную конструкцию термогидравлического снаряда-расширителя получен патент на изобретение RU № 2700143 С1 [70].

#### **4.2.4 Разработка рабочего органа термогидравлического бурового снаряда-расширителя**

В работах В.К. Чистякова, В.А. Чугунова и др. [89, 91, 92] теоретически показано, что наиболее оптимальной формой рабочей поверхности пенетратора является параболическая, а в работах Б.Б. Кудряшова [41, 42, 48], В.С. Литвиненко [59] и А.М. Шкурко [93] утверждается, что также требуются цилиндрические торцевые поверхности для разработки ствола скважины. В случае бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве пенетратор имеет параболическую форму рабочей поверхности с параметром цепной линии  $b = 0.04 \div 0.50$ , а также в нем отсутствуют цилиндрические торцевые поверхности [56, 74, 81], что минимизирует теплопотери.

Рабочий орган представляет собой пенетратор с установленным в нем нагревательным элементами и выполненным в нем коллектором, причем в нижней части коллектора по периметру выполнены гидравлические дугообразные каналы малого диаметра до 5 мм круглого сечения для подвода теплоносителя в

призабойную зону и создания вихревого потока (кольцевой циркуляции). Дугообразные гидравлические каналы выполнены таким образом, что выходящая турбулентная струя достигает стенки скважины под углом менее 45 градусов к касательной стенки. Достигая стенки скважины, струя движется вдоль нее по винтовой линии и возвращается в циркуляционную систему для подогрева. Увеличение энергоэффективности пенетратора можно достичь за счет конструирования его без углов, все поверхности должны быть сглажены, так как в острых местах образуются точки концентрации тепловой энергии, а распределение энергии в самом пенетраторе происходит неравномерно. Исходя из опыта предыдущих лет, самой эффективной формой пенетратора является параболическая форма нижнего торца [41, 42, 45]. Для повышения эффективности процесса бурения с одновременным расширением сразу после параболической части нижнего торца выполнены гидравлические каналы, чтоб избежать контактного плавления боковых стенок скважины [104, 140].

Диаметр пенетратора выбирается исходя из необходимого диаметра бурения. Во избежание лишнего прогрева теплоносителя в призабойной зоне боковые стенки пенетратора следует теплоизолировать, чтоб вся вырабатываемая тепловая энергия направлялась внутрь пенетратора.

Учитывая сложность выполнения гидравлических каналов заданной дугообразной траектории в механических мастерских, пенетратор должен состоять из двух частей, скрепляемых между собой жестко болтовым соединением. Первая часть пенетратора представляет собой полый цилиндр, вторая часть имеет нижний торец параболической формы, а на верхнем торце выполнены гидравлические каналы. Также в обеих частях пенетратора выполнены направляющие для центрирования при монтаже.



Рисунок 4.4 – Пенетратор



Рисунок 4.5 - Пенетратор

### 4.3 Выводы по главе 4

1. Разработанные технологии бурения с одновременным расширением скважин, бурения с последовательным расширением скважин и кавернообразования тепловым способом в ледовом массиве позволяют образовывать (выплавлять) локальную полость различной геометрической формы с помощью термогидравлического бурового снаряда-расширителя на грузонесущем кабеле.

2. Конструкция термогидравлического бурового снаряда-расширителя выполнена на высоком технологическом и техническом уровнях и позволяет проводить бурение плавлением с одновременным или последовательным расширением скважин для образования локальных полостей в ледовом массиве с возможностью контроля и оперативного управления режимными параметрами процесса бурения-расширения.

3. Рабочий орган термогидравлического бурового снаряда-расширителя представляет собой пенетратор параболической формы (тело цепной линии с параметром  $b = 0,05$ ) из металла, обладающего высокой теплопроводностью (медь, алюминий), с установленным в нем нагревательным элементом, а также включающий коллектор и гидравлические каналы для закручивания потока теплоносителя вокруг оси скважины в призабойной зоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы и рекомендации:

1. Теоретически обоснована и научно подтверждена необходимость разработки технологии и техники бурения сплошным забоем с одновременным или последовательным расширением скважин в ледовом массиве тепловыми буровыми снарядами на грузонесущем кабеле.

2. Образование локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом термогидравлическим буровым снарядом-расширителем на грузонесущем кабеле не требует больших энергетических затрат, массивного и дорогостоящего оборудования, что делает этот способ выгодно отличающимся от альтернативных в условиях сурового климата, отдаленности объекта исследования и отсутствия транспортных сообщений.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана математическая модель процесса бурения сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом, позволяющая определить основные технологические параметры: скорость бурения-расширения, тепловую мощность пенетратора и циркуляционной системы, конечный радиус расширения скважины, температуру поверхности пенетратора, температуру жидкости на выходе и входе в циркуляционную систему.

4. Создана физическая модель термогидравлического бурового снаряда-расширителя (патент на изобретение RU №2700143С1), позволяющая проводить экспериментальные исследования процесса бурения сплошным забоем с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом.

5. Закручивание потока жидкости вокруг оси термогидравлического бурового снаряда-расширителя с постоянным ее подогревом позволяет расширять скважину равномерно в радиальном направлении. Экспериментально установлено, что создание призабойной кольцевой циркуляции теплоносителя достигается ориентацией гидравлических каналов в диапазоне 27 – 45 градусов между осью струи и касательной к периметру пенетратора.

6. Дано определение термину «призабойная кольцевая циркуляция» – это разновидность призабойной (местной) схемы циркуляции теплоносителя или очистного агента, при которой реализуется вращательное (закрученное) движение жидкости вокруг оси на забое в кольцевом зазоре между буровым снарядом и стенкой скважины с минимальным осевым перемещением.

