

На правах рукописи



ДЖУРАЕВ Рустам Умарханович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПРИ БУРЕНИИ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН С ПРОДУВКОЙ ВОЗДУХОМ И
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА**

Специальность 25.00.14 - Технология и техника
геологоразведочных работ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» МГРИ – РГГРУ на кафедре Механизации, автоматизации и энергетики горных и геологоразведочных работ.

Научный руководитель: Меркулов Михаил Васильевич
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Нескоромных Вячеслав Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой технологии и техники
разведки МПИ института горного дела,
геологии и геотехнологий ФГАОУ ВПО
«Сибирский федеральный университет», г.
Красноярск.

Ивченко Иван Александрович
кандидат технических наук, специалист 1
категории отдела конструкторской
эксплуатационной и технической
документации АО «Технодинамика»,
г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
геологическое предприятие
«Гидроспецгеология», г. Москва.

Защита состоится **«16» марта 2016 года в 13 ч. 00 мин.** на заседании **диссертационного совета Д 212.121.05** при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования **«Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ - РГГРУ)** по адресу: **117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, ауд. 4-73.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГРИ-РГГРУ

Автореферат разослан «__» декабря 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, кандидат технических наук



Назаров А.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В развитии экономики России, как на современном этапе, так и в расчете на перспективу, важнейшее значение имеют районы Крайнего Севера и северо-востока Сибири. В этих районах сосредоточены основные запасы золота, алмазов и других полезных ископаемых и природных ресурсов. Практически вся эта обширная область находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород, занимающих более 60% России. Климатические, геолого-гидрогеологические и горнотехнические условия месторождений, расположенных в многолетнемерзлых породах, весьма неоднородны и разнообразны, что осложняет организацию геологической разведки и проведение буровых работ. В этих регионах с суровым климатом требуются дополнительные затраты топливно-энергетических ресурсов, как для обеспечения технологического процесса, так и для создания благоприятных условий труда буровых бригад.

Бурение геологоразведочных скважин в многолетнемерзлых породах имеет специфические особенности, в основе которых лежит важнейшая роль температурного фактора. В результате теплового воздействия буровых растворов на лед, цементирующий минеральные частицы породы (в основном песка), связность и прочность последней резко снижается. Это приводит к возникновению осыпей и обвалов стенок скважины, т.е. является причиной осложнений и аварий. Все эти особенности снижают рост производительности и качество колонкового разведочного бурения в сложных природных условиях Крайнего Севера и северо-востока Сибири. Часть проблем решается применением технологии бурения геологоразведочных скважин с продувкой сжатым воздухом. Однако, в этом случае повышается энергоемкость бурения за счет применения компрессорных установок, мощность привода которых значительно больше чем у насосов, применяемых в аналогичных условиях. Кроме того, существенно возрастает влияние высокой температуры на выходе из компрессора, что требует эффективного охлаждения подаваемого в скважину воздуха.

Таким образом, возникает необходимость решения актуальных задач, связанных с регулированием температурного режима циркулирующей промывочной среды, оценкой тепловой мощности, выделяемой на забое скважины, и повышением эффективности работы компрессора при бурении скважин с продувкой.

Объект исследования: технологический процесс бурения геологоразведочных скважин в условиях многолетнемерзлых пород, температурные факторы при бурении скважин с продувкой воздухом.

Цель работы: заключается в повышение технико-экономической и геологической эффективности бурения геологоразведочных скважин с продувкой воздухом в многолетнемерзлых породах путем повышения эффективности работы компрессора и нормализации температурного режима скважины.

Задачи исследования:

- анализ особенностей бурения геологоразведочных скважин с продувкой воздухом и путей повышения эффективности компрессорных установок;
- разработка способа повышения эффективности работы компрессора путем использования теплоты двигателя внутреннего сгорания (ДВС), его привода и избытков воздуха;
- анализ и обоснование возможности применения вихревой трубы для обеспечения температурного режима при бурении геологоразведочных скважин с продувкой воздухом;
- проведение экспериментальных исследований и разработка математической модели, позволяющей рассчитать параметры вихревой трубы в различных режимах;
- теоретические исследования температурных режимов при бурении скважины с использованием вихревой трубы;
- исследование и разработка методов прогнозирования и регулирования температурных режимов при бурении скважин в многолетнемерзлых породах с продувкой воздухом с использованием вихревой трубы;
- проведение экспериментальных и теоретических исследований по определению тепловой мощности, выделяемой на забое;
- определение экономической эффективности разработанных способов и параметров бурения геологоразведочных скважин с продувкой воздухом.

Методы исследования: для решения поставленных задач применялся комплексный метод исследований, включающий стендовые и экспериментально-производственные исследования, математическое моделирование, аналитические исследования моделей, анализ и обобщение практического опыта, литературных и научных данных.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывались с применением методов математической статистики и стандартных математических и графических программ.

Научная новизна диссертации:

- получена зависимость температуры воздуха на холодном выходе вихревой трубы, нагнетаемого в бурильные трубы, от давления воздуха;
- установлена зависимость температуры горячего потока вихревой трубы от давления воздуха;
- предложена математическая модель температурного режима скважины с использованием вихревой трубы, учитывающая изменения начальной температуры от давления воздуха;
- установлена экспериментальная зависимость теплового потока, выделяющегося на породоразрушающемся инструменте, от режима бурения;
- предложена новая система утилизации теплоты ДВС компрессора и избыточного воздуха, выходящего с горячего выхода вихревой трубы.

Научные положения, выносимые на защиту:

- Установлена зависимость, позволяющая определить температурный режим бурящейся скважины при различном давлении компрессора и других технологических параметрах, с использованием вихревой трубы.*
- Установлена зависимость величины теплового потока, выделяемого на забое, от скорости объемного разрушения, причем последняя, в свою очередь, определяется технологическими параметрами бурения.*
- Установлена зависимость, позволяющая определить величину теплового потока при использовании вторичных энергоресурсов дизельного компрессора с применением вихревой трубы.*

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертации, подтверждаются необходимым объемом теоретических и экспериментальных исследований, а также проверкой положений, выводов и рекомендаций в условиях, максимально приближенных к производственным, и достаточной сходимостью опытных данных с результатами ранее проведенных теоретических исследований.

Практическая значимость работы: результаты работы могут быть использованы при бурении геологоразведочных скважин в многолетнемерзлых породах, полученные результаты позволяют прогнозировать параметры температурного режима при бурении геологоразведочных скважин, разработанная конструкция системы утилизации теплоты ДВС привода компрессора может обеспечить не только скважину охлажденным воздухом при бурении в многолетнемерзлых породах, но и отопление помещения буровой установки утилизируемой теплотой, результаты работы используются при чтении курса «Теплотехника и теплоснабжение геологоразведочных работ».

