

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН



SATBAYEV  
UNIVERSITY

Институт металлургии и промышленной инженерии  
УДК 622.241.8

**Крамсаков Дамир Едегеұлы**  
**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

На соискание академической степени магистра техники и технологий

Название диссертации **«Обоснование и выбор динамических параметров  
вращательно-подающего механизма карьерного бурового станка»**  
Направление подготовки 7М07111 – Цифровая инженерия машин и оборудования

Научный руководитель,  
д.т.н., асс. профессор  
\_\_\_\_\_ Столповских И. Н.

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2021 г.

Рецензент

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2021 г.

Нормоконтроль  
канд. техн. наук. сениор лектор  
\_\_\_\_\_ С.А. Бортебаев  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой ТМ, Т и Л  
канд. техн. наук, ассоц. проф.  
\_\_\_\_\_ К.К. Елемесов  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2021 г.

Алматы 2021 г.  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН  
Satbayev University

Институт металлургии и промышленной инженерии  
Кафедра "ТМ, Т и Л"  
7M07111 – Цифровая инженерия машин и оборудования

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой ТМ, Т и Л  
канд. техн. наук, асс.проф.

\_\_\_\_\_ К.К.Елемесов  
" \_ " \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту \_Крамсакову Дамиру Едегеулы\_

Тема: «Обоснование и выбор динамических параметров вращательно-подающего механизма карьерного бурового станка»

Утверждена приказом руководителя университета №1202м  
"29" \_\_10\_\_ "2020 г.

Срок сдачи законченной диссертации " \_15\_ " \_\_05\_\_ 2021 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: данные

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации  
вопросов:

a. Анализ современного состояния и основные направления установления динамических параметров карьерных буровых установок.

b. Исследование и совершенствование динамических параметров породоразрушающего инструмента при бурении скважин с очисткой забоя воздухом.

c. Разработка мероприятий энергоэффективной эксплуатации бурового оборудования с использованием вихревых труб.

**ГРАФИК**

подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Введение		
Аналитический обзор		
Расчетная часть		
Заключение		

Подписи консультантов и нормоконтролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Введение	Доктор технических наук, профессор Столповских И.Н.		
Аналитический обзор			
Расчетная часть			
Нормконтролер	С.А. Бортебаев канд. тех..наук, сениор лектор		

Научный руководитель \_\_\_\_\_ Столповских И. Н.  
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_ Крамсаков Д.Е.  
(подпись) (Ф.И.О.)

Дата " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2020 г

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	5
1	Анализ современного состояния и основные направления установления динамических параметров карьерных буровых установок	9
1.1	Особенности бурения скважин с очисткой забоя продувкой воздухом	9
1.2	Анализ эффективности основных методов борьбы с пылью при бурении скважин с продувкой воздухом	13
1.3	Анализ состояния научных исследований по теме диссертации	16
1.4	Основные направления совершенствования и повышения динамических параметров бурового оборудования при бурении скважин с продувкой воздухом	17
2	Исследование и совершенствование динамических параметров породоразрушающего инструмента при бурении скважин с очисткой забоя воздухом	20
2.1	Анализ факторов и влияния температурного режима породоразрушающего инструмента на эффективность бурения	20
2.2	Исследование возможности применения вихревой трубы для нормализации температурного режима породоразрушающего инструмента при бурении скважин с очисткой забоя воздухом	22
2.3	Методика определения основных геометрических размеров вихревой трубы	24
2.4	Исследование температурных режимов скважины при бурении с очисткой забоя сжатым воздухом	32
2.6	Возможность регулирования температурного режима скважины	35
2.7	Основные направления совершенствования динамических параметров буровых станков для повышения энергетической эффективности бурения скважин с продувкой воздухом	45
3	Разработка мероприятий энергоэффективной эксплуатации бурового оборудования с использованием вихревых труб	48
3.1	Мощность, развиваемая на забое скважины и влияние высоких температур на работу породоразрушающего инструмента	48
3.2	Разработка конструкции инструмента при расположении вихревой трубы у забоя	49
3.3	Оценка эффективности работы бурового снаряда	56
	Заключение	58
	Список использованных источников	59
	Приложения	61

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность и идея.** В мире расширения разведки и добычи полезных ископаемых, является основной базой индустрии, повышающий всех отраслей народного хозяйства любой страны. Средняя глубина разведочных скважин составляет 500-600 м, а на отдельных месторождениях до 1200-1500 м и более. Скорость бурения – является одним из главных факторов, способствующей сократит сроки поиска и разведки месторождения, а также эксплуатации технологических и технических скважин. Бурение с продувкой воздухом относится к новым прогрессивным и высокоэффективным методам, отличающийся от промывки жидкостью тем, что для очистки забоя от шлама применяется газообразный агент, в частности сжатый воздух. Бурение с очисткой забоя воздухом способствует повышению механической скорости бурения и снижает простои, связанные с ликвидацией геологических осложнений, что приводит к увеличению производительности и эффективности буровых работ. Задачи, связанные с повышением энергетической эффективности эксплуатации бурового оборудования, до конца не решены.

На сегодняшний день практика бурения показывает, что использования сжатого воздуха для очистки забоя от шлама является наиболее эффективным в сложных и неблагоприятных для применения бурового раствора условиях: при бурении в поглощающих зонах промывочной жидкости, при невозможности или трудности водоснабжения, при ведении буровых работ в районах с отрицательной температурой окружающей среды. Однако, при бурении с очисткой забоя воздухом возникают высокие температуры на забое скважины за счет малой теплоемкости воздуха, которое отрицательное действует на эффективную работу породоразрушающего инструмента. Кроме того, значительно повышается топливно-энергетические затраты буровых работ за счет использования компрессорных агрегатов, затраты энергии привода которые больше, относительно насосов, используемых в аналогичных условиях. Повышение скорости проходки при бурении скважин возможно за счет внедрения новых высокопроизводительных технических и технологических решений.

В мире по разработке энергоэффективных методов эксплуатации бурового оборудования ведется ряд исследовательских работ по следующим приоритетным направлениям, в том числе: исследование факторов, влияющих на эффективность буровых установок; совершенствование и повышение эффективности породоразрушающих инструментов; энерго- и ресурсосбережение при ведении буровых работ; снижение затрат и повышение экономической эффективности проходки скважин; энергосбережение при эксплуатации компрессорных установок; утилизация вторичных энергоресурсов компрессорных установок.

**Степень изученности проблемы.** На сегодняшний день разработка научных основ эффективного эксплуатации бурового оборудования с использованием вихревых труб и повышения скорости бурения на основе улучшения условий работы породоразрушающего инструмента изучены не полностью. А также, не полностью исследованы влияние температурных режимов породоразрушающего инструмента на эффективность бурения и энергетических затрат. Вместе с тем, существуют нерешенные проблемы, обусловленные отсутствием связи между условиями идеализации свойств горных пород и условиями работы рабочих органов. Определение зависимостей, выделяемых на забое скважины высоких температур от скорости объёмного разрушения, определения прироста температуры очистного воздуха при бурении скважин и относительное влияние на работоспособности породоразрушающих инструментов. В связи с этим исследования температурного режима породоразрушающего инструмента и повышения энергетической эффективности буровых установок при бурении скважин с очисткой забоя воздухом является актуальной научной и практической проблемой горно-геологической отрасли и требует продолжения исследований в этом направлении.

**Целью исследования** является разработка эффективного энергетического комплекса при бурении скважин с продувкой воздухом на основе совершенствования динамических параметров буровых станков и их породоразрушающих инструментов.

**Задачи исследования:**

- анализ известных работ, выполненных по бурению скважин с продувкой воздухом и выбор направления исследований;
- исследование температурного режима породоразрушающего инструмента и его влияния на эффективность бурения;
- исследование вихревой трубы и возможности её использования при охлаждении породоразрушающего инструмента;
- разработка новой конструкции инструмента при расположении вихревого охладителя у забоя скважины;
- разработка математической модели теплового режима скважины с применением вихревой трубы;
- разработка методов повышающих энергетической эффективности бурения скважин с продувкой воздухом, и оценка энергетической эффективности предлагаемых решений.

**Объектом исследования** являются технологический процесс бурения с продувкой воздухом, энергоэффективная эксплуатация бурового оборудования.

**Предмет исследования:** динамические параметры породоразрушающего инструмента и эффективность карьерных буровых установок.

**Методы исследований.** При выполнении диссертационной работы использованы комплексные методы исследований, включающие теоретические обобщения и экспериментально-производственные исследования в промышленных условиях, методов математического моделирования температурных режимов породоразрушающего инструмента с применением методов математической статистики и стандартных математических и графических программ.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

- впервые на основе анализа теоретических данных, приведенных, была получена аналитическая зависимость величины температуры холодного потока воздуха вихревого охладителя от давления воздуха, позволяющая рассчитать температуру охлажденного воздуха при различных давлениях, создаваемых компрессором;

- впервые разработана математическая модель температурного режима скважины с применением вихревой трубы, позволяющая определить и спрогнозировать температуру в любой точке скважины в зависимости от давления воздуха;

- установлена зависимость температуры охлаждающего потока, выходящего с бурового снаряда с вихревой трубы от давления и расхода воздуха, создаваемым компрессором, позволяющая определить температуру очистного воздуха на забое скважины;

- впервые установлена эмпирическая зависимость изменения температуры на забое от частоты вращения бурильной колонны при различных осевых нагрузках при применении обычного бурового снаряда и бурового снаряда с вихревой трубой;

- разработана новая конструкция бурового снаряда с вихревым охладителем, позволяющая увеличить механическую скорость бурения на основе снижения температуры на забое.

**Практические результаты** исследования заключаются в следующем:

- разработана конструкция колонкового снаряда со съёмным керноприёмником, способствующая снижению затраты энергии и повышению стойкости буровой коронки;

- разработана и внедрена конструкция бурового снаряда для бурения с продувкой воздухом, позволяющая нормализовать температурные режимы породоразрушающего инструмента;

- разработана аналитическая модель температурного режима скважины, позволяющая рассчитать и прогнозировать температуру на забое.

**Научная значимость** результатов исследования обосновывается разработкой научных слов энергоэффективной эксплуатации бурового оборудования с использованием вихревых труб.

Практическая значимость результатов исследования характеризуется разработкой и новой конструкцией колонкового снаряда со съёмным керноприёмником, конструкцией бурового снаряда для бурения с продувкой

воздухом и аналитической модели температурного режима скважины, способствующих повышению энергетической эффективности эксплуатации бурового оборудования.

Апробация результатов исследования. Апробация результатов данного исследования проведена на научных семинарах кафедры ГМ, Т и ЛИ, научно-практических конференциях, а также в компании ТОО «GeoserviceKZ».

Структура и объём диссертации. Структура диссертации состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объём диссертации составляет 63 страниц.

# **1 Анализ современного состояния и основные направления установления динамических параметров карьерных буровых станков**

## **1.1 Особенности бурения скважин с очисткой забоя продувкой воздухом**

Совершенствование техники и технологии буровых работ, повышение энергетической эффективности буровых оборудований и уменьшение себестоимостей бурения скважин является актуальной задачей поиска и разработки месторождений полезных ископаемых.

Повышение эффективности бурения скважин требует внедрения новых инновационных и высокопроизводительных технических решений.

На сегодняшний день, наиболее прогрессивным и эффективным методом бурения в определенных условиях считается бурение скважин с очисткой забоя воздухом и различными газообразными промывочными агентами.

При бурении с продувкой очистка забоя от разбуренной горной породы осуществляется воздухом, поступающего из компрессора через нагнетательный шланг и бурильные трубы. Воздух, расширяясь при выходе из-под торца режущего инструмента, поднимается по затрубному пространству. Разбуренная горная порода увлекается за воздухом, поднимающегося по затрубному пространству, в выкидную трубу, затем в шламоуловитель. Разбуренная порода улавливается шламоуловителем, а очищенный от шлама, воздух поступает на поверхность. Основным требованием является герметизация устья скважины таким образом, чтобы колонны бурильных труб свободно вращались, но при этом исключалась утечка воздуха со шламом, полностью направляя его в выкидную трубу.

При бурении с продувкой скорость бурения резко увеличивается за счет отсутствия гидростатического давления столба промывочной жидкости.

Практика показывает, что со снижением давления на забой, снижается трудность разбуривания горной породы, так же и наоборот.

Кроме того, благодаря большим скоростям воздушного потока происходит более полная и быстрая очистка скважины от шлама. В результате улучшаются условия работы породоразрушающего инструмента, что ведет к ускорению проходки.

Бурение скважин с очисткой забоя продувкой в благоприятных условиях имеет характерные преимущества:

– уменьшается гидростатическое давление на скважину, отсутствует ламинарный подслой или фильтрационный глинистый раствор, препятствующие удалению шлама с забоя, что ведёт к увеличению механической скорости проходки, относительно бурения с промывочной жидкостью, в более твердых горных породах от 4 до 5 раз, а в мягких – от 2 до

3 раз. Надёжность бурового инструмента увеличивается от 2 до 5 раз, в некоторых условиях, и больше, что зависит от физико-механических свойств разбуриваемой горной породы, глубины пробуриваемой скважины и наличия притоков воды. При бурении с продувкой это объясняется отсутствием повторного измельчения разбуренных частиц на забое, почти мгновенно выносимых непосредственно из-под рабочих органов бурового инструмента высоко турбулентным потоком воздуха. С увеличением коэффициента крепости горной породы и глубины скважины, эффективность продувки увеличивается, однако она резко снижается в результате незначительных проявлений водоприток в забое и может достичь нуля при дальнейшем увеличении количества жидкости;

- исключаются затраты на приобретение и доставку воды, суглинок и реагентов, необходимых для обработки глинистых растворов, что важно в условиях бурения в сильные морозы, в безводной местности, на высокогорье и т.д.;

- при отрицательных температурах воздуха улучшаются условия работы буровой бригады;

- в некоторых случаях можно незатруднительно бурить скважины с участками полного поглощения промывочной жидкости. В данном случае затраты времени и средств на борьбу с поглощением сведены к нулю;

- уменьшается объём монтажных работ, вследствие отсутствия отстойников, желобной системы и т.п. Данное преимущество особенно значимо при бурении большего количества скважин самоходным буровым оборудованием в мягких горных породах;

- исключаются размыв стенок скважин, набухание и обвал горной породы, естественная структура которых склонна к нарушению при смачивании водой;

- устраняются засорения, а также обводнения призабойной области в скважинах, из-за чего существенно облегчается освоение скважин, также возрастают их дебиты при эксплуатации;

- упрощаются гидрогеологические работы в скважинах, легче выявляются водоносные, нефтеносные и газоносные горизонты;

- исключаются простои в работе бурового оборудования и персонала, возникающие из-за недостатка или отсутствия промывочной жидкости;

- исключаются загрязнение, размыв и растворение проб керна;

- упрощаются измерения искривлений, температур в скважине и т.п.

Вследствие упомянутым выше преимуществ бурения скважины с продувкой, стоимость 1 м проходки относительно бурения с промывкой в некоторых случаях снижается до 50 % [1;2];

- создаются благополучные условия поиска литологических контактов по шламу породы при колонковом бурении, по причине того, что частицы породы, отделяемые от массива, не перемешиваются в забое с разбуренной горной массой вышележащих горизонтов, резко выносятся на земную поверхность из-за большой скорости подъема;

– из-за подачи в процессе бурения сжатого воздуха или водовоздушной смеси, появляется возможность применения высокоэффективных пневмоударных буровых станков, получивших широкое распространение в горной промышленности.

Причины увеличения механической скорости бурения и выносливости наконечников буровых инструментов при переходе очистки забоя скважины от промывки к продувке воздухом исследовались во многих экспериментальных работах [1]. Сопоставляя результаты научных трудов различных авторов, установлены основные факторы, влияющие на повышение эффективности очистки забоя продувкой воздухом:

– понижение гидростатического давления на поверхность забоя и пластовых жидкостей в горном массиве, способствующее более быстрому отделению частиц горной породы;

– снижение вязкости циркуляционного агента, способствующее улучшению условий захвата и выноса бурового шлама.

До того времени, пока давление в вакууме не сравнивается с гидростатическим давлением в скважине, куски разбуренной породы прижимаются к забою, это затрудняет отделение частиц и приводит к ухудшению буримости [5]. Увеличение гидростатического давления вызывает увеличение силы поступления отколотой частицы в трещины. При бурении скважины с продувкой сжатым воздухом сила, прижимающая разбуренные породы к забою в монолитных породах, незначительна и стремится к нулю. В пористых горных породах пластовое давление способствует отделению частиц от забоя, по причине отсутствия противодействия в забое. Рассмотренные причины приводят к значительному увеличению буримости.