7. Проведенные исследования подтвердили работоспособность конструкции термогидравлического бурового снаряда расширителя и пути ее дальнейшего совершенствования:

- повышение эффективности нагрева жидкости в циркуляционной системе;
- проведение комплексных гидродинамических исследований процесса образования кольцевой циркуляции в призабойной зоне скважины;
- уменьшение непроизводительных потерь тепловой энергии при расширении скважины в ледовом массиве;
- совершенствование системы управления термогидравлическим буровым снарядом-расширителем для достижения заданной формы участка расширения;
- разработка технологии кавернообразования и строительства ледовых мостов.

Перспективным направлением развития научных исследований по тематике диссертации является создание математической модели процесса бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве методом плавления на основе системы уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, а также уравнений состояния, учитывая граничные условия Стефана; разработка системы контроля термогидравлического бурового снаряда-расширителя на основе оптоволоконных и акустических технологий для оперативного управления процессом вскрытия подледниковых озёр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, П.Г. Свойства кремнийорганических жидкостей: Справочник / П.Г. Алексеев, И.И. Скороходов, П.И.Поварихин. – М. : Энергоатомиздат, – 1997. – 328 с.
2. Алехина, И. А. Проблемы защиты окружающей среды и экологического мониторинга в проектах изучения подледниковых озер Антарктиды / Алехина И. А., Васильев Н. И., Липенков В. Я. // Лед и снег. – 2012. – Т.52. №4. С.104–114. doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-104-114.
3. Архипов, В.А. Курс лекций по теории и практике закрученных потоков. Часть 1 (лекции 1-5). / Архипов В.А . – Томск: Томский государственный университет, 1999. – 60 с
4. Барков, Н. И. Первая скважина на станции Восток / Барков Н. И. // Лед и снег. – 2012. – Т.52. №4. С.9–11.
5. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. - 4-е изд., стереотипное, перепечатка со второго издания 1982 г. - М: «Издательский дом Альянс», 2010. - 423 с.:
6. Беляев, В.В. Разработка электронной базы данных очистных агентов для бурения скважин в мерзлых породах и льдах / В.В. Беляев, П.Г. Талалай, В.К. Чистяков // V Международный симп. по бурению скважин в осложненных условиях: Тез. докл., Санкт-Петербург, 11-15 июня 2001 г. – СПб. : СПГГИ, 2001. – С. 5.
7. Бирюк, В.В. Вихревой эффект. Технические приложения / В.В. Бирюк, С.В. Веретенников, А.И. Гурьянов, Ш.А. Пиралишвили // М.: ООО «Научтехлитиздат» – 2014.–Т.2.–Ч.1.– 287 с., Ч.2.– 213 с.
8. Блинов, К.В. Прогнозирование сужения ствола скважины при глубоком бурении в ледниках / К.В. Блинов, П.Г. Талалай // Третий международный симп. по бурению скважин в осложненных условиях: Тез. докл., Санкт-Петербург, 5-10 июня 1995. – СПб. : СПГГИ, 1995. – С. 5.



9. Бобин, Н.Е. Механическое бурение скважин во льду: Учеб. пособие / Н.Е. Бобин, Н.И. Васильев, Б.Б. Кудряшов, Г.К. Степанов, П.Г. Талалай. – Л. : ЛГИ, 1988. – 90 с.
10. Богородский, В.В. Лед: Физические свойства. Современные методы гляциологии / В.В. Богородский, В.П. Гаврило. – Л. : Гидрометеиздат, 1980. – 384 с.
11. Болтенко, Э.А. Интенсификация теплосъема в парогенерирующих каналах с закруткой и транзитным потоком / Болтенко Э.А. // Тр. Первой Рос. Нац. конф. по теплообмену. Интенсификация теплообмена. М.Изд.-во МЭИ, 1994. Т.8. С.27.
12. Большунов, А.В. Перспективное технологическое решение по отбору проб донных отложений подледникового озера Восток: актуальность и постановка задач исследований / Большунов А. В., Васильев Н. И., Тимофеев И. П., Игнатьев С. А., Васильев Д. А., Лейченков Г. Л. // Записки Горного института. – 2021. – №252. С. 779-787.
13. Васильев, Н. И. Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции «Восток» / Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Блинов П. А. // Вестник Отделения наук о Земле Российской академии наук. – 2012. – Т.4. doi.org/10.2205/2012NZ000111
14. Васильев, Н.И. Бурение скважин во льду с целью получения кернов древнего льда / Васильев Н.И., Липенков В.Я., Дмитриев А.Н., Большунов А.В., Туркеев А.В., **Сербин Д.В.**, Игнатьев С.А // III Международная научно – практическая конференция «Бурение скважин в осложненных условиях» 8-9 ноября 2018 г: Тезисы докладов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2018. С. 20-21
15. Васильев, Н.И. Возможность применения технологии бурения скважин во льдах горячей водой на станции Восток (Антарктида) / Васильев Н.И., Подоляк А.В., Большунов А.В., Дмитриев А.Н., **Сербин Д.В.** // II Международная научно – практическая конференция «Бурение скважин в осложненных условиях» 30 октября-1 ноября 2017 г: Тезисы докладов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2017. С. 18-19

