

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт природных ресурсов
Кафедра бурения нефтяных и газовых скважин

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Зав. каф. бурения скважин

к.т.н.

_____ А.Ю. Дмитриев

“ ____ ” _____ 2016 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ БУРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ
СКВАЖИН ДЛЯ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ УЧЕБНОГО КОРПУСА № 6 ТПУ
Куликов Дмитрий Олегович

Руководитель

доцент кафедры БС, к.т.н.

_____ В.С. Купреков

Автор работы

_____ Д.О. Куликов

Томск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	1
Глава I. Расчёт-обоснование целесообразности.	5
1.1. Оценка по отоплению и ГВС.	5
1.2. Договорные условия по отпускной электроэнергии.	11
Глава II. Бурение тепловых скважин.	14
2.1. Кустовое бурение.	17
2.2. Многоствольное бурение.	19
2.3. Обязка и особенности.	23
Глава III. Анализ возможностей геотермальных источников Томска и Томской области.	26
3.1. Поверхностный слой.	26
3.2. Глубинный слой.	29
3.2.1. Расчет потенциальных возможностей.	32
3.2.2. Количество скважин.	36
Глава IV. Первый тепловой контур.	37
4.1. Теплоноситель: сравнение по теплоемкости.	44
4.2. Гидравлические потери в первом контуре.	51
4.3. Виды зондов, конструкция, особенности.	57
Заключение.	67
Список литературы	70

ВВЕДЕНИЕ.

Дефицит производства энергии за счет органического топлива и экологический ущерб, который наносится при его сжигании, требует поиска экологически чистых источников энергии, таких как: энергия Солнца, ветра, теплота недр и прочие.

Таким образом, в современных условиях остро встает вопрос об эффективном использовании ресурсов на законодательном уровне. Создается обширная законодательная база, направленная на оптимизацию использования ресурсов. Так, например, Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» ставит своей целью создать правовые, экономические и организационные основы стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности, что говорит о направленности на разработку и интенсивном внедрении альтернативных, нетрадиционных источников энергии.

Наибольшим ресурсом тепловой энергии при её постоянстве и практически повсеместном распространении обладают недра планеты. Тепло Земли является очень своеобразным полезным ископаемым, которое имеет связь добываемой полезной энергии с недрами и возможность извлечения их лишь с использованием горных выработок, в частности буровыми скважинами. Что говорит о необходимости применения особого подхода к его опробованию, разведке и разработке.

Одним из важных отличий между геотермальной тепловой энергией и разнообразными минеральными полезными ископаемыми является то обстоятельство, что тепловую энергию нельзя экономично транспортировать на большие расстояния. В связи с этим при уточнении понятия о геотермальном месторождении и оценке его запасов необходимо учитывать,

что их освоение возможно только там, где уже имеются конечные потребители.

Одним из основных видов горных работ при поисках, разведке и эксплуатации геотермальных месторождений является бурение скважин. Скважины позволяют получить информацию, которая необходима для оценки запасов извлекаемых тепловых ресурсов, их качественных характеристик, а также уточнить геолого-геотермические, горно-геологические и технические условия для опробования, разведки и эксплуатации системы извлечения.

Основой технологии является сооружение теплообменных скважин (ТС). Однако глубоких теоретических и экспериментальных исследований новой технологии освоения приповерхностных толщ недр недостаточно.

За рубежом, особенно в Скандинавских странах, доля теплоснабжения жилых объектов по этой технологии достигает 40-60%, а в нашей стране она не превышает 0,2%. Так, в Санкт-Петербурге и Ленинградской области насчитывается несколько сотен небольших объектов, которые отапливаются за счет тепловой энергии приповерхностных толщ горных пород.

Недра Земли обладают колоссальными запасами теплоты, которые можно и нужно использовать с целью теплофикации зданий и сооружений. Низкопотенциальное тепло Земли является ископаемым топливом, выступающим в роли альтернативного источника энергии, при использовании которого атмосфера не загрязняется продуктами горения. Так почему бы не воспользоваться энергией, как сказал В.А. Обручев, находящейся в буквальном смысле слова под ногами? Томская область входит в число крупных областей с теплоэнергетической мощностью подземных вод, которая достигает 80–120 млн Гкал. Грунт, находящийся в поверхностных слоях Земли, представляет определенного рода тепловой аккумулятор солнечной энергии неограниченной емкости. Если детально рассмотреть тепловой режим поверхностных слоев грунта Земли, то его формирование происходит под действием двух основных составляющих –

солнечная радиация и поток радиогенного тепла из недр Земли. Верхние слои грунта подвергаются сезонным и суточным изменениям температуры за счет изменения температуры наружного воздуха. В различных районах России, глубина проникновения суточных колебаний температуры наружного воздуха и интенсивности падающей солнечной радиации колеблется от нескольких десятков сантиметров до первых десятков метров (15–20 м). Слои грунта, расположенные ниже этой глубины имеют свой температурный режим, который формируется под воздействием тепловой энергии недр Земли и не зависит от суточных и сезонных колебаний. Величина радиогенного теплового потока различна для разных местностей и колеблется в пределах от 0,05 до 0,12 Вт/м². Градиент изменения температуры грунта на глубине зависит от конкретных почвенно-климатических условий и для Томской области он равен 3,6 градуса на 100 м. В таблице 1 представлены данные изменения температуры по Томской области в поверхностном слое в зависимости от времени года и глубины по вертикали, которые еще раз подтверждают эти изменения.

До сих пор нет достаточных оснований для использования технологий сооружения ТЭС, опробования и оценки подобных энергетических ресурсов, а также рекомендаций по режимам эксплуатационной разведки в конкретных геолого-технических условиях.

В связи с этим проблема проведения комплексных исследований, связанных с разведкой и опробованием тепловых ресурсов приповерхностных толщ, является актуальной.

Цель работы: провести сравнительный анализ методов бурения тепловых скважин.

Задачи исследования:

1. Провести оценку требуемого количества тепловой энергии для отопления и ГВС.
2. Провести анализ возможностей геотермальных источников.
3. Рассмотреть методы бурения тепловых скважин.

4. Рассмотреть первый тепловой контур.
5. Обосновать выбор использования геотермальных источников для теплоснабжения.

Работа выполнена в соответствии с общепринятыми методами теоретических исследований.

Работа содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы, включающий 83 наименования.

ГЛАВА 1. РАСЧЁТ-ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ.

1.1. Оценка отопления и ГВС.

I полугодие 2015 год.

Расчет стоимости тепловой энергии на отопление 1 м² общей площади производится следующим образом: норматив потребления отопления * тариф на тепловую энергию = стоимость тепловой энергии на отопление 1 м²:

- январь-апрель $0,0366 \text{ Гкал/ м}^2 * 990,50 \text{ руб./Гкал} = 36,2523 \text{ руб./ м}^2$;
- май $0,0122 \text{ Гкал/ м}^2 * 990,50 \text{ руб./Гкал} = 12,0841 \text{ руб./ м}^2$;

Расчёт стоимости услуги за горячее водоснабжение на 1 человека производится: норматив потребления ГВС * тариф на тепловую энергию = стоимость услуги ГВС на 1 человека.

Пример расчёта стоимости услуги горячего водоснабжения на 1 человека при полном благоустройстве квартиры (этажностью с 1 по 10, оборудованные мойкой, умывальником, ванной длиной 1500-1700 мм с душем) при отсутствии счётчиков горячей воды:

- январь-июнь $0,2120 \text{ Гкал/на 1 чел. в месяц} * 990,50 \text{ руб./Гкал} = 209,986 \text{ руб./чел.}$

Расчёт стоимости услуги за горячее водоснабжение по счётчику ГВС производится таким образом: норматив расхода тепловой энергии на подогрев 1 м³ воды * тариф на тепловую энергию = стоимость услуги за подогрев 1 м³:

- январь-июнь $0,0467 \text{ Гкал/ м}^3 * 990,50 \text{ руб./Гкал} = 46,2564 \text{ руб./ м}^3$.

2014 год.

Расчёт стоимости тепловой энергии на отопление 1 м² общей площади производится: норматив потребления отопления * тариф на тепловую энергию = стоимость тепловой энергии на отопление 1 м²:

- январь-апрель $0,0366 \text{ Гкал/ м}^2 * 934,43 \text{ руб./Гкал} = 34,2001 \text{ руб./ м}^2$;
- май $0,0122 \text{ Гкал/ м}^2 * 934,43 \text{ руб./Гкал} = 11,4000 \text{ руб./ м}^2$;
- октябрь $0,0322 \text{ Гкал/ м}^2 * 990,50 \text{ руб./Гкал} = 31,8941 \text{ руб./ м}^2$;

- ноябрь-декабрь $0,0366 \text{ Гкал/ м}^2 * 990,50 \text{ руб./Гкал} = 36,2523 \text{ руб./ м}^2$.

Расчёт стоимости услуги за горячее водоснабжение на 1 человека производится так: норматив потребления ГВС * тариф на тепловую энергию = стоимость услуги ГВС на 1 человека.

Пример расчёта стоимости услуги горячего водоснабжения на 1 человека при полном благоустройстве квартиры (этажностью с 1 по 10, оборудованные мойкой, умывальником, ванной длиной 1500-1700 мм с душем) при отсутствии счётчиков горячей воды:

- январь-июнь $0,2120 \text{ Гкал/на 1 чел. в месяц} * 934,43 \text{ руб./Гкал} = 198,0991 \text{ руб./чел.};$

- июль-декабрь $0,2120 \text{ Гкал/на 1 чел. в месяц} * 990,50 \text{ руб./Гкал} = 209,986 \text{ руб./чел.}$

Расчёт стоимости услуги за горячее водоснабжение по счётчику ГВС производится следующим образом: норматив расхода тепловой энергии на подогрев 1 м^3 воды * тариф на тепловую энергию = стоимость услуги за подогрев 1 м^3 :

- январь-июнь $0,0467 \text{ Гкал/ м}^3 * 934,43 \text{ руб./Гкал} = 43,6378 \text{ руб./ м}^3$;

- июль-декабрь $0,0467 \text{ Гкал/ м}^3 * 990,50 \text{ руб./Гкал} = 46,2564 \text{ руб./ м}^3$.

2013 год.

Расчёт стоимости тепловой энергии на отопление 1 м^2 общей площади проводится таким образом: норматив потребления отопления * тариф на тепловую энергию = стоимость тепловой энергии на отопление 1 м^2 :

- январь-апрель $0,0366 \text{ Гкал/ м}^2 * 851,03 \text{ руб./Гкал} = 31,1477 \text{ руб./ м}^2$;

- май $0,0122 \text{ Гкал/ м}^2 * 851,03 \text{ руб./Гкал} = 10,3826 \text{ руб./ м}^2$;

- октябрь $0,0322 \text{ Гкал/ м}^2 * 934,43 \text{ руб./Гкал} = 30,0886 \text{ руб./ м}^2$;

- ноябрь – декабрь $0,0366 \text{ Гкал/ м}^2 * 934,43 \text{ руб./Гкал} = 34,2001 \text{ руб./ м}^2$;

Расчёт стоимости услуги за горячее водоснабжение на 1 человека производится следующим образом: норматив потребления ГВС * тариф на тепловую энергию = стоимость услуги ГВС на 1 человека.

Пример расчёта стоимости услуги горячего водоснабжения на 1 человека при полном благоустройстве квартиры (этажностью с 1 по 10, оборудованные мойкой, умывальником, ванной длиной 1500-1700 мм с душем) при отсутствии счётчиков горячей воды:

- январь-июнь $0,2120 \text{ Гкал/на } 1 \text{ чел. в месяц} * 851,03 \text{ руб./Гкал} = 180,4184 \text{ руб./чел.};$

- июль – декабрь $0,2120 \text{ Гкал/на } 1 \text{ чел. в месяц} * 934,43 \text{ руб./Гкал} = 198,0991 \text{ руб./чел.}$

Расчёт стоимости услуги за горячее водоснабжение по счётчику ГВС производится: норматив расхода тепловой энергии на подогрев 1 м^3 воды * тариф на тепловую энергию = стоимость услуги за подогрев 1 м^3 :

- январь-июнь $0,0467 \text{ Гкал/ м}^3 * 851,03 \text{ руб./Гкал} = 39,7431 \text{ руб./ м}^3;$

- июль-декабрь $0,0467 \text{ Гкал/ м}^3 * 934,43 \text{ руб./Гкал} = 43,6378 \text{ руб./ м}^3.$

2012 год.

Расчёт стоимости тепловой энергии на отопление 1 м^2 общей площади производится таким образом: норматив потребления отопления * тариф на тепловую энергию = стоимость тепловой энергии на отопление 1 м^2 :

- январь-апрель $0,0366 \text{ Гкал/ м}^2 * 747,48 \text{ руб./Гкал} = 27,3578 \text{ руб./ м}^2;$

- май $0,0122 \text{ Гкал/ м}^2 * 747,48 \text{ руб./Гкал} = 9,1193 \text{ руб./ м}^2;$

- октябрь $0,0322 \text{ Гкал/ м}^2 * 851,03 \text{ руб./Гкал} = 27,4032 \text{ руб./ м}^2;$

- ноябрь - декабрь $0,0366 \text{ Гкал/ м}^2 * 851,03 \text{ руб./Гкал} = 31,1477 \text{ руб./ м}^2.$

Расчёт стоимости услуги горячего водоснабжения на 1 человека производится следующим образом: норматив потребления ГВС * тариф на тепловую энергию = стоимость услуги ГВС на 1 человека.

Пример расчёта стоимости услуги горячего водоснабжения на 1 человека при полном благоустройстве квартиры (этажностью с 1 по 10, оборудованные мойкой, умывальником, ванной длиной 1500-1700 мм с душем) при отсутствии счётчиков горячей воды:

- январь - июнь $0,2120 \text{ Гкал/на } 1 \text{ чел. в месяц} * 747,48 \text{ руб./Гкал} = 158,47 \text{ руб./чел.}$

- июль - август 0,2120 Гкал/на 1 чел. в месяц * 792,47 руб./Гкал = 168,00 руб./чел.

- сентябрь - декабрь 0,2120 Гкал/на 1 чел. в месяц * 851,03 руб./Гкал = 180,42 руб./чел.

Расчёт стоимости услуги горячего водоснабжения по счётчику ГВС производится: норматив расхода тепловой энергии на подогрев 1 м³ воды * тариф на тепловую энергию = стоимость услуги за подогрев 1 м³:

- январь – июнь 0,0467 Гкал/ м³ * 747,48 руб./Гкал = 34,9073 руб./ м³;

- июль – август 0,0467 Гкал/ м³ * 792,47 руб./Гкал = 37,0083 руб./ м³;

- сентябрь-декабрь 0,0467 Гкал/ м³ * 851,03 руб./Гкал = 39,7431 руб./ м³;

Считается, что если поставить счётчик, то оплата за отопление и ГВС будет значительно дешевле, поскольку оплачивается только то, что потрачено (получено).

Как подсчитать объём [теплоносителя в системе отопления](#)?

Для перевода [тепловой мощности](#)

1 Кал/Час = 0,864 * 1 Вт/Час

1 килоКал => 1 000 Кал

1 мегаКал => 1 000 кКал => 1 000 000 Кал

1 гигаКал => 1 000 мКал => 1 000 000 кКал => 1 000 000 000 Кал

Таким образом энергоснабжающая организация указала 0,21Гкал/ч. Это сколько в кВт?

0,21 Гкал/час это 0,21* 1000000 / 0,864 =243 055,6 Вт = 243,06 Квт

1 кКал/ч = 1,163 Вт

1 Гкал/час = 1,163 мВт

Единицы измерения тепловой мощности и [количества тепла](#).

Кал (Калория) – единица измерения тепловой энергии.

кКал (Килокалория) – единица измерения тепловой энергии.

Перевод гигакалорий в джоули, киловатт-часы.

1 гигакалория = 4.1840 гигаджоуля (ГДж) = 1.1622 мегаватт-час (МВт·ч)

1 гигакалория равна количеству тепла, необходимого для нагревания 1000 тонн (1 000 000 кг) воды на один кельвин при стандартном атмосферном давлении.