Личный вклад автора. Все основные положения, результаты и выводы, выдвигаемые для публичной защиты, получены автором лично.

Апробация и внедрение результатов: Основные положения диссертации и ее отдельные результаты докладывались на «Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов» (Екатеринбург, 2010 г.); XI международной конференции, посвященной 95-летию МГРИ-РГГРУ «Новые идеи в науках о Земле». (Москва, 2013 г.); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием посвященной 80-летию основания Старо Оскольского ГРТ имени И.И. Малышева. (Старый Оскол, 2014 г.); Международной конференции «Молодые – наукам о Земле». (МГРИ-РГГРУ, 2014 г.); II Всероссийской научной конференции «Малышевские чтения». (Старый Оскол, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». (МГРИ-РГГРУ, 2015 г.)

Публикации по теме диссертации: Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 13 работах, в том числе 4 работы из перечня научных журналов и изданий, рекомендованных ВАКом.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 98 наименований, 4 приложений; содержит 137 стр. машинописного текста, 38 рисунка, 17 таблиц.

Во **введении** обоснованы актуальность и научно-техническое значение повышения эффективности бурения геологоразведочных скважин в многолетнемерзлых породах. Сформулированы цель и задачи исследований.

В **первой** главе выполнен анализ литературных источников и состояния бурения геологоразведочных скважин с продувкой воздухом. Рассмотрены работы в этой области, выполненные предыдущими авторами. Рассмотрены преимущества и недостатки, область применения бурения с продувкой и использование вихревых труб. Определены основные пути достижения поставленной цели.

Во **второй** главе проведен анализ и пути повышения эффективности компрессорных установок. Предложена схема использования теплоты ДВС привода компрессора и вихревой трубы. Выполнена оценка тепловой мощности предлагаемой утилизационной установки.

Третья глава посвящена температурному режиму при бурении скважин с продувкой воздухом. Проведены экспериментальные исследования вихревой трубы и изложены результаты. Построена математическая модель расчетов в программе Mathcad для прогнозирования и регулирования параметров температурного режима скважин применительно к колонковому бурению в мерзлых породах с продувкой воздухом при использовании вихревой трубы.

В **четвертой** приведены результаты экспериментальных исследований при опытном бурении с продувкой. Определена величина тепловой мощности, выделяемой на забое.

В **пятой** главе приведена оценка экономической и технической эффективности предлагаемых решений. Основные выводы и рекомендации по реализации.

В **заключении** излагаются основные выводы и рекомендации, обобщающие основные положения выполненной работы.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность научному руководителю – доктору технических наук, профессору Меркулову М.В. за постоянное внимание и неоценимую помощь в выполнении данной диссертации, всему коллективу кафедры «Механизации, автоматизации и энергетики горных и геологоразведочных работ» МГРИ-РГГРУ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Недостаточный учет температурного фактора при бурении в мерзлых породах может привести к специфическим осложнениям, таким, как слипание частиц шлама, образование сальников, уменьшение проходных сечений, намерзание конденсата в соединениях, прихваты, прижоги породоразрушающего инструмента и др.

Также высокие температуры на забое отрицательно сказываются на работе породоразрушающего инструмента за счет высоких контактных температур с различными необратимыми последствиями.

Наиболее эффективным средством при бурении в многолетнемерзлых породах является использование сжатого воздуха вместо промывочной жидкости для удаления продуктов разрушения с забоя скважины. Воздух не замерзает при низких температурах, поэтому исключены осложнения, связанные с замерзанием промывочной жидкости в скважине при бурении. Однако возникают другие трудности. Температура воздуха, поступающего от компрессора в скважину, на забое значительно увеличивается за счет перехода механической энергии работающего инструмента в тепловую, что создает опасность возникновения осложнений, связанных с протаиванием стенок скважины и керна. Полностью устранить такие осложнения можно лишь применяя дополнительное охлаждение воздуха до температуры, достаточной для поглощения выделенной на забое теплоты.

Вопросам бурения геологоразведочных скважин с очисткой забоя воздухом и повышению эффективности бурения в сложных геологических условиях посвящены работы следующих ученых и исследователей:

Б.И. Воздвиженский, Б.Б. Кудряшов, Ф.А. Шамшев, Б.С. Филатов, Е.А. Козловский, А.М. Магурдумов, С.С. Сулакшин, А.В. Марамзин, Н.В. Соловьев, А.М. Лимитовский, М.В. Меркулов, В.В. Нескоромных, В.А. Косьянов, Н.С. Макурин, М.Г. Абрамсон, А.Н. Кирсанов, В.К. Чистяков, Л.К. Горшков, А.Т. Лактионов, В.С. Литвиненко, А.М. Яковлев, И.П. Елманов, Э.Э. Гитциграт, А.А. Абдумажитов, Н.И. Шацов, Ю.Ф. Рыбаков, Г.С. Грязнов, Б.И. Есьман, В.Т. Седов, С.М. Кулиева, Г.Г. Габузов, А.Н. Щербань, В.П. Черняк, Г.Я. Дедусенко, Е.А. Яшинникова, А.А. Афанасьев, А.К. Сидоренко, Ю.Е. Будюков, В.И. Спириин А.П. Скорняков и др.

Для обеспечения заданной температуры воздуха при бурении скважин с продувкой используются различные охлаждающие устройства. Применяемые холодильные установки достаточно дорогие и энергоемкие. Предлагаемое в данной работе применение вихревой трубы в качестве холодильно-нагревательной установки может снизить энергоемкость бурения.

Выполненные по вышеуказанным вопросам исследования позволили сформулировать следующие основные защищаемые положения:

Первое защищаемое научное положение.

Установлена зависимость, позволяющая определить температурный режим бурящейся скважины при различном давлении компрессора и других технологических параметрах с использованием вихревой трубы.

Для обеспечения заданной температуры воздуха при бурении скважин с продувкой в многолетнемерзлых породах используются различные охлаждающие устройства.

Одним из наиболее эффективных и, в тоже время, экономически выгодных устройств является вихревая труба, в которой происходит эффект Ранка (рис.1).

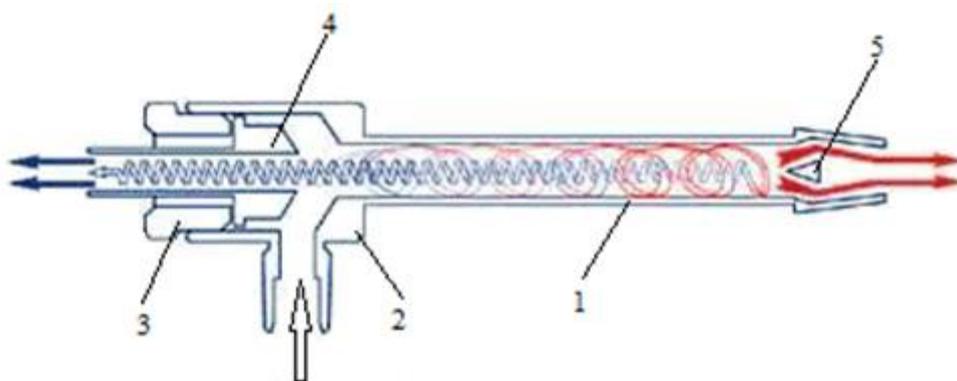


Рис.1. Вихревая труба.