16. Васильев, Н.И. Глубокое бурение антарктического ледникового покрова как метод исследования палеоклимата / Васильев Н.И. // Проблемы исследования Арктики и Антарктики. Л.: ААНИИ. – 2007. – № 76. – С. 78–88
17. Васильев, Н.И. Исследование системы удаления и сбора шлама при бурении скважин во льду электромеханическими снарядами на грузонесущем кабеле / Н.И. Васильев, П.Г. Талалай // Методика и техника разведки. – 1995. – №4 (142). – С.97-104
18. Васильев, Н.И. К вопросу о критической скорости теплоносителя (воды) / Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., **Сербин Д.В.** // II Международная научно – практическая конференция «Бурение скважин в осложненных условиях» 30 октября-1 ноября 2017 г: Тезисы докладов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2017. С. 50-51
19. Васильев, Н.И. Ликвидация осложнений и аварий при бурении глубоких скважин в ледниках. / Васильев Н.И., Талалай П.Г., Зубков В.М., Красилев А.В., Зубков М.В // Записки Горного института. – 2008. – Т.178, С. 181-187.
20. Васильев, Н.И. Рациональная технология бурения скважин в ледовых массивах с использованием электромеханического снаряда на кабеле / Васильев Н.И. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – СПб: СПГИ (ТУ), 2004. – 213 с.
21. Васильев, Н.И. Результаты и особенности бурения скважины 5Ги первого вскрытия озера Восток / Васильев Н.И., Липенков В.Я., Дмитриев А.Н., Подоляк А.В., Зубков В.М. // Лёд и Снег. 2012. №52(4). С.12-20. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-12-20>
22. Васильев, Н.И. Спускоподъемное устройство с полиспастной системой для исследования подледникового озера «Восток» / Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Подоляк А.В., Большунов А.В, **Сербин Д.В.** // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 9 (51) Часть 2. — С. 137—140. [doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.062](https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.51.062)
23. Вейнберг, Б.П. Лед. Свойства, возникновение и исчезновение льда / Вейнберг Б.П. М.-Л.: Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1940. — 522 с.

24. Ветров, Ю.А. Разрушение прочных грунтов // Ветров Ю.А., Баладинский В.Л., Баранников В.Ф., Кукса В.П. – Киев: Будивельник, 1972. – 35 с.
25. Винников, С.Д., Физика вод суши / Винников С.Д., Викторова Н.В. - Изд.2-е СПб.:изд.РГГМУ , 2009.-430с.
26. Гатапова, Н.Ц. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента [Электронный ресурс]: учебное пособие / Н.Ц. Гатапова, А.Н. Колиух, Н.В. Орлова, А.Ю. Орлов. – Тамбов, 2014. – 77 с .  
(<https://www.tstu.ru/book/elib2/pdf/2014/gatapova1.pdf>)
27. Гладков, М.Г., Фёдоров Б.А. Исследования механических свойств морского льда методом одноосного сжатия / Гладков М.Г., Фёдоров Б.А. // Тр. ААНИИ. – 1984 – Т. 386, С. 44-52.
28. Глебов, А.И. Аналитическое определение силы резания льда / Глебов А.И. // Тр. НИИВТ, 1983, вып. 164, С. 51-58.
29. Горская, Л.В. Математическая статистика с элементами теории планирования эксперимента: учеб. Пособие / Л.В. Горская, В.Н. Пиунова, В.С. Смирнова. Саратовский политех. институт, 1975, 103 с.
30. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия. Изд. стереотип. / Гухман А.А. - 2018. - 296 с.
31. Двойников, М.В. Тепловой способ бурения скважин в ледовом массиве / М.В. Двойников, В.Л. Трушко, А.Н. Дмитриев, Е.Ю. Цыгельнюк, **Д.В. Сербин** // Сборник трудов I-ой Международной междисциплинарной научно – практической конференции «Человек в Арктике», - СПб, - 2022 г. - С. 7-14.
32. Дмитриев, А.Н. К вопросу температурного режима скважины 5Г вблизи границы скважина – подледниковое озеро «Восток» / Дмитриев А.Н., Туркеев А.В., **Сербин Д.В.** // Материалы Международной научно – практической конференции, «ЛЕМА», 2016. С. 37-40
33. Дмитриев, А.Н. Особенности технологии экологически безопасного вскрытия озера «Восток» в Антарктиде и технические средства для ее реализации / Дмитриев А.Н., Васильев Н.И., Подоляк А.В., **Сербин Д.В.** // Материалы

Международной научно – практической конференции . ISBN 978-5-00105-070-4 «ЛЕМА», 2016. С. 13-14

34. Дмитриев, А.Н. Оценка процесса замерзания озёрной воды в приконтактном участке ствола скважины 5Г с подледниковым озером Восток, (Антарктида) / Дмитриев А.Н. **Сербин Д.В.**, Большунов А.В. // Вестник Международной академии холода. – 2017. – № 62. С. 73-77.

35. Захаренков, А.В. Экспериментальный стенд для исследования теплогидравлических характеристик модельных элементов тепловыделяющих сборок / Захаренков А.В., Комов А.Т., Варава А.Н. и др. // Вестник МЭИ – 2013. – №2 С.39-45

36. Зеленчук, А.В. Зонды для исследования ледяных и подлёдных сред планет. / Зеленчук А.В., Крыленков В.А. // *Лёд и Снег*. – 2019. – Т.59 №1 С.123-134. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-123-134.

37. Земцов, А.А. Комплекс технических средств для отбора проб на углеродный анализ из ледовых толщ / Земцов А.А., Меньшиков Н.Г. // Записки Горного Института. – 1988. – Т.116. С. 78-81.

38. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.

39. Козлов, Д.В. Моделирование ледовых явлений: учебное пособие. / Козлов Д.В.– М., 2020. – 145 с.