При одинаковых условиях в скважинах, не имеющих водопритоков, показатели работы бурового инструмента увеличиваются за счет большего объема разрушения при воздействии зуба долота на породу в воздушном пространстве относительно разрушения с промывкой, что было экспериментально установлено Л.А. Шрейнером [5]. В определенных породах, таких как тонкозернистых пелитоморфных известняках, при статистическом вдавливании штампа, позволяющей определять твердость, упругие и пластические характеристики горных пород, параметры зон разрушения отличались в зависимости от влажности образца, т.е. в сухом состоянии породы данный объем был в 5-6 раз больше, чем в её увлажнённом состоянии [5]. Данным, несомненно, объясняется тот факт, что при очистке забоя воздухом механическая скорость бурения и частота вращения долота резко снижается при появлении даже не значительного объема воды в скважине, но даже в обводнённых условиях эти показатели работы бурового инструмента остаются относительно выше, чем при бурении с промывкой.

В некоторых случаях улучшение условий охлаждения породоразрушающего инструмента при продувке положительно влияет на повышение их стойкости. Для бурения сплошным забоем зачастую в долотах имеются суженные отверстия, вытекающий из них в кольцевое пространство

сжатый воздух или газ расширяется. Расширение воздуха идёт подобно адиабатическому процессу, при этом температура воздушного потока значительно снижается.

Оптимизация условий охлаждения наконечников породоразрушающего инструмента при продувке положительно влияет на удлинение их стойкости. Воздух (газ) вытекает в кольцевое пространство из суженных отверстий в долотах, имеющих в них для бурения сплошным забоем. Относительно жидкостям, газ имеет меньшие значения коэффициентов теплоемкости и теплопроводности, несмотря на это, охлаждение породоразрушающего инструмента происходит интенсивнее, чем при бурении с промывкой.

На данном этапе развития бурения с воздушной очисткой забоя скважины основным его недостатком является сложность применения в районах с неблагоприятными гидрогеологическими и геологическими условиями.

Как показывает практика, продувка скважины газообразными агентами или сжатым воздухом является эффективным технологическим способом, позволяющим в некоторых условиях значительно повысить производительность породоразрушающего инструмента и снизить затраты на осуществление буровых работ [2; 9].

Одной из наиболее сложных проблем организации буровых работ является водоснабжение. В условиях, где возможно применение продувки, решение данной проблемы значительно облегчается, помимо этого, в необводненных горизонтах значительно облегчается проходка зон циркуляции. Отсутствуют осложнения, типичные для бурения с промывкой, связанные с отрицательными температурами атмосферного воздуха. Быстрый вынос бурового шлама потоком воздуха даёт возможность ведения непрерывного контроля за проходимыми горными породами и четкого регулирования режима бурения. Подъем керна может заменить легко осуществляемым отбором образцов бурового шлама [2].

Для осуществления бурения продувкой единица массовых расходов воздуха обычно в 15-20 раз меньше единицы массовых расходов любой промывочной жидкости, при этом теплоемкость сжатого воздуха или газа в 4 раза меньше теплоемкости воды. При одинаковых значениях начальной температуры, промывочная жидкость несёт в 60-80 раз больше тепла, чем воздух для продувки [2].

Основным недостатком очистки забоя продувкой является то, что эффективность применения данного способа зависит от степени обводненности разбуриваемых пород. Применение очистки забоя продувкой затруднено в сыпучих, несвязных, а также в липких, пластичных породах. К недостаткам относится также пылевыделение, возникает необходимость герметизации пыли и других мер борьбы с пылеобразованием. Расход электроэнергии для поддержания работы компрессора больше, чем на привод насосов. Выход проб керна в породах III и IV степени трещиноватости ниже, чем при промывке.

Бурение с продувкой скважин газообразными агентами наиболее целесообразно применять при следующих условиях:

- необводненных закарстованных и трещиноватых пород, в условиях потерь циркуляции промывочной жидкости, для уменьшения затрат средств и труда на борьбу с поглощениями;

- в пустынных, безводных и высокогорных районах, с затруднённой доставкой воды;

- в районах с суровой и продолжительной зимой для устранения осложнений и простоев, которые связаны с замерзанием промывочной жидкости;

- при бурении скважин по жидким полезным ископаемым, для высококачественного вскрытия и точной отбивки слабонапорных горизонтов;

- при бурении скважин в пучащихся породах и в породах, предрасположенных к оползаниям под действием промывочной жидкости;

- во всех случаях, когда породы безводны, для увеличения механической скорости бурения и рейсовой проходки [2];

- при проходке скважин с двойными бурильными трубами.

Значительная эффективность бурения скважин с очисткой забоя воздухом достигается в скальных горных породах при отсутствии притоков воды. Данный вид бурения успешно осуществляется в обломочных породах, имеющих слабую связь между кусками, и в случае промывки возникают обвалы. Не возникают трудности и при бурении в сухих породах таких, как глины, аргиллиты, различные растворимые соли, мел, уголь, мерзлые, насыщенные льдом породы, которые склонны к набуханию или разрушению при смачивании водой.

## **1.2 Анализ зарубежной и отечественной практики бурения скважин с продувкой воздухом**

Научно-исследовательские работы по изучению эффективности очистных агентов положительно повлияли на ход развития и массовое внедрение новой инновационной технологии (газовоздушная продувка) в практику бурового дела.

Впервые опыт бурения с продувкой был проведен в 1932 г. в восточной части Техаса. По причине отрицательных результатов, опыты были приостановлены и были возобновлены в 1936 г. для разведочных скважин. Несмотря на обнадеживающие результаты, при ограниченном объеме подачи воздуха, данный способ не получил распространения и в этот раз [2].

В 1950 году началось планомерное широкомасштабное изучение процесса бурения с продувкой воздухом по трём направлениям, используя сухой воздух, воздух с небольшим количеством воды и насыщенный воздух. Как показывает опыт, бурение с небольшим добавлением воды в воздушную

линию эффективно при малых притоках пластовых вод, не вызывающие налипание горной породы на стенки скважины и образование сальниковых пробок [2; 9].

Введение воздуха в поток воды или глинистого раствора используется при бурении с аэрированной (насыщенной) жидкостью.

Опыты, проведенные в бассейне Сан-Хуан на северо-западе штата Нью-Мексико (США) стали сильным толчком к интенсивному развитию и внедрению новой технологии. При разработке свиты лиза-верде, мощность которой составляла 240 м, в бассейне Сан-Хуан с 1951 г. с газовой очисткой забоя пробурено 400 скважин, а с частичным применением газа - 1000 скважин. При бурении скважин с промывочной жидкостью пласты полезных ископаемых закупоривались. До бурения с применением газообразных агентов применялось также ударно-канатное бурение, но в рассматриваемых условиях оно было малоэффективным.

С 1951 по 1955 г.г. в бассейне Сан-Хуан произошли пожары, которые привели к тяжелым последствиям по причине применения газа для продувки, вследствие широкого распространения получило бурение с продувкой воздухом, впервые применившееся в 1953 г. [2; 9].

В конце 1954 г. здесь было пробурено 600 скважин, глубина которых достигала до 2800 м, а к концу 1955 г. - 1200 скважин с очисткой забоя воздухом глубиной от 1000 до 2800 м. Средняя механическая скорость на 85% больше скорости бурения с промывочной жидкостью. Достигнутая рекордная скорость и уменьшение стоимости буровых работ вызвали большой интерес у буровых компаний, что привело к быстрому распространению данного метода не только по всей Америке, но и за ее пределами [2; 9].

Американская практика прошла два этапа развития бурения с продувкой.

На первом этапе (1951-1957 г.г.) велись широкомасштабные работы по определению эффективного бурения с применением сжатого воздуха в различных геологических условиях. Одним из главного препятствия на пути к эффективному применению бурения скважин газоздушным методом очистки забоя было водопроявление, которому уделялось основное внимание. Не решив проблему водопроявления, нельзя было рассчитывать на широкое распространение данного метода [1; 2].

Изучение бурения скважин в условиях с водопроявлениями проводилось тремя методами: стенки скважины осушались воздухом и перекрывались водоносные горизонты обсадными трубами, цементировали или вводили специальные химикаты в водоносные пласты, с целью уменьшения водоотдачи, вводимый поток воздуха насыщался реагентами, предназначенными для исключения возможности проникновения воды в частицы шлама и образования сальников [2].

На сегодняшний день бурение скважин с продувкой широко применяется не только в США, но и в Италии, Канаде, Франции, Англии,

Турции, Индии, Китае, Венесуэле, Эквадоре, в безводных районах Северной и Средне-Восточной Африки и во многих других странах [1; 2].

Первый опыт с продувкой в СНГ и Казахстане был осуществлен при разведочном колонковом бурении. Первая скважина очисткой забоя продувкой воздухом пробурена в 1954 г. на Северном Кавказе, на месторождении мрамора. При глубине скважины 100 м возникли трудности, и бурение пришлось остановить. Высокая механическая скорость по пройденному интервалу, относительно бурения с промывочной жидкостью, послужила причиной изучения новой технологии [2; ].

На первом этапе опытных работ с продувкой воздухом неудачам послужило:

- отсутствие компрессоров нужной мощности; неправильный подбор параметров компрессора исходя из параметров бурения;
- несоблюдение элементарных правил сборки циркуляционной системы и воздухопровода;
- недостаток необходимой аппаратуры для герметизации устья скважины;
- нехватка опыта по ведению бурения с продувкой воздухом в различных геологических условиях;
- отсутствие аппаратуры для осуществления контрольно-измерительной работы.

Перечисленные причины надолго задержали развитие бурения скважин с очисткой забоя продувкой.

Опыты на геологоразведочных работах подтверждают значительное преимущество бурения очистки забоя продувкой воздухом, чем промывкой раствором. Наблюдалось увеличение механической скорости в несколько раз также существенное снижение расхода долот.

Научно-исследовательские работы, посвященные возможности использования в забойных двигателях газообразных агентов велись с 80 г.г. прошлого столетия. Опытные образцы турбодвигателей, работающих на сжатом воздухе, были созданы в Италии и Франции [2].

В 70-80 г.г. XX века ВНИИБТ работает над созданием турбинных забойных двигателей. Сжатый воздух, использующийся в турбоаппарате и в электробурении, открыл возможность значительного повышения механической скорости проходки [2].

В пустынных районах Средней Азии и Казахстана также применяется бурение с очисткой забоя воздухом в частности в Казахстане - на месторождениях ВКО, Акмолинской области и других. Среднегодовой объем буровых работ с продувкой в Средней Азии составляет до 1 000 000 м, большинство из которых сейсмические скважины. Широкое распространение данный вид бурения получил при разведке воды [1].

### **1.3 Анализ состояния научных исследований по теме диссертации**

Исследования в области энергосбережения при ведении буровых работ проводились В.В. Алексеевым, А.М. Лимитовским, М.В. Меркуловым, В.А. Касьяновым и др.

Научно-исследовательские и практические разработки, связанные с энергосбережением при эксплуатации рудничных компрессорных установок отражены в работах Ю.Н. Миняева, А.Н. Жаткина, А.В. Прохорова, П.П. Фролова, В.Т. Дмитриева, Н.С. Кобелева, А.И. Рыбина и Д.Г. Закирова. Изучение температурного режима бурового инструмента связано с внедрением в практику нового очистного агента, т.е. сжатого воздуха. По причине довольно малого массового расхода и малой теплоемкости, относительно любой промывочной жидкости, наблюдается ухудшение охлаждения породоразрушающего инструмента при его работе на забое скважины.

На сегодняшней день имеется ряд решений проблем температурного режима бурового инструмента. Б.Б.Кудряшов впервые решил задачу о температурном режиме, путём аналитического вывода формулы для расчёта температуры нагрева торца кольцевых коронок при бурении с продувкой.

Рассмотрение процесса бурения геологоразведочных и взрывных скважин с удалением бурового шлама воздухом или пеной, подробное описание технологических оборудований и технических средств бурения с продувкой, осуществляется в работах С.С. Сулакшина.

Одним из основных параметров бурения с продувкой воздухом является температурный фактор, которому посвящён ряд опытно- исследовательских работ. В данных работах дается подробный обзор существующих методов расчёта температуры в протаивающих скважинах, изложена методика расчёта температуры глинистого раствора, который циркулирует в скважинах. Помимо этого, исследована зависимость параметров бурения от температуры на различных его этапах. Во многих работах описаны разновидности бурения с продувкой, их преимущества и недостатки, а также благоприятные и неблагоприятные геологические условия для проходки [9].

Также в следующих трудах авторов рассмотрены вопросы эффективной эксплуатации бурового оборудования, повышения эффективности породоразрушающего инструмента и вопросы ресурсо- и энергосбережения при ведении буровых работ.

#### **1.4 Основные направления совершенствования и повышения энергетической эффективности динамических параметров бурового оборудования при бурении скважин с продувкой воздухом**

Применение сжатого воздуха для очистки забоя скважины в определенных условиях является эффективным способом проходки скважин. Но массовые расходы и теплоемкость воздуха значительно меньше по сравнению с промывочной жидкостью, что приводит к возникновению высоких температурных режимов на забое скважины, которые отрицательно влияют на эффективность породоразрушающего инструмента.

Возможно одним из эффективных направлений нормализации температурных режимов породоразрушающего инструмента при бурении с продувкой воздухом, является принудительное охлаждение атмосферного воздуха на забое до оптимальной температуры, при которой выделенное на инструмент тепло нейтрализуется.

Использование различных охлаждающих устройств обеспечивает заданную температуру воздуха при продувке. Большинство применяемых холодильных устройств охлаждают воздух лишь на поверхности, а их эксплуатация является дорогим и энергоёмким. Для нормализации температурного режима породоразрушающего инструмента эффективно применение вихревого холодильника, встраиваемый в буровой снаряд над колонковой трубой. Погружение вихревого холодильника в пробуриваемую скважину делает устройство перспективным, относительно ранее известных.

Так же, совершенствование температурных режимов породоразрушающего инструмента возможно за счет снижения потерь мощности на вращение колонны. Это возможно за счет применения двойных бурильных труб, применение которых снижает мощность, расходуемую на вращение бурового снаряда из-за отсутствия шлама в затрубном пространстве между стенками ствола скважины и колонковым снарядом.

Одним из требований условий бурения геологоразведочных скважин с очисткой забоя продувкой воздухом является обеспечение передвижными компрессорами достаточным расходом и давлением сжатого воздуха. Прирост объёма очистного воздуха исключает возникновение затяжек и прихватов, повышается механическая скорость бурения. При этом увеличение мощности компрессорной установки увеличивает стоимость бурения. Мощность установки, подаваемой воздух, значительно выше мощности двигателей насосов. Работа в номинальном режиме компрессора является основной причиной больших энергетических потерь. Приблизительно 30 % сгораемого топлива преобразовывается в полезную мощность, а 70 % ее теряется в тепловом виде, по этой причине большая часть потерь приходится на ДВС (двигатели внутреннего сгорания) компрессорной установки. Аналогично, при применении вихревой трубы для охлаждения причиной потерь в

компрессорной установке является выброс в атмосферу определенной части воздуха, которая преобразована в тепловой поток.

Повышение эффективности применяемых на геологоразведочных работах компрессорных установок возможно за счет утилизации тепловых потерь ДВС установки. Утилизируемое тепло от ДВС компрессорной установки и горячего воздуха от вихревой трубы можно использовать для отопления производственных и бытовых объектов, на горячее водоснабжение и на технологические нужды производства. За счёт того, что тепло от двигателей внутреннего сгорания компрессора и вихревой трубы не выбрасывается в атмосферу, а используется в целях теплоснабжения объектов наблюдается экономия, так как уменьшаются затраты на топливо для этих нужд. Учитывая постоянное повышение цен на топливо, затраты на его доставку до энергоустановки, можно наблюдать увеличение экономического эффекта данной технологии.

Опыт работы и результаты предыдущих исследований позволили сформулировать следующие основные направления работы: совершенствование температурных режимов породоразрушающего инструмента и повышение энергетической эффективности компрессорных установок, применяемых на геологоразведочных работах.

Целью магистерского проекта является разработка эффективного энергетического комплекса при бурении скважин с продувкой воздухом на основе совершенствования динамических параметров породоразрушающего инструмента и повышения эффективности карьерных буровых установок.

Поставленная цель в работе может быть достигнута решением следующих задач:

- анализ известных работ выполненных по бурению скважин с продувкой воздухом и выбор направления исследований;
- исследование динамических параметров породоразрушающего инструмента и его влияния на эффективность бурения;
- разработка новой конструкции инструмента при расположении вихревого охладителя у забоя скважины;
- разработка методов, повышающих энергетическую эффективность бурения скважин с продувкой воздухом;
- оценка энергетической эффективности предлагаемых решений.