1-трубка, 2-корпус, 3-гайка, 4-генератор холодной фракции на холодном выходе, 5-дроссель, на горячем выходе.

При истечении воздуха через сопло образуется интенсивный круговой поток, приосевые слои которого заметно охлаждаются и отводятся через отверстие диафрагмы в виде холодного потока, а периферийные слои подогреваются и вытекают через дроссель в виде горячего потока. Дроссель предназначен для регулировки расхода холодного и горячего потоков воздуха. Данная конструкция позволяет расширить температурный диапазон воздуха и получить, при работе в оптимальном режиме, холодный поток с температурой до -40°C , а также повысить температуру горячего потока от 50 до 100°C . Доля воздуха, направляемого через холодный выход называется холодной фракцией. Холодная фракция имеет минимальное значение расхода воздуха при достижении наименьших температур холодного потока. Внутри трубы расположен сменный латунный генератор, который может изменять температуру и расход потока воздуха в вихревой трубе, а также контролирует температурные диапазоны на холодном и горячем выходах. Существует несколько вариантов генераторов, в частности два основных типа - для получения максимально низкой температуры генератор типа С и для получения максимальной мощности охлаждения генератор Н. На температуру на выходе вихревой трубы влияет давление и расход воздуха, поэтому возникает необходимость проведения экспериментальных исследований для определения зависимости изменения температуры при различных режимах работы.

Для того, чтобы установить основные закономерности изменений параметров в различных режимах и получения данных для моделирования работы вихревой трубы на научно-исследовательском полигоне МГРИ-РГГРУ нами были проведены экспериментальные исследования вихревой трубы. Схема экспериментальной установки с вихревой трубой показана на рисунке 2.

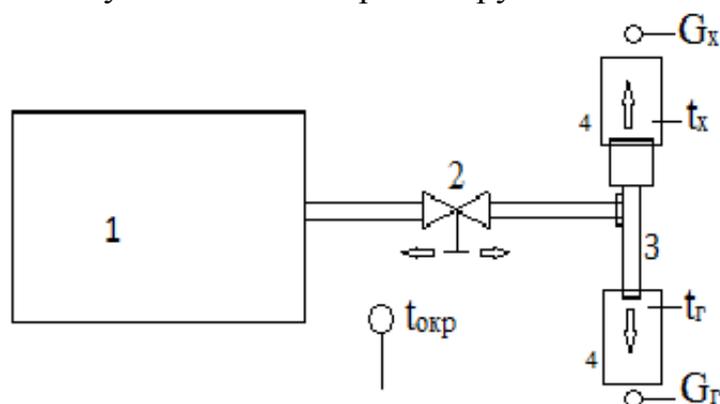


Рис.2. Схема экспериментальной установки с вихревой трубой.

1-компрессор, 2-регулятор давления, 3-вихревая труба, 4-расширительные трубы. t_x – температура на холодном выходе вихревой трубы, $^{\circ}\text{C}$; t_g -температура на горячем выходе вихревой трубы, $^{\circ}\text{C}$; G_x – точка замера скорости воздушного потока на холодном выходе, м/с; G_g – точка замера скорости воздушного потока на горячем выходе, м/с; $t_{окр}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 3 приведены фотография стенда.



Рис. 3. Фотография экспериментального стенда с вихревой трубой. Сергиево-Посадский научно-производственный полигон.

На снимках (рис. 4), сделанных тепловизором, видно, что температура при давлениях воздуха $0,7 \div 0,8$ МПа составляет -40°C , снимки получены при температуре воздуха поступающего с ресивера компрессора $50 \div 60^{\circ}\text{C}$.

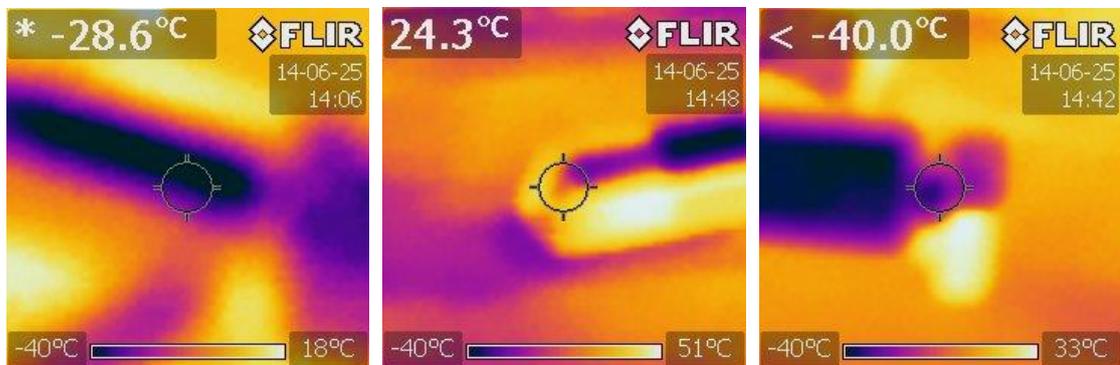


Рис. 4. Снимки, сделанные тепловизором температуры холодного выхода вихревой трубы.

Результаты замеров проведенных экспериментальных исследований вихревой трубы позволили установить:

- зависимость изменения температуры холодного потока воздуха от величины давления;
- зависимость изменения температуры холодного потока от расхода воздуха;
- зависимость температуры холодного потока воздуха от типа генератора холодной фракции;

- зависимость мощности охлаждения холодного потока вихревой трубы от давления воздуха;

- зависимость величины теплового потока воздуха на горячем выходе вихревой трубы от давления и расхода воздуха;

Испытание вихревой трубы с хладогенератором типа 8Н показали, что при регулировке дросселя на средний расход воздуха, с увеличением давления на 0,1 МПа, температура воздуха снижалась на 2-4°C. Температура холодного потока с начальным давлением 0,2 МПа составляла -16°C, а при максимальном давлении 0,8 МПа -30°C. В результате испытаний, была установлена зависимость изменения температуры холодного потока от давления сжатого воздуха. Зависимость показана на рисунке 5.