40. Кудряшов, Б. Б. К методике приближенного решения некоторых задач горной теплофизики. / Кудряшов Б. Б., Саламатин А. Н., Чугунов В. А. // Записки Горного института. – 1973 – Т.66 № 1. С. 38.

41. Кудряшов, Б. Б. Бурение скважин плавлением. / Кудряшов Б. Б., Чистяков В. К., Литвиненко В. С. // Записки Горного института. – 1991. – Т. 125. С. 109.

42. Кудряшов, Б.Б. Основы теории асептического вскрытия подледникового озера Восток. / Кудряшов Б. Б., Дмитриев А. Н., Васильев Н. И. // Записки Горного института. – 2001.– Т. 148 № 2. С. 155

43. Кудряшов, Б.Б. Принципы расчета параметров бурения с одновременным замораживанием проходимых пород. / Кудряшов Б. Б., Чистяков В. К. // Записки Горного института. – 1969. – Т. 57 № 2. С. 70.
44. Кудряшов, Б. Б. Теплообменные процессы при стерильном отборе проб из ледового керна для микробиологических исследований. / Кудряшов Б. Б., Бобин Н. Е. // Записки Горного института. – 1976. – Т. 71 № 2. С. 30.
45. Кудряшов, Б.Б., Закономерности процесса глубокого теплового бурения скважин во льду. / Кудряшов Б. Б., Шкурко А. М. // Записки Горного института. – 1982 – Т. 93. С. 13
46. Кудряшов, Б.Б. Бурение ледникового покрова Антарктиды тепловым способом / Б.Б. Кудряшов, В.К. Чистяков, В.А. Морев // 25 лет Советской антарктической экспедиции. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – С. 149-158.
47. Кудряшов, Б.Б. Анализ теплообменных процессов при бурении-плавлении льда паровым конденсатором / Кудряшов Б.Б., Соловьев Г.Н. // Записки Горного Института. – 1981. – Т.86. С.111.
48. Кудряшов, Б.Б. Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород / Б.Б. Кудряшов, В.К. Чистяков, В.С. Литвиненко. – Л. : Недра, 1991. – 295 с.
49. Кудряшов, Б.Б. Закономерности опережающего забой замораживания при бурении скважин с промывкой холодоносителем. / Кудряшов Б.Б. // Записки Горного института. – 1973г. – Т. 66 № 1. С. 33.
50. Кудряшов, Б.Б. Основы теории и расчет процесса бурения льда жидкостным тепловым снарядом / Б.Б. Кудряшов, В.В. Никишин // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые: Межвуз. науч. темат. сб. – Вып. 22. – Екатеринбург, изд. УГГА, 1999. – С. 108-114.
51. Кудряшов, Б.Б. Расчет скорости колонкового бурения плавлением с помощью жидкого теплоносителя / Кудряшов Б.Б., Меньшиков Н.Г. // Записки Горного Института. – 1993. – Т.136. С.6.

52. Лезин, Д.Л. Разрушение льда резанием / Лезин Д.Л. // Тр. НИИВТ – 1977. – Вып. 126, С. 16-26.
53. Липенков, В.Я. Особенности строения ледникового покрова Антарктиды и физико-географические условия его формирования в позднем плейстоцене / Липенков, В.Я. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. - Ленинград, 1988. - 234 с.
54. Липенков, В.Я. Температура плавления льда и газосодержание воды на контакте ледника с подледниковым озером Восток / Липенков В.Я., Туркеев А.В., Васильев Н.И., Екайкин А.А., Полякова Е.В // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2021. – Т. 67. № 4. С. 348–367. doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-4-348-367
55. Литвиненко, В. С Исследования и разработки прогрессивных технологий бурения скважин в осложненных условиях. / Литвиненко В. С., Кудряшов Б. Б., Николаев Н. И., Нифонтов Ю. А., Чистяков В. К, Шелковников И. Г., Яковлев А. М., Козлов А. В., Васильев Н. И., Зубков В. М., Дмитриев А. Н., Соловьев Г. Н., Талалай П. Г., Никишин В. В., Танинский П. Ю., Цыгельнюк Е. Ю. // Записки Горного института. – 2001. – Т. 147. С. 30.
56. Литвиненко, В. С. Разработка породоразрушающего инструмента для бурения скважин во льду / Литвиненко В. С., Васильев Н. И. // Записки Горного института. – 2012. – Т. 197. С. 15–20.
57. Литвиненко, В. С. Уникальные техника и технологии бурения скважин во льдах Антарктиды / Литвиненко В. С. // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 5–10.
58. Литвиненко, В.С. Анализ и расчёт процесса бурения горных пород плавлением / Литвиненко В.С., Кудряшов Б.Б. // В сб.: Совершенствование методов разведки и добычи полезных ископаемых Крайнего Севера. Сыктывкар, Коми филиал АН СССР, 1988.- С.6-19.
59. Литвиненко, В.С. Теоретические и экспериментальные основы бурения горных пород плавлением / В.С. Литвиненко // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 1991. - 357 с.

