

*На правах рукописи*

**Сербин Данил Васильевич**



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ  
ОБРАЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛОСТЕЙ В ЛЕДОВОМ  
МАССИВЕ ТЕПЛОМ СПОСОБОМ**

*Специальность 2.8.1. Технология и техника  
геологоразведочных работ*

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

Санкт-Петербург – 2023

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

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Дмитриев Андрей Николаевич*

**Официальные оппоненты:**

*Попов Сергей Викторович*

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

*Мелехин Александр Александрович*

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

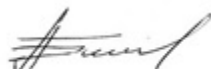
**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук, г. Москва.

Защита диссертации состоится **3 октября 2023 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ 2023.1 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, аудитория № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 3 августа 2023 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



БЛИНОВ  
Павел Александрович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследований**

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 выдвигаемых 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. Слосарев, 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 другие.

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 исследования:**

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**

1. 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;

2. 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 «АНИИ» от 11.06.2022 г.

### **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 осложнённых 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 термогидравлического бурового снаряда-расширителя, 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, 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 (далее – перечень ВАК), в 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен патент на изобретение.

**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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приводится общая характеристика работы; обосновывается ее актуальность; определяются цель, задачи, идея работы;



изложены основные защищаемые положения, методология исследования, научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** проведен обзор и анализ современного состояния технологий и технических средств создания локальных полостей во льду, выполнен обзор термобуровых снарядов и скважинных расширителей, обосновываются научные цель и задачи исследования.

**Во второй главе** изложен теоретический анализ закономерностей теплообменных процессов, происходящих в призабойной зоне скважины в ледовом массиве при бурении с одновременным или последующим расширением тепловым способом.

**В третьей главе** представлены планирование, методика и проведение экспериментальных исследований процесса бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом, а также результаты экспериментальных исследований.

**В четвертой главе** представлены технологии образования локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом и опытно-конструкторские разработки термогидравлического бурового снаряда-расширителя ТБСР.

В заключении приводятся общие **выводы и рекомендации**.

Основные результаты выполненных исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

**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.**

Разработанная технология образования локальных полостей в ледовом массиве тепловым способом подразумевает использование ТБСР на грузонесущем кабеле, который позволяет выполнить следующие технологические операции: бурение сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважины, образование каверны.

За основу взяты созданные и успешно зарекомендовавшие себя отечественные буровые тепловые снаряды ТЭЛГА–14М, ТБЗС–132, ТБЗС-152, ТБЖС, СГПУ. Основными конструктивными отличиями ТБСР от существующих снарядов являются циркуляционный и насосный отсеки, пенетратор с выполненными в нем коллектором и дугообразными

гидравлическими каналами, а также отдельные системы электрического нагрева пенетратора и циркуляционного отсека. Эти отличия позволяют объединить технологические процессы бурения и расширения скважины в ледовом массиве в одном устройстве с возможностью их независимого контроля и оперативного управления.

Крепление ТБСР к грузонесущему кабелю производится стандартным кабельным замком, входящим в используемые буровые снаряды. В электрическом отсеке выполняется соединение токоведущих жил грузонесущего кабеля с энергопотребителями снаряда, а также в нем закреплен датчик осевой нагрузки на забой и электронный блок.

Процесс бурения льда осуществляется контактным (кондуктивным) плавлением сплошным забоем за счет передачи тепловой энергии от пенетратора ледовому массиву через постоянно образующуюся тонкую водяную пленку. Процесс расширения осуществляется конвективным плавлением за счет создания призабойной кольцевой циркуляции теплоносителя в скважине с постоянным его подогревом в циркуляционном отсеке.

ТБСР (рисунок 2) предназначен для бурения плавлением сплошным забоем с одновременным или последующим расширением скважин в ледовом массиве, а также образования каверны и 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 размещен насосный отсек 7, с установленным в нем насосом 8. Нижняя часть насосного отсека 7 соединена с центральной двойной трубой 3, состоящей из наружной водоподъемной трубы 5 и внутренней водонагнетательной трубы 4, на внешней стороне которой закреплен нагревательный элемент 6, представляющий собой нагревательный кабель КНМС-НХ.

Формирующий забой пенетратор 1 крепится жестко болтовыми соединениями к корпусу 2 и изготовлен в форме цилиндра с закругленными нижними краями и сплошной торцевой поверхностью, внутри которого выполнен коллектор 12. В нижней части пенетратора 1 из коллектора 12 выполнены дугообразные гидравлические каналы 14, выходящие на поверхность пенетратора 1 и расположенные диаметрально противоположно относительно друг друга. Внутри пенетратора 1 жестко закреплен кольцевой нагревательный элемент 13.