Выводы по главе:

- анализ состояния бурения скважин с продувкой воздухом свидетельствует о том, что применение сжатого воздуха как очистного агента увеличивает механическую скорость бурения 4-5 раз в твердых, и в 2-3 раза в мягких породах, также стоимость 1 м проходки по сравнению с бурением с жидкостной промывкой снижается до 50 %;
- анализ эффективности основных методов борьбы с пылью при бурении с очисткой забоя воздухом позволили сделать вывод о том, что, применяемые методы и установки при их правильной эксплуатации имеют достаточно высокую эффективность очистки воздуха и являются

эффективными средствами для пылеподавления при бурении скважин с продувкой воздухом;

– применение сжатого воздуха в качестве очистного агента для очистки забоя скважины в определенных условиях является эффективным методом проходки скважин. Но массовые расходы и теплоемкость воздуха значительно меньше относительно промывочной жидкости, что приводит к возникновению высоких температурных режимов на забое скважины, которые отрицательно влияют на эффективность породоразрушающего инструмента;

– нормализация температурных режимов породоразрушающего инструмента возможно за счет принудительного охлаждения подаваемого в скважину продувочного воздуха до отрицательных температур. Однако применение холодильных установок для охлаждения продувочного воздуха является достаточно дорогим и энергоемким;

– мощность двигателей компрессорных установок применяемых при бурении скважин с продувкой воздухом значительно превышает мощность двигателей буровых насосов. Кроме того, компрессорные установки имеют значительные энергетические потери, большая часть которых приходится на двигатели внутреннего сгорания (ДВС) компрессорных установок, так как около 30% сгораемого топлива превращается в полезную мощность, а 70 % - теряется в виде тепла. Повышение эффективности применяемых на буровых работах компрессорных установок возможно за счет утилизации тепловых потерь ДВС установки;

– анализ результатов предыдущих исследований позволили сформулировать основные направления работы: повышение эффективности породоразрушающих инструментов на основе совершенствования температурных режимов на забое скважины и повышение эффективности компрессорных установок.

## **2 Исследование и совершенствование динамических параметров породоразрушающего инструмента при бурении скважин с очисткой забоя воздухом**

### **2.1 Анализ факторов и влияние температурного режима породоразрушающего инструмента на эффективность бурения**

Исследование температурных факторов при бурении скважин приобретает актуальное значение в связи с внедрением новых современных технических средств и технологии бурения, применением сжатого воздуха для очистки забоя от шлама, ростом объёма буровых работ, увеличением забойной мощности и глубин скважин.

При бурении скважин в скальных породах разрушение породы сопровождается значительным выделением тепла, так как на собственно разрушение породы расходуется около 1 % подводимой к забою механической энергии, вся же остальная часть энергии рассеивается в форме тепла [3].

При бурении скважин температурные факторы отрицательно влияют на работу бурового инструмента через высокие контактные температуры с необратимыми последствиями (деформации матриц, разрушение алмазов, зашлифования и засаливания их рабочих поверхностей, снижение твердости алмазов и прижоги инструмента) [3].

В работах [3] приведены экспериментальные доказательства того, что заполирование режущих граней алмазных долот вызвано их нагреванием до 650°C, в результате повышения температуры до 800 °C алмазные зёрна растрескиваются и выпадают из матрицы бурового инструмента, нагрев алмазов до 600 °C снижает их микротвёрдость на 30 %, а температура до 1000 °C - на 60 %. Это приводит к преждевременному выходу алмазных коронок из строя, соответственно, к удорожанию буровых работ. В результате высокой температуры бурового инструмента возникают аварийные ситуации, чаще алмазные коронки прижигаются, затраты времени на устранение прижога составляют 8-10 % [12]. Очевидно, что повышение эффективности непосредственно связано с обеспечением температурного режима при бурении скважин.

Действие температурного фактора становится наиболее заметным при применении низкотеплоемких и низкотеплопроводных очистных агентов, таких как сжатый воздух и аэрированные жидкости.

Износостойкость буровых снарядов напрямую зависит от температурного режима на забое скважины при бурении.

Не соблюдение оптимальных температурных режимов приводит к температурным деформациям буровых алмазов, которые приводят к зашлифованию режущих граней и растрескованию от температурных напряжений с возможным высыпанием осколков зерен из матрицы.

Изучение температурного режима работы буровых алмазов Л.К. Горшковым [3], показало, что зашлифования наиболее часто имеют место на гранях алмазов при нагреве их до 600 °С, а растрескивания – при 800 °С и выше. Растрескивания по плоскостям спайности или двойникования наблюдаются у крупных зерен, а зашлифования преимущественно у более мелких алмазов. Иногда температурные деформации накладываются на механические и наоборот.

Кроме температурного фактора, на процесс износа буровых алмазов влияют абразивные свойства, степень трещиноватости, структурные и текстурные особенности и минералогический состав буриемых пород, поэтому представляется необходимым количественно оценить роль собственно температурного фактора среди других.

Зашлифование может быть также вызвано механическим разрушением, выкрашиванием алмазов по плоскостям спайности, двойникования и трещинам. Механические деформации наступают, когда

$$C > \psi \rho_N Z_T, \quad (1)$$

где  $C$  – осевая нагрузка на коронку, Н;

$\psi$  – коэффициент стабильности нормальной нагрузки, зависящий от размеров алмазов и характера шероховатости забоя;

$\rho_N$  – допустимая нормальная нагрузка на один алмаз, Н/резец;

$Z_T$  – число резцов, одновременно контактирующих с забоем [3].

Часть зашлифованных алмазов неизбежно вызывает перегрузку остальных зерен и преждевременные механические деформации их: сколы, раздавливание. Этим можно объяснить кажущуюся одинаковость степени износа всех выступающих из матрицы алмазов одного слоя.

Механическое разрушение алмазов чаще наблюдается при бурении твердых пород, когда высокая сопротивляемость пород внедрению в них алмазных резцов вызывает раздавливание или скол последних, особенно, если породы интенсивно трещиноваты. В этом случае даже при оптимальной (рациональной) величине осевой нагрузки реализуется повышенная забойная мощность на малой контактной площади, результатом чего являются перегрев алмазов и деформации их режущих граней [3].

При бурении с продувкой воздухом, кроме того, возможны диффузный и абразивный виды износа алмазов, обусловленные снижением микротвердости алмазов при росте контактной температуры и наличием сухого трения. В случае бурения железистых пород с резким возрастанием контактной температуры может произойти микроплавление железосодержащих минералов, в расплавленную пленку которых диффундирует углерод (алмаз). В результате наблюдается микроизнос, в том числе и абразивный, размягченной части режущей грани алмаза с образованием гладкой, с бриллиантовым блеском площадки - площадки зашлифования [3].

Причиной зашлифования алмазов может стать и несоответствие твердости матрицы коронки абразивности породы. Это наблюдается, например, при бурении коронками с твердой матрицей по крепким малоабразивным породам, когда малое количество образующегося в процессе разрушения забоя шлама практически мгновенно и полностью выносятся из-под торца коронки потоком очистного агента. При этом матрица не изнашивается, алмазы не обнажаются на необходимую высоту, и скользит по забою без внедрения в породу [3].

Процесс бурения твердых пород сопровождаются высокими контактными температурами, вызывающими снижение абразивных качеств и микротвердости буровых алмазов и тем самым способствующими развитию и механических деформации.

Одним из эффективных средств поддержания температурного режима скважины при бурении с продувкой воздухом, является применение охлажденного до отрицательных температур воздуха в качестве очистного агента. Для охлаждения продувочного воздуха широкое распространение получили холодильные установки. Однако, на сегодняшний день применяемые охлаждающие устройства достаточно дорогие и потребляют большое количество энергии.

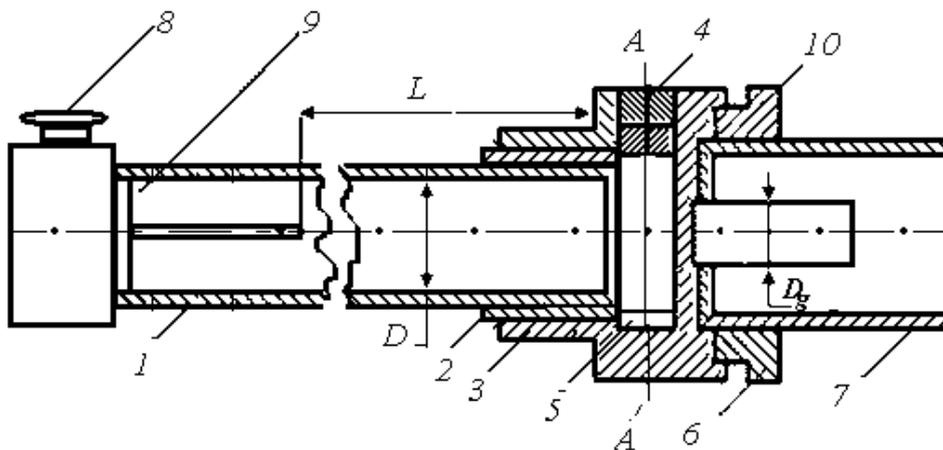
Использование вихревой трубы, основанной на эффекте Ранка, в качестве охлаждающего устройства для продувочного воздуха, возможно, является более эффективным и экономичным. Необходимость более детальной оценки эффекта Ранка, на котором основано охлаждение продувочного воздуха скважины, обусловлено недостаточной степенью исследованности зависимостей параметров вихревой трубы от других показателей, например, влияние давления и расхода воздуха на температуры холодной и горячей фракций.

## **2.2 Исследование возможности применения вихревой трубы для нормализации температурного режима породоразрушающего инструмента при бурении скважин с очисткой забоя воздухом**

Конструктивное строение и принцип работы вихревой трубы. Отличительные особенности вихревой трубы, малые размеры и отсутствие движущихся частей, позволяют использовать ее в качестве призабойного генератора холода в процессе бурения скважины. На рис. 1 приведен конструктивный вид вихревой трубы.

В общем виде конструкция вихревой трубы (рис. 1) состоит из корпуса 3, в кольцевой полости которого пропилен тангенциальный прямоугольный канал шириной  $b$  и высотой  $h$ . С внешней стороны прямоугольного канала к корпусу припаян штуцер для подвода сжатого воздуха. В кольцевой полости корпуса устанавливается отбортованная трубка 1 со строго цилиндрической

полированной внутренней поверхностью диаметром  $D$ , а затем улитка 4, что ее пропилил (размеры которого совпадают прямоугольному каналу корпуса) совпадает с каналом, образуя сопловый вход. В ту же полость корпуса вставляется генератор холодной фракции 5 с отверстием  $D_g$  и герметизирующая прокладка 10, подвижимая гайкой 6. В противоположном конце трубки 1 на расстоянии  $L$  от улитки плотно устанавливается четырехлопастная крестовина 9 и дроссель 8.



1 – трубка, 2 – гайка, 3 – корпус, 4 – улитка, 5 – генератор холодной фракции на холодном выходе, 6 – гайка, 7 – трубка, 8 – дроссель, 9 – крестовина, 10 – прокладка

Рисунок 1 – Конструкция вихревой трубы

Вихревой эффект, или эффект Ранка, заключается в том, что приосевые слои кругового потока, образованного в результате истечения воздуха через сопло, значительно охлаждаются и протекают через отверстие диафрагмы как холодный поток, одновременно происходит нагревание периферийных слоёв, которые затем вытекают через дроссель как горячий поток [49; с. 76-78]. Дроссель регулирует расход холодного и горячего воздуха. Часть воздуха, выходящая через холодный выход вихревой трубы, называется холодной фракцией. Она имеет минимальный расход воздуха при наименьшем значении температуры холодного потока. Сменный латунный генератор, изменяющий температуру и расход потока воздуха, а также контролирующий температуру на холодном и горячем выходах, расположен внутри вихревой трубы.

Существует несколько разновидностей генераторов, в том числе генератор холодной фракции С, для получения отрицательно низкой температуры, и генератор холодной фракции Н для получения высокой мощности охлаждения.

### 2.3 Методика определения основных геометрических размеров вихревой трубы

Определение оптимальных параметров и геометрических размеров вихревой трубы является необходимым условием ее рационального использования в качестве охлаждающего устройства при бурении скважин с продувкой воздухом.

Исходные данные для расчета: потребная температура холодного потока  $T_x$ , холодопроизводительность  $Q$ , давление  $P_x$  холодного потока.

Исходя от требований перед выполнением расчетов устанавливается величина изобарного подогрева  $\Delta t_x$  холодного потока теплообмена охлаждаемого объекта. Необходимый расход воздуха холодного потока определяется:

$$G_x = \frac{Q}{c_p \Delta t_x}, \quad (1)$$

где  $c_p$  – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С).

Необходимое охлаждение воздуха в вихревом охладителе:

$$\Delta t_x = T_1 + T_x, \quad (2)$$

где  $T_1$  – температура воздуха, перед соплом, °С;

$T_x$  – необходимая температура холодного потока, °С.

Основные размеры вихревой трубы определяется в следующем порядке:

1. Общий расход воздуха определяется из выражения:

$$G = \frac{G_x}{\mu} = \frac{Q}{\mu \cdot c_p \cdot \Delta t_x}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – весовая доля холодного потока;

$$\mu = \frac{G_x}{G}; \quad (4)$$

2. Площадь проходного сечения сопла:

$$F_c = \frac{G \cdot \sqrt{T_1}}{0.4 \cdot \alpha_c \cdot p_1}, \quad (5)$$

где  $G$  – общий расход воздуха, кг/сек;

$\alpha_c$  – коэффициент расхода сопла;

$p_1$  – давление воздуха перед соплом, кгс/см<sup>2</sup>.

3. Размеры сопла:

$$h = \sqrt{\frac{F_c}{2}}; \quad (6)$$

$$b = \frac{F_c}{h}, \quad (7)$$

где  $h$  – высота сопла вихревой трубы, мм;  
 $b$  – ширина сопла вихревой трубы, мм.

4. Диаметр трубы:

$$D = 3,65 \cdot \sqrt{F_c}; \quad (8)$$

5. Диаметр отверстия диафрагмы:

$$D_g = D \cdot (0,35 + 0,313 \cdot \mu); \quad (9)$$

6. Длина вихревой зоны:

$$L = 9 \cdot D. \quad (10)$$

Для получения горячего потока воздуха основные параметры вихревой трубы определяются следующим образом.

При расчете вихревой трубы для получения горячего потока исходными величинами являются необходимая температура горячего потока  $T_r$  и тепловой поток  $Q_r$  от него к горячему источнику при заданной величине  $\Delta t_r$ .

При заданном значении  $T_1$  – необходимый эффект подогрева:

$$\Delta t_r = T_r + T_1, \quad (11)$$

где  $T_r$  – необходимая температура горячего потока, °С.

Расход горячего потока:

$$G_r = \frac{Q_r}{c_p \Delta t_r}; \quad (12)$$

Общий расход сжатого воздуха:

$$G = \frac{G_r}{1-\mu} = \frac{Q_r}{c_p \cdot \Delta t_r \cdot (1-\mu)} \quad (13)$$

Дальнейший расчет определения основных геометрических размеров вихревой трубы производится аналогично предыдущему.

Температура на выходе вихревой трубы зависит от давления и расхода воздуха, для расчета температуры вихревой трубы необходимо знать зависимости изменения температуры при различных режимах работы.

Полученная величина скорости потока воздуха в расширительных трубах позволила рассчитать расход воздуха на холодном и горячем выходе вихревой трубе по следующим формулам:

$$G_x = v_x \cdot \frac{\pi d_x^2}{4} \cdot \rho_x, \text{ кг/с}, \quad (14)$$

где  $v_x$  – скорость холодного потока, м/с;

$d_x$  – диаметр патрубка в месте замера скорости, м;

$\rho_x$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Точно также определяем расход воздуха для горячего потока:

$$G_r = v_r \cdot \frac{\pi d_r^2}{4} \cdot \rho_x, \text{ кг/с}. \quad (15)$$

Тепловая мощность холодного и горячего потока воздуха, выходящего из вихревой трубы рассчитывался по величине перепада температуры и расхода воздуха по следующей формуле:

– для холодной фракции:

$$Q_x = c_x \cdot G_x \cdot (t_{\text{вк}} - t_x), \text{ Вт}, \quad (16)$$

где  $c_x$  – теплоемкость воздуха, Дж/кг·°С;

$G_x$  – расход воздуха, кг/с;

$t_{\text{вк}}$  – температура воздуха на выходе из компрессора, °С.

Аналогичным образом рассчитывается мощность для горячего потока [2; с. 37-51].

– для горячей фракции:

$$Q_r = c_r \cdot G_r \cdot (t_{\text{вк}} - t_r), \text{ Вт}. \quad (17)$$

фракции 8Н вихревой трубы определялись подобным образом.

На основе полученных результатов вихревой трубы определено:

1. Расход холодного и горячего потока воздуха вихревой трубы:

$$G = v \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho, \text{ кг/с}, \quad (18)$$

где  $v$  – скорость потока воздуха на холодных и горячих концах, м/с;

$d$  – диаметр патрубка в месте замера скорости, м;

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

2. Тепловая мощность холодного и горячего потока воздуха вихревой трубы:

$$Q = c \cdot G \cdot (t_{\text{вк}} - t), \text{ Вт}, \quad (19)$$

где  $c$  – теплоемкость воздуха; Дж/кг·°С;

$G$  – расход воздуха, кг/с;

$t_{\text{вк}}$  – температура воздуха на выходе из компрессора, °С;

$t$  – температура на выходе из вихревой трубы, °С.