Гигакалория (Гкал) – основа теплотехнических расчётов и замеров, поскольку она является единицей измерения тепловой энергии, которая соизмерима с объёмами теплопередачи на промышленно-бытовом уровне. Как единица измерения тепла, гигакалория максимально близка к реальной жизни и, поэтому – горячо любима теплотехниками тепловиками и коммунальниками всех времён и народов. Учёт тепла и взаиморасчёт за тепловые услуги происходит только на уровне гигакалории. Все теплотехнические расчёты и замеры для зданий и сооружений, систем отопления и отопительных агрегатов также производятся только в гигакалориях.

В теплотехнике, **гигакалория** стоит является основной единицей измерения тепловой энергии. Предшествующая гигакалории, мегакалория – слишком мелка для реальных нужд теплотехники, а последующая за гигакалорией, теракалория – огромна. Из-за своей громадности, теракалория не используется в прикладной теплотехнике и, практически – теракалория совершенно не имеет отношения к земной жизни.

Гигакалория, отнесённая к единице массы или объёма, используется при оценке удельной массовой или удельной объёмной энергетической ценности (теплотворности) топлива.

Удельная *массовая* (весовая) теплотворность топлива мало кому интересна, потому что для топлива органического происхождения – это, практически, постоянная величина.

Удельная *объёмная* теплотворность топлива – это важнейшая его характеристика, как топливного ресурса.

В связи с этим, наибольшее распространение получила гигакалория, отнесённая к метру кубическому твёрдого или [жидкого топливного](#) вещества – Гкал/м³.

Для измерения *объёмной* теплотворности газообразного топливного вещества (природного газа), гигакалория не используется, в виду низкой *объёмной* теплотворности газообразного топлива. Из-за этого, теплотворная способность газов (природного газа) измеряется в ккал/м³ (по ГОСТ Р 8.577-2000).

Гигакалория, приведённая к единице времени, применяется для характеристики тепловой мощности прибора или процесса. Например, в гигакалориях в час (Гкал·ч) измеряется производительность отопительного оборудования или скорость теплотерь (охлаждения, остывания) зданий и сооружений в холодный период.

Таким образом, анализ теплопотребления по итогам нескольких лет говорит об увеличении тарифов на потребление отопления и ГВС. В то время как за рубежом находит широкое применение использование низкопотенциальной тепловой энергии Земли с помощью тепловых насосов, что в свою очередь позволяет снизить затраты на конечный продукт потребления. Поэтому обустройство скважины для теплового насоса обладает целым рядом преимуществ.

1.2. Договорные условия по отпускной электроэнергии.

Средние тарифы для потребителей на декабрь 1998 года, утверждённые по областям России региональными энергетическими комиссиями, составили:

- на электроэнергию = 23,45 коп./кВт-ч;
- на тепловую энергию = 98,05 руб./Гкал.

Средние фактические тарифы составили:

- на электроэнергию = 21,85 коп./кВт-ч;
- на тепловую энергию = 94,60 руб./Гкал.

Отклонение фактических тарифов от утверждённых РЭК являются, во-первых, следствием изменения отпуска энергии по группам потребителей по сравнению с принятыми в расчётном периоде, во-вторых, результатом применения льготных условий оплаты энергии отдельными потребителями.

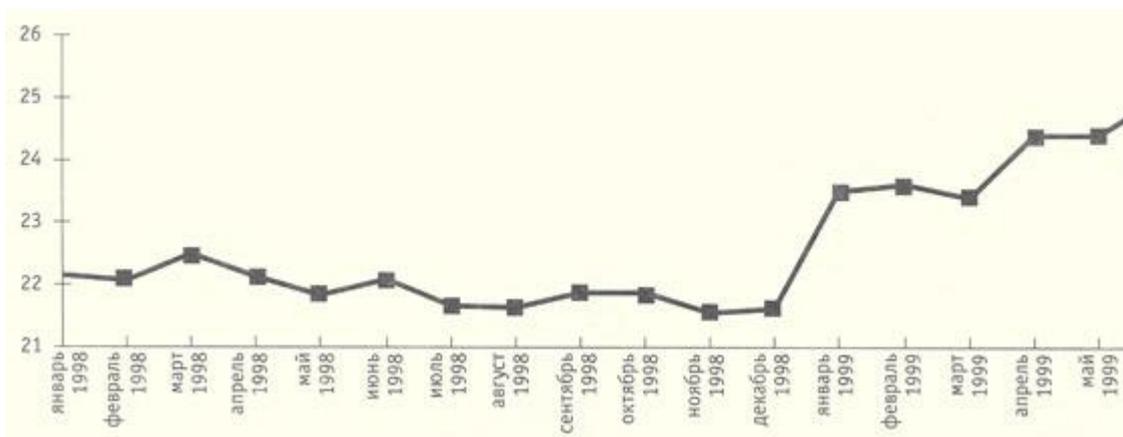


Рисунок 1. Средние отпускные тарифы (фактические) на электроэнергию для потребителей, коп./кВт-ч

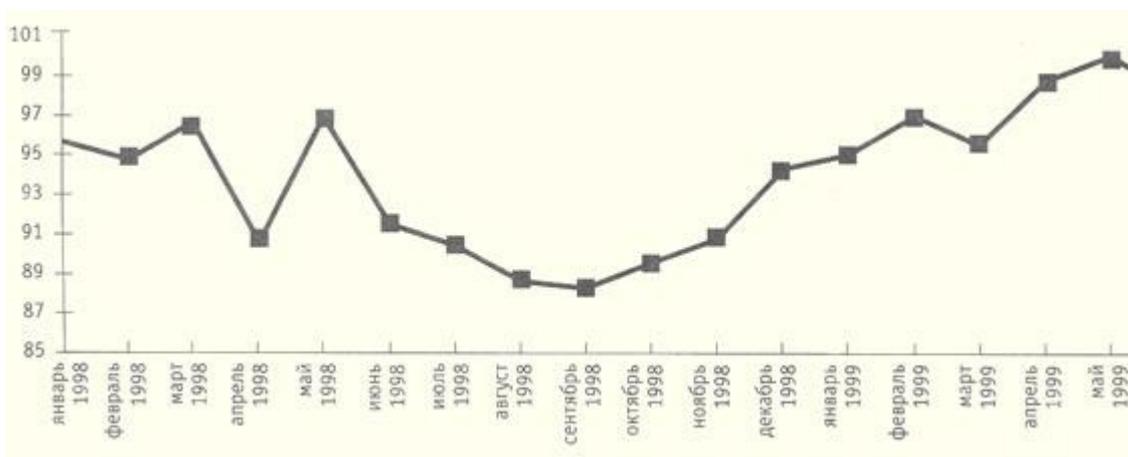


Рисунок 2. Средние отпускные тарифы (фактические) на тепловую энергию для потребителей, руб./Гкал

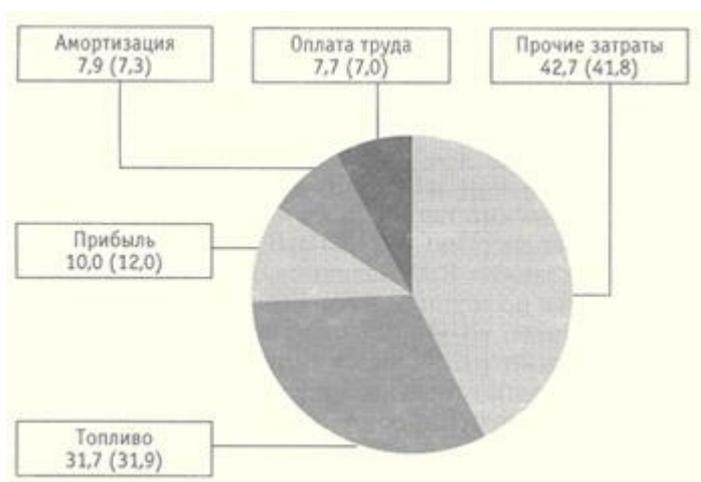


Рисунок 3. Структура среднего тарифа на электроэнергию по России в 1998 г., %*

* в скобках указан показатель 1997 г.

На июнь 1999 года средние тарифы для потребителей, утверждённые РЭК по областям России, выросли:

- на тепловую энергию на 6,8% по сравнению с декабрем месяцем и составили 25,04 коп./кВт-ч.;

- на тепловую энергию на 6,1% и стали равны 104,10 руб./Гкал.

Средний фактический тариф на электроэнергию составил 24,97 коп./кВт-ч, на тепловую энергию – 98,31 руб./Гкал. Таким образом, фактический тариф на электроэнергию вырос на 14,3 %, на тепловую энергию на 3,9 %.

Средний тариф на электроэнергию для потребителей в 1998 году в размере 22,04 копейки за 1 кВт-ч состоит из прибыли (10 %) и затрат на производство и передачу электроэнергии. Затраты на топливо составляют 31,7 % тарифа. По сравнению в 1997 годом доля топлива снизилась на 0,2 %. Доля амортизации основных фондов составила 7,9 %, она снизилась на 0,6 %. Оплата труда составила 7,7 %, её доля увеличилась по сравнению с предыдущим годом на 0,7 %. Другие затраты увеличились по сравнению с прошлым годом на 0,9 %. Доля прибыли в структуре тарифа снизилась на 2 %.

ГЛАВА II. БУРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ СКВАЖИН.

Современный рынок буровой техники и бурового инструмента динамично развивается и учитывает конъюнктуру конечного потребителя своих услуг. В странах, где активно развито бурение теплообменных скважин производством выпускаются специальные буровые установки, ориентированные на бурение теплообменных скважин. Создаются различные механизмы и устройства для повышения эффективности и скорости бурения.

Технология бурения тепловых скважин аналогична технологии бурения водозаборных скважин. Основная технология – вращательное бескерновое бурение с прямой промывкой глинистым буровым раствором. Глубина теплообменных скважин в российской практике в среднем не превышает 100-120 м, конечный диаметр колеблется от 112-132 мм до 190,5 мм.

Конструкция теплообменных скважин простая. Чаще всего скважина бурится без обсадных колонн, либо с временным закреплением неустойчивых пород верхней части разреза. После завершения бурения в скважине устанавливается теплообменный коллектор, в российской практике, чаще всего применяется U-образный и двойной U-образный тип коллекторов. Затем скважина на всю глубину тампонируется либо цементным раствором, которые традиционно используются для цементирования затрубного пространства эксплуатационных колонн водозаборных скважин, либо глиноцементными растворами.

Скорости проходки вышеуказанными технологией и техникой в среднем составляет от 2-3 до 4-5 м в смену, таким образом, бурение скважины глубиной 100 м составляет от 2-х недель до 1-го месяца в зависимости от качества организации работ.

За рубежом основными технологиями бурения теплообменных скважин являются следующие технологии:

- вращательное бескерновое бурение с обратной промывкой технической водой, глинистым буровым раствором или продувкой воздухом. Такая

технология по сравнению с бурением с прямой промывкой позволяет увеличить механическую скорость бурения;

- вращательное бурение с обратной промывкой/продувкой с применением колонны двойных бурильных труб и ударных забойных машин, как с пневматическим приводом, так и с гидравлическим приводом; вибрационно-вращательное бурение. На забой скважины оказывается комбинированное воздействие высокочастотной вибрации и вращения, что позволяет разрушать горные породы эффективнее и гораздо быстрее по сравнению с традиционной технологией бурения.

Применение выше описанных технологий бурения позволяют значительно увеличить скорость проходки скважин. При эффективной организации работ скорость проходки скважин даже в скальных прочных породах достигает значений 1-2 м/мин.

Большинство зарубежных буровых установок, предназначенных для бурения теплообменных скважин, смонтировано на базе гусеничных шасси. Применение нашли как легкие установки, так и относительно тяжелые, а также полностью гидрофицированные установки с подвижным вращателем и безлебедочной системой спускоподъемных операций. Технология бурения предусматривает также бурение двойными колоннами труб, наружная труба которых выполняет функцию временной обсадной колонны.

Такая технология реализована в установках ТКВ 205 GT и KB 30/150. Бурение осуществляется следующим образом:

- бурение скважины производится на всю глубину одним рейсом;
- внутренняя колонна труб вместе с породоразрушающим инструментом извлекается из скважины, а наружная колонна остается в ней, выполняя функцию временной обсадной колонны;
- в скважину опускается теплообменный коллектор;
- наружная колонна труб извлекается.

Достоинством такого способа является возможность бурения одним диаметром на всю глубину скважины, без потерь времени на

спускоподъемные операции. Технология позволяет применять комбинированный тип воздействия породоразрушающим инструментом на забой горных пород, используя удар или вибрацию.

Благодаря высокочастотному воздействию на забой возможна высокая эффективность разрушения и высокая скорость проходки скважин.

Современный рынок буровой техники предлагает большой выбор высокоэффективных технико-технологических средств для бурения скважин, назначением которых является извлечение низко потенциальной тепловой энергии горных пород. Зарубежный опыт по бурению теплообменных скважин показывает, что одним из основных путей по снижению капитальных затрат на бурение является применение высокопроизводительных технологий, которые позволяют снизить затраты:

- во-первых, времени;
- во-вторых, затраты на инструмент и материалы.

Геотермальные скважины аналогично скважинам для водоснабжения бурятся на глубину 50-200 м, обсадная труба не требуется. Отсутствие необходимости обсаживать геотермальные скважины стальной трубой значительно удешевляет бурение.

Как вариант, существует горизонтальный способ расположения геотермального контура. В этом случае затраты на организацию системы на основе теплового насоса значительно снижаются, так как вместо дорогого бурения требуется рытье траншеи. Но в этом случае понадобится большая площадь для горизонтального размещения труб с теплоносителем. В зависимости от мощности теплового насоса общая длина труб может достигать нескольких сотен метров. Такой вариант может оказаться невыгодным при высокой цене на землю и неудобным при маленькой площади участка. В данной ситуации бурение и тепловой насос будет более подходящим решением.

2.1. Кустовое бурение.

«Кустовое бурение – сооружение [скважин](#) (в основном наклонно направленных), устья которых группируются на близком расстоянии друг от друга на общей ограниченной площадке (основании)» [37].

Кустовое бурение применяется при разработке [месторождений](#) под застроенными участками, при разработке [нефтяных](#) и [газовых месторождений](#), на территории с сильно пересечённым [рельефом](#) местности или в пределах [акваторий](#).

Площадка для кустового бурения, на которой будет находиться буровая установка и устьевое оборудование, обычно располагается там, где затраты времени и средств по условиям рельефа будут минимальны.

Бурение скважин производится различным количеством одновременно действующих буровых установок, мощность которых также различна и зависит от непосредственно количества скважин и их глубины.

При бурении куста скважины вспомогательные службы (например, площадки под буровой инструмент и пр.) размещаются стационарно и передвигаются с места на место лишь только вышки и насосные группы.

Наиболее сложным моментом в бурении скважин кустами с близким расположением устьев является бурение вертикальных участков близкорасположенных скважин. В кусте скважины бурятся начиная с первой при наличии проекта проводки всех скважин куста. В зависимости от условий бурения количество скважин в кусте может изменяться от 2 до нескольких десятков; максимальное отклонение забоев скважин от вертикали могут составлять более 2000 м.

Использование кустового бурения обладает рядом преимуществ, а именно:

- сокращение строительно-монтажных работ;
- уменьшение объёма вспомогательных работ;
- упрощение обслуживания эксплуатируемых скважин;
- сокращение объёма перевозок и затрат на оборудование промысла;

- упрощение автоматизации процесса добычи и обслуживания;
- охрана окружающей среды.

2.2. *Многоствольное бурение.*

Для извлечения и использования низкопотенциальной тепловой энергии из недр Земли применяются различные схемы, которые делятся на два основных класса – закрытые (герметичные) и открытые системы теплосбора. В данном случае представляют интерес закрытые системы теплосбора, которые в свою очередь делятся на горизонтальные и вертикальные. Преимущества горизонтальных систем сбора тепла в том, что они устанавливаются на незначительной глубине. Так в Томской области глубина установки горизонтального контура начинается с 1,5 до 1,8 м, что выше глубины промерзания (2,2–2,5 м).