В пенетраторе ТБСР дугообразные гидравлические каналы 14 выходят под углом  $\leq 45^\circ$  к касательной наружной окружности пенетратора 1 и позволяют подвести теплоноситель 15 тангенциально к стенкам скважины 16, от которых струя 17 отражается и движется вдоль по винтовой линии. В совокупности ТБСР и стенки скважины 16 играют роль завихрителя, причем закручивание потока происходит в два этапа: задача углового направления струи и последующее ее тангенциальное отражение по касательной. Завихритель преобразует движение потока теплоносителя 15 во вращательное вокруг оси, а ограничение пространства стенками скважины 16 и постоянная рециркуляция обеспечивает осевое перемещение теплоносителя 15 на расстояние от гидравлических каналов 14 до заборных окон 11.

Создание призабойной кольцевой циркуляции обеспечивает закручивание потока теплоносителя вокруг оси устройства и вследствие этого происходит равномерная в радиальном направлении интенсификация тепломасообменных процессов в призабойной зоне скважины.

Технология бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве реализуется следующим образом. ТБСР спускают в скважину на забой, подается напряжение на кольцевой нагревательный элемент пенетратора и начинается контактное бурение плавлением льда. Талая вода в процессе углубки снаряда перекроет заборные окна над верхним торцом пенетратора, после чего включается насос и нагревательный элемент центральной двойной трубы. Талая вода через заборные окна всасывается в межтрубном пространстве центральной двойной трубы, при этом происходит активный подогрев воды нагревательным элементом, затем прокачивается насосом в водонагнетательную трубу, из которой попадает в коллектор и выходит в затрубное пространство через дугообразные гидравлические каналы. Подогретая вода, выходя из каналов, передает энергию движения талой воде в затрубном пространстве, при этом начинается закручивание потока, который оплавляет стенки скважины в радиальном направлении. После чего, вода попадает обратно в снаряд через заборные окна и цикл повторяется.

Осевая нагрузка на забой создается собственным весом бурового снаряда.

Технология бурения с последующим расширением скважин в ледовом массиве подразумевает на первом этапе контактное бурение плавлением сплошным забоем, при этом электроэнергия подается только на пенетратор, а после достижения необходимой проходки он выключается и начинается второй этап – конвективное расширение плавлением, при котором электроэнергия подается на нагревательные элементы циркуляционной системы и насос. Расширение целесообразно производить с малой скоростью подъема ( $v_{\text{оп}} \leq 1 \text{ м/ч}$ ).

Также ТБСР способен в стационарном положении ( $v_{\text{оп}} = 0 \text{ м/ч}$ ) образовывать (выплавливать) каверну, при этом электрическая энергия подается на нагревательные элементы циркуляционной системы и насос, а нагревательные элементы пенетратора остаются выключенными.

ТБСР может использоваться для вскрытия подледниковых водоемов, выплавления каверны, отбора проб газа из ледовой толщи, увеличения рабочего пространства в скважине при боковом отборе керна или забуривании 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, для локальной рекристаллизации трещиноватого участка скважины в ледовом массиве (например, трещин гидроразрыва) и других основных или вспомогательных технологических операциях.

В сезонах буровых работ 64-ой и 67-ой Российской антарктической экспедиции на станции Восток (Антарктида) были собраны и испытаны экспериментальный стенд и натурная модель ТБСР 90/180. Экспериментальные исследования показали, что разработанная конструкция ТБСР 90/180 работоспособна и позволяет осуществлять технологические операции бурения и расширения скважин в ледовом массиве одновременно или последовательно, а также выплавлять каверну.

**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.**

Механическая скорость контактного бурения плавлением и соответствующая ей интенсивность конвективного расширения являются основными параметрами, характеризующими процесс бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом.

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, его верхний торец в теплообмене не участвует, а скорость бурения-расширения  $v_{\text{бр}}$ , суммарная активная электрическая (тепловая) мощность ТБСР  $Na_{\text{бр}}$  и массовый расход насоса  $G$  являются постоянными ( $v_{\text{бр}}=\text{const}$ ;  $Na_{\text{бр}}=\text{const}$ ;  $G=\text{const}$ ), теплофизические свойства льда изотропны и усреднены, а поверхность забоя изотермическая. Рассматривается двумерная тепловая задача для конечной проходки  $l$ .

С учетом допущений и результатов экспериментальных работ предложена одна из возможных математических моделей процесса бурения с одновременным расширением скважин в ледовом массиве тепловым способом с применением основ горной теплофизики, разработанных Б.Б. Кудряшовым.