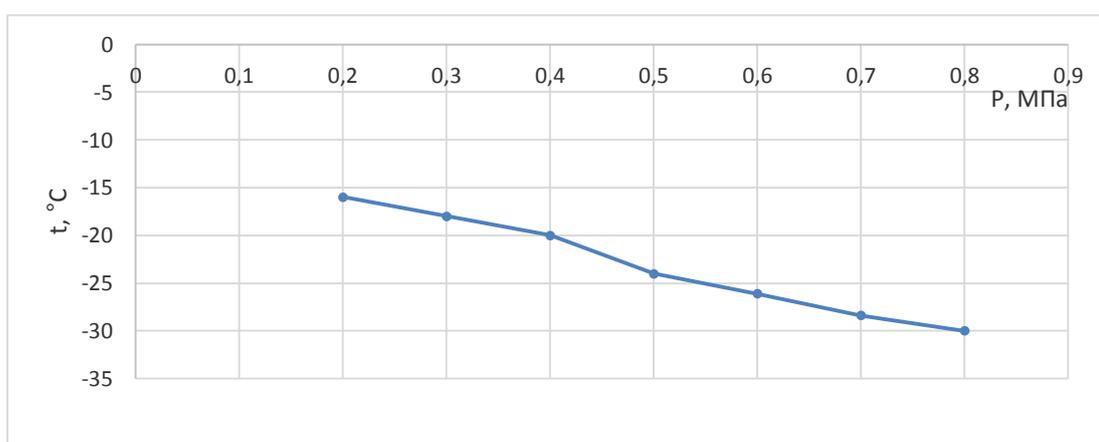


Рис. 5. Зависимость изменения температуры холодного потока вихревой трубы (t , °C) от величины давления воздуха (P , МПа).

В результате статистической обработки экспериментальных данных была установлена следующая зависимость температуры холодного потока вихревой трубы от давления воздуха:

$$t_{1H} = -24,6 P - 10,9, \text{ °C}; \quad (1)$$

где P - давление сжатого воздуха, выходящего с компрессора, МПа.

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

Полученная зависимость может использоваться для определения начальной температуры воздуха на холодном выходе вихревой трубы, нагнетаемой в бурильные трубы (t_{1H}), при расчете температурных режимов скважины с помощью формул 2 и 3, при геологоразведочном бурении с продувкой воздухом с использованием вихревой трубы.

Под температурным режимом скважины в процессе бурения понимают распределение температуры циркулирующей промывочной среды во внутреннем канале бурильной колонны и в кольцевом канале, зависящее от

большого числа разнородных по своему действию факторов. За основу были приняты формулы, предложенные Б.Б. Кудряшовым. Эти выражения позволяют определить текущую температуру потоков промывочной среды на любой глубине h в зависимости от начальной температуры при конечной глубине скважины H . Формулы для распределения температуры:

в бурильных трубах

$$t_1 = (t_{1H} - T_{\Pi}) e^{r_2 h} + \frac{k\pi \Delta t_3}{G_r c_p r_1} e^{r_1(h-H)} + T_{\Pi}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2)$$

в кольцевом канале

$$t_2 = (T_{\Pi} - t_{1H}) \frac{r_2}{r_1} e^{r_2 h} - \frac{k\pi \Delta t_3}{G_r c_p r_2} e^{r_1(h-H)}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (3)$$

где r_1, r_2 – корни характеристического уравнения:

$$r_{1,2} = \frac{\pi}{G_c} \left(\frac{k_{\tau} D}{2} \mp \sqrt{\frac{k_{\tau}^2 D^2}{4} + k_{\tau} k D} \right), \text{ } \text{м}^{-1}; \quad (4)$$

где T_{Π} – средняя постоянная по глубине естественная температура пород, $^\circ\text{C}$; t_{1H} – температура промывочной среды $^\circ\text{C}$, нагнетаемой в бурильные трубы; h – глубина скважины (текущая координата), м; H – конечная глубина, м; D – диаметр скважины, м; k – коэффициент теплопередачи через стенку бурильной колонны, отнесенной к единице длины трубы, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. G -весовой расход (для воздуха - G_r) в $\text{кг}/\text{с}$; c – удельная весовая теплоемкость очистного агента, (для воздуха при постоянном давлении - c_p) $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$; k_{τ} - коэффициент нестационарного теплообмена в $\text{Вт}/\text{ч}\cdot^\circ\text{C}$; Δt_3 – прирост температуры воздуха в призабойной зоне скважины, $^\circ\text{C}$.

Результаты расчета температурного режима скважины с помощью формул (2) и (3) решающим образом зависят от правильного определения входящих в них величин. При бурении с продувкой воздухом с применением вихревой трубы в качестве холодильной установки, температура воздуха (t_{1H}) на холодном выходе вихревой трубы, нагнетаемой в бурильные трубы, зависит от давления и может быть определена по зависимости, полученной при испытаниях вихревой трубы (рис. 5).

При использовании вихревой трубы для охлаждения воздуха, подаваемого в скважину, начальная температура (t_{1H}) промывочной среды будет определяться температурой воздуха на холодном выходе вихревой трубы.

После подстановки, полученной экспериментально зависимости (1) температуры на холодном выходе вихревой трубы от давления, формулы 2 и 3 примут следующий вид:

в бурильных трубах

$$t_1 = ((-24,6 \cdot P - 10,9) - T_{\text{п}}) e^{r_2 h} + \frac{k\pi}{G_{\text{р}} c_{\text{р}}} \frac{\Delta t_3}{r_1} e^{r_1 (h-H)} + T_{\text{п}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

в кольцевом канале

$$t_2 = (T_{\text{п}} - (-24,6 \cdot P - 10,9)) \frac{r_2}{r_1} e^{r_2 h} - \frac{k\pi}{G_{\text{р}} c_{\text{р}}} \frac{\Delta t_3}{r_2} e^{r_1 (h-H)}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

где P – давление воздуха, МПа.

Другим важным фактором, определяющим температурный режим скважины, кроме начальной температуры продувочного воздуха ($t_{1\text{н}}$) нагнетаемой в бурильные трубы, является прирост температуры продувочного воздуха Δt_3 , в результате нагрева породоразрушающего инструмента у забоя скважины.

Поэтому, второй этап экспериментальных исследований ставил своей задачей оценить количество теплоты, выделяемой на породоразрушающем инструменте, которая определяет прирост температуры продувочного воздуха Δt_3 на забое.

Второе защищаемое научное положение.

Установлена зависимость величины теплового потока, выделяемого на забое, от скорости объемного разрушения, причем последняя, в свою очередь, определяется технологическими параметрами бурения.

Целью экспериментальных исследований при опытном бурении с продувкой воздухом было определение тепловой мощности, выделяемой на забое, что определяет прирост температуры продувочного воздуха.