Горизонтальные системы имеют несколько существенных недостатков: большая площадь для установки системы теплосбора (теплообменника) и достаточное освещение (на участке расположения теплового контура нельзя возводить капитальные постройки).

Система с вертикальным грунтовым теплообменником устанавливается ниже уровня зоны воздействия солнечной радиации и имеет преимущества:

- нет потребности в участке большой площади;
- нет зависимости от интенсивности солнечной радиации и времени года;
- тепловая мощность ограничивается лишь общей глубиной скважин и характеристиками оборудования.

Для обустройства вертикального теплообменника необходимо пробурить несколько скважин расчетной глубины, как правило, от 40 до 100 м, и спустить геотермальный зонд. Геотермальный зонд состоит из труб, зачастую полиэтиленовых диаметром 30 или 40 мм.

На сегодняшний день вертикальный теплообменник представлен двумя разновидностями:

- U-образный и коаксиальный теплообменник;

- U-образный зонд – теплообменник, представляющий собой две полипропиленовых (полиэтиленовых) трубы, которые соединяются в нижней части U-ым наконечником.

В зависимости от тепловых характеристик теплоносителя, в одной скважине располагается одна или две пары таких труб. Коаксиальный зонд – теплообменник, состоящий из труб различного диаметра. Простейший коаксиальный теплообменник представляет из себя две трубы различного диаметра находящиеся одна в другой.

С точки зрения целесообразности применения данного метода теплофикации зданий в условиях плотной застройки города, целесообразно рассмотреть возможность съема низкопотенциальной тепловой энергии Земли с применением многоствольного бурения.

Зачастую в таких условиях проблематично найти необходимый участок земли, свободный от скрытых коммуникаций и пригодный для работы буровых установок для сооружения вертикальных скважин с целью съёма необходимого количества низкопотенциального тепла.

Требуемая мощность теплового насоса зависит от качества и теплотехнических характеристик здания и его объёма. Под качеством понимается его способность сохранять и не выпускать тепло наружу.

Для оценки состояния теплового контура учебного корпуса № 6 ТПУ, были привлечены специалисты компании ООО «Эоклимат», которые произвели тепловизионное обследование корпуса с использованием тепловизионной камеры Testo 875-2. В результате проведенных работ обнаружены неоднородности в области фундамента по всему периметру, в которых температура поверхности достигает $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при твозд на улице $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$), что говорит о недостаточно высоких термических характеристиках ограждающих конструкций в этих зонах. Часть окон здания выполнены с применением деревянных переплётов, некоторые окна были заменены на стеклопакеты с пластиковым переплетом.

Все перечисленные дефекты приводят к ухудшению микроклимата внутри здания и перерасходу тепловой энергии на обогрев, вследствие увеличения общих тепловых потерь здания, которые составляют 111 940 Вт.

Для снижения тепловых потерь рекомендуется устранить дефекты ограждающих конструкций, а именно, выполнить утепление отмостки здания по всему периметру, заменить пластиковые и деревянные окна на более качественные окна с коэффициентом сопротивления теплопередаче не ниже 0,65.

Результаты расчета теплотерь по корпусу показывают, что на 1 м² отапливаемой площади здания, необходимо от 1,2 до 2,4 погонных метра скважины (без учета нагрузки на ГВС) в зависимости от пород, залегающих под зданием, а также наличием водоносных горизонтов. Исходя из этого, для учебного корпуса № 6 ТПУ общей площадью 945 м² необходимо иметь общую протяженность скважин для спуска геотермального зонда 1700 погонных метров для его теплофикации.

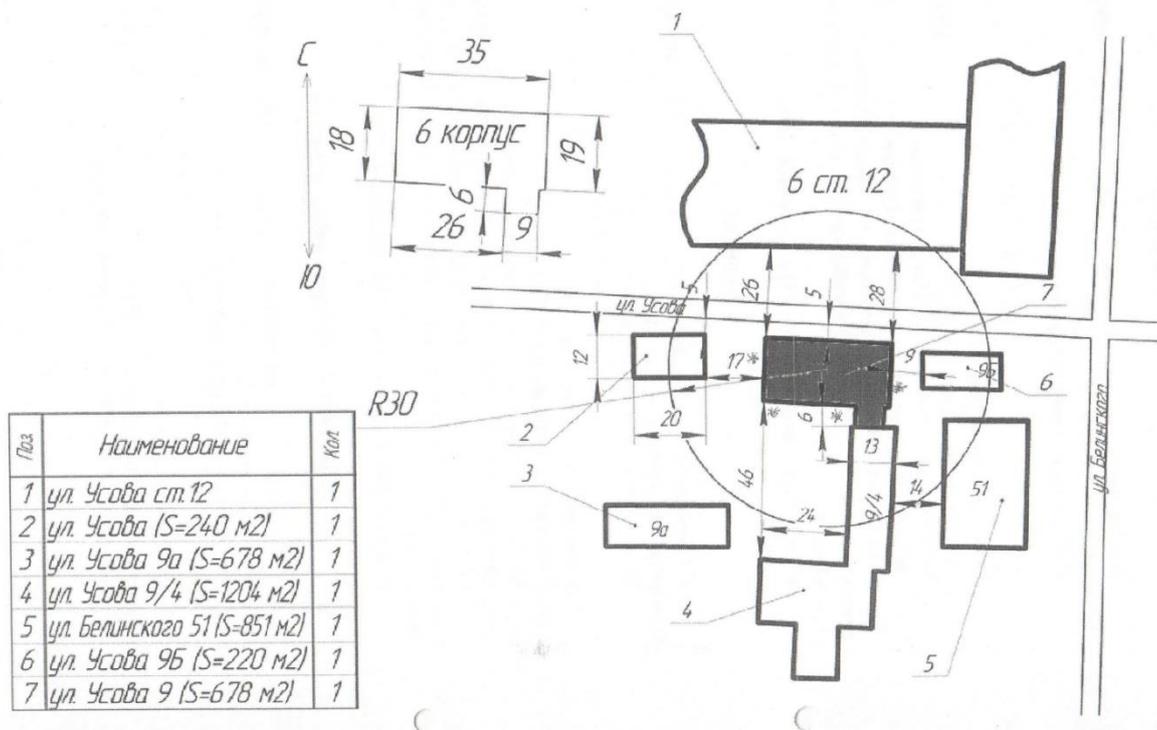


Рисунок 4. Ситуационная схема.

Многоствольное бурение обеспечивает значительную экономию площади по сравнению с бурением большого числа отдельных вертикальных скважин. При этом бурится основной вертикальный ствол до проектной глубины. Далее из этого ствола бурятся боковые стволы требуемой длины со сверхмалым радиусом кривизны. Взаимовлияние стволов исключается разведением последних по азимуту и глубине. В результате будет получено необходимое число погонных метров для теплофикации здания. Преимущества данной технологии при теплофикации зданий включает в себя следующее: - снижение общего количества скважин; - множественные стволы позволяют получить больше тепловой энергии по сравнению с вертикальными скважинами, у которых первые 15–20 м подвержены изменениям температуры окружающей среды и солнечной радиации, а, соответственно, и возможное количество тепла варьируется. В качестве теплового насоса, выбрано четыре тепловых насоса марки Danfoss DHP-R35, с тепловой мощностью 35 кВт каждый, при установке которых в каскад, суммарная тепловая мощность составит 140 кВт. Резюмируя вышесказанное, использование низкопотенциальной тепловой энергии Земли для теплоснабжения зданий с применением многоствольного бурения является новой технологией, которая существенно снижает требуемые площади при обустройстве и расширяет возможности использования геотермального тепла Земли.

2.3. *Обвязка и особенности.*

Оборудование шахты и определение её глубины рассчитывается исходя из нескольких факторов.

1. Геологические особенности региона, где проводятся работы
2. Тип почвы, где выполняется бурение
3. Климатические особенности региона
4. Необходимая мощность теплового оборудования

По статистике на один метр глубины скважины приходится около 60 Вт тепловой энергии соответственно для получения тепловой энергии 10-20 кВт, что необходимо для отопления среднего дома, необходима шахта глубиной до 170м. Понятно, что бурение скважин для тепловых насосов такой глубины слишком дорогостоящее удовольствие, да и оборудование есть далеко не везде. Поэтому приходится бурить несколько отдельных скважин и погружать в каждую из них поглощающий контур.

В среднем на глубине около 20 метров температура грунта достигает +10 и чем глубже, тем больше она становится. Шахты для тепловых насосов бурят на глубину от 75 до 100 метров для поглощения большего объема тепла.

Особенность шахты для тепловых насосов состоит в том, что максимально допустимая её глубина не должна превышать 200 м. В свою очередь особенности геологии далеко не везде позволяют так углубляться.

В некоторых случаях скважина нужна для теплового насоса не вертикальная, а под углом. Этот вариант позволяет монтировать тепловые насосы даже в регионах, где на небольшой глубине залегают твердые породы, пробиваться через которые не имеет смысла.

Бурение скважин под тепловые насосы под углом проводится на глубину не более 10-15 метров и под углом в 45°. Для обеспечения достаточной мощности одновременно прокладывают от 4 до 10 шахт радиально расходящихся из центра. Центральный коллектор, соединяющий все шахты, устанавливают на небольшой глубине около 1 метра и от него

делают разводку к тепловому насосу, установленному в доме. В каждую отдельную шахту погружается медный теплообменник с закаченным в него рассолом.

Еще одной особенностью таких скважин является технология проведения работ. Шахты не бурятся, а вымываются напором воды. Это существенно снижает расходы на организацию системы отопления, хоть и ограничивает глубину шахты. Бурение под углом методом вымывания сохраняет уже имеющиеся инженерные и коммуникационные сети, если они попадают на пути прокладки канала, в отличие от бурильного метода, разрушающего все, что попадает под ножи установки.

Таким образом:

1. Анализ отечественного и зарубежного опыта показывает, что наиболее эффективным типом коллектора теплообменной скважины является коаксиальный тип, при этом подача теплоносителя должна осуществляться через кольцевой канал, что позволит увеличить объем получаемой энергии на 20-30% по сравнению с U-образными коллекторами.

2. Исходя из практического опыта, диаметр теплообменных скважин варьируется в диапазоне от 112 до 190,5 мм, а глубина от 50 до 200 м. В России выбор таких параметров теплообменных скважин, как диаметр, глубина их необходимо количество осуществляется на основе зарубежного опыта без учета конкретных геологических условий района работ.

3. На настоящий момент самыми эффективными технологиями бурения теплообменных скважин являются вибрационно-вращательное бурение и вращательное бурение с обратной промывкой и применением колонны двойных бурильных труб и забойных ударных машин, которые позволяют повысить механическую скорость бурения до десятков м/мин по перемежающимся по буримости породам, а также снизить себестоимость буримой скважины.

4. При проектировании теплообменных скважин должно учитываться следующее: геолого-технические условия, геологическое строение,

теплофизические свойства горных пород, а также условия работы теплообменной скважины в системе теплообмена, то есть режим и продолжительность циркуляции теплоносителя в скважине.

ГЛАВА III. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТОМСКА И ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ.

В современных условиях мировой промышленности наблюдается значительный рост производства и использования большого объема энергоносителей, таких как нефть и газ. В свою очередь запасы данных видов полезных ископаемых истощаются, а экологическая обстановка из-за продуктов сгорания углеводородов ухудшается.

В связи с этим человечество приходит к проблеме разработки и использования альтернативных источников энергии с точки зрения эффективности, экономичности и экологичности. Одним из таких альтернативных источников энергии является тепловая энергия, запасённая в толще горных пород [60].

Толчок к развитию системы тепловых насосов получили в 70-х гг. XX века. В начале своего развития подобные отопительные системы устанавливались в домах высшей ценовой категории, но за счет применения современных технологий они стали доступны большому числу потребителей. Подобные системы устанавливаются в новых зданиях или заменяют собой устаревшее оборудование с сохранением или незначительной модификацией прежней отопительной системы. По прогнозам Мирового Энергетического Комитета к 2020 г. доля тепловых насосов в теплоснабжении составит 75%.

3.1. Поверхностный слой.

Среди возобновляемых источников энергии низкопотенциальная тепловая энергия различного происхождения, благодаря технологии тепловых насосов, в настоящее время играет важную роль в отоплении и кондиционировании зданий. Экологически чистым, наиболее универсальным, а также повсеместно доступным источником низкопотенциальной энергии является тепло горных пород и подземных вод верхней части земной коры [3].

В прогрессивных геотехнологических методах добычи нагнетаемый с поверхности рабочий агент, взаимодействуя с минеральными образованиями в недрах, обогащается полезными компонентами при сохранении или изменении их природного агрегатного состояния или химического состава в получаемом продуктивном флюиде.

Термин полезное ископаемое указывает на генетическую и пространственную связь добываемых полезных компонентов с недрами земной коры и возможность их извлечения лишь с использованием той или иной горной технологии. С данной точки зрения низкопотенциальная тепловая энергия может рассматриваться в качестве полезного ископаемого, которое может быть извлечено на поверхность с помощью различных теплоносителей, циркулирующих в специально сооруженных для этих целей геотехнологических скважинах.

Как и любое другое ископаемое, месторождения тепловой энергии требуют проведения разведочных работ. Основными этапами разведки тепловых ресурсов приповерхностных толщ горных пород являются разведочно-эксплуатационные работы. По предварительному проекту производится бурения скважин, в которых производятся опытные работы, уточняются необходимые параметры. Затем составляется окончательный проект, производится бурение необходимого числа скважин и все они переходят из разряда разведочно-эксплуатационных в разряд эксплуатационных.

Теплообменные скважины, оборудованные циркуляционными системами различной конструкции, сооружаются с целью доставки низкопотенциальной энергии горного массива к тепловому насосу.

В общем объеме тепловой энергии, производимой тепловым насосом, затраты электроэнергии на работу циркуляционных теплообменных систем и тепловых насосов не превышают 25-30%, все остальное – трансформированное низкопотенциальное тепло горного массива [55].

За рубежом доля теплоснабжения жилых объектов по этой технологии достигает в настоящее время 40-60%; в нашей стране она незначительна и не превышает долей процента.

Тепловую энергию горных пород принято подразделять на собственно геотермальную и низко потенциальную. Геотермальная энергия использует тепло пород, которые разогреты до температуры кипения воды и выше. Эти условия обуславливают и технологию использования данного вида тепловой энергии.

3.2. Глубинный слой.

Тепловая энергия недр в настоящее время рассматривается как своеобразное полезное ископаемое. В современном понимании термин ископаемое утрачивает прямую связь с непосредственным процессом извлечения твердого, жидкого или газообразного полезного компонента на поверхность.

Геотермальные ресурсы тепловой энергии недр (глубинное тепло Земли) представлены двумя основными видами [65]:

1. Гидротермальными, динамическими и самоизливающимися, теплоносителями, в которых являются геотермальные воды (вода, пар, пароводяные смеси);

2. Петрогеотермальными, теплоносителями в которых являются скелеты пород природных коллекторов и практически безводные (непроницаемые или слабопроницаемые) нагретые горные породы.

В настоящее время глубина бурения геотермальных скважин достигает 3-5 тыс. м. Геолого-технические условия бурения геотермальных скважин определяются следующими факторами: температура пород или теплоносителя, минерализация, качество теплоносителя и пластовые давления.

Очевидно, что использование геотермальной энергии сопряжено с высокими капитальными затратами и сложностью в проектировании и строительстве. Использование низкопотенциальной тепловой энергии горных пород приповерхностных толщ, в отличие от глубинной геотермальной, не требует больших капитальных затрат и учета сложных геолого-технических условий бурения. Именно поэтому, начиная с третьей четверти XX века, использование данного вида энергии находит все более широкое применение в Европе.