Наиболее неблагоприятны условия охлаждения инструмента, в особенности алмазного, при бурении с продувкой воздухом вследствие малого массового расхода, очень малой плотности и приблизительно в 4 раза меньшей, чем у воды, удельной теплоемкости (при постоянном давлении).

Условия охлаждения коронок и долот при бурении с продувкой существенно хуже, чем при использовании газожидкостных систем. Нормализация температурного режима породоразрушающего инструмента при бурении с продувкой возможна за счет расширения проходных каналов и кольцевых зазоров, увеличения на этой основе массового расхода  $G_r$  при умеренных скоростях движения воздуха и его принудительного охлаждения.

Вопросами прогнозирования и регулирования теплового режима бурящихся скважин детально занимался профессор Ленинградского горного института Б.Б. Кудряшов, впервые им была получена аналитическая формула (2.20) для расчета температуры нагрева торца кольцевых коронок при бурении с продувкой. За меру нагрева бурового инструмента может быть принята усредненная температура на незначительной глубине в приторцевой части коронки, где отдельные поля температур, развивающиеся от работающих в данный момент твердосплавных резцов или алмазов, сливаются в общее температурное поле. Расчетная формула для определения средней температуры торца работающей кольцевой коронки, имеет вид:

$$t_T = \frac{2K_p N}{\pi \sqrt{\lambda_1 (\alpha_1 D_1 + \alpha_2 D_2) (D_2^2 - D_1^2)}} + \frac{K_p N}{2G c_p} + t_1, \quad (20)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала коронки, Вт/ч (м·°С);

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно в зазорах между коронкой и керном, между коронкой и стенками скважины, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$D_1$  и  $D_2$  – внутренний и наружный диаметры короночного кольца, м;

$t_1$  – начальная температура промывочного агента (внутри колонковой трубы над коронкой), °С;

$N$  – мощность затрачиваемая коронкой на забое, Вт;

$G$  – массовый расход очистного агента, кг/с;

$c_p$  – удельная массовая теплоёмкость воздуха, Дж/кг·°С;  
 $K_p$  – безразмерный коэффициент распределения тепловых потоков, определяемый из выражения:

$$K_p = \frac{1}{1 + \lambda_2 / \lambda_1 \sqrt{a_1 / a_2}}, \quad (21)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с (индексы 1, 2 относятся к материалу коронки и горной породе).

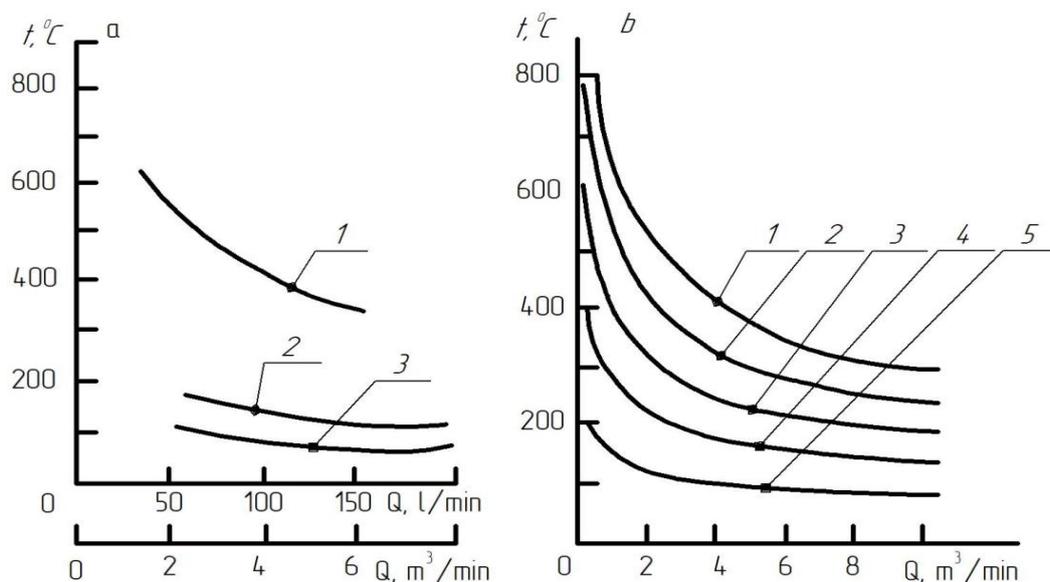
Формула (20) выражает максимальную осредненную температуру на незначительной глубине в приторцевой части коронки. Если для твердосплавных коронок понятие  $t_T$  условное, то для алмазных коронок и долот температура  $t_T$  торца имеет вполне реальное значение, что подтверждено экспериментально.

Формула (20) позволила проследить влияние на температуру торца коронки таких факторов, как развиваемая на забое мощность, температура очистного агента на подходе к забою, конструктивные поперечные размеры коронки, свойства ее материала и проходимых пород, а также свойства, расход и режим движения промывочной среды через коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , определяемые в зависимости от вида очистного агента по критериальным формулам М.А.Михеева.

В любом случае бурения с продувкой воздухом тепловому расчету породоразрушающего инструмента должен предшествовать расчет давления в призабойной зоне для оценки реальной плотности воздуха.

На рис. 2 графически представлены результаты расчетов по формуле (21) для условий бурения твердосплавной коронкой диаметром 93 мм в породах типа песчаников с положительными температурами при развиваемой на забое мощности  $N=2$  кВт и использовании основных разновидностей очистных агентов: воды, нормального глинистого раствора и воздуха. В последнем случае учтена реальная плотность воздуха при глубине скважины 100 м.

Опытные данные по замеру температуры коронок в процессе бурения показывают, что при воздушной продувке температура достигает 450-500 °С, т.е. близка к расчетной. В случае бурения с продувкой температура торца коронки с уменьшением расхода воздуха возрастает так быстро, что фактор охлаждения инструмента становится определяющим.



а – твердосплавная коронка: 1 – воздух; 2 – глинистый раствор; 3 – вода;  
 б – мелкоалмазная коронка (при мощности на забое, кВт): 1 – 1.85; 2 – 1.47;  
 3 – 1.1; 4 – 0.74; 5 – 0.37

Рисунок 2 – Расчетные зависимости температуры на торце кольцевой коронки от расхода очистного агента

В области наиболее приемлемых для выноса шлама расходов воздуха 4-6 м³/мин при твердосплавном бурении с продувкой температура охлаждения коронки держится в допустимых пределах. При незначительном уменьшении расхода температура на торце коронки быстро достигает 500 °С, когда уже приходится считаться с изменением свойств материала коронки и твердого сплава.

В работе рассчитана зависимость осредненной температуры торца мелкоалмазной коронки диаметром 59 мм от расхода воздуха (в пределах от 0,5 до 10 м³/мин) при различной развиваемой на забое мощности (0,37 до 1,85 кВт). В качестве буримой породы принят порфирит Кураховского участка (Донбасс). Расчеты потерь давления проведены для глубины 100 м при условии использования бурильной колонны ниппельного соединения диаметром 50 мм. Температура воздуха на подходе к коронке принята  $t_1=20$  °С. Результаты расчетов представлены графически на рис. 2.16,б. Анализ графиков показывает, что температура торца алмазной коронки прямо пропорциональна развиваемой на забое мощности и находится в сложной зависимости от расхода воздуха. С увеличением расхода свыше 3-4 м³/мин снижение температуры торца замедляется. Одновременно возрастают потери давления в циркуляционной системе скважины, утечки воздуха через неплотности соединений и расход энергии на привод компрессора. Увеличение подачи воздуха свыше 4 м³/мин без изменения геометрии коронки нерационально, тем более что при этом в соответствии с формулой (22) возрастает температура торможения  $t_p$ .

$$t_p = t + k_B \frac{v^2}{c_p}, \quad (22)$$

где  $t_p$  – равновесная температура у стенки канала, °С;  
 $k_B$  – безразмерный коэффициент восстановления температуры, выражающий степень превращения кинетической энергии в тепловую (при турбулентном обтекании пластины  $k_B=0,89$ );  
 $v$  – средняя по сечению канала скорость потока, м/с;  
 $c_p$  – удельная массовая теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°С).

Анализ формулы (20) показывает, что имеются реальные пути улучшения охлаждения алмазной коронки при бурении с продувкой воздухом. Поскольку тепло от забоя распространяется по телу корончатого кольца и колонковой трубы и воспринимается потоком воздуха с внутренних и внешних поверхностей, температура торца коронки будет тем меньше, чем выше теплопроводность материала, чем больше высота корончатого кольца и плотнее резьба, соединяющая его с колонковой трубой, внутренняя и наружная поверхности корончатого кольца (например, за счет продольного оребрения), массовый расход воздуха при умеренных скоростях его движения, а значит, чем больше суммарная площадь промывочных каналов и шире кольцевые зазоры.

Формула (20) правильно отражает основные закономерности температурного режима буровой коронки. Применительно к алмазному бурению с промывкой и продувкой справедливость этой формулы подтверждена экспериментальными замерами температуры.

Аналитическое исследование зависимости, выравненной (на некоторой глубине) температуры торца алмазного долота от его радиуса как характеристики нагрева долота при бурении позволило получить следующую расчетную формулу [2]:

$$t_T = 36K_p P_n \left( \frac{\Delta}{\lambda_1} \frac{r}{R^2} + \frac{r}{3\alpha_1 R_0^2 + 2\alpha_2 R^2} + \frac{R}{Gc} \right) + t_1, \quad (23)$$

где  $K_p$  – безразмерный коэффициент распределения тепловых потоков;  
 $\Delta$  – толщина торцевого диска долота, м;  
 $R, R_0$  – наружный и внутренний радиусы корпуса долота, м;  
 $r$  – текущая координата, м;  
 $n$  – частота вращения, об/мин;  
 $P$  – осевая нагрузка, Н;  
 $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала коронки, Вт/ч (м·°С);  
 $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с (индексы 1, 2 относятся к материалу коронки и горной породе);  
 $G$  – весовой расход (для воздуха –  $G_r$ ) в кг/с;  
 $c$  – удельная весовая теплоемкость очистного агента, (для воздуха при постоянном давлении –  $c_p$ ) Дж/кг·°С;

$t_1$  – начальная температура промывочного агента, °С.

Наличие многих источников тепла (зубья шарошек, шариковые и роликовые опоры, спинки лап), большое количество и сложность конфигурации элементов шарошечного долота затрудняют аналитическое исследование его температурных полей и требуют выбора некоторого определенного участка, температура которого в процессе бурения могла бы характеризовать температурный режим долота в целом. В качестве такого участка Б.Б.Кудряшовым было принято поперечное сечение цапф в месте их сопряжения с лапами, через которое тепло от шарошек передается корпусу долота, и получено аналитическое выражение для установившейся температуры в цапфе шарошечного долота.

$$t_{ц} = \left[ \left( \frac{h}{\lambda_1 f_{ц}} + \frac{1}{\alpha f_{л}} \right) \frac{k_1 k_2}{m} + \frac{1}{2G_{г} c_p} \right] N - \frac{\Psi \Delta W}{2c_p} + t_1, \quad (24)$$

где  $h$  – средняя толщина лапы вдоль оси цапфы, м;

$f_{ц}$ ,  $f_{л}$  – площади сечения основания цапфы и наружной поверхности лапы, м<sup>2</sup>;

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала коронки, Вт/ч (м·°С);

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$c_p$  – удельная весовая теплоемкость очистного воздуха при постоянном давлении, Дж/кг·°С;

$G_{г}$  – весовой расход воздуха, кг/с;

$k_1$ ,  $k_2$  – безразмерные коэффициенты потерь мощности на трение в опорах и распределения тепловых потоков в подшипнике доли ед.;

$N$  – забойная мощность, Вт;

$m$  – число шарошек;

$\Psi$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

$\Delta W$  – влажность доли единицы.

При бурении с продувкой воздухом (газом) по «сухим» породам, не содержащим влаги в жидком или твердом состоянии, а также при бурении с газожидкостными системами следует принимать  $\Delta W = 0$ , при этом формула упрощается. При одиночных расчетах можно принимать  $k_1 = 0,1$ ;  $k_2 = 0,5$ .

Как способы нормализации температурного режима шарошечного долота могут быть применены снижение начальной температуры воздуха, его увлажнение в призабойной зоне (для обеспечения испарительного охлаждения), продувка опор.

## 2.4 Исследование температурных режимов скважины при бурении с очисткой забоя сжатым воздухом

Под температурным режимом бурящейся скважины понимают распределение температуры циркулирующей промывочной среды во внутреннем канале бурильной колонны и в кольцевом канале, зависящее от большого числа разнородных по своему действию факторов. Одно из наиболее простых решений применительно к бурению скважин с продувкой воздухом подробно изложено в работе.

Проблемы температурного режима при бурении скважин с продувкой подробно рассмотрены в работе, в которой представлена зависимость определения и прогнозирования температуры в бурильном инструменте и в кольцевом канале скважины с учётом глубины бурения.

С помощью формул (25) и (26) определяется температура в любой точке бурильной трубы или затрубного пространства при известной глубине скважины  $H$ . Данные формулы можно использовать вне зависимости от вида промывочной среды (вода, пена, воздух, глина и т.п.), как и в случае нагревания, так и в случае охлаждения.

В эти выражения входит величина начальной температуры промывочной среды  $t_{1H}$ , напрямую зависящая, с применением вихревой трубы, от величины давления поступающего в скважину воздуха. Прирост температуры промывочной среды у забоя скважины  $\Delta t_3$  определяется количеством теплоты, выделяемой на породоразрушающем инструменте, и существенно влияет на результаты расчета. При этом остается неизвестным, какая часть мощности, идущей на разрушение горной породы, преобразуется в теплоту, следовательно, необходима правильная оценка величины параметра  $\Delta t_3$ .

В ходе испытания вихревой трубы генератором 8Н (рис. 2) каждое увеличение давления воздуха на 0,1 МПа снижало температуру на 2÷4 °С, при начальном давлении 0,2 МПа температура холодного потока составляла –16°С, при максимальном давлении 0,8 МПа –30 °С.

В результате регрессионного анализа, проведенного на основании экспериментальных данных, получена зависимость температуры воздуха холодного потока вихревой трубы от его давления:

$$t_{1H} = -24,6 \cdot P - 10,9, \quad (27)$$

где  $P$  – давление сжатого воздуха, выходящего с компрессорной установки, МПа.

Коэффициент корреляции для данного уравнения составляет  $r = 0,96$ .

Полученную регрессионную зависимость, можно использовать в качестве модели начальной температуры  $t_{1H}$  (температура промывочной среды °С, нагнетаемой в бурильные трубы), при условии её достаточной точности, в зависимости от давления воздуха при бурении с очисткой воздухом.

Так как среднеквадратичная погрешность уравнения составляет 2,2 % от среднеарифметического его значения, значит уравнение 27 с достаточно точно описывает зависимость начальной температуры воздуха  $t_{1н}$  от величины его давления.

Закономерности температурного режима при бурении скважин, особенно при изменении агрегатного состояния буримых горных пород, описываются сложными аналитическими выражениями. Использование коэффициентов нестационарного теплообмена  $k_{\tau}$  и интенсификации теплообмена при агрегатном переходе  $k_{agr}$ , предложенных Ю. Д. Дядькиным, значительно упрощает решение подобных задач.

Для определённых условий разведочного бурения коэффициент нестационарного теплообмена рассчитывается по приближенной формуле

$$k_{\tau} = \frac{\alpha_2}{1 + B_i^4 \sqrt{F_0}}, \quad (28)$$

где  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи в кольцевом канале скважины,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С}}$ ;

$k_{\tau}$  – коэффициент нестационарного теплообмена в  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С}^\circ$ ;

$B_i = \frac{\alpha_2 R}{\lambda_{п}}$  – параметр Био;

$F_0 = \frac{\alpha_{п} \tau}{R^2}$  – параметр Фурье;

$\lambda_{п}$ , – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{С}^\circ$ ;

$\alpha_{п}$  – коэффициент температуропроводности пород массива,  $\text{м}^2/\text{ч}$ ;

$\tau$  – время (продолжительность циркуляции очистного агента), ч;

$R$  – радиус скважины, м.

Коэффициент изменения агрегатного состояния пород  $k_{agr}$  в виде поправочного множителя к коэффициенту нестационарного теплообмена  $k_{\tau}$  вводится для учета влияния на теплообмен фазовых переходов влаги и основан на допущении, что интенсификация теплообмена прямо пропорциональна относительному приросту переданного или воспринятого в единицу времени тепла за счет скрытой теплоты плавления.

Для определения коэффициента изменения агрегатного состояния пород  $k_{agr}$  в определенных условиях можно использовать приближенную расчетную формулу

$$k_{agr} = 1 + 1,4 \cdot 10^5 \frac{W_n}{[t]c_n}, \quad (29)$$

где  $[t]$  – абсолютная температура очистного агента,  $^\circ\text{С}$ ;

$W_n$  – влажность породы;

$c_n$  – теплоемкость породы,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{С}^\circ$ .