При экспериментальном бурении с продувкой воздухом были применены следующие приборы и агрегаты: счетчик электроэнергии; электрический перфоратор (Status MPR-70: $P=1200$ Вт, $n_0=600$ об/мин.); вихревая труба (50008Н); вертлюг и твердосплавные коронки диаметром $D=33$ мм; искусственный разбуриваемый блок (образец породы); многоканальный измеритель температуры (ИРТ-4); анемометр (smart sensor AR816); тахометр (СЕМ. АТ-8); электронные весы; компрессор поршневой (ПКСД-5,25ДМ(Р)); клапан редукционный с манометром (регулятор давления);

Схема экспериментальной установки и фото снимки при бурении с продувкой с использованием вихревой трубы приведены на рисунках 6 и 7.

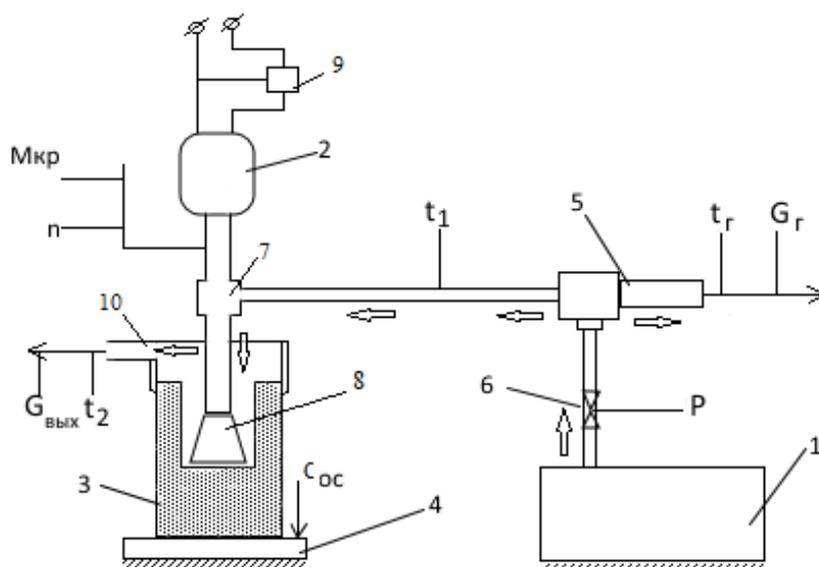


Рис. 6. Схема экспериментальной установки при бурении с продувкой воздухом.

1-компрессор, 2-электроперфоратор, 3-разбуриваемая порода, 4- весы, 5- вихревая трубка, 6-регулятор давления, 7-вертлюг, 8-коронка, 9- электросчетчик, 10- герметизатор. t_2 – точка замера температуры горячего потока, °С; t_1 -точка замера температуры холодного воздуха на выходе с вихревой трубки, °С; t_2 – точка замера температуры на выходе с герметизатора, °С; G_r – точка замера скорости воздуха горячего потока, м/с; $G_{\text{вых}}$ – точка замера скорости воздуха на выходе с герметизатора, м/с; $C_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка, кг; P -давление воздуха, МПа; n - точка замера числа оборотов, об/мин.



Рис. 7. Снимок экспериментальной установки, при бурении с продувкой. Сергеево-Посадский научно-производственный полигон

Экспериментальные работы проводились следующим образом: на вихревую трубу 5 установили генератор холодной фракции 8Н и вихревую трубу присоединили к ресиверу компрессора 1, в соединительные шланги между ресивером и вихревой трубой установили регулятор давления 6. Холодный выход вихревой трубы подсоединили через шланг к вертлюгу 7. Далее электроперфоратор 2 соединили с породоразрушающим инструментом через вертлюг, установили весы 4 под блок разбуриваемой породы 3. Подключили перфоратор к сети через электросчётчик 9 и включили перфоратор в режиме вращения и продувку. Установили давление 0,8 МПа с помощью

регулятора давления, и с помощью держателя передали перфоратору осевую нагрузку 10 кг, осевую нагрузку определяли с помощью весов 4. Записали текущее время, показания электросчетчика (Wh) и осевую нагрузку ($C_{ос}$), тахометром замерили число оборотов (n) на породоразрушающем инструменте. После стабилизации температуры, многоканальным измерителем (ИРТ-4) замеряли температуры окружающей среды ($t_{окр}$), горячего потока (t_r), холодного выхода вихревой трубы (t_1) и температуру потока, выходящего с гермитизатора 10 (t_2).

Также замеряли анемометром (smart sensor AR816) скорость потока воздуха на горячем выходе вихревой трубы и выходящую из гермитизатора.

Далее все замеры повторяли для давления воздуха 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3 и 0,2 МПа. Также с осевыми нагрузками 30 и 50 кг.

Для определения наибольшей величины теплового потока весь комплекс проведенных работ повторяли при таких же значениях параметров заменив коронку на коронку с значительно изношенными зубьями.

Все полученные экспериментальные данные и расчетные параметры заносились в таблицы.

Результаты испытаний при опытном бурении с продувкой позволили определить тепловую мощность выделяющегося на забое, т.е., мощность, которая идет на нагревание призабойной зоны и коронки:

$$P_{\text{тепл}} = c \cdot G \cdot (t_2 - t_1), \text{ Вт}; \quad (5)$$

где c - теплоемкость воздуха, Дж/кг·°С; t_2 – температура воздуха на выходе с гермитизатора, °С; t_1 – температура воздуха на выходе с вихревой трубы, °С; G – расход воздуха, кг/с:

$$G = v \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho, \text{ кг/с}; \quad (6)$$

где v - скорость холодного потока, м/с; d - диаметр патрубка в месте замера скорости, м; ρ - плотность воздуха, кг/м³;

Также в ходе экспериментальных исследований было установлено следующее:

- зависимость изменения температуры воздуха на забое от осевой нагрузки;
- зависимость изменения температуры выходящего с забоя воздуха от его начальной температуры;
- зависимость изменения температуры воздуха, выходящего с забоя от его расхода;
- изменение тепловой мощности, выделяемой на забое в зависимости от осевой нагрузки на породоразрушающий инструмент и от состояния режущих зубьев коронки;

- зависимость углубки скважины от расхода продувочного воздуха;
- зависимость тепловой мощности, выделяемой на забое от скорости объемного разрушения.

Тепловая мощность выделяющейся на забое ($P_{\text{тепл}}$) изменяется в зависимости от осевой нагрузки и числа оборотов породоразрушающего инструмента но обобщающем является скорость объемного разрушения($v_{\text{п}}$).

В ходе испытаний выявлено, что тепловая мощность забоя изменяется в зависимости от изменения скорости объемного разрушения. Из сделанных экспериментальных замеров наблюдается что, тепловая мощность забоя составляет 640 Вт при объемной скорости разрушения породы $1,04 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, при увеличении скорости объемного разрушения породы до $1,16 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$, тепловая мощность возрастает до 724 Вт. Результаты экспериментальных исследований позволили установить зависимость тепловой мощности ($P_{\text{тепл}}$) от скорости объемной разрушения ($v_{\text{п}}$), которая показана на рисунки 8.