$Na_{\text{бр}}$  является суммой (1) мощностей пенетратора  $Na_{\text{б}}$  и циркуляционной системы  $Na_{\text{р}}$ , тогда для процесса бурения с одновременным расширением справедливо уравнение (2), в которое входят тепловые потоки (рисунок 3, таблица 1-(1-11)):

$$Na_{\text{бр}}=Na_{\text{б}}+Na_{\text{р}}, \quad (1)$$

$$Na_{\text{бр}}=Q_{\text{лб}}+Q_{\text{лб}}+Q_{\text{вб}}+Q_{\text{лр}}+Q_{\text{лр}}+Q_{\text{вр}}+Q_{\text{ллк}}+Q_{\text{лк}}+Q_{\text{вк}}+Q'_{\text{вб}}+Q_{\text{пот}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{лб}}$  – тепловой поток на плавление льда при бурении, Вт;  $Q_{\text{лб}}$  – тепловой поток на создание температурного поля впереди забоя при бурении, Вт;  $Q_{\text{вб}}$  – тепловой поток на нагрев воды в прослойке между торцевой поверхностью пенетратора и ледовым забоем, Вт;  $Q_{\text{лр}}$  – тепловой поток на плавление льда при расширении, Вт;  $Q_{\text{лр}}$  – тепловой поток на создание температурного поля впереди забоя при расширении, Вт;  $Q_{\text{вр}}$  – тепловой поток на нагрев воды на забое расширения, Вт;  $Q_{\text{ллк}}$  – тепловой поток на плавление боковых стенок, Вт;

$Q_{лк}$  – тепловой поток на создание температурного поля при плавлении боковых стенок, Вт;  $Q_{вк}$  – тепловой поток на нагрев воды на участке плавления боковых стенок, Вт;  $Q'_{об}$  – тепловой поток на нагрев воды на участке расширения, образовавшейся при бурении, Вт;  $Q_{пот}$  – потери тепла на границе «талая вода-заливочная жидкость», Вт.

Рассмотрим отдельно процессы бурения и расширения с общим параметром скорость бурения-расширения  $v_{бр}$ .

*Бурение.* Основными факторами контактного бурения плавлением 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 реологические свойства льда.

В качестве теплового баланса для процесса бурения справедливо уравнение (3):

$$Na_{\delta} = Q_{нлб} + Q_{нб} + Q_{об} . \quad (3)$$

Раскрывая тепловые потоки в уравнении (3) и решая относительно температуры поверхности пенетратора  $t_k$ , получим новое выражение (таблица 1 – (12)). Для теплового потока  $Q_{нен}$  от рабочей поверхности реального пенетратора площадью  $F_{\delta}$  в окружающий ледовый массив через слой расплава толщиной  $\delta$  (таблица 1 – (13)) справедливо выражение из таблицы 1 – (14), что также равняется сумме  $Q_{нлб}$  и  $Q_{нб}$ . Составляем систему уравнений из полученных двух выражений для  $Q_{нен}$  из которой определяем  $t_k$  (таблица 1 – (15)). Имея два независимых уравнения для  $t_k$  (таблица 1 – (12) и (15)) с двумя неизвестными  $v_{бр}$  и  $t_k$ , приравниваем, раскрываем тепловые потоки  $Q_{нлб}$ ,  $Q_{нб}$  и, решая относительно  $v_{бр}$ , получаем трансцендентное уравнение (4) для скорости бурения реального пенетратора:

$$v_{бр} = \frac{2 \cdot F_{\delta} \cdot \lambda_{\text{в}}}{\pi \cdot (r_{\delta} + 2\delta)^2 \cdot c_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{л}} \cdot \delta} \cdot \left[ \frac{Na_{\delta}}{\pi \cdot (r_{\delta} + 2\delta)^2 \cdot (\psi + (t_{\text{аэп}} - t_0 - \sigma \cdot H) \cdot c_{\text{л}}) \cdot \rho_{\text{л}} \cdot v_{бр}} - 1 \right], \quad (4)$$

где  $\lambda_{\text{в}}$  – коэффициент теплопроводности воды в прослойке между пенетратором и ледовым забоем, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $r_{\delta}$  – радиус бурения, м;  $\rho_{\text{л}}$  – плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C);

$c_{л}$  – удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·°C);  $\psi_{л}$  – скрытая теплота плавления льда, Дж/кг;  $t_{агр}$  – температура агрегатного перехода льда, °C;  $\sigma$  – геотермический градиент, °C/м;  $t_0$  – температура льда, °C;  $H$  – глубина скважины, м.

Теоретико-экспериментальные результаты исследования процесса бурения плавлением представлены на рисунке 4.

*Расширение.* Основными факторами конвективного расширения плавлением скважин в ледовом массиве, влияющими на интенсивность процесса, являются тепловая мощность нагревательных элементов циркуляционной системы и пенетратора, производительность насоса, реологические и плотностные свойства теплоносителя, ориентация и геометрические характеристики гидравлических каналов, а также физико-механические и реологические свойства льда.

В качестве теплового баланса для процесса расширения справедливо уравнение (5):

$$Na_p = Q_{нпр} + Q_{пр} + Q_{вр} + Q_{лк} + Q_{плк} + Q_{врк} + Q_{об} + Q_{ном}. \quad (5)$$

Суммарное количество теплоты  $Na_p$ , затраченное в единицу времени на процесс расширения, можно выразить через изменение энтальпии теплоносителя (таблица 1 – (16)), постоянный подогрев которого осуществляется в циркуляционной системе ТБСР. Приравнявая (5) и уравнение из таблицы 1 – (16), раскрывая тепловые потоки  $Q_{нпр}$ ,  $Q_{пр}$ ,  $Q_{вр}$ ,  $Q_{плк}$ ,  $Q_{лк}$ ,  $Q_{врк}$ ,  $Q_{об}$ ,  $Q_{ном}$ , получаем выражения для температуры жидкости на выходе и входе в циркуляционную систему  $t_1$  (таблица 1 – (17)) и  $t_2$  (таблица 1 – (18)).