Если стальные обсадные колонны зацементированы, при практических расчетах  $k_{\tau}$ , не учитывая сопротивление стали, можно использовать лишь внешний радиус трубы, так как теплофизическим свойства цементного камня

и горные породы практически одинаковы. Все прочие расчеты ведутся по внутреннему диаметру обсадной колонны.

Для определения коэффициента теплопередачи через стенку бурильной колонны служит формула:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (30)$$

где  $d_1, d_2$  – внутренний и наружный диаметры трубы, м;

$\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно во внутреннем канале бурильных труб и кольцевом канале скважины, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала труб, Вт/(м·°С).

Безразмерный гидравлический уклон в бурильной колонне и в кольцевом канале  $i_2$  определяется на основе предварительно проведенного расчета потерь давления в циркуляционные системы скважины из соотношения [73; с. 48-52]:

$$i = \frac{P}{g\rho H}, \quad (31)$$

где  $P$  – потери давления, Па;

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

$H$  – конечная глубина скважины, м;

При бурении с продувкой воздухом можно принимать  $i_1 = i_2 = 0$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в случаях бурения с промывкой жидкостью и продувкой воздухом может быть определен по критериальным формулам М.А. Михеева. В случае обычно наблюдаемого при бурении с промывкой турбулентного течения можно пользоваться формулой:

$$\alpha = 0,021 Re^{0.8} Pr^{0.43} \frac{\lambda}{D_3}; \quad (32)$$

при бурении с продувкой воздухом

$$\alpha = 0,018 Re^{0.8} \frac{\lambda}{D_3}, \quad (33)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности очистного агента при средней температуре в скважине, Вт/(м·°С);

$D_3$  – эквивалентный диаметр кольцевого зазора

$Re$  – число Рейнольдса,  $Re = v \frac{D_3}{\zeta}$

$Pr$  – число Прандтля,  $Pr = \frac{\zeta}{a}$ ;

$v$  – средняя скорость движения жидкости по сечению канала (в случае воздуха – при среднем давлении), м/с;

$\zeta$  – кинематическая вязкость промывочной среды при средней температуре в скважине, м<sup>2</sup>/с;

$a$  – коэффициент температуропроводности промывочной среды при средней температуре в скважине, м<sup>2</sup>/с.

Прирост температуры какой-либо промывочной среды в результате местного нагрева у забоя скважины можно определить по формуле [73; с. 48-52]:

$$\Delta t_3 = \frac{N}{Gc_p}, \quad (34)$$

где  $N$  – мощность, реализуемая на забое (в частности, мощность, развиваемая забойным двигателем), Вт;

$G$  – весовой расход промывочной среды, кг/ч;

$c_p$  – удельная весовая теплоемкость промывочной среды, Дж/кг·°С.

## 2.5 Возможность регулирования температурного режима скважины

В работе приведены расчеты по прогнозированию и регулированию температурного режима бурения скважин с очисткой забоя воздухом, в основных зависимостях можно принять  $i = i_2 = 0$ ,  $\sigma = 0$ ,  $e^{r_2 H} = 0$  позволяющие получить более простые формулы распределения температуры: в бурильных трубах

$$t_1 = (t_{1H} - T_{\Pi}) \cdot e^{r_2 h} + \frac{k\pi}{G_r c_p} \cdot \frac{\Delta t_3}{r_1} \cdot e^{r_1(h-H)} + T_{\Pi}, \quad ^\circ\text{C}; \quad (35)$$

и в кольцевом канале

$$t_2 = (T_{\Pi} - t_{1H}) \cdot \frac{r_2}{r_1} \cdot e^{r_2 h} - \frac{k\pi}{G_r c_p} \cdot \frac{\Delta t_3}{r_2} \cdot e^{r_1(h-H)}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (36)$$

В расчётах температурного режима необходимо учитывать и давление воздуха, подаваемое компрессорной установкой, от которого зависит температура воздуха на холодном выходе вихревой трубы. В расчётах температурных режимов бурения с использованием вихревой трубы, величина параметра  $t_{1H}$  (температура промывочной среды °С, нагнетаемой в бурильные трубы) определяется зависимостью 27, полученной нами экспериментальным путем.

В этом случае, выражения 35 и 36 примут следующий вид: в бурильных трубах

$$t_1 = [(-2,46 \cdot P - 10,9) - T_{\text{п}}] e^{r_2 h} \cdot \frac{k\pi}{G_{\text{гср}}} \cdot \frac{\Delta t_3}{r_1} \cdot e^{r_1(h-H)} + T_{\text{п}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (37)$$

в кольцевом канале

$$t_2 = [T_{\text{п}} - (-2,46 \cdot P - 10,9)] \frac{r_2}{r_1} e^{r_2 h} - \frac{k\pi}{G_{\text{гср}}} \frac{\Delta t_3}{r_2} e^{r_1(h-H)}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (38)$$

где  $T_{\text{п}}$  – средняя постоянная по глубине естественная температура горных пород,  $^\circ\text{C}$ ;

$P$  – давление воздуха, МПа.

Определение важнейших значений температуры воздуха в кольцевом канале у забоя и устья осуществляется через приближенные зависимости, которые получены из выражения (2.37) при условиях  $h = H$  и  $h = 0$

$$t_3 = T_{\text{п}} - \frac{k \cdot \pi \cdot \Delta t_3}{G \cdot c \cdot r_2}; \quad (39)$$

$$t_y = (T_{\text{п}} - t_{1H}) \cdot \frac{r_2}{r_1} + T_{\text{п}}. \quad (40)$$

Выражения (2.39) и (2.40) показывают, что значения температур на забое и устье не зависят от глубины скважины, определяются условиями и продолжительностью теплообмена, температурой породы.

Одной из важнейших функций продувки скважины является подъем в восходящем потоке частиц борового шлама и удаление их из забоя. Воздух имеет малую вязкость и плотность, что создаёт более высокую скорость ее движения относительно промывочной жидкости.

При нормальных атмосферных условиях ( $p_k = p_0 = 9,8 \cdot 10^4$  Па;  $T_{\text{ср}} = T_0 = 273$  К) объемный расход воздуха определяется по формуле, ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ):

$$Q_0 = \frac{\pi}{4} (D_c^2 - d^2) v_3 \cdot 60, \quad (41)$$

где  $D_c$  и  $d$  – соответственно диаметры скважины и бурительных труб, м;  
 $v_3$  – эквивалентная скорость восходящего потока воздуха;

$$v_3 = v_{\text{в.ч}} + u, \quad (42)$$

где  $v_{\text{в.ч}}$  – скорость витания частиц;

$u$  – скорость выноса выбуренной породы, принимаемой равной  $u = 0,2 v_{\text{в.ч}}$  откуда

$$v_3 = v_{\text{в.ч}} + 0,2 v_{\text{в.ч}}. \quad (43)$$

При бурении геологоразведочных скважин расход воздуха (м<sup>3</sup>/мин) определяют по формуле.

$$Q = K \cdot \frac{\pi}{4} (D_c^2 - d^2) \cdot v_3, \quad (44)$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий неравномерность скорости потока по стволу из-за местной повышенной разработки, наличия каверн водопритоков в скважину ( $K = 1,3 - 1,5$ );

$D_c$  – диаметр скважины с учетом ее разработки, м;

$d$  – диаметр бурильных труб, м.

Скорость поднимающегося воздушного потока ориентировочно может приниматься в следующих пределах: при бурении коронками из твердых сплавов 10-12 м/с; при бурении алмазными инструментами 15 – 18 м/с. Для бурения сплошным забоем в условиях «сухого разреза» скважины большинство исследователей при расчетах принимают  $v_3 = 15 - 25$  м/с.

Скорость витания определяется по формуле Риттенгера

$$v_{в.ч.} = \sqrt{4g/3k_c} \cdot \sqrt{\rho_n d_{ч}/\rho_0}, \quad (45)$$

где  $d_{ч}$  – диаметр наибольших частиц шлама, подлежащих выносу, мм;

$k_c$  – составляет 0,805 (песчаник) и 1,40 (известняк);

$\rho_n$  – плотность породы, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Диаметр наиболее крупных частиц породы для турбулентного их обтекания

$$d_{ч} = v_3^2 \frac{3k_c}{4g} \frac{\rho_0}{\rho_n - \rho_0}, \quad (46)$$

где  $v_3^2$  – эквивалентная скорость восходящего потока воздуха.

На больших глубинах давление и, следовательно, плотность воздуха возрастают, поэтому объемный расход воздуха, достаточный для транспортирования шлама из наиболее трудных условий определяется из выражения:

$$Q = Q_0 \cdot k_1, \quad (47)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий уменьшение подъемной силы восходящего потока воздуха в зависимости от глубины скважины, вследствие потерь давления в кольцевом пространстве;

$Q_0$  – расход воздуха без учета влияния глубины скважины и

механической скорости бурения, м<sup>3</sup>/мин.

Значение  $k_1$  при геологоразведочном бурении ориентировочно могут быть рассчитаны по формуле:

$$k_1 = \sqrt{P_3/P_y}, \quad (48)$$

где  $P_3$  – давление воздуха на забое, МПа;

$P_y$  – давление воздуха на устье скважины, МПа.

Для расчета потерь давления для различных участков в циркуляционные системы рекомендуется упрощенные формулы [2; с. 58-59]:

для горизонтального потока в выкидной линии и горизонтальных участках поверхностной обвязки при условии, что на указанных участках смонтировано специальное оборудование (шламоуловитель, вентилятор)

$$P_{\text{н.п.о.}} = \sqrt{P_k^2 + (1 + k_r \mu_1) \lambda \frac{G^2 RT_{\text{cp}}}{dS^2} l}; \quad (49)$$

для восходящего потока в кольцевом пространстве

$$P_{\text{н.к.}} = \frac{\sqrt{P_k^2 + a_2 G^2 l + P_k b l}}{1 - (1 + \mu_1) b l}; \quad (50)$$

для нисходящего потока по бурильным трубам и УБТ

$$P_{\text{т.н.}} = \frac{\sqrt{P_k^2 + a_1 G^2 (l + l_3) - P_k b l}}{1 + b l}, \quad (51)$$

где  $a_1, a_2$  и  $b$  – сокращённые обозначения, рассчитываемые по следующим уравнениям:

$$a_1 = \lambda_1 \frac{RT_{\text{cp}}}{d_1 S_1^2}; \quad a_2 = \lambda_2 \frac{RT_{\text{cp}}}{D - d_2 S_2^2}; \quad b = \frac{g \sin \alpha}{2RT_{\text{cp}}}, \quad (52)$$

где  $P_k$  – давление в конце расчетного участка с постоянным поперечным сечением в Па;

$k_r$  – безразмерный коэффициент Гастерштадта, определяемый в зависимости от вида породоразрушающего инструмента: для шарошечных и лопастных долот  $k_r=1,5-2$ ; для алмазных коронок и долот  $k_r=0,5-1,0$  для твердосплавных коронок  $k_r=1-1,5$ ;

$\mu_1$  – расходная концентрация выбуренной породе в потоке воздуха;

$l$  – текущая координата для нисходящего – от забоя к устью;

$l_3$  – эквивалентная длина канала бурильной колонны, м;

$\lambda$  – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления;

$G$  – массовый расход газообразных агентов, кг/с;

$R$  – газовая постоянная, Дж/ (кг·К);  
 $T_{cp}$  – средняя температура в циркуляционной системе скважины в К;  
 $D_3$  – эквивалентный диаметр канала потока (для круглого канала равный его диаметру; для кольцевого – разность диаметров скважины  $D_{cp}$  и наружного диаметр бурильных труб  $d_n$  в м);  
 $S$  – площадь сечения канала потока в м<sup>2</sup>;  
 $\alpha$  – угол наклона скважины к горизонту, градусах.  
 Расходная концентрация выбуренной породы в потоке воздуха:

$$\mu_1 = \frac{G_{п}}{G}, \quad (53)$$

где  $G_{п}$  – масса породы, выносимая с забоя, кг/ч,

$$G_{п} = \frac{\pi}{4} \cdot D_c^2 \cdot \rho_n \cdot v_m, \quad (54)$$

где  $D_c^2$  – диаметр скважины с учетом ее разработки, м;  
 $v_m$  – механическая скорость проходки, м/с.

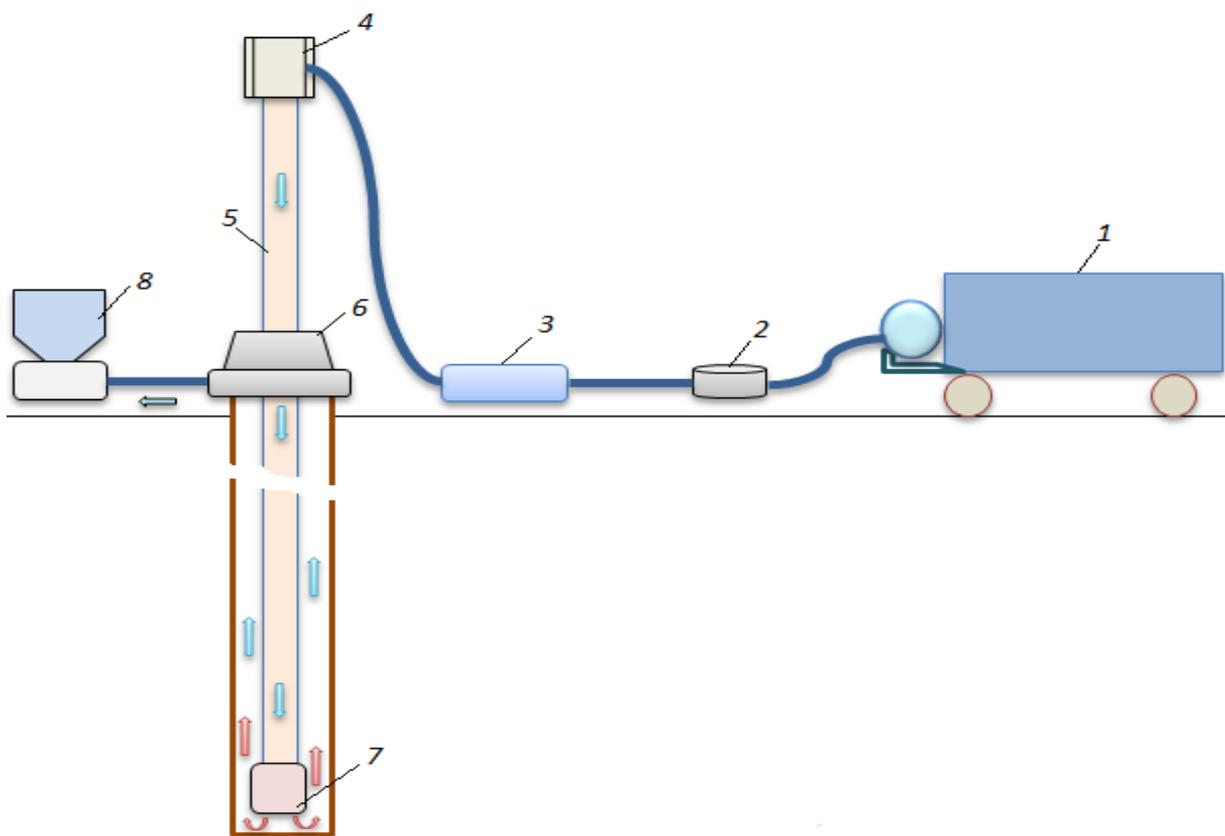
Таблица 1 – Параметры для расчета прогнозирования и регулирования температурного режима скважины

Наименование параметра	Единица измерения	Индекс параметра
1	2	3
Диаметр скважины	мм	D
Диаметр бурильных труб	мм	d
Теплоемкость породы	Дж/(кг·°С)	$c_{п}$
Коэффициент теплопроводности	Вт/(м·°С)	$\lambda_{п}$
Температура породы	°С	$T_{п}$
Массовый расход воздуха	кг/ч	G
Начальная температура очистного агента (воздуха)	°С	$t_{1н}$
Мощность на забое	кВт	$N_{заб}$
Продолжительность циркуляции	ч	$\tau$

Нами был рассчитан температурный режим скважины при бурении с очисткой забоя воздухом в программе MATHCAD с использованием ее графического интерфейса на основе формул 37 и 38.

Температурный режим скважины был рассмотрен для двух случаев, в первом случае, вихревая труба устанавливается на устье скважины,

охлажденный воздух подается в скважину по теплоизолированным бурильным трубам (рис. 3).



1 – компрессор, 2 – влагоотделитель, 3 – вихревая труба, 4 – вертлюг,  
5 – теплоизолированная бурильная труба, 6 – герметизатор, 7 – коронка,  
8 – шламоуловитель

Рисунок 3 – Схема движения воздушного потока при бурении с продувкой воздухом с применением вихревой трубы

Во втором случае, вихревая труба встраивается в состав бурового снаряжения над колонковой трубой (рис. 2.20).