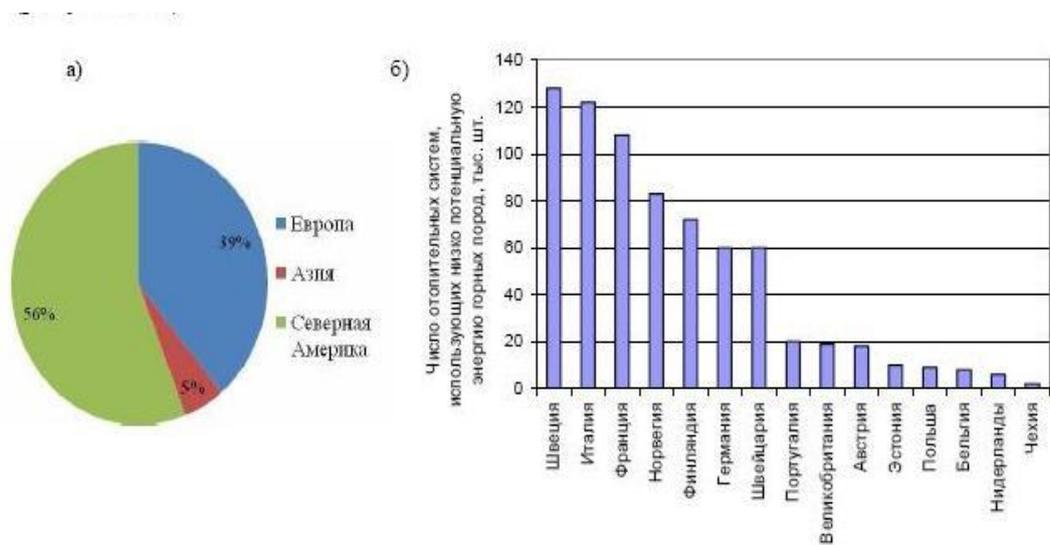


Рисунок 5 – Использование тепловых насосов в мире:

- а) – доля использования региона от общего числа установленных систем;
- б) – количество установленных систем в странах Европы и Северной Америке.

В настоящее время наблюдается четкая тенденция увеличения доли низко потенциальной энергии в отоплении и кондиционировании гражданских и производственных помещений.

В России доля использования данного вида альтернативного источника энергии минимальна и от общей доли занимает лишь десятые доли процента.

Использовать низко потенциальную энергию горных пород позволяет применение технологии тепловых насосов – механизмов, работающих по принципу "холодильника наоборот" (рисунок 5 и 6).

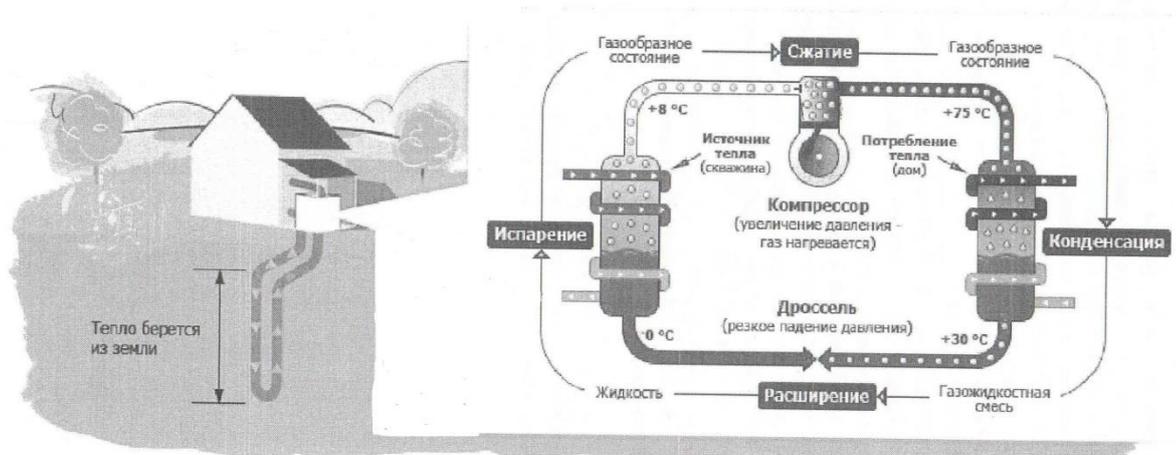


Рисунок 5 – Схема теплового насоса.

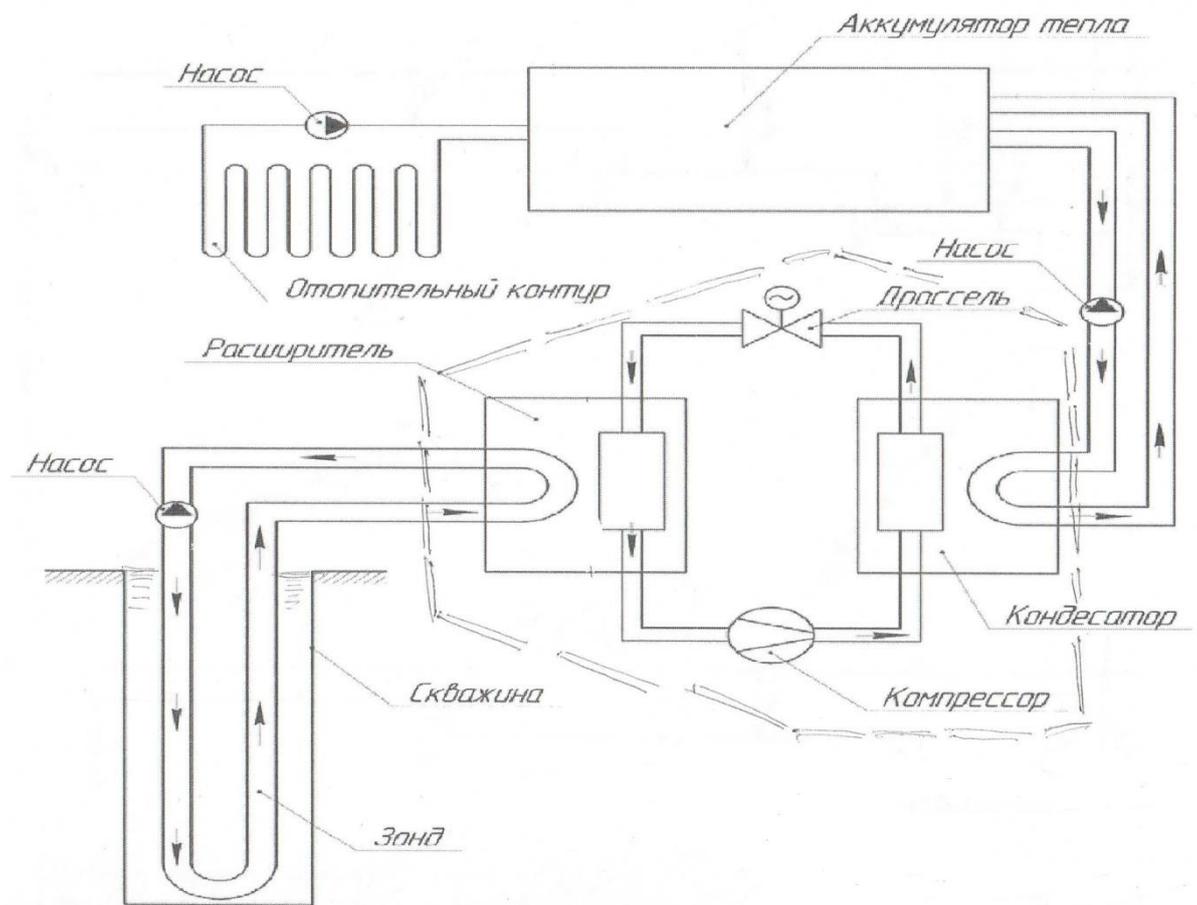


Рисунок 6. Схема работы теплового насоса.

Отопительная система, использующая тепловой насос, состоит из трёх теплообменных контуров.

Первичный циркуляционный контур служит для того, чтобы теплоноситель мог отбирать низкопотенциальную энергию у того или иного источника. Для эффективной работы необходимо, чтобы теплоноситель нагревался на $3-8^{\circ}\text{C}$. В свою очередь такой перепад температур могут обеспечивать различные источники низкопотенциальной тепловой энергии, например:

- водоёмы;
- воздух;
- массив горных пород.

Каждый из перечисленных источников энергии обладает различными достоинствами и недостатками. Достоинство использования энергии водоемов и воздуха заключается в том, что отсутствует необходимость в бурении скважин, что значительно сказывается на объеме капитальных вложений при строительстве отопительной системы. Однако недостатком является тот факт, что для использования энергии водоема, он должен находиться в непосредственной близости от отапливаемой площади, что по очевидным причинам не всегда возможно. Использование в качестве низкопотенциального источника тепловой энергии воздуха перестает быть эффективным в области отрицательных температур, что неприемлемо для большинства регионов в России в зимний период.

Среди перечисленных выше источников низкопотенциальной энергии наиболее доступным является массив горных пород.

Для создания первичного теплообменного контура сооружаются так называемые теплообменные скважины. Глубина бурения подобных скважин стоит в пределах от 50 м. до 200 м. в зависимости от конструкции конечные диаметры бурения колеблются от 90 мм. до 219 мм [19].

3.2.1. Расчет потенциальных возможностей.

Глубокие скважины могут быть использованы для извлечения геотермального тепла с помощью различных технологий. Например, фонтанной, циркуляционной и односкважинной (с замкнутым контуром).

Фонтанная и циркуляционная технологии получили большое обсуждение, а вот односкважинная технология с замкнутым контуром сопряжена с поиском методов теплоотбора, которые в свою очередь могут быть реализованы в условиях отсутствия геотермального флюида и при любом расположении скважин.

В Европе (Швейцария, Германия и др.) одиночные скважины в последнее стали использоваться для извлечения тепла по методу

глубинного (1 v 4 км) скважинного теплообменника (СТО), который встраивается в различные схемы теплоснабжения.

Технико-экономическая значимость таких систем оценивается достаточно высоко. При извлекаемой мощности 100 v 500 кВт и выше они обеспечивают теплоснабжение крупного объекта или даже небольшого посёлка. При всём этом капиталовложения в систему теплосбора ограничены и состоят лишь в реконструкции скважины путём установки вдоль её центральной оси колонны для подъёма теплоносителя (воды) и в оборудовании скважины насосом для его циркуляции через межтрубное пространство; из колонны и отопительного контура для потребителя (или наземный теплообменник). В отдельных случаях реконструкция включает добуривание исходной скважины до рациональной глубины.

В результате геологоразведочного бурения в России, которые составляет уже почти 100 лет, накоплен огромный фонд скважин, которые выведены из эксплуатации и не нашли постоянного применения (в частности это на нефтегазопроисловых площадках). Часть этих скважин характеризуются повышенными значениями геотермального градиента (Западная Сибирь, Кавказ и др.). В связи с этим актуализируется концепция односкважинного теплоснабжения, которая может быть оценена применительно к различным регионам России.

«Однако её развитие сдерживается отсутствием адекватного методологического обеспечения для научно-обоснованного выбора вариантов эффективного извлечения тепла, отражающего нестационарное тепловое поведение окружающих горных пород при движении теплоносителя через глубокую скважину со ступенчатоменяющимся поперечным сечением многослойной конструкции, с учётом распределения пород по глубине и теплового влияния встречающихся водоносных горизонтов» [25].

Методики, которые существуют для расчёта мелких СТО, не применимы для выбора технологии и проектирования глубинных СТО

ввиду разницы возможных механизмов теплопереноса, которая составляет существенный процент.

Кроме того, чтобы строительство односкважинных систем теплоснабжения нашло широкое применение, особенно важное значение имеет соответствие экономическим критериям, которые связаны с оценкой:

- стоимости рациональной глубины добурирования скважин;
- предельных значений расстояния до потребителя с учётом теплопотерь на участках между скважиной и потребителем;
- целесообразности теплонасосной схемы эксплуатации скважин для конкретных регионов.

Для оценки тепловых возможностей скважин, основой для которой являются методы расчёта выходной температуры теплоносителя и извлекаемой мощности в СТО коаксиального типа, использованы аналитические зависимости, которые связаны с вычислением коэффициента нестационарного теплообмена, и элементы численного метода, разработанного швейцарскими исследователями и прошедшего успешную экспериментальную проверку на скважинах в Веггисе и Вайсбаде, Швейцария [33, 56].

«Результаты контрольных расчётов, на примере Тюменской скважины (с установкой внутренней колонны до глубины 3,0 в 3,5 км, при общей глубине скважины в 7502 м), показали, что для условий Западной Сибири полезный перепад температур между входом и выходом СТО и величина извлекаемой тепловой мощности, при входной температуре воды 5|С и расходе 10 м³/ч, могут составить, соответственно, 35 - 45|С и 420 - 500 кВт. Для условий Центральной России, на примере Медягинской скважины в Ярославской области, возможности извлечения тепла, при имеющейся глубине скважины 2250 м и тех же входных параметрах жидкости, существенно меньше: по температурному перепаду 12 в 14|С, а по извлекаемой мощности 140 в 150 кВт» [25]. Однако, при теплонасосной

термотрансформации извлеченной при этом тепловой энергии, могут быть получены достаточные мощности теплоснабжения.

С учётом полного срабатывания полученного теплового потенциала (полезного перепада температур) с помощью тепловых насосов (ТН), при возможных и подтверждённых практикой зарубежных исследований величинах среднесезонных рабочих коэффициентов преобразования 3,5 и 4,0, расчётная тепловая мощность ТН с использованием глубинных СТО, на примере рассмотренных скважин, составит от 200 до 700 кВт. Поскольку эта геотермальная составляющая, как правило, выгодно используется в схемах теплоснабжения для обеспечения базовой тепловой нагрузки, то общая мощность теплогенерирующей установки при геотермальном вкладе 0,2 и 0,7 МВт с пиковым догревом может составить от 0,5 до 2,5 МВт. При этом цена отпускаемой тепловой энергии, по данным немецкого рынка, при сравнении с геотермальными установками другого типа, в указанном диапазоне мощностей, будет ниже (на 30% - по сравнению с технологией, использующей мелкие СТО, и на 20% - по сравнению с технологией на основе геотермальной циркуляционной системы) [25].

Таким образом, законченные бурением скважины в России могут быть достаточно эффективно применены для извлечения тепла. Так, например, использование одной скважины (средняя мощность установки и 1 МВт) обеспечит теплом примерно 1000 жителей или горячей водой около 3000 человек, и, как вариант промышленного применения, сможет обслужить теплицы площадью 1600 м².

По нашему мнению, целесообразно провести ревизию скважин, которые находятся вблизи потенциальных потребителей, для технико-экономической оценки, а также оценить возможности добычи тепла с их использованием и произвести расчёты параметров различных схем теплоснабжения на конкретного потребителя.

3.2.2. Количество скважин.

Количество теплообменных скважин зависит от мощности теплового насоса и площади отапливаемого помещения. Теплоноситель нагревается, проходя первичный теплообменный контур. В качестве теплоносителей применяются: вода, рассолы и водные растворы этиленгликоля. Выбор теплоносителя зависит от режима эксплуатации теплового насоса, а именно от температуры, с которой теплоноситель нагнетается в скважину, чем она выше, тем выше КПД работы теплового насоса. Объемный расход теплоносителя находится в диапазоне 10-30 л/мин. Нагретый теплоноситель попадает в тепловой насос и сообщает тепловую энергию внутреннему теплообменному контуру. Во внутреннем контуре циркулирует хладагент, который имеет низкую температуру кипения. Хладагент, нагреваясь, испаряется и попадает в компрессор. В компрессоре давление газообразного хладагента повышается, за счет чего температура газа также растет. Разогретый газ передает тепловую энергию вторичному контуру, после этого температура газа снижается, и он проходит через дросселирующую систему сброса давления и переходит в жидкое состояние, затем цикл повторяется.

Вторичный теплообменный контур – это собственно отопительный контур помещения. Начальная температура во вторичном контуре колеблется в пределах 60-70⁰ С, для случая отопления помещения системой традиционных радиаторов, и – 30-35 0С – для системы аэрокондиционного отопления.