60. Любченко, Е.А. Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. Часть 1./ Любченко Е.А., Чуднова О.А. // Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. – 156 с.
61. Макаричев, Ю.А. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н. // Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с
62. Маковой, Н. Гидравлика бурения. / Маковой Н. - Пер. с РУМ.- М.: Недра, 1986.- 536 с.
63. Маэно, Н. Наука о льде. / Маэно Н. - М.: Мир, 1988. 231 с
64. Местные сопротивления трубопроводов [Электронный ресурс] <https://poznayka.org/s91262t1.html>
65. Михеев, М. А. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. / Михеев М. А., Михеева И. М. - М., «Энергия», 1977. 344 с
66. Морев, В.А. Экспериментальные работы по бурению холодных покровных ледников термобуровыми снарядами ААНИИ / В.А. Морев, В.А. Пухов // Труды ААНИИ. – 1981. – Т. 367. – С. 64-68.
67. Морев, В.А. Электротермобуры для бурения скважин в ледниковом покрове / В.А. Морев // Материалы гляциологических исследований. – 1976. – Вып. 28. – С. 118-120.
68. Никишин, В.В. Основы технологии бурения скважин во льду жидкостным термоэлектробуровым снарядом / Никишин В.В. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб: СПГГИ (ТУ), 1999. – 121 с.
69. Осипов, П.Ф. Гидравлические и гидродинамические расчеты при бурении скважин: Учебное пособие / П.Ф. Осипов. – Ухта: УГТУ, 2004. – 71 с.
70. Патент № 2700143 С1 РФ. Тепловой снаряд для бурения плавлением / Н. И. Васильев, Д. В. Сербин, А. Н. Дмитриев, А. В. Большунов. Опубл. 12.09.2019. Бюл. № 26.
71. Пашкевич, В.М. Исследование устойчивости ствола глубокой скважины в ледовом массиве / Пашкевич В.М., Чистяков В.К. // Записки Горного института. – 1981. – Том 86. С. 16. -.

72. Пиралишвили, Ш.А. Вихревой эффект / Ш.А. Пиралишвили.–М.: ООО «Научтехлитиздат», 2013.–Т.1.–342 с.
73. Подоляк, А.В. Обоснование и разработка технологии опробования льда бурением дополнительных стволов скважин снарядами на грузонесущем кабеле / Подоляк А.В. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб: НМСУ «Горный», 2014. – 128 с.
74. Путиков, О.Ф. Сравнительная характеристика эффективности пенетраторов различной формы для термического бурения. / Путиков О. Ф., Литвиненко В. С. // Записки Горного института, – 1993. – Т.136 С. 21.
75. Реброва, И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие. / Реброва И.А. – Омск: СибАДИ, 2010. – 105 с.
76. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство / Румшинский Л.З. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
77. Савельев, Б.А. Строение и состав природных льдов / Савельев Б.А. – М.: Изд-во МГУ. 1980. 280 с.
78. Савин, И. Ф. Основы гидравлики и гидропривод: Учебник для строительных техникумов. / Савин И. Ф., Сафонов П. В. — М.: Высш. школа, 1978. 222 с.
79. **Сербин, Д.В.** Технологии и техника бурения скважин во льдах тепловым способом / **Д.В. Сербин**, И.С. Моисеенко, В.С. Шадрин. // Молодой ученый. — 2021. — № 27 (369). — С. 63-69.
80. **Сербин, Д.В.** Тепловой снаряд для бурения плавлением с одновременным расширением ледовых скважин / **Сербин Д.В.**, Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Большунов А. В. // Новые идеи в науках о Земле: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. М.: Изд-во МГРИ, 2019. С. 297–300.
81. **Сербин, Д.В.** Устройство для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин во льду / **Сербин Д.В.**, Дмитриев А. Н., Васильев Н. И. // Науки о Земле и недропользование. – 2021. – Т. 44. № 3. С. 204–216 doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343
82. **Сербин, Д.В.** Предотвращение образования эмульсии при вскрытии подледниковых водоемов / **Сербин Д.В.** // Известия УГГУ. – 2021. – Вып. 3 (63).



С. 80–88. DOI 10.21440/2307-2091-2021-3-80-88

83. **Сербин, Д.В.** Тепловой снаряд для экологически безопасного вскрытия подледникового озера Восток (Антарктида) / **Сербин Д.В.**, Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Большунов А.В. // III Международная научно – практическая конференция «Бурение скважин в осложненных условиях» 8-9 ноября 2018 г: Тезисы докладов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2018. С. 110-111

84. **Сербин, Д.В.** Технология экологически безопасного вскрытия тепловым способом подледникового озера Восток в Антарктиде / **Сербин Д.В.**, Васильев Н.И., Большунов А. В., Дмитриев А. Н., Подоляк А.В. // Международная научно-практическая конференция «Бурение 2017» 22 декабря 2017 г: Тезисы докладов / Монголия, МУШУТИС, 2017. С. 146-147

85. **Сербин, Д.В.** Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра / **Д.В. Сербин**, А.Н. Дмитриев // Записки Горного института. – 2022. – Т.257. – С. 833-842.

86. Талалай П. Г. Вскрытие озера Восток: шаг вперед — два шага назад? // Природа. 2012. №7. С. 3–13.

87. Талалай, П. Г. Научно-практические основы эффективной и экологически чистой технологии бурения глубоких скважин в ледниках / Талалай П. Г. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.- Санкт-Петербург, 2007.- С. 304.

88. Харитонов, В.В. Метод исследования внутреннего строения торосов и стамукх с помощью технологии термобурения / Харитонов В.В, Морев В.А.// Метеорология и гидрология. – 2011.- № 7, С. 49–58.

89. Чистяков, В.К. Анализ процесса контактного плавления при бурении скважин для сред с нелинейными теплофизическими и реологическими характеристиками. / Чистяков В.К., Чугунов В.А. // Записки Горного института. 1993. Том 136. С. 31.