Температурный режим с не теплоизолированными бурильными трубами не рассматривается, так как, воздух имеет низкую теплоемкость и при ее подаче по не теплоизолированным бурильным трубам, у которых теплопроводность высока, воздух на начальных глубинах 30-40 м приобретает температуру близкой к температуре породы. Поэтому применение не теплоизолированных бурильных труб в этом случае не рационально.

При расположении вихревой трубы на устье скважины (рис. 3) сжатый воздух с ресивера компрессора 1 подается в вихревую трубу 3, после температурного разделения холодный поток воздуха через вертлюг 4 поступает в теплоизолированные бурильные трубы 5, охлаждая коронку 7 и очищая забой от шлама, поднимается по кольцевому зазору и поступает в шламоуловитель 8.

В первом случае расчета для определения температурного режима скважины применялись теплоизолированные бурильные трубы. Скважина с диаметром 76 мм с расходами воздуха 400 и 600 кг/ч; глубина скважины  $L=100$  м; наружный диаметр бурильных труб  $D=0,063$  м; внутренний диаметр  $d=0,04$  м; порода типа песчаников при  $\delta=2600$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{п}=1,05 \cdot 10^3$ ;  $\lambda_{п}=1,86$  Вт/(м·°С) с температурой  $T_{п}=10^{\circ}\text{C}$ ; мощность на забой 2,5 кВт.

Результаты сделанных расчетов в программе Mathcad представлены на рисунках 3 и 4.

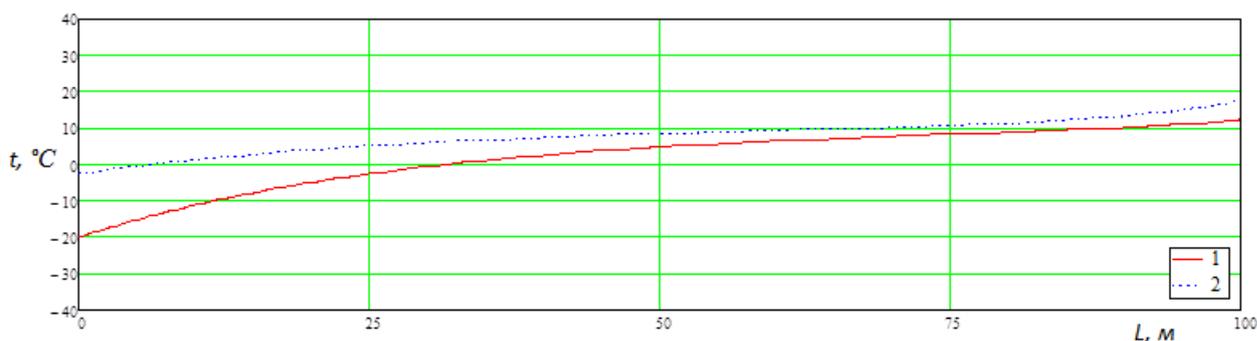


Рисунок 3 – График распределения температуры в теплоизолированных бурильных трубах (1) и кольцевом канале (2),  $G=400$  кг/ч,  $H_{к}=100$  м,  $\tau=2$  ч

Результаты расчета с теплоизолированными бурильными трубами при расположении вихревой трубы на устье скважине с расходом воздуха 400 кг/ч при глубине скважины 100 метров и температурой продувочного воздуха  $-20^{\circ}\text{C}$  (рис. 2.18) показывает, что от верхних участков ствола до глубины 75÷80 метров происходит повышение температуры продувочного воздуха и температура становится близкой к температуре породы. В призабойной зоне на глубине 90 метров наблюдается постепенное возрастание температуры воздуха под действием тепла, отбираемого от породоразрушающего инструмента. Температура воздуха на конечной глубине 100 метров достигает в бурильной трубе  $11^{\circ}\text{C}$  и в кольцевом канале скважине  $18^{\circ}\text{C}$ .

При увеличении расхода воздуха до 600 кг/ч (рис. 5) на верхних участках скважины температура воздуха также постепенно повышается, на конечной глубине 100 метров температура воздуха в бурильных трубах составляет  $7^{\circ}\text{C}$ , что ниже на  $4^{\circ}\text{C}$  при сравнении с графиком 3 и в кольцевом канале составляет  $10^{\circ}\text{C}$  также которая ниже на  $8^{\circ}\text{C}$ .

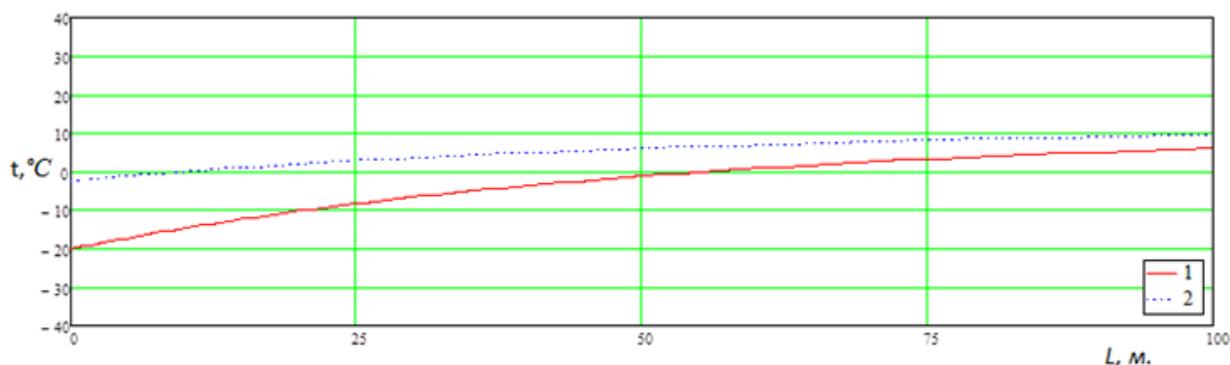
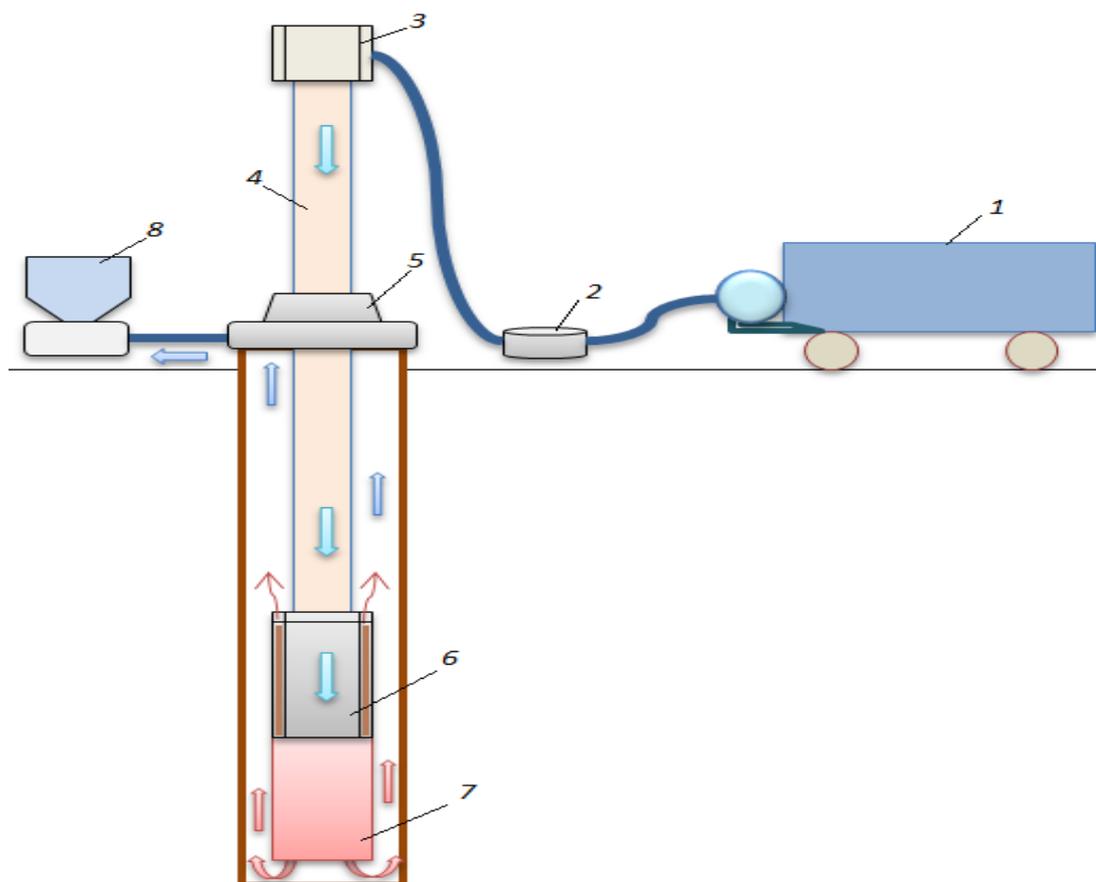


Рисунок 5 – График распределения температуры в теплоизолированных бурильных трубах (1) и кольцевом канале (2),  $G=600$  кг/ч,  $H_k=100$  м,  $\tau=2$  ч

Во втором случае расчетов вихревая труба встраивается в состав бурового снаряда над колонковой трубой.

Сжатый воздух из компрессора 1 по бурильным трубам 4 подается в вихревую трубу 6, где разделяется на холодный и горячий потоки. Холодный поток направляется внутрь колонковой трубы 7, попадает на забой и по узкому кольцевому зазору между стенками скважины и колонковой трубой направляется вверх, транспортируя шлам с забоя. Горячий воздух выпускается непосредственно в широкий зазор между стенками скважины и бурильными трубами, где смешивается с холодным потоком.

Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением количества продувочного воздуха, в призабойной зоне скважины снижается температура, наблюдается зависимость температуры в призабойной зоне скважины от расхода воздуха.



1 – компрессор, 2 – влагоотделитель, 3 – вертлюг, 4 – бурильная труба,  
 5 – герметизатор, 6 – вихревая труба, 7 – колонковая труба,  
 8 – шламоуловитель

Рисунок 6 – Схема воздушного потока при расположении вихревой трубы над колонковой трубой

Параметры расчета: скважина с диаметром 76 мм с расходами воздуха 400 и 600 кг/ч; длина колонковой трубы  $L=5$  м; порода типа песчаников при  $\delta=2600$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{п}=1,05 \cdot 10^3$ ;  $\lambda_{п}=1,86$  Вт/(м·°С); температура породы  $T_{п} = 10^{\circ}\text{C}$ ; мощность на забой 2,5 кВт.

Результаты сделанных расчетов в программе MATHCAD представлены на рисунках 7, 8.

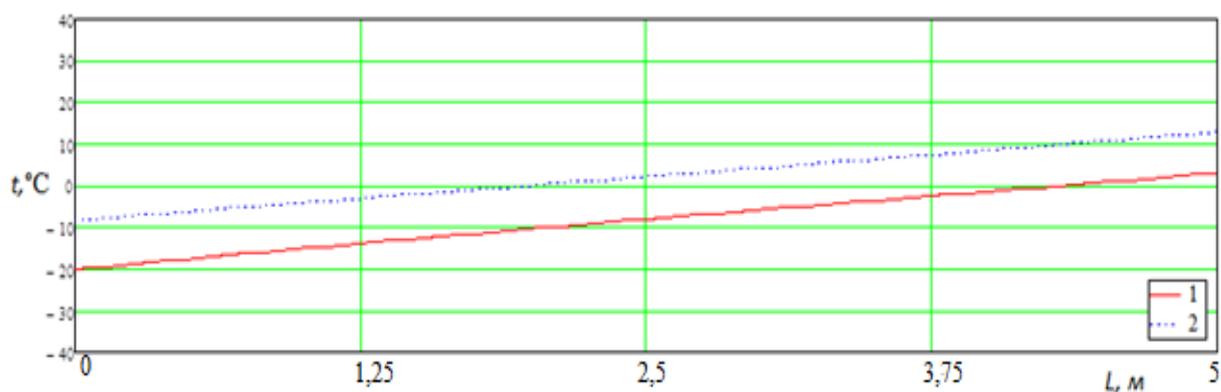


Рисунок 7 – График распределения температуры при установке вихревой трубы в состав бурового снаряда над колонковой трубой, 1 - в колонковой трубе и 2 - в кольцевом канале,  $G=400$  кг/ч,  $H_k=5$  м,  $\tau=2$  ч

На графике (рис. 2.21) наблюдается интенсивное повышение температуры, при начальной температуре  $t_{н1} = -20$  °C и расхода воздуха  $G = 400$  кг/ч на конечной глубине температура составляет в колонковой трубе 1 °C, а в кольцевом канале 11°C.

При увеличении расхода продувочного воздуха до 600 кг/ч (рис. 2.22), интенсивность повышения температуры ниже на два раза по сравнению с графиком (рис. 2.21), а конечная температура в колонковой трубе составляет – 8 °C, а в кольцевом канале –1°C. Здесь так же наблюдается зависимость изменения температуры от расхода воздуха.

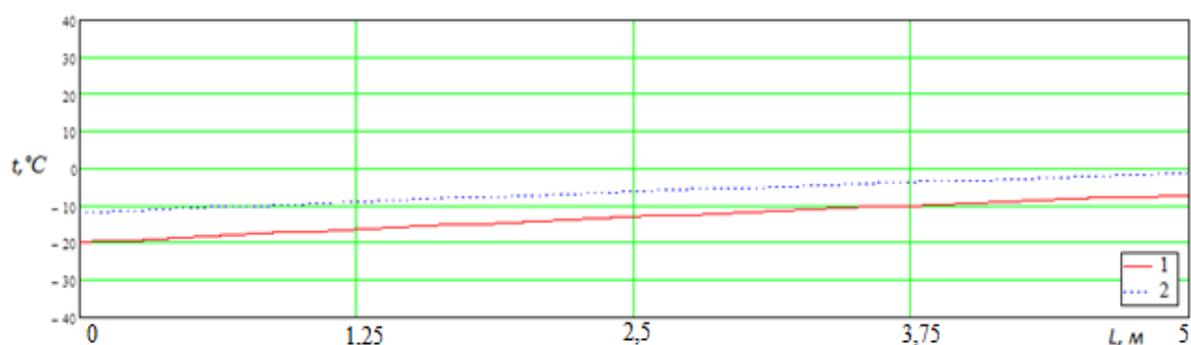


Рисунок 8 – График распределения температуры при установке вихревой трубы в состав бурового снаряда над колонковой трубой, 1- в колонковой трубе и 2- в кольцевом канале,  $G=600$  кг/ч,  $H_k=5$  м,  $\tau=2$  ч

Результаты расчетов по определению температурного режима скважины, приведенных на графиках (рис. 2.18, 2.19, 2.21 и 2.22) показывают, что применение охлажденного продувочного воздуха значительно снижает температуру в скважине, которая создает благоприятные температурные условия для работы породоразрушающего инструмента, предотвращая отрицательные влияния высоких температур на забое скважине [2].

Наилучшего охлаждения на забое можно достичь, установив вихревую трубу в состав бурового снаряда над колонковой трубой. Но в этом случае возникает необходимость разработки надёжной конструкции забойного бурового снаряда, обеспечивающую бесперебойную работу.

## **2.6 Основные направления совершенствования температурного режима для повышения энергетической эффективности бурения скважин с продувкой**

Одним из причин приводящего к преждевременной потере работоспособности инструмента и, как следствие, к удорожанию буровых работ, является нарушения нормального теплового режима работы породоразрушающего инструмента.

В настоящее время существует ряд рекомендаций по предупреждению прижога инструмента, которые в основном сводятся к контролю за работой циркуляционной системы, обеспечению герметичности бурового снаряда, выбору минимально допустимого расхода очистного агента. Однако достаточно высокий процент прижогов свидетельствует об их низкой эффективности.

Установить нормальный тепловой режим работы породоразрушающего инструмента можно путём принудительного охлаждения воздуха до необходимой температуры, способной исключить выделения тепла на забое.

С целью, определения влияния величины начальной температуры очистного воздуха на температурный режим породоразрушающего инструмента на основе формул 2.20 и 2.24 в графической программе MATHCAD построена математическая модель расчета температурного режима породоразрушающего инструмента.

Для расчета температурного режима кольцевой буровой коронки на основе формулы 2.20 выбраны следующие параметры:  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала коронки, Вт/ч ( $\text{м}\cdot^\circ\text{C}$ );  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи соответственно в зазорах между коронкой и керном, между коронкой и стенками скважины, Вт/( $\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}$ );  $D_1$  и  $D_2$  – внутренний и наружный диаметры короночного кольца, м;  $t_1$  – начальная температура промывочного агента (внутри колонковой трубы над коронкой),  $^\circ\text{C}$ ;  $N$  – реализуемая на забое мощность (Вт),  $G$  – массовый расход очистного агента (кг/с),  $c_p$  – удельная массовая теплоёмкость воздуха, Дж/(кг $\cdot^\circ\text{C}$ ),  $K_p$  – безразмерный коэффициент распределения тепловых потоков.