В особых случаях, когда территория, отведенная под бурение теплообменных скважин, ограничена или потребности в тепле превышают мощность установленного теплового насоса, а также во время пиковых нагрузок, возможен также и бивалентный режим работы системы, то есть такой режим, когда в отопительную линию подключается традиционный обогревательный прибор.

ГЛАВА IV. ПЕРВЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТУР.

Под теплообменной скважиной подразумевается скважина, пробуренная на относительно небольшую глубину (до 50-200 м), оборудованная специальным теплообменным коллектором и предназначенная для переноса низкопотенциальной тепловой энергии от массива горных пород к тепловому насосу для её трансформации в энергию с более высоким потенциалом.

Как уже было отмечено ранее, отопительная система, использующая тепловой насос, состоит из трёх теплообменных контуров. Первичный циркуляционный контур служит для того, чтобы теплоноситель мог отбирать низко потенциальную энергию у того или иного источника. Для эффективной работы необходимо, чтобы теплоноситель нагревался на 3-8⁰С. Такой перепад температур могут обеспечивать различные источники низко потенциальной тепловой энергии:

- водоёмы;
- воздух;
- массив горных пород.

Каждый из перечисленных источников энергии обладает различными достоинствами и недостатками. Достоинство использования энергии водоемов и воздуха заключается в том, что отсутствует необходимость в бурении скважин, что значительно сказывается на объеме капитальных вложений при строительстве отопительной системы. Однако недостатком является тот факт, что для использования энергии водоема, он должен находиться в непосредственной близости от отапливаемой площади, что по очевидным причинам не всегда возможно. Использование в качестве низкопотенциального источника тепловой энергии воздуха перестает быть эффективным в области отрицательных температур, что неприемлемо для большинства регионов в России в зимний период.

Наиболее доступным источником низкопотенциальной энергии является массив горных пород.

Для создания первичного теплообменного контура сооружаются так называемые теплообменные скважины. Как показывает настоящий опыт, глубина бурения подобных скважин колеблется в пределах от 50 м. до 200 м., а конечные диаметры бурения, в зависимости от конструкции колеблются от 90 мм. до 219 мм.

Скважинным теплообменным коллектором называется циркуляционная система различной конструкции, установленная в теплообменной скважине и предназначенная для того, чтобы циркулирующий в ней теплоноситель аккумулировал в себе тепловую энергию массива горных пород и доставлял ее на поверхность к тепловому насосу.

Изучение процессов, протекающих в теплообменной скважине, требует их рассмотрения с различных точек зрения: гидромеханики, гидравлики, теплофизики горных пород, теплопереноса в жидких средах, гидрогеологии и некоторых других. Таким образом, изучение процессов циркуляции и теплообмена является комплексной задачей.

Как любая техническая система, теплообменные скважины требуют анализа эффективности их работы с помощью расчета коэффициента полезного действия. Однако если речь идет о тепловых насосах и теплообменных скважинах такой подход не применим, так как объем получаемой энергии больше затраченной.

В мировой практике для комплексной оценки работы теплового насоса, применяется такой параметр, как COP – коэффициент трансформации, равный отношению полученной энергии от массива горных пород к затраченной энергии на циркуляцию теплоносителя в скважине. Этот показатель зависит от многих параметров, но основные факторы – это температура теплоносителя на выходе из скважинного коллектора и требуемый температурный уровень во вторичном циркуляционном контуре теплового насоса (рисунок 7).

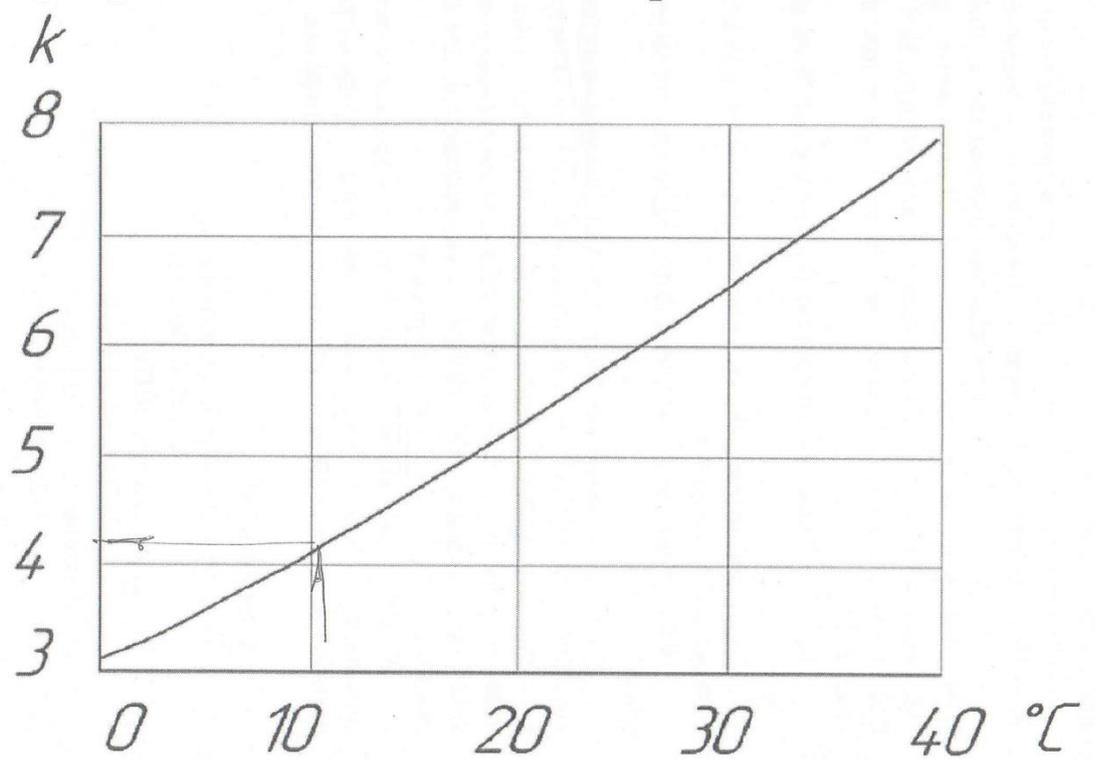


Рисунок 7. Эффективность работы теплового насоса.

Коэффициент преобразования тепловых насосов (k) в зависимости от температур кипения ($t_{\text{кип}}$) и конденсации ($t_{\text{к}}$)

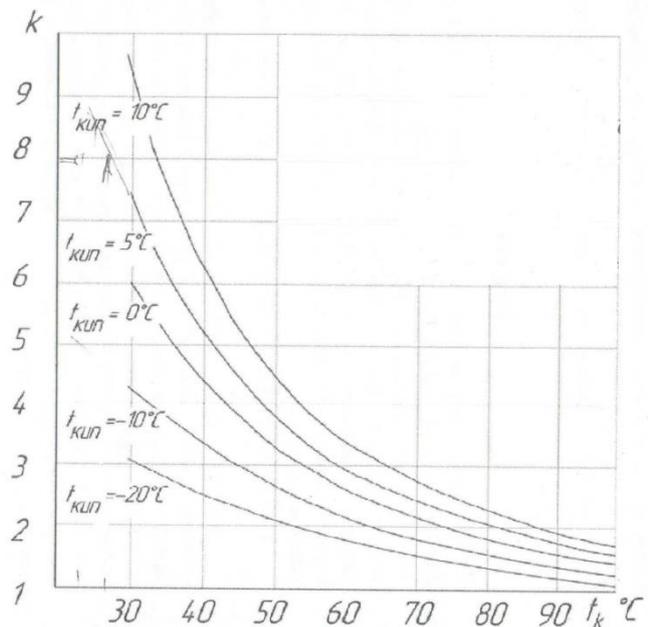


Рисунок 8. Зависимость k от температуры.

Недостатком данного коэффициента в том, что в абсолютном выражении его значение больше единицы. При работе теплообменной скважины происходят следующие энергообменные процессы:

- потери энергии, которая рассеивается из-за потерь давления при циркуляции теплоносителя в скважинном коллекторе, QP;

- получение энергии от массива горных пород в виде тепла, QT.

Эффективность теплообменной скважины зависит от потерь давления, эффективной разности температур и параметров теплоносителя.

Основные факторы, влияющие на работу теплообменной скважины.

На режим работы теплообменной скважины оказывают влияние множество факторов, среди которых основными являются:

1. Геологические:

- теплофизические: теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность пород, их температура и ее распределение по глубине.

- гидрогеологические: пористость пород, их влажность, коэффициент фильтрации, водонасыщенность и др.;

- петрографические и минералогические особенности горных пород;

- условия залегания, мощности слоев, плотность пород.

2. Технологические: режим нагрузки, время и циклы эксплуатации;

3. Технические: диаметр и глубина скважины, расстояние до соседних скважин, тип скважинного коллектора, свойства материалов самого коллектора и тампонажного раствора.

С ростом глубины возрастает температура горных пород. В массиве аккумулируется энергия теплового потока, идущего с большой глубины. Градиент температуры на определённых глубинах зависит от теплопроводности горных пород и удельного теплового потока.

На территории России удельный тепловой поток колеблется в пределах 0,035 до 0,075 Вт/м². Опыт бурения глубоких скважин в России, в том числе и бурение нефтяных скважин, что в среднем геотермический градиент составляет порядка 0,03 К/м. Однако температура приповерхностных толщ горных пород не всегда строго подчиняются этому распределению.

Основными факторами, влияющими на нелинейное распределение температуры в приповерхностных толщах горных пород, являются:

- сезонные колебания температур, вызванные аккумулярованием тепловой солнечной энергии летом и отдача ее в атмосферу зимой;
- наличие водоносных горизонтов, воды которых могут иметь аномально низкую или аномально высокую температуру.

Сезонные колебания температур горных пород прямо зависят от сезонных колебаний температуры воздуха. Сезонные колебания распространяются на глубину от 15 до 30 м, в зависимости от климата, свойств горных пород и теплового потока Земли в рассматриваемом регионе. Минимальная глубина, на которой не отмечается сезонных колебаний, называется глубиной «нейтрального слоя».

Приповерхностные водоносные горизонты могут также вызывать аномалии в распределении температуры по глубине массивов горных пород. Такое явление объясняется тем, что вода, заполняющая поры и трещины вмещающих пород, имеет высокую теплоемкость, около 4200 Дж/(кг·К). Такие свойства воды позволяют ей запасать достаточное большое количество тепловой энергии и доставлять ее в различные точки водоносного горизонта или наоборот, отбирать эту энергию от горных пород.

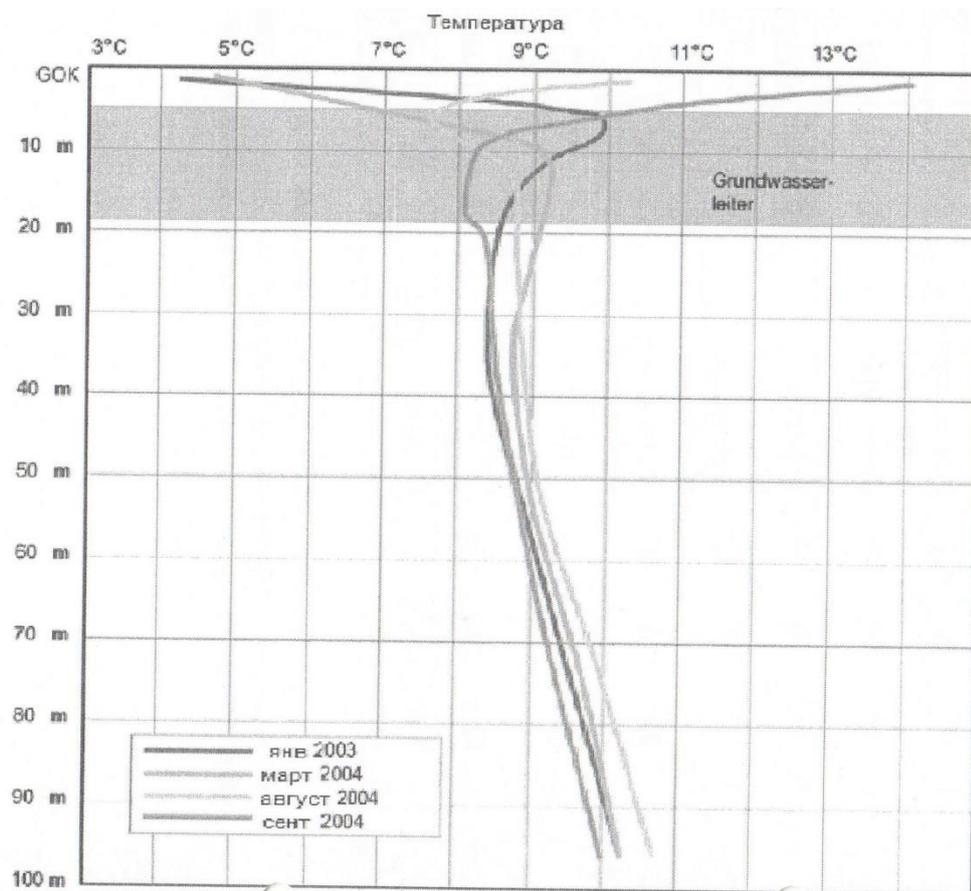


Рисунок 9. Изменение температуры с глубиной.

Возможны два случая:

1. Нелинейное повышение температуры горных пород;
2. Нелинейное понижение температуры горных пород.

Подобное поведение горного массива достаточно сложно спрогнозировать аналитическими методами, поэтому оно требует непосредственного измерения температуры в скважине для качественного проектирования теплообменных скважин.

В зависимости от конструкции теплообменной скважины и геологического строения влияние подземных вод на теплообмен может быть как незначительным, так и определяющим. Для вариантов конструкций, предусматривающих тампонирующее пространство между теплообменным коллектором и стенкой скважины влияние подземных вод незначительно.

Наличие обильных водоносных горизонтов с сильно проницаемыми вмещающими породами замедляет их охлаждение в процессе эксплуатации теплообменной скважины и изменяет профиль фронта теплового влияния на окружающий массив.

Для вариантов конструкций теплообменных скважин, работа которых непосредственно зависит от параметров водоносного горизонта, роль гидрогеологических условий является определяющей, и учета требуют не только коэффициент фильтрации и гидравлический градиент, но и напор подземных вод, пьезопроводность, водопроводимость и коллекторские свойства вмещающих пород водоносного горизонта. Для проектирования теплообменных скважин любой конструкции необходимо учитывать влияние водоносных горизонтов и качественно оценивать их фильтрационные параметры.

4.1. Теплоноситель: сравнение по теплоёмкости.

Теплоноситель – движущая среда в системе отопления, которая аккумулирует теплоту и затем передает её в обогреваемые помещения. Теплоносителем для отопления может быть подвижная, жидкая или газообразная среда, соответствующая требованиям, предъявляемым к системе отопления [65].

Для отопления преимущественно используют воду или атмосферный воздух, реже – водяной пар или нагретые газы.

Сопоставим характерные свойства указанных видов теплоносителя при использовании их в системах отопления.

Газы, которые образуются при сжигании твердого, жидкого или газообразного органического топлива, имеют сравнительно высокую температуру. Они применяются в тех случаях, когда в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями удаётся ограничить температуру теплоотдающей поверхности отопительных приборов. При транспортировке горячих газов имеют место значительные попутные теплотери, обычно бесполезные для обогрева помещения.

Высокотемпературные продукты сгорания топлива могут выпускаться непосредственно в помещения или сооружения, но при этом ухудшается состояние их воздушной среды, что в большинстве случаев недопустимо.

Удаление продуктов сгорания наружу по каналам усложняет конструкцию и понижает КПД отопительной установки. При этом же возникает и необходимость решения экологических проблем, которые связаны с возможным загрязнением воздуха продуктами сгорания вблизи отапливаемых объектов [65].

Использование горячих газов ограничено отопительными печами, газовыми калориферами и другими подобными местными отопительными установками.

В то время как вода, воздух и пар могут быть использованы многократно в режиме циркуляции и без загрязнения окружающей здание среды в отличие от горящих газов.