Одна из величин  $t_1$  или  $t_2$  определяется экспериментально, а другая рассчитывается по формулам из таблицы 1. Температура талой воды на входе в циркуляционную систему  $t_2$  во время экспериментальных исследований при скорости бурения 0,2 и 0,3 м/ч находилась в пределах 10-11 °C, при 0,5 м/ч – 8-9 °C, а при 0,8 м/ч – 5-6 °C.

Потери тепловой энергии на прогрев и оплавление боковых стенок, а также перегрев талой воды, можно учесть, введя опытный коэффициент увеличения радиуса расширения  $K_k$  (6):

$$K_k = r_k / r_p \quad (6)$$

где  $r_p$  – радиус расширения, м;  $r_k$  – радиус расширения за счет естественной конвекции, м.

В результате обработки экспериментальных данных получена поверхность (рисунок 5) для определения  $K_k$  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.

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  $l=0,5$  м, что свидетельствует о минимальных тепловых потерях и, соответственно, минимальной разработке участка расширения. При значении  $v_{\text{бр}} \leq 0,3$   $K_k$  резко возрастает и его величина превышает 1, что ведет к экспоненциальному росту непроизводительных тепловых потерь.

Зная  $K_k$ , можно найти  $r_k$  (7):

$$r_k = r_p \cdot K_k = K_p \cdot r_{\text{б}} \cdot K_k. \quad (7)$$

Решая уравнение (5) относительно скорости бурения-расширения (для расширения)  $v_{\text{бр}}$  имеем выражение (8):

$$v_{\text{бр}} = \frac{Na_p}{\rho_l \cdot \pi \cdot (A + B + C) + Q_{\text{ном}}}, \quad (8)$$

где  $A = (r_p^2 - (r_{\text{б}} + 2\delta)^2) \cdot (c_g \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} + \psi + |t_l| \cdot c_l)$ ;

$$B = ((\frac{1}{2} r_p \cdot l \cdot K_k)^2 - r_p^2) \cdot (c_g \cdot t_2 + \psi + |t_l| \cdot c_l);$$

$$C = (r_{\text{б}} + 2\delta)^2 \cdot c_g \cdot \rho_l \cdot \left| t_2 - \frac{t_k}{2} \right|.$$

Суммарная активная тепловая мощность процесса бурения с одновременным расширением находится из выражения (9):

$$Na_{\text{бр}} = Na_{\text{б}} \left( \frac{(A + B + C) + Q_{\text{ном}}}{(r_{\text{б}} + 2\delta)^2 \cdot (\frac{1}{2} \cdot c_g \cdot t_k + \psi + |t_l| \cdot c_l)} + 1 \right). \quad (9)$$

При проведении экспериментальных исследований процесса бурения плавлением с одновременным расширением параметры



$v_b = const$ ;  $Na_{оп} = const$ ;  $G = const$  принимались постоянными величинами. С увеличением проходки потери тепловой энергии на рассеивание и оплавление боковых стенок также увеличиваются, а радиус расширения уменьшается. Теоретико-экспериментальные данные представлены на рисунке 1.

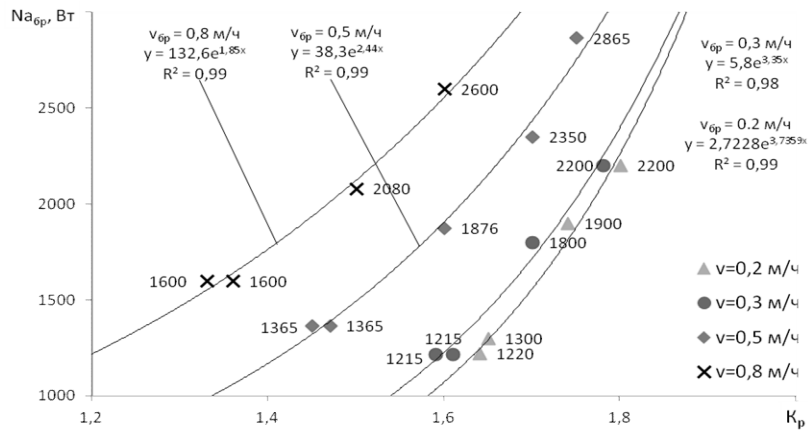


Рисунок 1 – График зависимости затрачиваемой суммарной тепловой мощности на процесс бурения с одновременным расширением от коэффициента расширения (при радиусе бурения 45 мм и проходке 0,5 м)

В процессе бурения с одновременным расширением скважины в ледовом массиве, как видно из примера на рисунке 6, наибольшие затраты тепловой мощности 68,1% приходятся на расширение, на бурение всего 8,22%, потери тепла на границе «таялая 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% суммарной тепловой мощности в зависимости от температуры льда. С увеличением проходки экспоненциально растет тепловая мощность на расширение, а тепловая мощность на бурение остается постоянной.