Результат расчета температурного режима кольцевой буровой коронки приведен на рисунке 9.

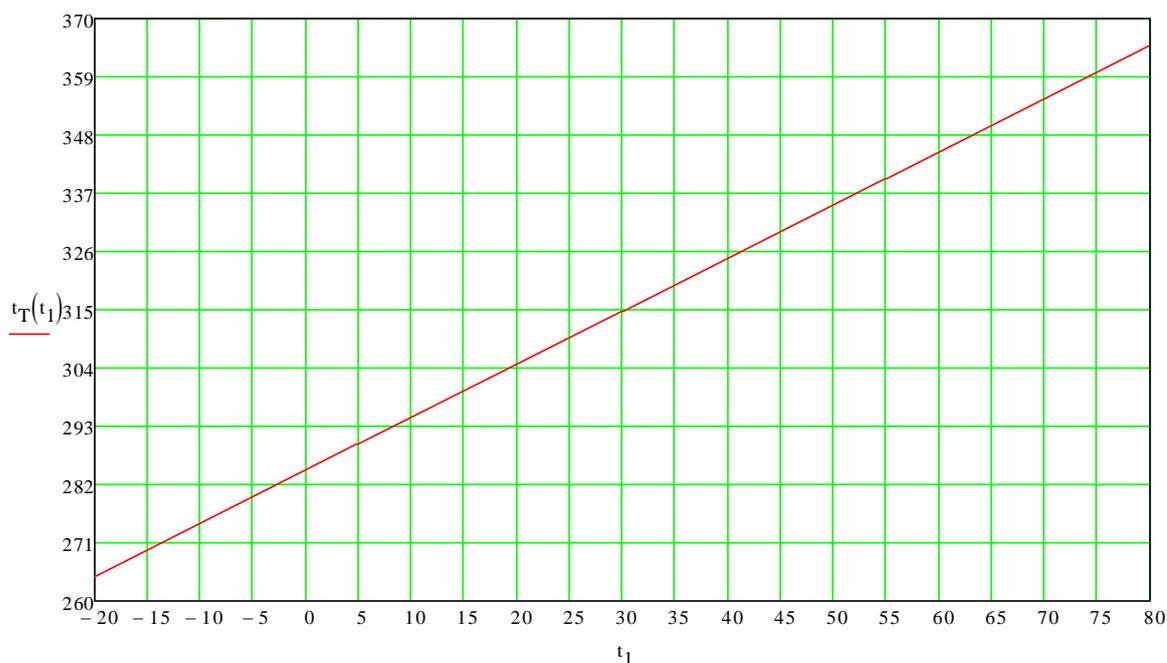


Рисунок 9 – Расчетная зависимость температуры на торце кольцевой коронки ( $t_T$ ) от величины начальной температуры продувочного воздуха ( $t_1$ ).  $D_1=64$  мм,  $D_2=76$  мм;  $N=2500$  Вт;  $G=400$  кг/ч;  $t_1$  изменялся от  $-20$  °С до  $80$  °С

Результаты расчета по определению температуры на торце кольцевой буровой коронки показывают, что температура коронки изменяется в зависимости от величины начальных температур очистного воздуха. При увеличении температуры воздуха  $t_1$  наблюдается повышение температуры торца коронки  $t_T$ .

Для расчета температурного режима шарошечного долота на основе формулы 2.24 выбраны следующие параметры:  $h$  – средняя толщина лапы вдоль оси цапфы, м;  $f_{ц}$ ,  $f_{л}$  – площади сечения основания цапфы и наружной поверхности лапы, м<sup>2</sup>;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала коронки, Вт/ч (м·°С);  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;  $c_p$  – удельная весовая теплоемкость очистного воздуха, Дж/кг·°С;  $G_r$  – весовой расход воздуха, кг/с;  $k_1$ ,  $k_2$  – безразмерные коэффициенты потерь мощности на трение в опорах и распределения тепловых потоков в подшипнике доли ед.;  $N$  – забойная мощность, Вт;  $m$  – число шарошек;  $\Psi$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $\Delta W$  – влажность доли единицы.

Результат расчета температурного режима шарошечного долота приведен на рисунке 10.



Рисунок 10 – Расчетная зависимость температуры цапфы трехшарошечного долота ( $t_{ц}$ ) от величины начальной температуры продувочного воздуха ( $t_1$ ).  $N=2500$  Вт;  $G=0,210$  кг/с;  $m=3$ ;  $t_1$  изменялся от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $80^{\circ}\text{C}$

Результаты расчета температуры цапфы трехшарошечного долота также показывают, что температура долота изменяется в зависимости от величины начальных температур очистного воздуха. При начальной температуре воздуха  $t_1 = -20^{\circ}\text{C}$ , температура цапфы трехшарошечного долота  $t_{ц}$  составляла  $229^{\circ}\text{C}$ , при температуре очистного воздуха  $t_1 = 80^{\circ}\text{C}$ , температура долота  $t_{ц}$  составляет  $328^{\circ}\text{C}$ . Таким образом можно сделать вывод, что нормализация температурного режима породоразрушающего инструмента возможна за счет обеспечения низких температур на забое.

Для обеспечения оптимальной температуры воздуха в процессе бурения скважин с продувкой применяются разные холодильные установки. Широко применяются фреоновые парокомпрессорные холодильные устройства с воздушным охлаждением конденсатора, холодопроизводительностью при стандартном режиме составляет от 1,3 до 14 кВт в зависимости от марки установки, мощностью двигателя соответственно от 1,0 до 10 кВт. Однако, применяемые в настоящее время охлаждающие устройства достаточно дорогие и потребляют большое количество энергии.

Кроме того, охлаждение продувочного воздуха в холодильных машинах осуществима лишь на поверхности, так как, воздух имеет низкую теплоемкость и при ее подаче по бурильным трубам, у которых теплопроводность высока, воздух на начальных глубинах 20÷40 м приобретает температуру близкой к температуре породы.

### 3. Разработка рекомендаций по энергоэффективной эксплуатации бурового оборудования с использованием вихревых труб

#### 3.1 Мощность, развиваемая на забое скважины и влияние высоких температур на работу породоразрушающего инструмента

Мощность является одним из важнейших динамических параметров бурения карьерных взрывных скважин, определяющих энергоёмкость и эффективность процесса разрушения горной породы. Определение рациональных технологических режимов и обеспечение экономической эффективности зависит от определения необходимой мощности бурения на стадии проектирования процесса.

При колонковом бурении скважин мощность складывается из трех основных составляющих:

$$N_{\text{б}} = N_{\text{заб}} + N_{\text{вр}} + N_{\text{ст}}, \quad (55)$$

где  $N_{\text{заб}}$  – мощность двигателя, расходуемая на разрушение породы, Вт;  
 $N_{\text{вр}}$  – мощность двигателя бурового оборудования, расходуемая на вращение колонны бурильных труб о стенки скважины, Вт;  
 $N_{\text{ст}}$  – мощность, расходуемая в трансмиссии и других узлах бурового станка, Вт.

Рассмотрим мощность двигателя, затрачиваемую собственно на разрушение породы  $N_{\text{заб}}$ . Мощность на бурение горной породы зависит прежде всего от типа породоразрушающего инструмента и параметров режима бурения.

При бурении коронками из твёрдых сплавов величину мощности на забой определяю по формуле:

$$N_{\text{заб}} = 0,53 \cdot C_{\text{ос}} \cdot n \cdot D_{\text{д}} \cdot (0,137 + \mu_{\text{тр}}), \quad (56)$$

где  $C_{\text{ос}}$  – осевая нагрузка, действующая на коронку, даН;  
 $n$  – частота вращения коронки, мин<sup>-1</sup>;  
 $D_{\text{д}}$  – средней диаметр коронки, м;  
 $\mu_{\text{тр}}$  – коэффициент трения резцов коронки о породу на забое скважины [65].

При использовании алмазных коронок мощность на забой определяется по формуле:

$$N_{\text{заб}} = 0,2 \cdot C_{\text{ос}} \cdot n \cdot D_{\text{кор}}. \quad (57)$$

При бурении без отбора керна мощность на забое определяется по формуле:

$$N_{\text{заб}} = 0,35 \cdot C_{\text{ос}} \cdot n \cdot D_{\text{кор}} \quad (58)$$

где  $D_{\text{д}}$  – диаметр долота, м.

При использовании шарошечных долот мощность двигателя бурового оборудования определяется по формуле:

$$N_{\text{заб}} = 10^{-3} \mu P_{\text{д}} n D. \quad (59)$$

Если диаметр долота 76 мм и более, принимаем  $\mu = 0,17$

Величина теплового потока на поверхности трения бурового инструмента и породы представляет особый интерес, так как повышение температуры, возникающее в процессе бурения скважины, отрицательно влияет на структурные свойства металла и породоразрушающий инструмент теряет свою первоначальную прочность, быстро изнашивается, теряются твердосплавные вставки и алмазы [46; с. 63-67].

Необходимость экспериментального оценивания величины мощности двигателя бурового инструмента и количества теплоты, возникающей на забое, обоснована значительным влиянием температурного фактора на эффективность работы станка при проходке скважин.

$$\frac{r_2}{r_1} e^{r_2 h} - \frac{k\pi(7 \cdot 10^9 \cdot v_{\text{п}} - 83,82)}{G_{\text{г}}^2 \cdot c_{\text{п}}^2 \cdot r_2} e^{r_1(h-H)}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (60)$$

### **3.2 Разработка конструкции инструмента при расположении вихревой трубы у забоя**

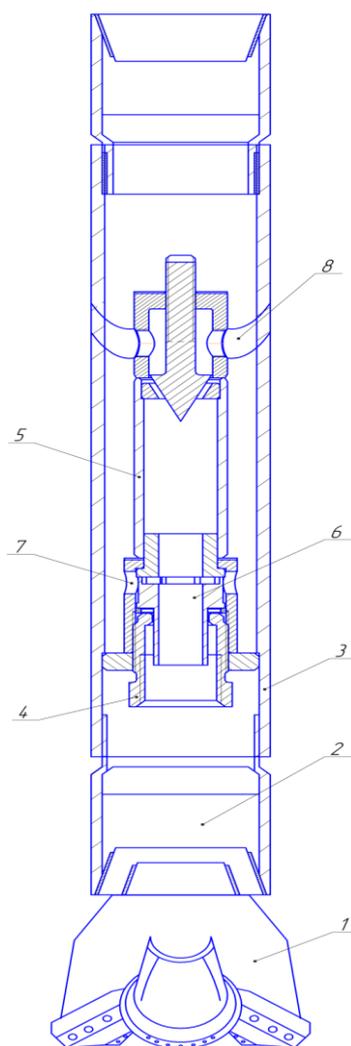
Искусственное понижение температуры воздуха до значения, необходимого для нейтрализации тепла, выделенного на забое, устраняет отрицательное воздействие температурного фактора.

Наилучшего охлаждения очистного воздуха на забое можно достичь, установив вихревую трубу в состав бурового снаряда над породоразрушающим инструментом. Но в этом случае, возникает необходимость разработки надёжной конструкции забойного бурового снаряда, обеспечивающую бесперебойную работу.

Обобщение результатов исследований и опыта использования вихревых труб, позволило разработать конструкцию вихревой трубы для установки ее в призабойной зоне бурового снаряда с целью охлаждения продувочного воздуха непосредственно на забое скважины.

Для повышения эффективности породоразрушающего инструмента, на основе нормализации и регулирования температурных режимов при бурении

с очисткой забоя воздухом, разработана следующая конструкция бурового снаряда, включающая в себя вихревую трубу (рис. 11).



1 – шарошечное долото; 2 – переходник; 3 – наружная труба; 4 – перемычка (шайба); 5 – вихревая труба; 6 – гайка; 7 – генератор холодной фракции на холодном выходе; 8 – корпус; 9 – входное отверстие; 10 – шайба; 11 – корпус дросселя на горячем выходе; 12 – тангенциальное отверстие для выхода горячего воздуха; 13 – дроссель на горячем выходе; 14 – верхний переходник

Рисунок 11 – Буровой снаряд, включающий в себя вихревую трубу для бурения с очисткой забоя воздухом

Буровой снаряд с вихревой трубой работает следующим образом. При бурении скважины сжатый воздух по наружной трубе 3, через входные отверстия 7, подается на генератор холодной фракции 6 вихревой трубы 5 и закручивается в ней. Поток сжатого воздуха при прохождении через вихревую трубу разделяется на два потока, поток холодного и горячего воздуха. Поток холодного воздуха вытекает из отверстия гайки 4, через переходник 2 и буровое долото 1, поступает на забой скважины для выноса продуктов разрушения в затрубное пространство с одновременным охлаждением

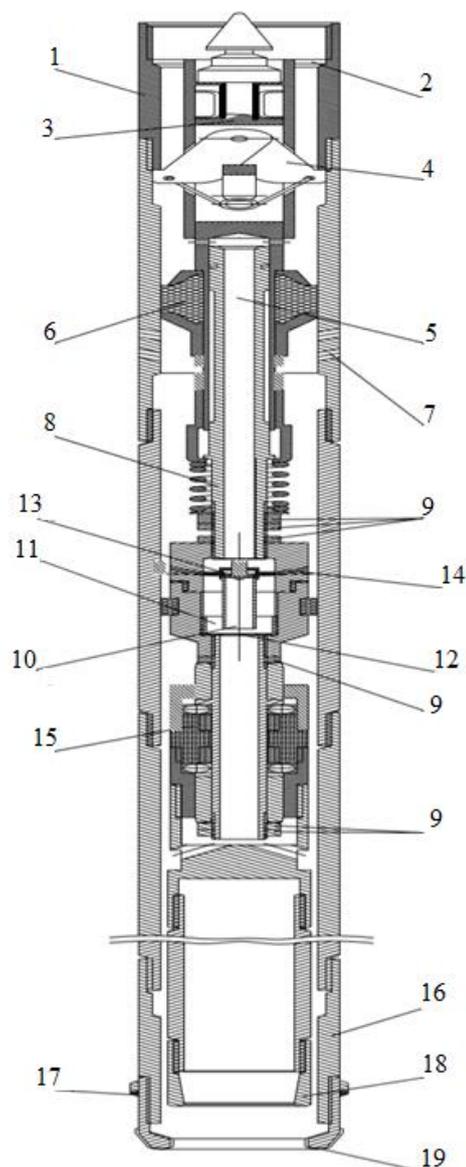
бурового долота. Генератор холодной фракции, в данном устройстве, выполнен съемным, который можно заменить на другой тип генератора, что позволяет, в случае необходимости, изменить режим охлаждения при изменении режимов бурения.

Горячий воздух из вихревой трубы 5, через тангенциальное отверстие для выхода горячего потока воздуха 8, вытекает в затрубное пространство. Поскольку отверстие 8 выполнено тангенциально эжекторным, то оно создаёт вихревое движение в затрубном кольцевом зазоре. Это позволяет эжектировать холодный поток с продуктами разрушения, что улучшает очистку забоя и благоприятно сказывается на охлаждении долота, так как уменьшаются затраты энергии на повторное переизмельчение частиц породы.

Такое выполнение бурового снаряда для бурения с продувкой воздухом позволяет повысить стойкость бурового долота и нормализовать температурный режим породоразрушающего инструмента.

Применение охлажденного продувочного воздуха значительно снижает температуру в скважине, создает благоприятные температурные условия для работы породоразрушающего инструмента, предотвращая отрицательные влияния высоких температур на забое скважины.

С целью наилучшего охлаждения бурового долота при бурении скважин с продувкой воздухом и с отбором керна, перспективно использование вихревой трубы в качестве холодильника, встраиваемого в состав бурового снаряда.