Вода являет собой жидкую, практически несжимаемую среду со значительной плотностью и теплоемкостью. Вода изменяет плотность, объём и вязкость в зависимости от температуры, а температуру кипения – в зависимости от давления, способна сорбировать или выделять растворимые в ней газы при изменении температуры и давления [65].

Пар является легкоподвижной средой сравнительно малой плотности. Температура и плотность пара зависят от давления. Пар значительно изменяет объём и энтальпию при фазовом превращении.

Воздух также является легкоподвижной средой со сравнительно малыми вязкостью, плотностью и теплоёмкостью, изменяющей плотность и объём в зависимости от температуры.

Сравним эти три теплоносителя по показателям, важным для выполнения требований, предъявляемых к системе отопления.

Согласно санитарно-гигиеническим требованиям является необходимым поддержание в помещениях равномерной температуры. Как раз-таки по этому показателю преимущество перед остальными теплоносителя имеет воздух. При использовании нагретого воздуха с низкой теплоинерционностью можно поддерживать равномерной температуру каждого отдельного помещения, а также быстро изменять температуру подаваемого воздуха. при этом можно обеспечить и вентиляцию помещений одновременно с отоплением.

Применение горячей воды в системе отопления позволяет также поддерживать равномерную температуру помещений. Такой эффект достигается посредством регулирования температуры, подаваемой в отопительные приборы. Однако при таком регулировании температура помещений всё же может несколько отклоняться от заданной (на 1 -2°C), что происходит вследствие тепловой инерции масс воды, труб и приборов.

При использовании же пара равномерность температуры помещений не достигается. А это противоречит гигиеническим требованиям. Неравномерность температуры возникает из-за несоответствия теплопередачи приборов при неизменной температуре пара (при постоянном давлении) изменяющимся теплотерям помещения в течение отопительного сезона. В связи с этим приходится уменьшать количество подаваемого в приборы пара и даже периодически отключать их во избежание перегревания помещений при уменьшении их теплотерь.

Следующее санитарно-гигиеническое требование – ограничение температуры наружной поверхности отопительных приборов. Данное требование вызвано явлением разложения и сухой возгонки органической пыли на нагретой поверхности, которое сопровождается выделением вредных веществ, в частности окиси углерода. Разложение пыли начинается при температуре 65-70 °С и интенсивно протекает на поверхности, имеющей температуру более 80 °С.

Использование пара в качестве теплоносителя дает то, что температура поверхности большинства отопительных приборов и труд постоянна и равняется более 100°С, что существенно превышает гигиенический предел.

При использовании горячей воды для отопления, средняя температура нагретых поверхностей приборов отопления обычно ниже, чем при применении пара. Кроме того, температуру воды в системе отопления понижают для снижения теплопередачи приборов при уменьшении теплотерь помещений. Поэтому средняя температура поверхности приборов при теплоносителе воде в течение отопительного сезона не превышает гигиенического предела.

При применении различных теплоносителей важным экономическим показателем является расход металла на теплопроводы и отопительные приборы. Расход металла на теплопроводы возрастает с увеличением их поперечного сечения.

Вычислим соотношение площади поперечного сечения теплопроводов, по которым подаются различные теплоносители для передачи в помещение одинакового количества теплоты.

Примем, что для отопления используется вода, температура которой понижается с 150°C до 70°C, пар избыточным давлением 0,17 МПа (температура 130°C) и воздух, охлаждающийся с 60°C до температуры помещения (например, 15°C). Результаты расчётов, а так же характерные параметры теплоносителей (плотность, теплоёмкость, удельная теплота конденсации пара) сведём в таблицу 1 [65].

Таблица 1. Сравнение основных теплоносителей для отопления.

Параметры	Теплоноситель		
	вода	пар	воздух
Температура, разность температуры, °С	150-70=80	130	60-15=45
Плотность, кг/м ³	917	1,51,84	1,03
Удельная массовая теплоёмкость, кДж/(кг · °С)	4,31	21753263	1,0
Удельная теплота конденсации, кДж/кг	-	80	-
Количество теплоты для отопления в объёме 1 м ³ теплоносителя, кДж	316 37	1,8	46,4
Скорость движения, м/с	0		15
Соотношение площади поперечного сечения теплопроводов	1,5		680
	1		

Видно, что площади поперечного сечения водоводов и паропроводов относительно близки, а сечение воздухопроводов в сотни раз больше. Это связано с тем, что, с одной стороны, значительной теплоаккумуляционной способностью воды и свойством пара выделять большое количество теплоты

при конденсации, а с другой стороны – малыми плотностью и теплоёмкостью воздуха.

Также при сравнении расхода металла следует учитывать площадь поперечного труб для отвода конденсата от приборов в паровой системе – конденсатопроводов, значительно меньше площади сечения паропроводов. Это обуславливается тем, что объём конденсата примерно в 1000 раз меньше объёма той же массы пара.

Таким образом, расход металла как на водоводы, так и на паро- и конденсато-проводы будет значительно меньшим, чем на воздухопроводы. Даже если последние выполнить со значительно более тонкими стенками. Кроме того, при большой длине металлических воздухопроводов малотеплоёмкий теплоноситель (воздух) сильно охлаждается по пути движения. Этим объясняется, что при дальнем теплоснабжении в качестве теплоносителя используют не воздух, а воду или пар.

Расход металла на отопительные приборы, обогреваемые паром, меньше, чем на приборы, нагреваемые горячей водой. Это связано с тем, что уменьшены площади приборов при более высоких значениях температуры нагревающей их среды.

Конденсация пара в приборах происходит без изменения температуры насыщенного пара, а при охлаждении воды в приборах, понижается и средняя температура (например, до 110°C при температуре воды, входящей в прибор, 150°C и выходящей из прибора 70°C). Поскольку площадь нагревательной поверхности приборов обратно пропорциональна температурному напору (разности между средней температурой поверхности прибора и температурой окружающего его воздуха), то при температуре пара 130°C площадь паровых приборов приблизительно (считая коэффициенты теплопередачи приборов равными и принимая температуру помещения – 20°C) составит $(t_{\text{п}} - 20) / (130 - 20) = 0,82$ площади водяных приборов.

В дополнение к известным эксплуатационным показателям следует отметить, что из-за высокой плотности воды (больше плотности пара в 600-

1500 раз и воздуха в 900 раз) в системах водяного отопления многоэтажных зданий может возникать разрушающее гидростатическое давление.

Воздух и вода до определённой скорости движения могут перемещаться в теплопроводах бесшумно. Частичная конденсация пара вследствие попутных теплопотерь через стенки паропроводов и появления попутного конденсата вызывает шум (щелчки, стуки и удары) при движении пара.

В связи с суровыми климатическими условиями российской зимы в некоторых случаях рекомендуется использовать в системе отопления специальный незамерзающий теплоноситель – антифриз.

Антифриз – водный раствор этиленгликоля, пропиленгликоля и других гликолей, а так же раствор некоторых неорганических солей [65].

Любой антифриз является токсичным веществом, который требует особого обращения. Применение его в системе отопления может привести к негативным последствиям, таким как: ускорение коррозионных процессов, снижение теплообмена, изменение гидравлических характеристик, завоздушивание и др. В связи с этим, применение антифриза в качестве теплоносителя должно быть обоснованным для каждого конкретного случая его использования.

Подводя итог вышеизложенному, перечислим преимущества и недостатки основных теплоносителей:

1. При использовании воды обеспечивается достаточно равномерная температура помещений, температуру поверхности отопительных приборов можно ограничить, по сравнению с другими теплоносителями сокращается площадь поперечного сечения труб, достигается бесшумность движения в теплопроводах. Недостатками применения воды являются значительный расход металла и большое гидростатическое давление в системе. Тепловая инерция воды замедляет регулирование теплопередачи приборов.

2. При использовании пара сравнительно сокращается расход металла, что достигается за счёт уменьшения площади приборов и поперечного сечения конденсатопроводов, достигается быстрое прогревание приборов и

отапливаемых помещений. По сравнению с водой гидростатическое давление пара в вертикальных трубах минимально. Однако пар как теплоноситель не отвечает санитарно-гигиеническим требованиям, его температура высока и постоянна при данном давлении, что затрудняет регулирование теплопередачи приборов, движение его в трубах сопровождается шумом.

3. При использовании воздуха обеспечивается быстрое изменение или равномерность температуры помещений, возможно и избежать установки отопительных приборов, совмещать отопление с вентиляцией помещений, достигать бесшумности его движения в воздуховодах и каналах. Недостатками являются его малая теплоаккумулирующая способность, значительные площадь поперечного сечения и расход металла на воздуховоды, относительно большое понижение температуры по их длине.

4.2. Гидравлические потери в первом контуре.

Чтобы правильно провести гидравлический расчет системы отопления, необходимо принять во внимание некоторые эксплуатационные параметры самой системы. Сюда входят скорость теплоносителя, его расход, гидравлическое сопротивление запорной арматуры и трубопровода, инертность и так далее.

Может показаться, что эти параметры никак друг с другом не связаны. Но это ошибка. Связь между ними прямая, поэтому нужно при анализе опираться именно на них.

Приведем пример этой взаимосвязи. Если увеличить скорость теплоносителя, то сразу же возрастет сопротивление трубопровода. Если увеличить расход, то увеличивается скорость горячей воды в системе, а, соответственно, и сопротивление. Если увеличить диаметр труб, то снижается скорость движения теплоносителя, а значит, снижается сопротивление трубопровода.

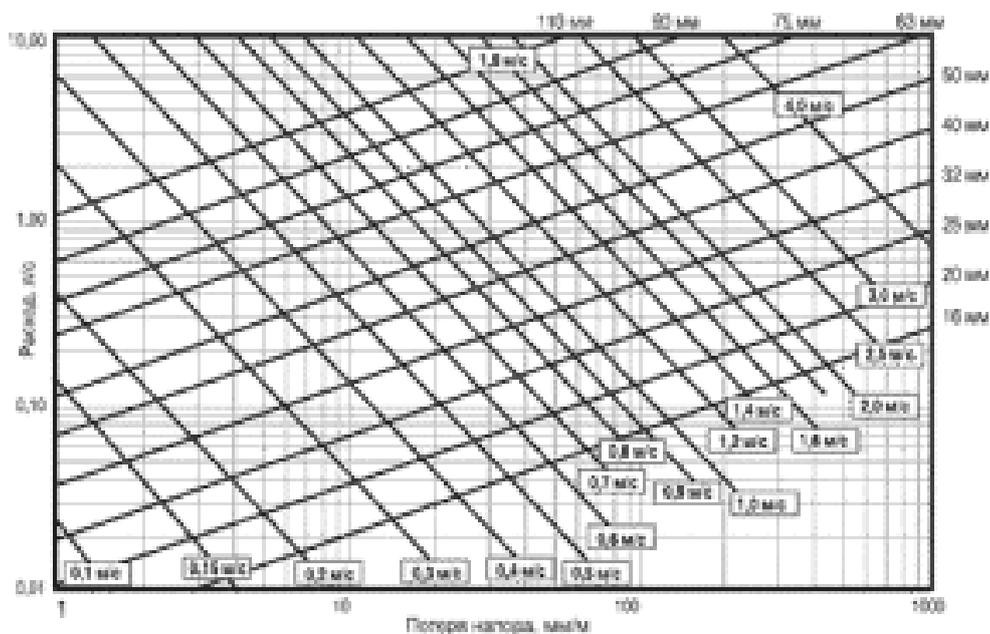
О чём это говорит? Можно всё рассчитать таким образом, что сократятся расходы на приобретаемые материалы. А это уже экономическая сторона дела.

Система отопления включает в себя 4 основных компонента:

1. Отопительный котел.
2. Трубы.
3. Приборы отопления.
4. Запорная и регулирующая арматура.

Каждый из этих компонентов имеет свои параметры сопротивления. Ведущие производители обязательно их указывают, потому что гидравлические характеристики могут изменяться. Они во многом зависят от формы, конструкции и даже от материала, из которого изготовлены составляющие отопительной системы. И именно эти характеристики являются самыми важными при проведении гидравлического анализа отопления.

Что же такое гидравлические характеристики? Это удельные потери давления. То есть, в каждом виде отопительного элемента, будь то труба, вентиль, котёл или радиатор, всегда присутствует сопротивление со стороны конструкции прибора или со стороны стенок. Поэтому, проходя по ним, теплоноситель теряет своё давление, а, соответственно, и скорость.



Расход теплоносителя. Программа для гидравлического расчета трубопровода (60°С).

Чтобы показать, как производится гидравлический расчёт отопления, возьмём для примера простую отопительную схему, в которую входят отопительный котел и радиаторы отопления с киловаттным потреблением тепла. И таких радиаторов в системе 10 штук.

Здесь важно правильно разбить всю схему на участки, и при этом точно придерживаться одного правила — на каждом участке диаметр труб не должен меняться.

Итак, первый участок — это трубопровод от котла до первого отопительного прибора. Второй участок — это трубопровод между первым и вторым радиатором. И так далее.

Как происходит теплоотдача, и каким образом понижается температура теплоносителя? Попадая в первый радиатор, теплоноситель отдает часть

тепла, которое снижается на 1 киловатт. Именно на первом участке гидравлический расчет производится под 10 киловатт. А вот на втором участке уже под 9. И так далее с понижением.

Расчёт потерь давления (напора) производится по зависимостям:

а) на запорной и регулирующих относительных приборах и прочих местных сопротивлениях.

$$\Delta h_m = \zeta \frac{v^2}{2g} \left[\text{м. в. с.} \right]$$

ζ — коэффициент сопротивления.

б) на прямолинейных участках ТЭ (потери по длине)

$$\Delta h_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \left[\text{м. в. с.} \right]$$

λ — коэффициент гидравлического сопротивления,

l — длина,

d — диаметр трубы.

Требуемый расход теплоносителя при известных тепловых нагрузках определяем следующим образом:

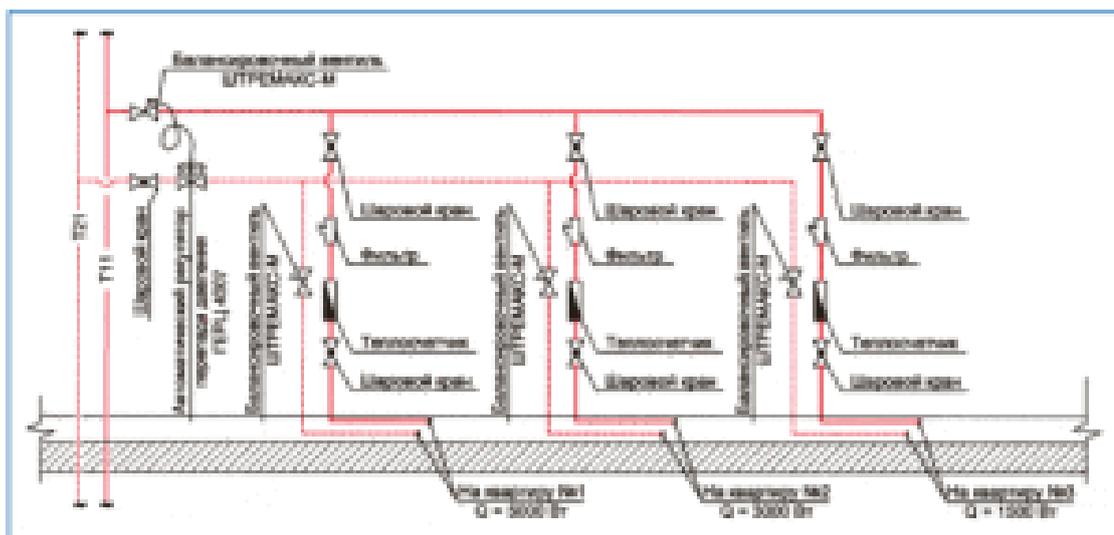
$$G = (3,6 \times Q_{уч}) / (c \times (tr - to))$$

$Q_{уч}$ — это расчетная тепловая нагрузка участка. В нашем примере для первого участка она равна 10 кВт, для второго 9.

c — удельная теплоемкость воды, показатель постоянный и равный 4,2 кДж/кг × С;

tr — температура теплоносителя при входе на участок;

to — температура теплоносителя при выходе с участка.