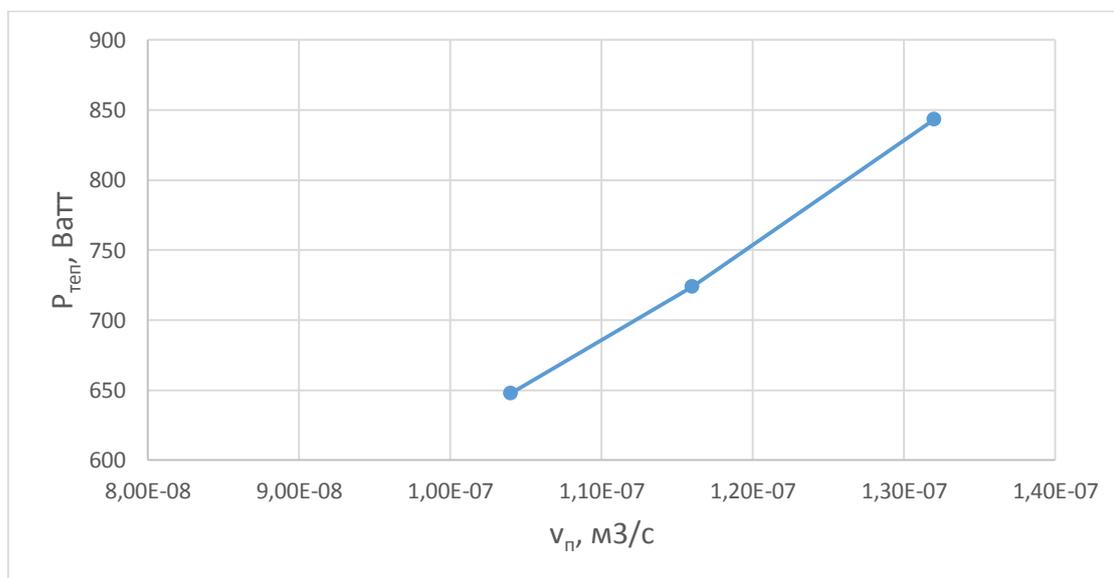


Рис. 8. Зависимость величины тепловой мощности ($P_{\text{тепл}}$) от скорости объемного разрушения породы ($v_{\text{п}}$).

Проведя регрессионный анализ результатов исследования на основе полученных экспериментальных данных была установлена следующая зависимость величины тепловой мощности, выделяемой на забое от скорости объемного разрушения:

$$P_{\text{тепл}} = 7 \cdot 10^9 \cdot v_{\text{п}} - 83,82, \text{ Вт}; \quad (7)$$

где $v_{\text{п}}$ – скорость объемного бурения, м³/с.

Полученная зависимость может быть использована для определения прироста температуры продувочного воздуха на породоразрушающем инструменте на забое скважины:

$$\Delta t_3 = \frac{P_{\text{тепл}}}{Gc} = \frac{7 \cdot 10^9 \cdot v_{\text{п}} - 83,82}{Gc}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (8)$$

где $P_{\text{тепл}}$ - тепловая мощность, выделяющейся на забое при бурении, Вт;

При практических расчетах температурного режима скважины при бурении с продувкой с использованием вихревой трубы количество теплоты, выделяемой на породоразрушающем инструменте, которая определяет прирост температуры продувочного воздуха (Δt_3) может определяться по экспериментально полученной нами зависимости (7). При этом формулы для практических расчетов температурного режима скважины 2 и 3 предложенные Б.Б. Кудряшовым примут следующий окончательный вид:

в бурильных трубах

$$t_1 = ((-2,46 \cdot P - 10,9) - T_{\text{п}}) e^{r_2 h} + \frac{k\pi(7 \cdot 10^9 \cdot v_{\text{п}} - 83,82)}{G_{\text{r}}^2 \cdot c_{\text{p}}^2 \cdot r_1} e^{r_1(h-H)} + T_{\text{п}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

в кольцевом канале

$$t_2 = (T_{\text{п}} - (-2,46 \cdot P - 10,9)) \frac{r_2}{r_1} e^{r_2 h} - \frac{k\pi(7 \cdot 10^9 \cdot v_{\text{п}} - 83,82)}{G_{\text{r}}^2 \cdot c_{\text{p}}^2 \cdot r_2} e^{r_1(h-H)}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

Третье защищаемое научное положение.

Установлена зависимость, позволяющая определить величину теплового потока при использования вторичных энергоресурсов дизельного компрессора с применением вихревой трубы.

Для бурения разведочных скважин с продувкой воздухом в настоящее время применяют в основном передвижные дизельные компрессорные станции с поршневыми компрессорами. В настоящее время тепло выделяющейся с ДВС компрессора и выхлопные газы, загрязняя воздух и выделяя избыточное тепло, уходят в атмосферу.

Утилизируемое тепло от ДВС компрессора и горячего выхода вихревой трубы (принцип действия вихревой трубы основан на эффекте вихревого температурного разделения газа) возможно использовать на отопление объектов производственного и бытового назначения, на горячее водоснабжение, а также на технологические нужды производства. При этом экономия очевидна, т.к. тепло от ДВС и вихревой трубы не выбрасывается в атмосферу, а непосредственно полезно используется на теплоснабжение объекта, при этом сокращаются закупки топлива для этих нужд.

Использование теплоты отработанных газов и систем охлаждения позволит снизить потери теплоты в окружающую среду, т.е. повысить КПД энергоисточника, который для ДВС составляет 30-40%.

Вторичный ТН воспринимает теплоту от выхлопных газов и воды системы охлаждения и передает ее потребителю. В передвижных установках, при постоянной работе ДВС используют в качестве вторичного ТН воздух, т.к. при переездах, остановках возможно замерзание воды.

Нами предлагается следующая система утилизации теплоты ДВС компрессора и горячего воздуха, выходящего с горячего конца вихревой трубы (рис.9).