## 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 с использованием ТБСР 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 ТБСР (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 ТБСР 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 ТБСР 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 ТБСР 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ,  
ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. **Сербин, Д.В.** Предотвращение образования эмульсии при вскрытии подледниковых водоемов // Известия УГГУ. - 2021. - № 3 (63). - С. 80–88. DOI:10.21440/2307-2091-2021-3-80-88.

2. **Сербин, Д.В.** Устройство для бурения плавлением с одновременным или последующим расширением скважин во льду / **Д.В. Сербин**, А.Н. Дмитриев, Н.И. Васильев // Науки о Земле и недропользование. - 2021. - Т. 44. № 3. - С. 204–216 DOI:10.21285/2686-9993-2021-44-3-333-343 (ВАК, №1557 ред.01.02.2022).

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

3. **Serbin, D.V.** Experimental research on the thermal method of drilling by melting the well in ice mass with simultaneous controlled expansion of its diameter / **D.V. Serbin**, A.N. Dmitriev // Journal of Mining Institute.- 2022.- №257.- P.833-842. doi.org/10.31897/PMI.2022.82

*Патент:*

4. Патент № 2700143 Российская Федерация, МПК E21B 7/15 (2006.01), Тепловой снаряд для бурения плавлением : 2019111315 : заявл. 15.04.2019 : опубл. 12.09.2019 / Васильев Н.И., **Сербин Д.В.**, Дмитриев А.Н., Большунов А.В; заявитель СПГУ. – 10 с.: ил.