1 – наружная часть; 2 – отверстие для продувочного воздуха; 3 – фиксатор;  
 4 – запорный узел; 5 – внутренняя труба; 6 – уплотнитель;  
 7 – тангенциальные отверстия на колонковой трубе для выхода горячего  
 потока воздуха; 8 – сигнализатор самозаклинивания керна; 9 – гайки;  
 10 – вихревая трубка; 11 – диафрагма (для входа сжатого воздуха);  
 12 – отверстие для выхода холодного потока воздуха; 13 – дроссель на  
 горячем выходе; 14 – тангенциальные отверстия для выхода горячего потока  
 воздуха; 15 – подшипниковый узел; 16 – нижняя труба; 17 – расширитель;  
 18 – kernорвателное кольцо; 19 – буровая коронка

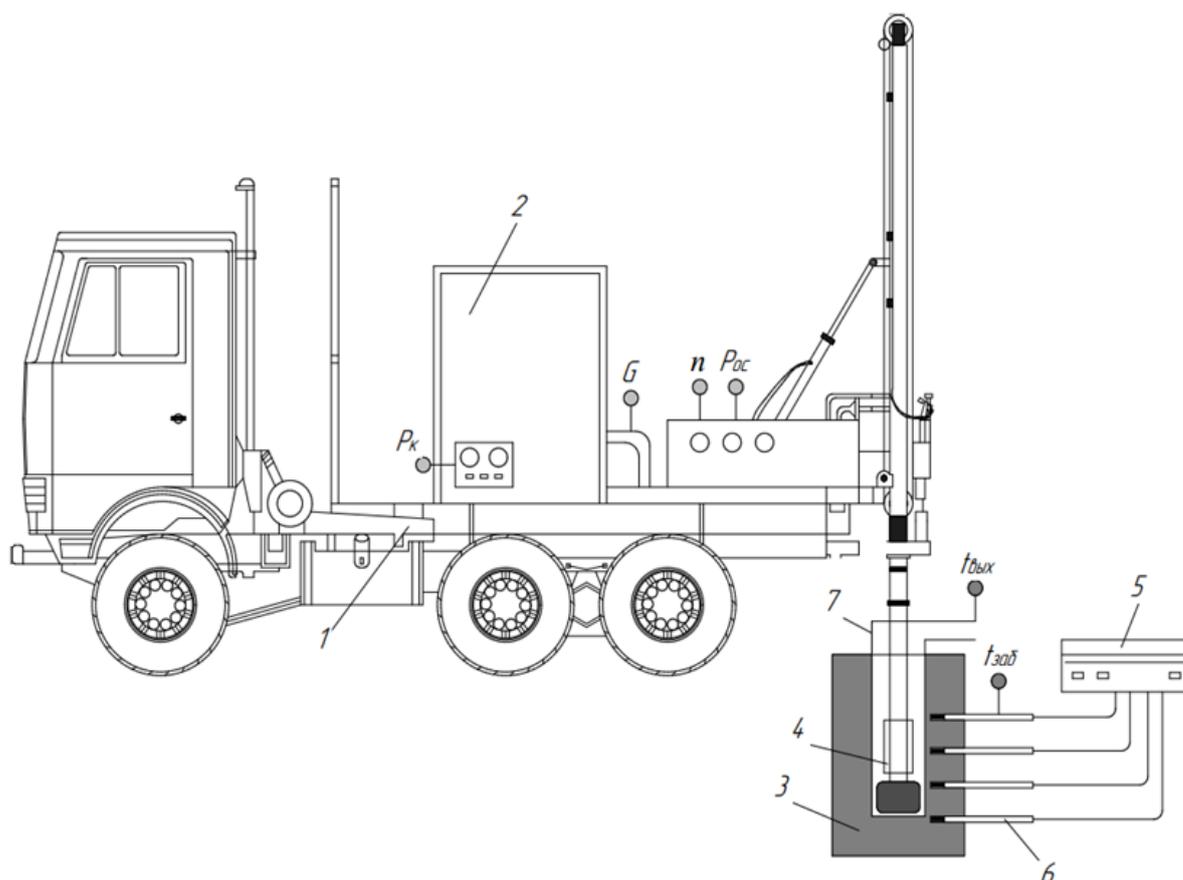
Рисунок 12 – Колонковый снаряд со съёмным кернаприемником,  
 содержащий вихревую трубу

Разработанная конструкция колонкового снаряда со съёмным кернаприемником для бурения с продувкой воздухом работает следующим образом: при бурении скважины сжатый воздух через отверстие для промывочной жидкости 2 и по внутренней трубе 5 подается на диафрагму 11 вихревой трубы 10 и закручивается в ней. Поток сжатого воздуха, при

прохождении через вихревую трубу, разделяется на два потока, поток холодного и горячего воздуха. Поток холодного воздуха вытекает из отверстия для выхода холодного потока воздуха 12 и через межтрубный кольцевой зазор поступает на забой скважины для выноса продуктов разрушения в затрубное пространство с одновременным охлаждением буровой коронки 19.

Горячий воздух из вихревой трубы через тангенциальное отверстие для выхода горячего потока воздуха 14 вытекает в межтрубное пространство и далее через тангенциально эжекторным отверстиям для выхода горячего потока воздуха 7 вытекает в затрубное пространство.

Поскольку отверстия 7 выполнены тангенциально эжекторным, то она создаёт вихревую движению в затрубном кольцевом зазоре, что позволяет эжектировать холодный поток с продуктами разрушения, улучшает очистку забоя и благоприятно сказывается на охлаждение коронки, за счёт уменьшения затрат энергии на повторное переизмельчение частиц породы. Такое выполнение колонкового снаряда со съёмным керноприемником позволяет повысить стойкость буровой коронки.



1 – буровая установка; 2 – компрессор; 3 – искусственный разбуриваемый блок; 4 – буровой снаряд, содержащий вихревую трубу; 5 – многоканальный измеритель температуры; 6 – термопары тика К; 7 – патрубок для отвода очистного воздуха со шламом;  $n$  – точка замера частоты вращения бурильной колонны, об/мин;  $P_{ос}$  – точка замера осевой нагрузки, кН;  $P_k$  – точка замера давления воздуха на выходе из компрессора, мПа;  $G$  – точка замера расхода воздуха на выходе из компрессора, кг/с;  $t_{заб}$  – точка замера температуры на забое, °С;  $t_{вых}$  – точка замера температуры очистного воздуха на выходе из скважины, °С

Рисунок 13 – Схема экспериментальной установки при испытании бурового снаряда с вихревым охладителем

Экспериментальные работы были проведены следующим образом: на искусственный разбуриваемый блок 3, с коэффициентом крепости породы  $f=7$ , установили термопары 6 и подключили к многоканальному измерителю температуры 5. Сверху разбуриваемого блока установили патрубок 7 для отвода очистного воздуха со шламом. Буровой снаряд с вихревой трубой 4 присоединили к вращателю буровой установки 1, далее запустили компрессор 2 затем, буровую установку 1, задали давление сжатого воздуха  $P_k$  на компрессоре, частоту вращения  $n$  и осевую нагрузку  $P_{ос}$ .

После установившейся режима работы замеряли расход воздуха  $G$  на выходе из компрессора, замеряли температуру на забое  $t_{заб}$  и температуру

$t_{\text{вых}}$  очистного воздуха на выходе из скважины. Длительность экспериментального бурения  $T$  для каждой заданных параметров составила 10 минут, после которых замерялась длина проходки  $L$ . Мощность на забое скважины  $N_{\text{заб}}$  определялась по формуле (4.15).

Экспериментальные работы выполнялись по несколько раз с различными частотами вращения  $n$ , осевой нагрузкой  $P_{\text{ос}}$ , давлением  $P_{\text{к}}$  и расходом  $G$  сжатого воздуха.

### 3.3 Оценка эффективности работы бурового снаряда

Оценка экономической эффективности от внедрения разработанного бурового снаряда, содержащую вихревую трубу, является сложным. Относительную оценку экономической эффективности разработанного бурового снаряда можно выполнить, применяя методику ВНИИБТ, которая учитывает проходку на долота и механическую скорость. Для расчета приняты базовый буровой снаряд с диаметром 76 мм и буровой снаряд содержащую вихревую трубу с диаметром 76 мм.

Для оценки экономической эффективности основные сравнительные данные базового бурового снаряда и нами разработанного бурового снаряда содержащую вихревую трубу приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Основные сравнительные данные буровых снарядов

№ п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	Базовый буровой снаряд	Буровой снаряд содержащая вихревую трубу
1	Диаметр долота	мм	76	76
2	Категория по буримости		VII	VII
3	Механическая скорость	м/ч	6,8	7,6
4	Проходка на долота	м	120	120
5	Стоимость бурового снаряда	тыс.тенге	42,7	48,8
6	Объем бурения	М	120	120
7	Стоимость 1 часа эксплуатации буровой установки (по данным АО «Волковгеология»)	тыс.тенге/ч	5,3	5,3

Оценка экономической эффективности определяется по формуле

$$E = \left[ \left( \frac{C_{бб}}{h_{бб}} + \frac{Y}{V_{бб}} \right) - \left( \frac{C_{бсв}}{h_{бсв}} + \frac{Y}{V_{бсв}} \right) \right] \cdot G_{бсв}, \text{ тенге}; \quad (61)$$

$$E = \left[ \left( \frac{42,7}{120} + \frac{5,3}{6,8} \right) - \left( \frac{48,8}{120} + \frac{5,3}{7,6} \right) \right] \cdot 120 = 2,4 \text{ тыс.тенге}$$

где  $C_{бб}$  – стоимость базового бурового снаряда, тенге;

$C_{бсв}$  – стоимость бурового снаряда с вихревой трубой, тенге;

$h_{бб}$  и  $h_{бсв}$  – проходка на долота базового бурового снаряда и бурового снаряда с вихревой трубой, м;

$Y$  – стоимость 1 часа работы буровой установки по затратам, зависящий от времени, тенге /ч;

$V_{бб}$  и  $V_{бсв}$  – механическая скорость базового бурового снаряда и бурового снаряда с вихревой трубой, м/ч;

$G_{бсв}$  – объем бурения одного бурового снаряда с вихревой трубой, м.

Таким образом экономический эффект при бурении пород с крепостью породы  $f = 7$  категории по буримости от применения одного бурового снаряда с вихревой трубой составляет 2,4 тыс.тенге.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате научного обобщения, аналитического исследования, разработки и внедрения новой конструкции вихревых труб для карьерных буровых установок, решена важная задача повышения эффективности эксплуатации карьерных буровых станков. Основные выводы и рекомендации:

а) нормализация динамических параметров породоразрушающего инструмента при бурении скважин с очисткой забоя воздухом достигается за счет принудительного охлаждения подаваемого в скважину продувочного воздуха до отрицательных температур, непосредственно на забое;

б) установлена зависимость температуры горячего потока вихревой трубы от давления воздуха, позволяющая определить величину теплового потока, передаваемого горячим потоком воздуха вихревой трубы в теплообменнике;

в) впервые предложена математическая модель температурного режима скважины с применением вихревой трубы, которая позволяет определить и прогнозировать температуру в любой точке скважины в зависимости от величины давления воздуха;

г) разработана новая конструкция бурового снаряда с вихревым охладителем, позволяющая увеличить механическую скорость бурения до 7% на основе снижения температуры на забое бурового снаряда с вихревым охладителем;

д) установлена эмпирическая зависимость изменения температуры на забое от частоты вращения бурильной колонны при различных осевых нагрузках при применении обычного бурового снаряда и бурового снаряда с вихревой трубой;

е) применение бурового снаряда с вихревым охладителем и устройства для утилизации теплоты двигателя внутреннего сгорания позволяет получить расчетный экономический эффект в размере 22 500 тыс. тенге в год на один буровой снаряд.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ. – Красноярск, СФУ, 2015. – С. 396.
- 2 Патентный поиск изобретений в сфере породоразрушающих инструментов (RU 195564 U1).
- 3 Тошов Ж.Б. Пути оптимизации промывочных узлов породоразрушающих буровых инструментов. // Горный журнал. – Москва, 2016. – №2. – С. 24-27.
- 4 Третьяк А.А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами. // Дисс. ...докт. техн. наук. – Новочеркасск, 2017. – С. 319.
- 5 Власюк В.И., Будюков Ю.Е., Спиринов В.И. Технические средства и технологии для повышения качества бурения скважин. – Тула: Гриф и К, 2013. – С. 176.
- 6 Кубасов В.В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента. // Дисс. ...канд. техн. наук. – Москва, 2015. – С. 131.
- 7 Лимитовский А.М., Башкуров А.Ю. Повышение эффективности освоения объектов минерально-сырьевого комплекса на основе модернизации электропривода технологического оборудования и оптимизации систем комплексного энергообеспечения. Учебное пособие. – Москва, 2019. – С. 68.
- 8 Куликов В.В. Мощность, затрачиваемая на разрушение забоя скважины // Инженер-нефтяник. – Москва, 2013. – №1. – С. 53-56.
- 9 Жаткин А.Н. Повышение эффективности рудничных компрессорных установок за счет утилизации вторичных энергоресурсов. // Дисс. ...канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2015. – С. 177.
- 10 Куликов В.В. Определение мощности, затрачиваемой на процесс бурения геологоразведочной скважины // Геология и разведка. – Москва, 2014. – №1. – С. 54-59.
- 11 Куликов В.В. Энергозатраты на забое геологоразведочной скважины. Известия высших учебных заведений // Геология и разведка. – Москва, 2013. – №4. – С. 63-67.
- 12 Потери теплоты, отводимой системой охлаждения и уносимой с газами//URL: <http://www.denisov-vinskiy.ru/energoauditorskoe/list/the-heat-of-internal-combustion-engines-and-gas-turbine-units-the-loss-of-heat-removed-cooling-syste/> (дата обращения: 08.09.2020).
- 13 Нескоромных В.В. Бурение скважин. // Учебное пособие. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. – С. 400.
- 14 Bridges S., Robinson L. A Practical Handbook for Drilling Fluids Processing. // Gulf Professional Publishing, 2020. – P. 594.

15 Caenn R., Darley HCH, Gray G. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. // 7th Edition. – Gulf Professional Publishing, 2017. – P. 729.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

NAVOIY  
KON-METALLURGIA  
KOMBINATI  
DAVLAT KORXONASI  
GEOLOGIYA QIDIRUV EKSPEDITSIYASI  
MARKAZIY GEOLOGIYA-QIDIRUV  
PARTIYASI

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
НАВОЙСКИЙ  
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ  
КОМБИНАТ  
ГЕОЛОГОРАЗВЕДЧНАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ  
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ГЕОЛОГОРАЗВЕДЧНАЯ  
ПАРТИЯ

DALOLATNOMA  
АКТ

27.07.2020 № 205  
г. Навои

«УТВЕРЖДАЮ»  
Начальник ЦГРП ГРЭ ГП НГМК

  
Усмонов Х.К.  
«27» июля 2020 г.  


о внедрении результатов исследований, изложенных в диссертационной работе Джураева Рустама Умархановича, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук (DSc) по специальностям 04.00.16 – «Горные машины» и 04.00.15 – «Технология и техника геологоразведочных работ».

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Джураева Рустама Умархановича, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук (DSc) по специальностям 04.00.16 – «Горные машины» и 04.00.15 – «Технология и техника геологоразведочных работ», внедрены в Центральной геологоразведочной партии ГРЭ Навойского горно-металлургического комбината.

В задачи проведенных исследований входило подтверждение разработанной аналитической зависимости по определению температурного режима породоразрушающего инструмента для совершенствования температурного режима породоразрушающего инструмента, повышение энергетической эффективности бурения скважин с очисткой забоя воздухом на основе обеспечения низких температур продувочного воздуха на забое и повышение эффективности компрессорных установок за счет утилизации теплоты двигателя внутреннего сгорания (ДВС) привода компрессора и избыточного воздуха.

В результате внедрения рекомендуемой конструкции выявлены работоспособность и экономия топлива при использовании компрессора с применением устройства для утилизации теплоты двигателя внутреннего сгорания и избыточного воздуха.

Проведенные работы подтвердили расчетные значения параметров вихревого охладителя.

Производственные работы по определению влияния низких начальных температур очистного воздуха на температурный режим породоразрушающего инструмента и на

эффективность бурения проведены с трехшарошечным породоразрушающим инструментом диаметром  $\varnothing$  76 мм по блоку буримой породы с коэффициентом по крепости бурения  $f=7$ .

При выполнении работ применялся буровой станок марки «УРБ-5АГ» с компрессором марки «КВ-12/12С», искусственные разбуриваемые блоки, многоканальные измерители температуры, анемометр, трехшарошечные долота и буровой снаряд, включающий в себя вихревой охладитель.

Таким образом, производственные исследования доказали, что разработанная новая конструкция бурового снаряда с вихревым охладителем является работоспособной, эффективной, применение которой позволяет снизить температуру породоразрушающего инструмента на забое в среднем на 50-60 °С.

Внедрение предлагаемой конструкции бурового снаряда с вихревым охладителем обеспечило низкие температуры продувочного воздуха на забое скважины, что, в свою очередь, способствовало повышению энергетической эффективности бурения и стойкости породоразрушающего инструмента.

Внедрение вихревой трубы повысило эффективность работы компрессора с приводом от ДВС и позволило получить экономию топлива до 10 %.

В результате внедрения бурового снаряда с вихревым охладителем и устройства для утилизации теплоты двигателя внутреннего сгорания и избыточного воздуха получен экономический эффект в размере **22 500 000** сум на одну буровую установку.

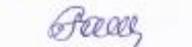
Главный механик

 Тухтаев К.Х.

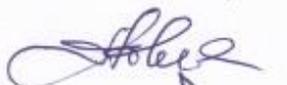
Зам.начальника бурового участка

 Абдумуталов Ш.

Мастер буровых работ

 Гафуров А.А.

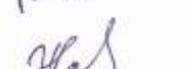
Проректор НГТИ

 Абдуазизов Н.А.

Доцент кафедры  
“Горная электромеханика” НГТИ

 Джураев Р.У.

Ассистент кафедры  
“Горная электромеханика” НГТИ

 Жураев А.Ш.