Схематический расчёт.

Существует минимальная скорость горячей воды внутри отопительной системы, при которой само отопление работает в оптимальном режиме. Это 0,2-0,25 м/с [70]. Если она уменьшается, то из воды начинает выделяться воздух, что ведет к образованию воздушных пробок. Последствия — отопление не будет работать, и котел закипит.

Это нижний порог, а что касается верхнего уровня, то он не должен превышать 1,5 м/с. Превышение грозит появлением шумов внутри трубопровода. Наиболее приемлемый показатель — 0,3-0,7 м/с.

Если необходимо провести точный подсчет скорости движения воды, то придется принять во внимание параметры материала, из которого изготовлены трубы. Особенно в этом случае учитывается шероховатость внутренних поверхностей труб. К примеру, по стальным трубам горячая вода движется со скоростью 0,25-0,5 м/с, по медным 0,25-0,7 м/с, по пластиковым 0,3-0,7 м/с [70].

Выбор основного контура.



Гидравлическая стрелка отделяет котловые и отопительные контура.

Здесь необходимо рассматривать отдельно две схемы — однотрубную и двухтрубную. В первом случае расчёт нужно вести через самый нагруженный стояк, где установлено большое количество отопительных приборов и запорной арматуры.

Во втором случае выбирается самый загруженный контур. Именно на его основе и нужно делать подсчет. Все остальные контуры будут иметь гидравлическое сопротивление гораздо ниже.

В том случае, если рассматривается горизонтальная развязка труб, то выбирается самое загруженное кольцо нижнего этажа. Под загруженностью понимают тепловую нагрузку.

Итак, чтобы сделать гидравлический анализ отопительной системы дома, необходимо учесть многое. Пример специально был простым, поскольку разобраться, скажем, с двухтрубной системой отопления дома в три или более этажей очень сложно. Для проведения такого анализа придётся обратиться в специализированное бюро, где профессионалы разберут весь [проект отопления](#) «по косточкам».

Необходимо будет учесть не только вышеописанные показатели. Сюда придётся включить потерю давления, снижение температуры, мощность циркуляционного насоса, режим работы системы и так далее. Показателей

много, но все они присутствуют в ГОСТах, и специалист быстро разберётся, что к чему.

Единственное, что необходимо предоставить для расчёта — это мощность отопительного котла, диаметр труб, наличие и количество запорной арматуры и мощность насоса.

Таким образом, даже упрощенных вариант расчёта гидравлических потерь показывает необходимость учёта всего многообразия свойств теплоносителя, условий эксплуатации и свойств материалов для изготовления теплового контура.

Показано, что для наиболее эффективного использования потенциального источника тепловой энергии необходимо обеспечить минимальные потери (Δh), что достигается применением горизонтальной (лучевой) разводок.

Относительным сочетанием отдаваемой тепловой энергии и развиваемых напоров являются $V = 0,2 - 0,25$ м/с.

4.3. Виды зондов, конструкция, особенности.

Главным элементом в работе системы отопления при использовании тепла поверхностных слоев Земли является скважина. Её бурение производится с целью установки в ней специального геотермального зонда и непосредственно теплового насоса.

Организация обогревательной системы на основе теплового насоса рациональна как для небольших частных коттеджей, так и для целых фермерских хозяйств. Вне зависимости от площади, которую необходимо будет отапливать, перед бурением скважин следует провести оценку геологического разреза на территории объекта. Точные данные помогут корректно рассчитать количество необходимых скважин.

Глубина скважины должна подбираться таким образом, чтобы она не только могла обеспечивать теплом в достаточном количестве рассматриваемый объект, но и позволяла выбрать тепловой насос со стандартными техническими характеристиками. Для увеличения теплообмена в полость скважин, где располагается вмонтированный контур, заливается специальный раствор (в качестве альтернативы раствору можно использовать глину).

Главное требование, предъявляемое к бурению скважин для тепловых насосов, – полная изоляция всех, без исключения, горизонтов подземных вод. В противном случае попадание воды в нижележащие горизонты можно будет расценивать как загрязнение. Если же теплоноситель попадёт в подземные воды, это будет иметь негативные экологические последствия.

Поэтому бурение скважин для тепловых насосов – серьезный процесс, который требует внимательного подхода, аккуратности и высокой технологичности.

Как мы отмечали ранее в работе, геотермальный зонд состоит из труб, зачастую полиэтиленовых диаметром 30 мм. или 40 мм.

На сегодняшний день существует две разновидности вертикального теплообменника:

- U-образный и коаксиальный теплообменник;

- U-образный зонд-теплообменник, представляющий собой две полипропиленовых (полиэтиленовых) трубы, которые соединены в нижней части U-ым наконечником.

В зависимости от тепловых характеристик теплоносителя, в одной скважине располагается одна или две пары таких труб. Коаксиальный зонд-теплообменник, состоящий из труб различного диаметра.

Простой коаксиальный теплообменник представляет собой две трубы различного диаметра, которые находятся одна в другой.

С точки зрения целесообразности применения данного метода теплофикации зданий в условиях плотной застройки города, целесообразно рассмотреть возможность съема низкопотенциальной тепловой энергии Земли с применением многоствольного бурения.

В мировой практике сооружения теплообменных скважин используются самые разные конструкции скважинных теплообменных коллекторов (рисунок 10).

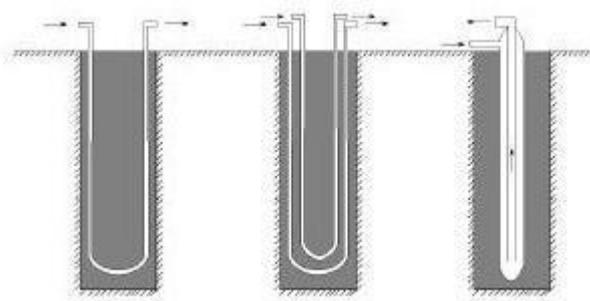


Рисунок 10. Конструкция коллекторов:

слева – U-образная, по центру – двойная U-образная, справа – коаксиальная.

Широкое распространение получили U-образные и двойные U-образные типы теплообменных коллекторов. Это связано с тем, что конструкция их достаточно проста и относительно экономична.

Для создания коллекторов подобного рода чаще всего используются гибкие полиэтиленовые трубки PE32, PE100 и PE-Xa наружного диаметра 32 и 40 мм. При использовании двойного U-образного коллектора предпочтение

отдают трубкам меньшего диаметра, а при использовании одинарного – применяют большие диаметры.

Пространство между стенкой скважины и коллектором заполняется различными по составу тампонажными материалами. Функции такого заполнения следующие:

- создание плотного контакта между стенкой скважины и стенками трубок,
- для обеспечения возможности эффективного кондуктивного теплообмена;
- гидравлическая изоляция теплоносителя от геологической среды во избежание возможного загрязнения подземных вод.

В современной практике для тампонирувания теплообменных скважин используются традиционные цементные растворы на основе портландцемента – ПЦ400 и пр. Применение таких растворов позволяет создать достаточно качественный контакт стенки скважины и теплообменного коллектора. Теплопроводность таких растворов, после отвердевания, колеблется в пределах 0,5-0,8 Вт/(м·К), что сопоставимо с теплопроводностью воды – 0,58 Вт/(м·К), но примерно на порядок ниже, чем теплопроводность большинства горных пород верхней части разреза.

Также широкое применение находят глиноцементные растворы, которые изготавливаются из портландцемента и глинопорошка, чаще всего – бентонита различных марок. Подобного рода растворы обеспечивают более качественный контакт стенки скважины с коллектором, а коэффициент теплопроводности тампонажного камня достигает значений до 1,5 Вт/(м·К). Также применяются смеси специального назначения для тампонирувания теплообменных скважин. Эти смеси состоят из бентонита и кварцевого песка. Содержание кремнезема в песке, используемом для данных смесей, превышает 90% и достигает 99%.

Применение подобных смесей обладает рядом преимуществ, среди которых:

- при одинаковой глубине теплообменных скважин применение специальных смесей, по сравнению с цементными, позволяет снизить энергозатраты на работу отопительной системы на 10-15%;

- применение специальных смесей поддерживает температуру в скважине выше за счет высокой теплопроводности, что позволяет отказаться от использования морозостойких добавок – этиленгликоля и солевых растворов.

Коаксиальные трубы являются одним из самых эффективных конструкций теплообменного коллектора. Для изготовления такого вида коллектора используются различные материалы. Часто применяется то же, что и для U-образных систем, то есть полиэтилен марок PE32, PE100 и PE-Xa. Помимо этого применяется также и сочетание полиэтиленовых трубок, в качестве внутренней трубы коаксиальной системы, и стальной – наружной трубы. Такая комбинация обеспечивает большой теплосъём, за счёт высокой теплопроводности стали, примерно 46 Вт/(м·К), по сравнению с теплопроводностью полиэтиленовых трубок, около 0,2-0,4 Вт/(м·К).

Применяемые коаксиальные коллектора имеют следующие геометрические характеристики: наружный диаметр внешних трубок колеблется от 50 до 130 мм, наружный диаметр внутренних трубок колеблется в пределах от 32 до 90 мм.

Основными процессами, протекающими в эксплуатируемой теплообменной скважине, являются: циркуляция теплоносителя в скважинном коллекторе и теплоотдача энергии от горных пород потоку рабочего агента.

Рассмотрим участок теплообменной скважины длиной H , оснащённой коаксиальным коллектором (рисунок 11). На данном участке происходит активный теплообмен. В качестве теплоносителя будет использоваться техническая вода.

Двигаясь вниз по кольцевому сечению со скоростью v_1 , через стенку трубы теплоноситель будет нагреваться, и материал заполнится за счёт

тепловой энергии, которая передается от массива горных пород. В центральном круглом канале теплоноситель будет двигаться вверх со скоростью v_2 , получая небольшую долю тепла от потока в кольцевом канале. Таким образом, при условии, что температура теплоносителя $t_{ж}$ ниже, чем температура пород $t_{п}$ на всей глубине, в коаксиальном коллекторе не будут происходить потери тепловой энергии [3].

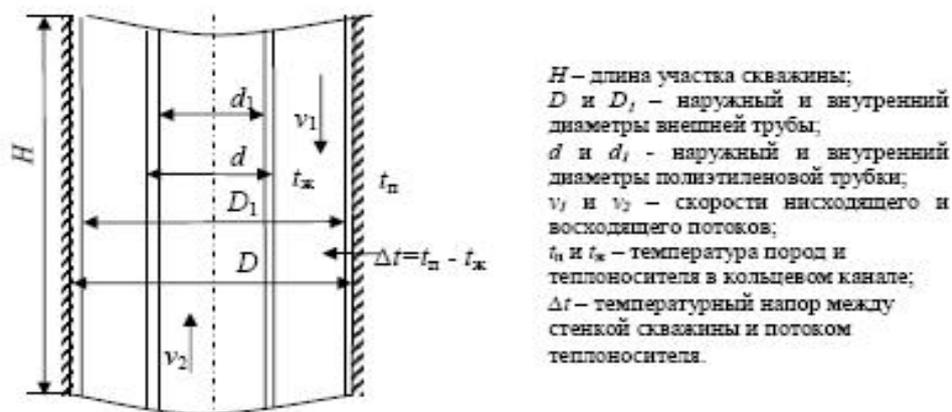


Рисунок 11. Схема участка скважинной коаксиальной циркуляционной системы.

Потери давления на циркуляцию теплоносителя в скважинном коллекторе коаксиального типа складывается из трех составляющих:

- P1 – потери давления по длине в кольцевом канале;
- P2 – потери давления по длине во внутреннем круглом канале;
- P3 – потери давления в подводящей системе и в зоне пассивного теплообмена, требующей теплоизоляции.

Зоной пассивного теплообмена называется интервал теплообменной скважины до глубины нейтрального слоя, температура которого недостаточна для эффективного теплообмена.

Мировой опыт использования теплообменных скважин показывает, что эксплуатация теплообменных скважин ведется в ламинарном, реже переходном режиме с числами Рейнольдса от 2000 до 5000 в кольцевом пространстве коллектора. Такой режим позволяет потоку теплоносителя

эффективно поглощать тепловую энергию запасенную в горных породах, при этом затраты энергии на циркуляцию остаются невысокими.

В процессе эксплуатации теплообменной скважины происходит непрерывный теплообмен между массивом горных пород и теплоносителем. Этот процесс можно считать непрерывным за все время циркуляции. С течением времени интенсивность процесса теплообмена монотонно снижается при условии постоянства температуры теплоносителя подаваемого в скважину, и при этом снижается температура стенки скважины. Также со временем растёт радиус зоны теплового влияния теплообменной скважины на массив горных пород, теплообмен, протекающий с таким условием, называется нестационарным. Процесс теплообмена в коаксиальном геотермальном коллекторе является процессом нестационарным и поэтому требует учёта времени.

Расчёт конструкций для теплообменных скважин будет неоднозначным (ситуационным), поскольку общая тепловая мощность, получаемая от массива горных пород, зависит от суммарной длины теплообменного коллектора. Что означает зависимость от произведения числа скважин на их глубину. Отопительные системы будут работать с одинаковой производительностью при условии соблюдения этого произведения. Поэтому вопрос определения глубин и количества скважин является вопросом финансовой оптимизации.

На первом этапе необходимо определить типизацию геолого-технических условий, значения теплофизических параметров и расчётов глубины нейтрального слоя.

Непосредственное определение конструктивных параметров следует начинать с вариантного расчета оптимальной скорости циркуляции теплоносителя в коаксиальном теплообменнике, задаваясь различными значениями диаметра скважины из стандартного геологоразведочного ряда, начиная от 56 мм, заканчивая 132 мм.

Для расчётов задается отношение диаметра внутреннего канала к внешнему диаметру наружной трубы, который примерно равен диаметру скважины. На практике это соотношение колеблется в пределах 0,5-0,7.

«Минимальное расстояние между скважинами зависит от максимального радиуса зоны теплового влияния» [65].

При каждом определённом диаметре производится расчёт длин активных участков скважин при различном их количестве. Производится такой расчёт при помощи номограммы, которая представлена на рисунке 12.

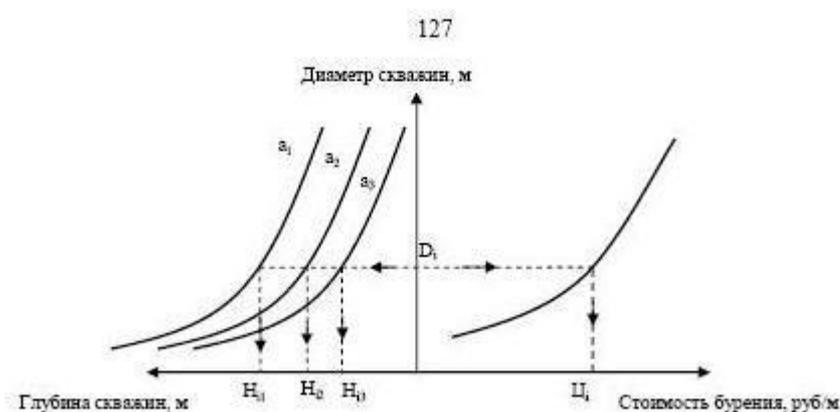


Рисунок 12. Номограмма для определения диаметра, глубин и количества теплообменных скважин.

«Для каждого расчётного значения диаметра на вертикальной оси отмечаются выбранные для вариантного расчёта и из этих точек влево и вправо опускаются перпендикуляры на графики. Вправо перпендикуляр пересечётся с зависимостью стоимости бурения одного метра от диаметра скважины. Влево перпендикуляр пересечёт графики зависимости глубины бурения от диаметра и количества скважин. Перемножив значения глубин на соответствующие значения стоимости, определяется стоимость бурения каждого варианта» [65].