90. Чистяков, В.К. Бурение-плавление горных пород. / Чистяков В.К. // Записки Горного института. – 1982. – Т. 93. С. 66.
91. Чистяков, В.К. Исследования влияния формы нагревателя на скорость бурения-плавления горных пород. / Чистяков В.К., Чугунов В.А. // Записки Горного института. – 1976. – Т. 71. С. 59.
92. Чистяков, В.К. Математическая модель процессов тепло- и массопереноса при бурении горных пород плавлением. / Чистяков В.К. // Записки Горного института. – 1985. – Т. 105.-С. 86.
93. Чистяков, В.К. Теоретические и экспериментальные основы бурения скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород / Чистяков, в.к. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук - Санкт-Петербург, : СПГИ (ТУ), 1995. - 397 с.
94. Чистяков, В.К. Экспериментальные буровые работы на Северной Земле в 1975-1985 гг. / Чистяков В.К., Шкурко А.М., Земцов А.А. и др.// Географические и гляциологические исследования в полярных странах. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – С. 33-42
95. Чистяков, В.К. Экспериментальный стенд для исследования устойчивости ствола скважины при бурении в ледниковом покрове / Чистяков В.К., Пашкевич В.М. // Записки Горного Института. 1976. № 2 (71). С. 42.
96. Чубинский, А.Н. Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов / А.Н. Чубинский, Д.С. Русаков, И.М. Батырева, Г.С. Варанкина // СПб. : СПбГЛТУ, 2018.– 109 с.
97. Шамшев, Ф.А. Технология и техника разведочного бурения: Учебник для вузов/ Ф.А. Шамшев, С.Н. Тараканов, Б.Б. Кудряшов и др. – Изд. 3-е, перераб. и доп.- М.: Недра, 1983. –565 с.
98. Шкурко, А.М. Основы теории и практики бурения плавлением в ледовых отложениях Антарктиды / А.М. Шкурко // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – СПб: СПГИ (ТУ), 1998. – 249 с.
99. Шумский, П.А. Основы структурного ледоведения. / Шумский П.А. – М.: Изд-во АН СССР, 1965. 317 с.

100. Юдин, Ю. В. Организация и математическое планирование эксперимента : учебное пособие / Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе, Ф. В. Водолазский. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 124 с.
101. Яворский, Н. И. Теория затопленных струй и следов / Н. И. Яворский; Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе. - Новосибирск : Ин-т теплофизики СО РАН, 1998. - 242 с.
102. Benson, T. IceCube Enhanced Hot Water Drill functional description / Benson T., Cherwinka J., Duvernois M., Elcheikh A., Feyzi F., Greenler L., Paulos R. // *Annals of Glaciology*. – 2014. – 55(68), P. 105-114. DOI: 10.3189/2014AoG68A032.
103. Bentley, C.R. Ice drilling and coring / Bentley C.R., Koci B.R., Augustin L.J.M. // *Drilling in extreme environments. Penetration and sampling on earth and other planets*. – 2009. – P.221–308 doi.org/10.1002/9783527626625.ch4
104. Blythe, D. Developing a hot - water drill system for the WISSARD project: 1. Basic drill system components and design // *Annals of Glaciology*. – 2014. – Vol. 55. Iss. 68. P. 285-297. DOI: 10.3189/2014AoG68A031.
105. Blythe, D. S. Developing a hot-water drill system for the WISSARD project: 2. In situ water production / Blythe D. S., Duling D. V, Gibson D. E. // *Annals of Glaciology*. – 2014. – P.298-302. DOI: 10.3189/2014AoG68A037
106. Bulat, S. A. Cell concentrations of microorganisms in glacial and lake ice of the Vostok ice core, East Antarctica / Bulat S. A., Alekhina I. A., Lipenkov V. Y., Lukin V. V., Marie D., Petit J. R. // *Microbiology*. – 2009. – Vol. 78. Iss. 6. P. 808–810. <https://doi.org/10.1134/S0026261709060216>.
107. Calciati, M. Le perforazioni eseguite del ghiacciaio d'Hosand./ Calciati M. // *Bolletino del Comitato Glaciologico Italiano 1945 - №23*, P.19–28.
108. Clarke, G.K.C. A short history of scientific investigations on glaciers // *J. of Glaciology*. – 1987. – Spec. Issue. – P. 4-24.
109. Clow, G. D. A fast mechanical access drill for polar glaciology, paleoclimatology, geology, tectonics and biology/ Clow G. D, Koci B. R. // *Memoirs of National Institute of Polar Research*. – 2002. – Vol. 56. P. 5–37.

110. Donnou, D. Deep core drilling: electro-mechanical or thermal drill? / Donnou D., Gillet F., Manouvrier A., etc. // USA CRREL Spec. Rep. 84-34. – Hanover, USA CRREL, – 1984. – P. 81-84.
111. Ekaykin, A. First glaciological investigations at Ridge B, central East Antarctica / Ekaykin A., Bolshunov A., Lipenkov V., Scheinert M., Eberlein L., Brovko E., Turkeev A. // Antarctic Science, – 2021, – V.33(4), P.418-427. doi:10.1017/S0954102021000171
112. Engelhard, H. A hot-water ice-coring drill / Engelhard H., Kamb B., Bolsey R. // J. of Glaciology. – 2000. – Vol.46, № 153. – P. 341-345. doi:10.3189/172756500781832873
113. Fujii, Y. Deep ice coring at Dome Fuji station, Antarctica / Fujii Y., Azuma N., Tanaka Y. et al. // Antarctic Record. – 1999. – Vol. 43, № 1. – P. 162-210.
114. Hansen, B.L. An overview of ice drilling technology// USA CRREL Spec. Rep. 84-34. – Hanover, USA CRREL, 1984. – P. 1-6.
115. Hansen, B.L. Deep core drilling in ice// Mem. of National Inst. of Polar Research. – 1994. – № 49. – P. 5-8.
116. Hughes, K. Estimates of the refreezing rate in an ice-shelf borehole / Hughes K., Langhorne P., Williams M. // Journal of Glaciology. – 2013. – Iss. 217. P. 938-948. DOI: 10.3189/2013JoG12J117
117. Humphrey, N. Hot-water Drilling and Bore-hole Closure in Cold Ice / Humphrey N., Echelmeyer K. // Journal of Glaciology. – 1990. – Vol. 36, Iss. 124. P. 287-298 DOI: 10.3189/002214390793701354.
118. Iken, A. A light-weight hot water drill for large depth: experiences with drilling on Jakobshavns Glacier, Greenland / Iken A., Echelmeyer K., Harrison W. // Proc. of the Third Int. Workshop on Ice Drilling Technology, Grenoble, France, 10-14 October 1988. Grenoble: LGGE. – 1989. – P. 123-136.
119. Isaev, S.A. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on the turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel / Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2010. – Vol.53. Issues 1-3. P.178-197 DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.042