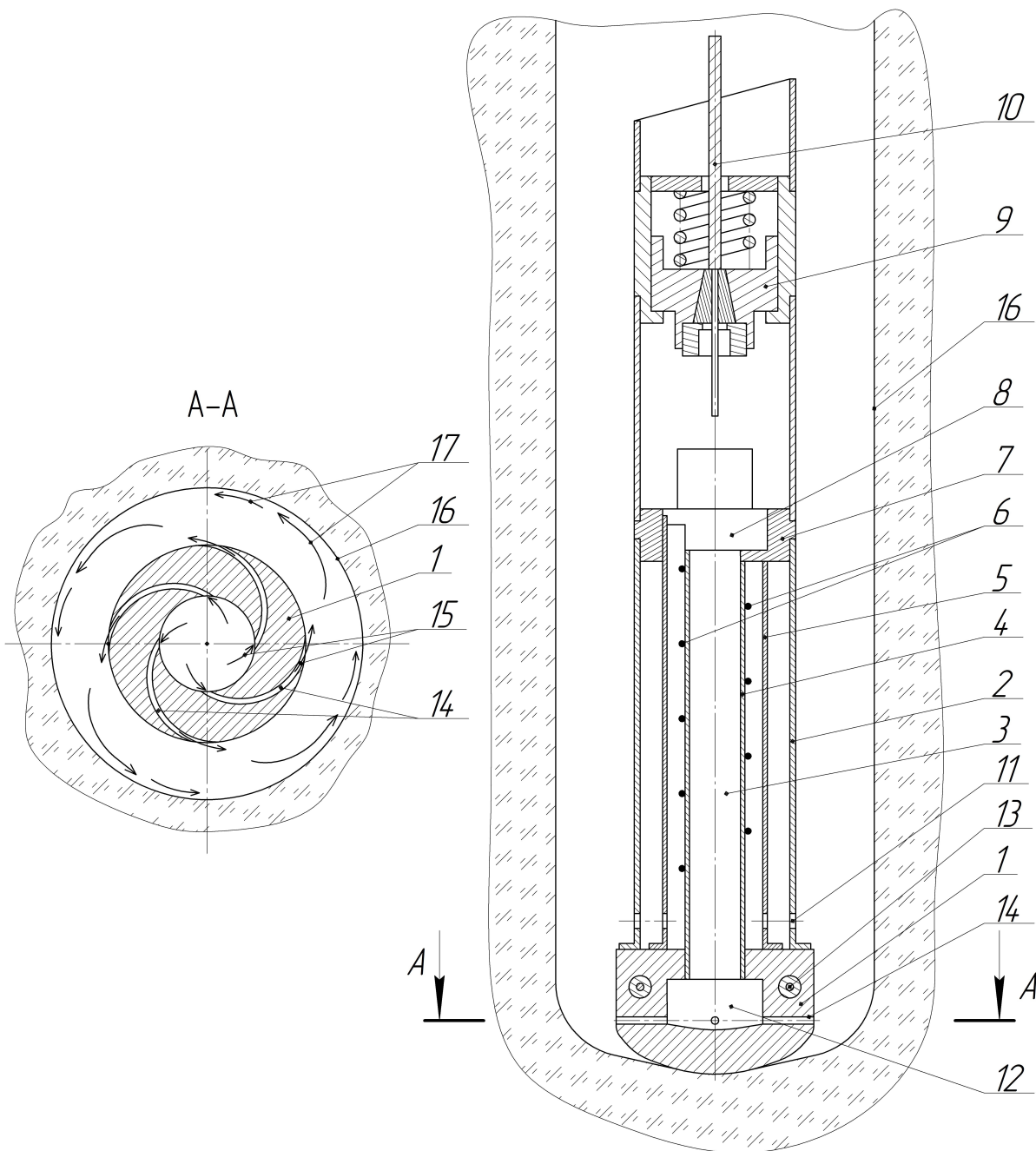


Рисунок 2 – Схема термогидравлического бурового снаряда-расширителя ТБСР

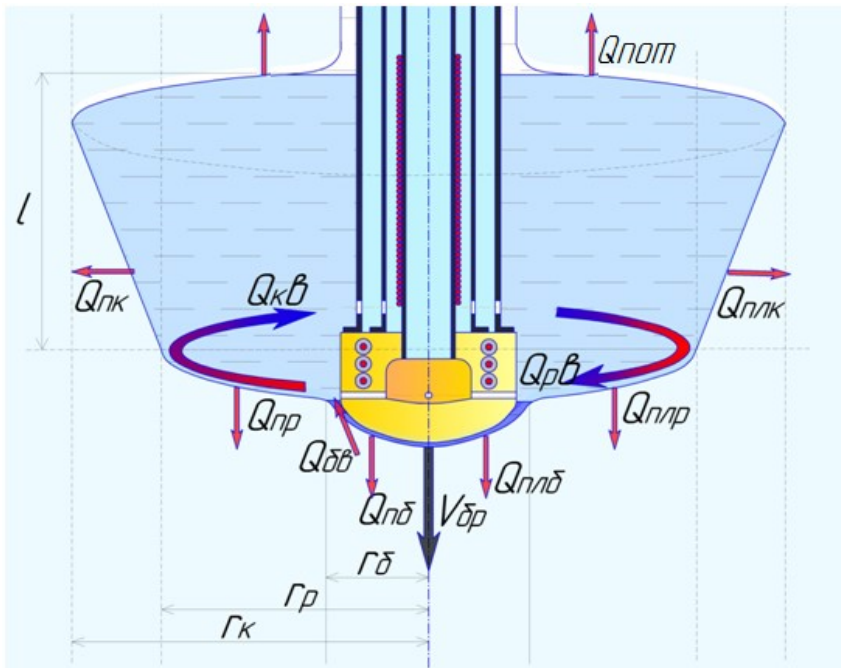


Рисунок 3 – Тепловые потоки при бурении плавлением с одновременным расширением

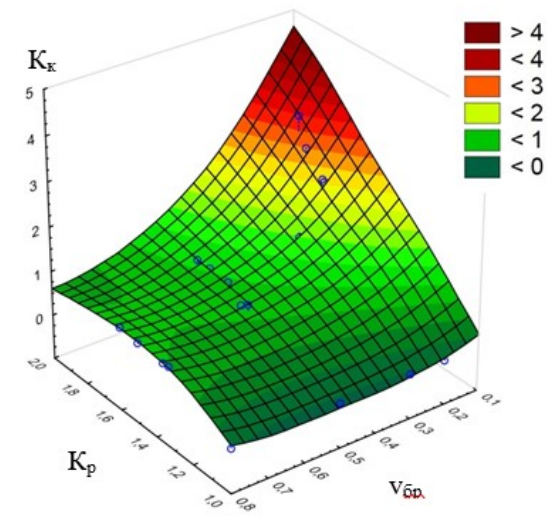


Рисунок 5 – Результаты экспериментальных исследований процесса бурения плавлением с одновременным расширением скважин в ледовом массиве: эмпирические зависимости коэффициента увеличения радиуса расширения  $K_k$  от механической скорости бурения-расширения  $v_{\delta p}=0,2 \div 0,8$  м/ч и коэффициента расширения  $K_p=1 \div 2$  при радиусе бурения 45 мм и проходке 0,5 м.