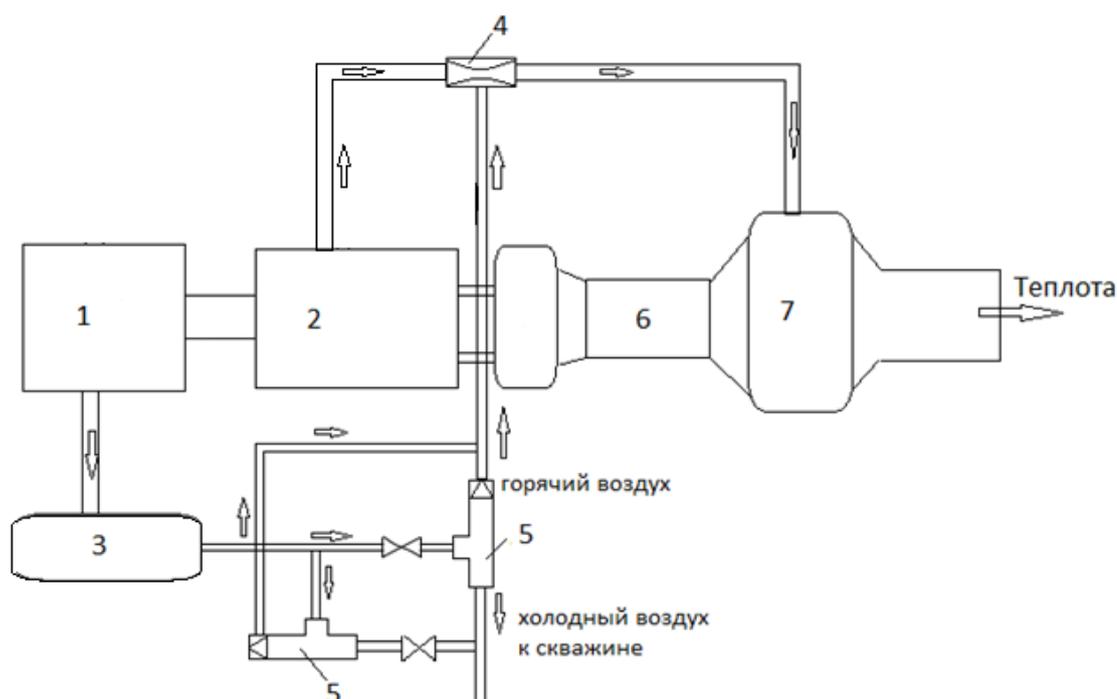


Рис. 9. Схема использования теплоты ДВС компрессора и вихревой трубки.
1-компрессор, 2-ДВС, 3-ресивер компрессора, 4-сопло, 5-вихревая трубка, 6-вентилятор охлаждения, 7-теплообменник для отбора теплоты выхлопных газов.

Схема работает следующем образом: сжатый воздух из ресивера 3 компрессора 1 подается в вихревые трубы 5, где происходит температурное разделение воздуха на холодный и горячий потоки, после разделения в вихревых трубах 5 холодный поток воздуха подается в скважину, а горячий поток воздуха через сопло 4, смешиваясь с потоком выхлопных газов поступающего из ДВС компрессора, направляется в теплообменник 7.

В сопле происходит эффект эжекции, принцип которого заключается в следующем: струя горячего потока воздуха из вихревой трубы, выходя с большой скоростью из сопла, создает разрежение и увлекает за собой выхлопные газы. При этом снижается сопротивление выхлопных газов, создаваемая теплообменником. Следовательно, в ДВС снижается расход

топлива. При остановках процесса бурения компрессор работает в холостую. Второй вихревой холодильник 5 предназначен для снабжения горячим воздухом теплообменника при холостой работе компрессора.

Оценка тепловой мощности данной утилизационной установки производится в следующем порядке:

1. Определяется тепловой поток, отводимый системой охлаждения дизеля:

$$Q_p = 10^{-4} \cdot G \cdot Q_H^p, \text{ кВт}; \quad (9)$$

где G – расход топлива, кг/ч; Q_H^p – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

2. Определяется расход вторичного теплоносителя, необходимого для отвода теплоты системы охлаждения:

$$M_2 = \frac{Q_p}{C_2 \cdot \Delta t_1}, \text{ кг/с}; \quad (10)$$

где C_2 – теплоемкость вторичного теплоносителя, кДж/кг·°С; Δt_1 – перепад температур теплоносителя, °С;

3. Определяется тепловой поток, передаваемый выхлопными газами в теплообменнике:

$$Q_r = C_1 \cdot M_1 (T_1 - T_2), \text{ кВт}; \quad (11)$$

где C_1 – теплоемкость выхлопных газов, кДж/кг·°С; M_1 – расход выхлопных газов, кг/с; T_1 – температура выхлопных газов на входе в теплообменник, °С;

T_2 – температура выхлопных газов на выходе из теплообменника, °С;

4. Определяется тепловой поток, передаваемый горячим потоком вихревой трубы в теплообменнике:

$$Q_{вт} = C_2 \cdot M_{вт} (T_{1вт} - T_2), \text{ кВт}; \quad (12)$$

C_2 – теплоемкость воздуха, кДж/кг·°С; $M_{вт}$ – расход воздуха на горячем выходе вихревой трубы, кг/с; $T_{1вт}$ – температура горячего потока вихревой трубы на входе к теплообменнику, °С; T_2 – температура горячего потока вихревой трубы на выходе из теплообменника, °С;

Величина $T_{1вт}$ (температура горячего потока вихревой трубы) в формуле (12) при расчете теплового потока, передаваемый горячим потоком вихревой трубы в теплообменнике, может определяться по экспериментально полученной нами зависимостью.

При проведении экспериментальных исследований определения температур на горячем выходе вихревой трубы результаты замеров показали повышение температуры на 4-6 °С при каждом увеличении давления сжатого воздуха на 0,1 МПа. При начальном давлении воздуха 0,2 МПа горячей поток воздуха имел температуру +58 °С, при максимальном давлении 0,8 МПа +90 °С.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований позволили получить зависимость изменения величины теплового потока температуры от давления воздуха, зависимость приведена на рисунке 10.

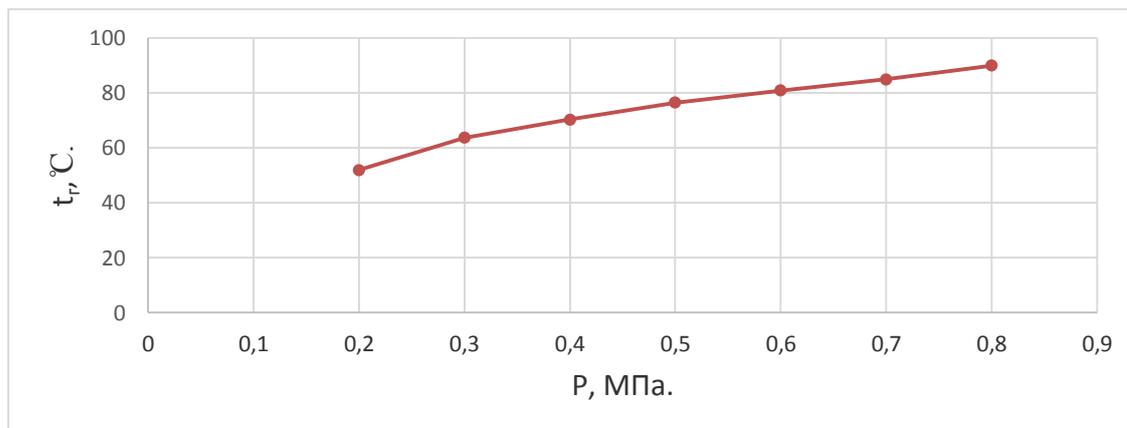


Рис. 10. Зависимость температуры теплового потока (t_p) от давления воздуха (P , МПа).