120. Jeong, C. H. Numerical Investigation on the Evolution of Thin Liquid Layer and Dynamic Behavior of an Electro-Thermal Drilling Probe during Close-Contact Heat Transfer / Jeong C. H. etc. // Journal Applied Sciences. – 2021. – P.10 DOI:10.3390/app11083443
121. Kuznetsov, V.V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // Proc. 14 Int. Heat Transfer Conf. Washington: ASME, – 2010. – Keynote 22570
122. Litvinenko, V.S. Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development // Geochemistry. – 2020. – № 1, P.1 – 4 doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125652
123. Litvinenko, V. S. Special aspects of ice drilling and results of 5G hole drilling at Vostok station, Antarctica / Litvinenko V., Vasiliev N., Lipenkov V., Dmitriev A., Podoliak A. // Annals of Glaciology. – 2014. – Vol. 55(68), P. 173-178. DOI: 10.3189/2014AoG68A040
124. Litvinenko, V.S. Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling / Litvinenko V. S. , Leitchenkov G. L., Vasiliev N. I. // Geochemistry. – 2019. – Vol. №79. P. 1-6. doi.org/10.1016/j.chemer.2019.125556
125. Liu, A. Test-Bed Performance of an Ice-Coring Drill Used with a Hot Water Drilling System / Liu A., Wang R., Fan X., Yang Y., Li X., Wang L. and Talalay P. // China Journal of Marine Science and Engineering. – 2019. – P.13 DOI:10.3390/jmse7070234
126. Liu, An. Optimization of hot-water ice-coring drills. / Liu, An & Wang, Rusheng & Yang, Yang & Wang, Liang & Li, Xiao & Yazhou, Li & Talalay, Pavel // Annals of Glaciology. 2020 – Vol. 62. P.1-8. DOI:10.1017/aog.2020.63.
127. Lukin, V. Technological aspects of the final phase of drilling borehole 5G and unsealing Vostok Subglacial Lake, East Antarctica / Lukin V., Vasiliev N. // Annals of Glaciology. – 2014 – Vol. 55, Iss. 65. P. 83-89. DOI: 10.3189/2014AoG65A002.

128. Makinson, K. The BAS ice-shelf hot-water drill: Design, methods and tools. / Makinson K., Anker P. // *Annals of Glaciology*, – 2014 – Vol. 55(68), P. 44-52. doi:10.3189/2014AoG68A030
129. McKay, R. M. Antarctic Cenozoic climate history from sedimentary records: ANDRILL and beyond / McKay R. M., Barrett P. J., Levy R. S., Naish T. R., Golledge N. R., Pyne A. // *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2016. – Vol. 374. Iss. 2059. doi.org/10.1098/rsta.2014.0301.
130. Merzlyakov, M.Y. Study of water-containing ability of gas-liquid cement mixtures / M.Y. Merzlyakov, I.A. Straupnik, **D.V. Serbin** // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. – V.2 – London – 2019 – p. 851-859
131. Methodology for clean access to the subglacial environment associated with the Whillans Ice Stream // ATCM IP 72. 34 Antarctic Treaty Consultative Meeting. Buenos Aires. – 2011.
132. Montagnat, M. The viscoplastic behaviour of ice in polar ice sheets / Montagnat M., Duval V. // *C. R. Physique*. – 2004. – Vol. 5. P. 699–708. doi.org/10.1016/j.crhy.2004.06.002
133. Siegert, M. J. Recent advances in understanding Antarctic subglacial lakes and hydrology / Siegert M. J., Ross N., Le Brocq A. M. // *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2016. – Vol. 374. Iss. 2059. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0306>.
134. Siegert, M.J. An assessment of deep hot-water drilling as a means to undertake direct measurement and sampling of Antarctic subglacial lakes: experience and lessons learned from the Lake Ellsworth field season 2012/13 / Siegert M.J., Makinson K., Blake D., Mowlem M., Ross N. // *Annals of Glaciology*. – 2014. – P.59-73. DOI: 10.3189/2014AoG65A008
135. Smith, A.M. RABID: Basal conditions on Rutford Ice Stream, West Antarctica: Hot-water drilling and down-hole instrumentation. British Antarctic Survey Field Report, R/2004/S3, BAS.: 2005. Archives ref.: AD6/2R/ 2004/S3.