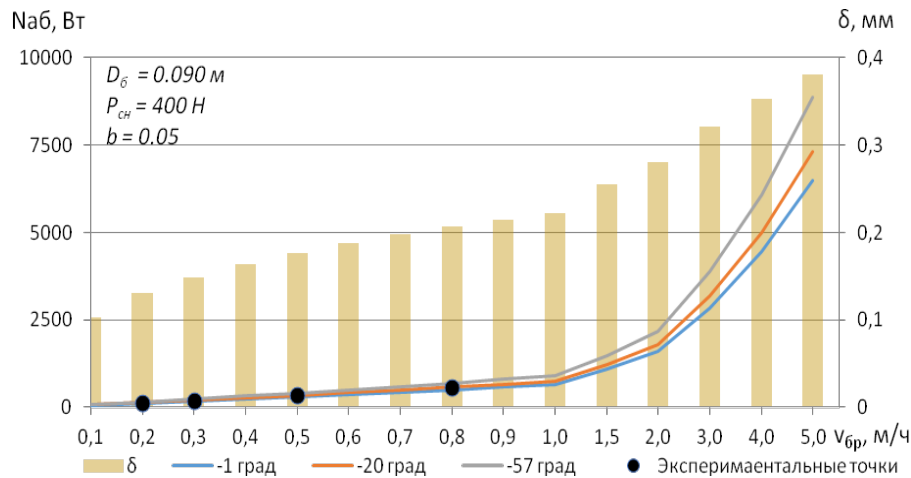


Рисунок 4 – Затраты тепловой мощности на процесс бурения и толщина прослойки воды между пенетратором и забоем

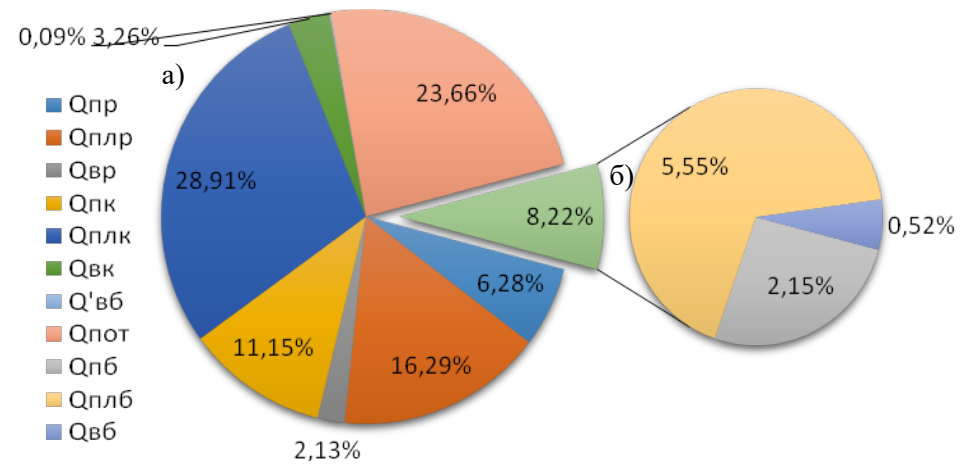


Рисунок 6 – Затрачиваемая тепловая мощность на контактное бурение с одновременным конвективным расширением при  $r_{\delta}=0,045$  мм,  $v_{\delta}=0,5$  м/ч,  $l=1$  м,  $K_p=2$ ,  $G=0,00028$  м<sup>3</sup>/с,  $P_{сн}=400$  Н,  $t_2=9$  °С,  $t_i=-57$  °С,  $K_k=0,91$ .

а) бурение-расширение; б) бурение.