Проведя статистический анализ экспериментальных данных приведенных на графике (рис. 10) была получена следующая зависимость температуры горячего потока вихревой трубы от давления воздуха:

$$T_{\text{вт}} = 59,7 \cdot P + 44,2, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (13)$$

где P - давление сжатого воздуха, выходящего с компрессора, МПа.

Коэффициент корреляции для данного уравнения составляет $r = 0,95$.

Полученная зависимость может быть использована в качестве модели для определения температуры горячего потока вихревой трубы в зависимости от давления при оценке тепловой мощности утилизационной установки.

Тогда формула (12) для определения теплового потока, передаваемого горячим потоком вихревой трубы в теплообменнике, примет следующий вид:

$$Q_{\text{вт}} = C_2 \cdot M_{\text{вт}} ((5,9 \cdot P + 44,2) - T_2), \text{ кВт.}$$

Это позволит определить общий тепловой поток, отбираемой от ДВС привода компрессора.

Проведенные экспериментальные испытания вихревой трубы при бурении геологоразведочных скважин с продувкой воздухом позволили: определить параметры регулирования температурного режима скважины с использованием предложенной математической модели; повысить эффективность работы компрессора и снизить часть затрат на теплоснабжение геологоразведочных работ.

Определена экономическая эффективность предлагаемых решений. При бурении геологоразведочных скважин с применением вихревой трубы для охлаждения продувочного воздуха и системы утилизации тепла снижаются

затраты на электроэнергию и на отопление. При этом экономический эффект на 1000 метров бурения составляет 217 730 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе на основе приведенных аналитических и экспериментальных исследований и установленных закономерностей решена задача по регулированию и прогнозированию температурного режима при бурении геологоразведочных скважин в многолетнемерзлых породах с продувкой воздухом. Также решена задача по повышению эффективности бурения за счет использования вторичных энергоресурсов ДВС компрессора и вихревой трубы. Решение поставленных в диссертации задач имеет существенное значение для совершенствования технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых России.

Основные результаты выполненных исследований сводятся к следующему:

1. Анализ особенностей бурения геологоразведочных скважин с продувкой воздухом позволил выявить те условия, при которых существенно повышается производительность и значительно снижается стоимость буровых работ.

2. Проведенные экспериментальные исследования позволили обосновать возможность применения вихревой трубы для обеспечения температурного режима скважины при бурении геологоразведочных скважин с продувкой воздухом в многолетнемерзлых породах.

3. Предложена система утилизации теплоты ДВС компрессора, выхлопных газов и горячего воздуха, выходящего с горячего конца вихревой трубы, которая позволяет снизить затраты на энергоресурсы.

4. Экспериментально получены зависимости, которые позволяют рассчитать температуру холодной и горячей фракции вихревой трубы, при различных давлениях воздуха.

5. Получена зависимость, которая позволяет определить величину теплового потока при использовании вторичных энергоресурсов дизельного компрессора с применением вихревой трубы.

6. Выполнены исследования температурного режима скважины в процессе бурения и предложены способы его нормализации в условиях геологоразведочного бурения в многолетнемерзлых породах, на основе моделирования температурного режима скважины.

7. Получена зависимость, позволяющая определить температурный режим, бурящийся скважины в зависимости от давления компрессора и других технологических параметров при использовании вихревой трубы.

8. Установлена зависимость, описывающая связь количества теплоты, которая выделяется на забое в зависимости от скорости объемной разрушения, последняя, в свою очередь, определяется технологическими параметрами бурения.

9. Определена экономическая эффективность бурения геологоразведочных скважин с продувкой воздухом с использованием вихревой трубы в многолетнемерзлых породах. Экономический эффект на 1000 метров бурения составляет 217 730 рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

В рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:

1. Джураев Р.У., Меркулов М.В. О возможности применения вихревых труб при бурении геологоразведочных скважин. // Известия Вузов. Геология и разведка. 2013 г. №3. С.76.

2. Джураев Р.У., Меркулов М.В. Анализ бурения скважин с продувкой воздухом. // Горный информационно-аналитический бюллетень - ГИАБ, №12, 2014 г. С 327.

3. Джураев Р.У., Меркулов М.В. Результаты экспериментальных исследований вихревой трубки применительно к бурению геологоразведочных скважин. // Горный информационно-аналитический бюллетень - ГИАБ, №4, 2015 г. С 349.

4. Джураев Р.У., Меркулов М.В. Моделирование температурного режима при бурении скважин в мерзлых породах с продувкой воздухом. // Горный информационно-аналитический бюллетень - ГИАБ, №11, 2015 г. С 6.

В прочих изданиях:

1. Джураев Р.У. Совершенствование системы воздухораспределения поршневых компрессоров. // Уральская горнопромышленная декада – 2010. Екатеринбург 15-20 апреля, 2010 г. (Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов)

2. Худойбердиев Ш.М., Джураев Р.У., Хайдаров Ш.Б. Анализ систем воздухораспределения поршневых компрессоров. // Научно технический и производственный журнал Горный Вестник Узбекистана, №1 (48), 2012 г. С 90.

3. Эгамбердиев И.П., Джураев Р.У. Повышение эффективности системы воздухораспределения поршневых компрессоров. // Материалы Республиканской научно-технической конференции на тему «Современные технологии и инновации горно-металлургической отрасли» - Навоий, 2012 г. - С. 166-167.

4. Джураев Р.У. Анализ и возможность применения вихревых труб при бурение геологоразведочных скважин. // Сборник докладов XI международной

конференции «Новые идеи в науках о Земле», посвященной 95 – летию МГРИ-РГГРУ, - М.: 2013 г.

6. Джураев Р.У. Опыт бурения скважин с продувкой воздухом. // Сборник докладов Международной конференции «Молодые – наукам о Земле». 15-17 апреля 2014 г. Москва, МГРИ-РГГРУ.

7. Джураев Р.У. Анализ бурения скважин с продувкой воздухом. // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием посвященной 80 – летию основания Старо Оскольского ГРТ имени И.И. Малышева. Старый Оскол, 23-24 апрель 2014.

8. Джураев Р.У. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в осложненных горно-геологических условиях. // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» 08 - 10 апреля 2015 г. Москва, МГРИ-РГГРУ.

9. Джураев Р.У. Экспериментальное исследование при бурении с продувкой воздухом, с применением вихревой трубы. // II Всероссийская научная конференция «Малышевские чтения». Старый Оскол 23-24 апреля, 2015 г.