136. Talalay, P.G. Mechanical Ice Drilling Technology. / Talalay P.G. - Singapore:Springer Geophysics 2016, p.284 DOI 10.1007/978-981-10-0560-2\_1
137. Talalay, P.G. Thermal Ice Drilling Technology. / Talalay P.G. - Singapore: Springer. 2020 p.278 doi: 10.1007/978-981-13-8848-4.
138. Turkeev, A. Drilling the new 5G-5 branch hole at Vostok Station for collecting a replicate core of old meteoric ice. / Turkeev, A., Vasilev, N., Lipenkov, V., Bolshunov, A., Ekaykin, A., Dmitriev, A., & Vasilev, D. // Annals of Glaciology – 2021. - V. 62 (85-86), P.305-310. doi:10.1017/aog.2021.4
139. Vasilev, N.I. Inertial. mechanical reamer for borehole 5G-3 conditioning for penetration into subglacial lake Vostok. / N.I. Vasilev, A.V. Bolshunov, S. A. Ignatiev // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – №5. pp. 561-566.
140. Weiss, P. Study of a melting drill head for the exploration of subsurface planetary ice layers / Weiss P and others // Planetary and Space Science. – 2008. – Vol. 56 Iss. 9 P. 1280–1292. doi:10.1016/j.pss.2008.04.004
141. Wirtza, M. Ice Shuttle Teredo: an ice-penetrating robotic system to transport an exploration AUV into the ocean of Jupiter's moon Europa / Wirtza M. Hildebrandt M. // 67th International Astronautical Congress (IAC), September, 2016. Guadalajara, Mexico. – P. 26–30.

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
Патент на изобретение  
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2700143

**ТЕПЛОВОЙ СНАРЯД ДЛЯ БУРЕНИЯ ПЛАВЛЕНИЕМ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Васильев Николай Иванович (RU), Сербин Данил Васильевич (RU), Дмитриев Андрей Николаевич (RU), Большунов Алексей Викторович (RU)*

Заявка № 2019111315

Приоритет изобретения 15 апреля 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 12 сентября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 15 апреля 2039 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11)**2 700 143**<sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
E21B 7/15 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

E21B 7/008 (2019.05); E21B 7/15 (2019.05); E21C 37/18 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2019111315, 15.04.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
15.04.2019Дата регистрации:  
12.09.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 15.04.2019

(45) Опубликовано: 12.09.2019 Бюл. № 26

Адрес для переписки:

199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,  
ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный  
университет", отдел ИС и ТТ

(72) Автор(ы):

Васильев Николай Иванович (RU),  
Сербин Данил Васильевич (RU),  
Дмитриев Андрей Николаевич (RU),  
Большунов Алексей Викторович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Санкт-Петербургский горный  
университет" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2012760 C1, 15.05.1994. SU 127629  
A1, 10.10.1960. SU 1078068 A1, 07.03.1984. SU  
1149670 A1, 27.12.1995. RU 108789 U1, 27.09.2011.  
US 5484027 A1, 16.01.1996. WO 2000/053883 A1,  
14.09.2000.

## (54) ТЕПЛОВОЙ СНАРЯД ДЛЯ БУРЕНИЯ ПЛАВЛЕНИЕМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике бурения залитых низкотемпературной жидкостью скважин сплошным забоем в мощных ледовых массивах Арктики и Антарктики и может быть использовано для бурения плавлением с одновременным или последовательным расширением скважин во льду. Тепловой снаряд для бурения плавлением содержит корпус с насосным отсеком с установленным в нем насосом, нагревательные элементы и коронку, выполненную в форме цилиндра с закругленными нижними краями и сплошной торцевой поверхностью, в которой выполнен коллектор, соединенный с двойной трубой, верхняя часть которой соединена с насосным отсеком. Внутри стенок коронки выполнены сквозные

дугообразные каналы, расположенные диаметрально противоположно относительно друг друга, при этом внутри коронки установлен кольцевой нагревательный элемент. Снаряд способен одновременно со стабильной проходкой скважины производить расширение ее сечения, а также вести образование локальных полостей, надежен в работе, имеет низкое энергопотребление и простую конструкцию. При его использовании достигается снижение энергоемкости процесса бурения, а также призабойная циркуляция теплоносителя. Создание вихревого потока теплоносителя позволит образовать гладкие стенки скважины постоянного диаметра. 2 ил.

RU 2 700 143 C 1

RU 2 700 143 C 1

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт внедрения



#### АКТ

внедрения результатов диссертации Сербина Данила Васильевича на тему: «Обоснование и разработка технологии образования локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом»

Состав комиссии:

Председатель:	зав. лаб., канд. геогр. наук В.Я.Липенков
Члены комиссии:	ст. науч. сотр., канд. биол. наук И.А.Алехина науч. сотр. А.В.Туркеев вед. спец. ЛЦ РАЭ Тетерев П.В.

Комиссия рассмотрела результаты диссертационной работы Сербина Данила Васильевича на тему: «Обоснование и разработка технологии образования локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом». Диссертационная работа Сербина Данила Васильевича посвящена разработке технологии образования локальных полостей в ледовом массиве методом плавления с использованием термогидравлического бурового снаряда – расширителя на грузонесущем кабеле, который объединяет технологические процессы кондуктивного бурения и конвективного расширения в одном техническом средстве.

Теоретические и практические научно-технические результаты, полученные в диссертационной работе Сербина Д.В., представляют ценность при планировании, организации и внедрении комплексных мероприятий по бурению скважин в ледовом массиве с одновременным или последовательным расширением их диаметра.

Комиссией принято решение о возможности использования, разработанной в диссертационной работе, технологии и технического средства бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом.

Председатель комиссии

Липенков В.Я.

Члены комиссии

Алехина И.А.

Туркеев А.В.

Тетерев П.В.