Таблица 1 – Расчетные формулы

№ расчета	Расчет
1	$Q_{нлб} = \pi \cdot (r_{б} + 2\delta)^2 \cdot \psi_{л} \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp}$
2	$Q_{нб} = \pi \cdot (r_{б} + 2\delta)^2 \cdot  t_{л}  \cdot c_{л} \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp}$
3	$Q_{бб} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{б} + 2\delta)^2 \cdot c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot t_{к} \cdot v_{бp}$
4	$Q_{нлр} = \pi \cdot (r_{р}^2 - (r_{б} + 2\delta)^2) \cdot \psi_{л} \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp}$
5	$Q_{нр} = \pi \cdot (r_{р}^2 - (r_{б} + 2\delta)^2) \cdot  t_{л}  \cdot c_{л} \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp}$
6	$Q_{бp} = \pi \cdot (r_{р}^2 - (r_{б} + 2\delta)^2) \cdot c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \cdot v_{бp}$
7	$Q_{нлк} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{к}^2 - r_{р}^2) \cdot \psi_{л} \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp}$
8	$Q_{нк} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{к}^2 - r_{р}^2) \cdot  t_{л}  \cdot c_{л} \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp}$
9	$Q_{бк} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{к}^2 - r_{р}^2) \cdot c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot t_2 \cdot v_{бp}$
10	$Q_{бб}' = \pi \cdot (r_{б} + 2\delta)^2 \cdot c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot \left  t_2 - \frac{t_{к}}{2} \right  \cdot v_{бp}$
11	$Q_{ном} = \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{к}^2 - r_{б}^2) \cdot \alpha_{б} \cdot (t_2 - \frac{t_{л}}{2})$
12	$t_{к} = t_{аp} + \frac{2 \cdot (N_{аб} - Q_{нлб} - Q_{нб})}{\pi \cdot (r_{б} + 2\delta)^2 \cdot c_{б} \cdot \rho_{б} \cdot v_{бp}}$
13	$\delta = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{\lambda \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp}^2 \cdot b \cdot \left[ (r_{б} + 2 \cdot b^2) \cdot sh \frac{r_{б}}{b} - 2b \cdot r_{б} \cdot ch \cdot \frac{r_{б}}{b} \right]}{2\rho_{б} \left[ 2p - g\rho_{б} b \left( ch \frac{r_{б}}{b} - 1 \right) \right]}}$
14	$Q_{нен} = F_{б} \cdot \frac{\lambda_{б}}{\delta} (t_{к} - t_{аp})$
15	$t_{к} = t_{аp} + \frac{\delta \cdot (Q_{нлб} + Q_{нб})}{\lambda_{б} \cdot F}$
16	$Na_{p} = G \cdot c_{б} \cdot (t_1 - t_2)$
17	$t_1 = \frac{2 \cdot (Q_{нлр} + Q_{нр} + Q_{нлк} + Q_{нк} + Q_{бк} + Q'_{бб} + Q_{ном}) - \pi \cdot (r_{р}^2 - (r_{б} + 2\delta)^2) \cdot c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot t_2 \cdot v_{бp} + 2 \cdot G \cdot c_{б} \cdot t_2}{2 \cdot G \cdot c_{б} \cdot t_2 + (r_{р}^2 - (r_{б} + 2\delta)^2) \cdot c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp}}$
18	$t_2 = \frac{2 \cdot \left[ Na_{p} + Q_{нлр} + Q_{нр} + Q_{нлк} + Q_{нк} - \pi \cdot (r_{р}^2 - (r_{б} + 2\delta)^2) \cdot c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot \frac{t_1}{2} \cdot v_{бp} + \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{б} + 2\delta)^2 \cdot c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot t_{к} \cdot v_{бp} + \frac{1}{2} \pi \cdot (r_{к}^2 + (r_{б} + 2\delta)^2) \cdot \alpha_{б} \cdot \frac{t_{л}}{2} \right]}{c_{б} \cdot \rho_{л} \cdot v_{бp} \cdot \pi \cdot \left[ 2 \cdot (r_{б} + 2\delta)^2 + (r_{р}^2 - (r_{б} + 2\delta)^2) + (r_{к}^2 - r_{р}^2) \right]}$

где  $Na_p$  – активная электрическая (тепловая) мощность циркуляционной системы бурового снаряда;  $Q_{нлб}$  – тепловой поток на плавление льда при бурении, Вт;  $Q_{нб}$  – тепловой поток на создание температурного поля впереди забоя при бурении, Вт;  $Q_{бб}$  – тепловой поток на нагрев воды в прослойке между торцевой поверхностью пенетратора и ледовым забоем, Вт;  $Q_{нлр}$  – тепловой поток на плавление льда при расширении, Вт;  $Q_{нр}$  – тепловой поток на создание температурного поля впереди забоя при расширении, Вт;  $Q_{бp}$  – тепловой поток на нагрев воды на забое расширения, Вт;  $Q_{нлк}$  – тепловой поток на плавление боковых стенок, Вт;  $Q_{нк}$  – тепловой поток на создание температурного поля при плавлении боковых стенок, Вт;  $Q_{бк}$  – тепловой поток на нагрев воды на участке плавления боковых стенок, Вт;  $Q'_{бб}$  – тепловой поток на нагрев воды на участке расширения, образовавшейся при бурении, Вт;  $Q_{ном}$  – потери тепла на границе «талая вода-заливочная жидкость», Вт;  $r_{б}$  – радиус бурения, м;  $Q_{нен}$  – тепловой поток от рабочей поверхности пенетратора в окружающий ледовый массив, Вт;  $r_{р}$  – радиус расширения, м;  $r_{к}$  – радиус расширения за счет естественной конвекции, м;  $c_{л}$  – удельная теплоемкость льда, Дж/(кг·°C);  $c_{б}$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C);  $\psi_{л}$  – скрытая теплота плавления льда, Дж/кг;  $\lambda_{б}$  – коэффициент теплопроводности воды в прослойке между пенетратором и ледовым забоем, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $\rho_{л}$  – плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{б}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $t_{к}$  – температура поверхности пенетратора, °C;  $t_{л}$  – температура льда, °C;  $t_1$  – температура воды на выходе из циркуляционной системы, °C;  $t_2$  – температура воды на входе в циркуляционную систему, °C;  $l$  – проходка, м;  $\delta$  – толщина водяной прослойки между пенетратором и забоем бурения;  $\alpha_{б}$  – коэффициент теплоотдачи воды, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $b$  – параметр цепной линии;  $\lambda$  – коэффициент гидравлических сопротивлений при ламинарном режиме течения воды в прослойке;  $F_{б}$  – площадь рабочей поверхности реального пенетратора, м<sup>2</sup>;  $p$  – осевая нагрузка на забой, Н;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $G$  – массовый расход, кг/с.