Наиболее оптимальный вариант, диаметр и глубина скважин определяется наименьшим значением стоимости. Число скважин будет равно удвоенному значению параметра a . Поскольку режим работы теплообменных

скважин подразумевает периодическое включение и выключение циркуляции теплоносителя в них для восстановления температурного поля массива.

После того как будет выбран оптимальный вариант конструктивных элементов теплообменных скважин, проводится окончательный проверочный расчёт, и даются рекомендации по режиму её работы, исходя из потребности в тепловой энергии. С помощью зависимостей (5.8) и (5.9) оценивается время восстановления температурного поля массива, с тем, чтобы работа теплообменных скважин не охлаждала массив настолько, что его использование в качестве источника низкопотенциальной энергии окажется неэффективным.

Виды скважин.

Тепловые насосы, как уже говорилось выше, могут получать тепло как из воды, так и из воздуха и земли. Если рядом с объектом, в котором планируется установка отопительной системы, есть водоем, то наиболее рациональным будет монтаж водяного внешнего контура.

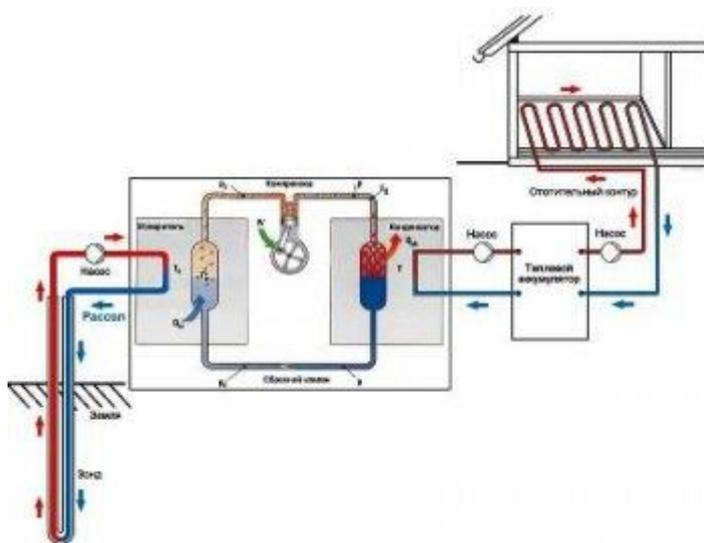
Скважина – альтернативное решение для участков, не имеющих выхода к водоемам, в которых отсутствует возможность установки горизонтального земляного контура. Принято выделять несколько основных типов скважин для тепловых насосов:

1. Обыкновенная – вертикальный земляной контур – система длинных труб, которые опускаются на глубину до 150 метров. Площадь скважины невелика, однако для ее организации потребуется специальное бурильное оборудование. Применение данного типа скважины эффективно, благодаря тому, что на глубине температура воды всегда стабильна и равняется примерно 10 градусам. Вертикальный земляной контур допускает также сброс теплоты.

2. Переливная – принцип работы системы заключается в том, что две скважины бурятся на расстоянии, не превышающем 50 метров друг от друга. Одна скважина служит для забора грунтовых вод, которые впоследствии пропускаются сквозь насос и направляются во вторую.

Применение данного типа скважин в отопительной системе требует дополнительных расходов на электроэнергию для перелива воды.

Устройство скважины.



Несмотря на то, что обустройство скважины, предназначенной для тепловых насосов, требует особой внимательности и серьезного подхода, ее организация может выполняться собственными силами владельца объекта, для которого создается система отопления.

Таким образом:

1. Теплообменная скважина при расчёте температурного режима циркулирующего в ней теплоносителя, условно делится на два участка: участок активного теплообмена, лежащий ниже глубины нейтрального слоя, и участок возможных тепловых потерь, расположенный на глубинах от уровня дневной поверхности до глубины нейтрального слоя, который считается теплоизолированным и в расчетах не учитывается.

2. Режим циркуляции теплоносителей в кольцевом пространстве коаксиального теплообменного коллектора является ламинарным, реже переходным ($2000 < Re < 2300$). Для возможного увеличения расхода теплоносителя рекомендуется применять специальные добавки (высокомолекулярные полимерные добавки в малых концентрациях),

способные сохранить ламинарный режим потока жидкости и увеличить диапазон чисел Рейнольдса.

3. Для учёта фактора времени при изучении процесса теплообмена в теплообменной скважине используется понятие коэффициента нестационарности теплового потока, зависящего от теплоотдачи потока жидкости, теплофизических свойств горных пород и, прежде всего, от длительности теплообмена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Обустройство скважины для теплового насоса обладает целым рядом преимуществ по сравнению с наружным прокладыванием теплопоглощающего контура.

Подземное размещение теплопоглатителей освобождает пространство на поверхности, что особо важно для небольших земельных участков, на которых хочется реализовать максимум идей.

Даже сверхкаменистый грунт даёт возможность установки оборудования. В отличие от наружных типов, требующих наличие мягкого влажного грунта.

Результаты проведённых в ходе выполнения работы исследований позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Массив горных пород является повсеместно доступным и эффективным источником низко потенциальной тепловой энергии, с точки зрения её использования для отопления гражданских и производственных сооружений. Наиболее эффективной конструкцией скважинного теплообменного коллектора является коаксиальный тип (с соотношением наружного диаметра к диаметру внутреннего канала в диапазоне 0,5-0,7), который показывает эффективность на 10-20% больше, чем другие конструкции теплообменных коллекторов. При этом наиболее рациональный режим проведения опробования и эксплуатации теплообменных скважин устанавливается в случае, если режим течения теплоносителя в коллекторе ламинарный, либо переходный со значениями критерия Рейнольдса в диапазоне от 2000 до 5000, что позволит осуществлять эффективный теплосъём с низкими затратами энергии на циркуляцию теплоносителя.

2. Для оценки эффективности качества работы теплообменных скважин введено понятие КПД теплообменной скважины, который зависит от таких параметров как общие потери давления потока циркулирующего теплоносителя, эффективной разницы температур и объемной теплоемкости теплоносителя. Обоснован допустимый уровень снижения КПД до 70-75%,

при достижении которого циркуляция в скважине должна останавливаться и начинаться период восстановления температурного поля массива.

Задача теплообмена между массивом горных пород и скважинным коллектором была решена двумя способами, которые опирались на разные подходы. Первое решение базируется на определении коэффициента нестационарности теплового потока в системе скважина-массив. Второе решение подразумевает процесс теплообмена через цилиндрическую стенку, состоящую из вмещающих пород, которая ограничена с одной стороны стенкой скважины, а с другой границей зоны теплового влияния, постоянно растущей во времени.

Оба решения связывают в единую зависимость следующие параметры: теплофизические параметры горных пород, их температуру, геометрию скважинного коллектора, свойства теплоносителя, режим циркуляции и её периодичность и позволяют определить такие параметры диаметр и глубину теплообменных скважин, в зависимости от режима проведения опробования ресурсов тепловой энергии.

Все выше оговоренные зависимости позволяет проектировать конструкцию теплообменных коаксиальных скважин, а также рассчитать режимы проведения разведочных работ в них с помощью проведения опытных прокачек.

Технология опробования и разведки позволяет снизить себестоимость разведочных работ, а также обеспечить высокое качество сооружаемых разведочно-эксплуатационных теплообменных скважин.

Подземное размещение даёт независимость от климатических и погодных условий. На глубине в несколько десятков метров температура земли остается стабильно положительной на протяжении всего года.

Бурение скважины под тепловой насос даёт возможность организовать не только отопительную систему, но и обратную ей систему кондиционирования воздуха в летнее время года, так как невысокая температура под землей сохраняется.

Монтаж тепловых насосов, таким образом, обеспечивает безопасность оборудованию. Шанс того что кабеля и теплопоглощающие контуры будут пробиты на глубине в 30-50 метров очень невелики.

Единственным недостатком является довольно высокая стоимость проведения подобных работ.

Установки на основе теплового насоса производят в 3-7 раз больше тепловой энергии, чем потребляют электрической – это гораздо эффективнее любых традиционных котлов, сжигающих топливо, центрального отопления.

По результатам оценки состояния теплового контура учебного корпуса № 6 ТПУ были установлены неоднородности в области фундамента по всему периметру, в которых температура поверхности достигает $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при твозд на улице $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$). В свою очередь это говорит о недостаточно высоких термических характеристиках ограждающих конструкций в этих зонах. Именно имеющиеся дефекты приводят к ухудшению микроклимата внутри здания и перерасходу тепловой энергии на обогрев, вследствие увеличения общих тепловых потерь здания.

Для снижения тепловых потерь рекомендуется устранить дефекты ограждающих конструкций, а именно, выполнить утепление отмостки здания по всему периметру, заменить пластиковые и деревянные окна на более качественные окна с коэффициентом сопротивления теплопередаче не ниже 0,65.

Результаты расчета теплотерь по корпусу показывают, что на 1 м^2 отапливаемой площади здания, необходимо от 1,2 до 2,4 погонных метра скважины (без учета нагрузки на ГВС) в зависимости от пород, залегающих под зданием, а также наличием водоносных горизонтов.

Исходя из этого, для отопления учебного корпуса № 6 ТПУ общей площадью 945 м^2 требуется 18 скважин глубиной 60 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Алексеев В.А. Тепловые насосы: тепло XXI века//Загородное обозрение. №8 – СПб, 2005. – С. 15-18.
2. Альтернативная энергетика в России // Электронный журнал Memoid. – URL: http://www.memoid.ru/node/Alternativnaya_energetika_v_Rossii (дата обращения 27.05.2016).
3. Аналитические экспериментальные исследования по определению эффективной разницы температур теплообменных скважин с коаксиальным коллектором [Электронный ресурс], URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1507> (дата обращения 29.03.2016).
4. Антонов В.В. Поиски и разведка подземных вод. – СПб: Изд-во СПГГИ (ТУ), 2004. – 94 с.
5. Богуславский Э.И. Геотермальные ресурсы СССР// Физические процессы горного производства. Межвузовский сборник. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1980. – вып. 12. – С. 17-21.
6. Большой соник [Электронный ресурс]. – URL: <http://gortools.ru/userFiles/file/catalog/SonicSampDrill%20LS.pdf> (дата обращения 12.03.2016).
7. Брылин В.И. Бурение скважин специального назначения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 255 с.
8. Буйок П. Анализ эффективности теплообменных скважин на «Исследовательском полигоне» Остравского технического университета П. Буйок, М. Клемпа, И.А. Страупник, В.К. Чистяков // Горный информационно- аналитический бюллетень (научно-технический журнал) - №3, 2012, С. 371-376.
9. Бурение скважин для геотермальных зондов и монтаж зондов для тепловых насосов. [Электронный ресурс]. – URL: <http://энергео.рф/geozond.php> (дата обращения 19.03.2016).
10. Буровые установки для геологоразведочных работ [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gortools.ru/cat/30.html> (дата обращения 19.03.11).

11. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низко потенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. – М., 2009. – 423 с.
12. Ганджумян Р.А. Практические расчеты в разведочном бурении. – М.: Недра, 1986. – 253 с.
13. Геология СССР Том 1, Ленинградская, Псковская и Новгородская области/ Под общ. ред. Селивановой В.А. – М.: Недра, 1971. – 504 с.
14. Геотермальное отопление. [Электронный ресурс], URL: <http://www.sktspb.ru/geothermal/> (дата обращения 04.04.2016).
15. Геотермальные тепловые насосы Refcom/. [Электронный ресурс], URL: <http://refkomspb.ru/> (дата обращения 12.03.2016).
16. Геотермическая карта России / Гл. редактор Смыслов А.А. – СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 1996. – 28 с.
17. Гидравлический расчет отопления [Электронный ресурс]. – URL: <http://gidotopleniya.ru/montazh-otopleniya/raschet/gidravlicheskiy-raschet-sistemy-otopleniya-truboprovod-995> (дата обращения 24.04.2016).
18. Горшков В. Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор //Справочник промышленного оборудования - № 2, 2004. – С. 18-21.
19. Данилевич Я.Б. Тепловые насосы в системах малой энергетики / Я.Б. Данилевич, А.Н. Коваленко // Известия Российской академии наук. Энергетика. № 1. 2005, С. 63-69.
20. Дмитриев А.П. Термодинамические процессы в горных породах / А.П. Дмитриев, С.А. Гончаров – М.: Недра, 1990. – 360 с.
21. Добрынин В.М. Петрофизика / В.М. Добрынин, Б.Ю. Вендельштейн, Кожевников – М.: Недра, 1991. – 368 с.
22. Дортман Н.Б. Петрофизика / Том 1, - М.: Недра, 1992. – 286 с.
23. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энергоиздат, 1981. – 488 с.
24. О возможности использования глубоких скважин для теплообеспечения и горячего водоснабжения в России [Электронный ресурс],

URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=284 (дата обращения 29.03.2016).

25. Калинин А.Г. Разведочное бурение / А.Г. Калинин, О.В. Ошкордин, Н.В. Соловьев - М.: Недра, 2000. – 748 с.

26. Кардыш В.Г. Совершенствование и разработка бурового инструмента. / В.Г. Кардыш, И.Г. Никифоров, О.В. Смирнов. - Л.: ВИТР, 1986. – 221 с.

27. Кардыш В.Г. Техника и технология бурения с гидротранспортом / В.Г. Кардыш, А.Н. Пешков, А.В. Кузнецов.- М.: Недра, 1993. – 253 с.

28. Кипко Э.Я. Глиноцементные тампонажные растворы в горном деле. - Днепропетровск: Изд-во НГУ, 2007. – 191 с.

29. Киселев А.Т. Новые технологии бурения гидрогеологических скважин с использованием двойных концентрических колонн и гидроударных машин. – М.: Геоинформмарк, 2002. – 278 с.

30. Кирсанов А.Н. Буровые машины и механизмы / А.Н. Кирсанов, В.П. Зиненко – М.: Недра, 1981. – 448 с.

31. Козловский А.Е. Совершенствование технологических средств ССК и повышение эффективности их внедрения. / А.Е. Козловский, Н.И. Слюсарев. - Л.: ВИТР, 1987. – 312 с.

32. Компакт рото соник (КРС) [Электронный ресурс]. – URL: <http://gortools.ru/userFiles/file/catalog/SonicSampDrill%20CRS.pdf> (дата обращения 12.03.2016).

33. Кудряшов Б.Б. Бурение разведочных скважин с применением воздуха / Б.Б. Кудряшов, А.И. Кирсанов – М.: Недра, 1990. – 263 с.

34. Кудряшов Б.Б. Бурение скважин в мерзлых породах / Б.Б. Кудряшов, А.М. Яковлев – М.: Недра, 1983. – 286 с.

35. Куликов В.В. О коэффициенте полезного действия гидравлического и теплового скважинных насосов//Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. № 4. 2009. - С. 76-78.

36. Куликов В.В. Оценка эффективности отбора тепла земных недр от низко потенциальных источников//Недропользование – XXI век. № 03. 2009. - С. 93-96.
37. Кустовое бурение [Электронный ресурс], URL: <http://mining-enc.ru/k/kustovoe-burenie/> (дата обращения 04.04.2016).
38. Лисев Н.А. Энергия тепла// Экономика и время. – СПб, – №48(285), 1999. С. 18-24.
39. Михайлов В.А. Альтернативная энергетика [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.zagorod.spb.ru/articles/3171/> (дата обращения 12.02.2016).
40. Михайлова Н.Д. Техническое проектирование колонкового бурения. – М.: Недра, 1985. – 200 с.
41. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
42. Осадчий Г.Б. Солнечное излучение и геотермальное тепло – источники энергии для комбинированных систем энергоснабжения [Электронный ресурс]. – URL: <http://vetrodvig.ru/?p=2473> (дата обращения 12.03.2016).
43. Поромпка С. Особенности бурения и обустройства скважин для установки зондов тепловых насосов (опыт германии) / С. Поромпка, Л.М. Махов // Водоснабжение и санитарная техника. № 12. 2011. - С. 39-42.
44. Поротов Г.С. Математические методы моделирования в геологии. – СПб: Изд-во СПГГИ(ТУ), 2006. – 223 с.
45. Потанин А.В. Тепловые насосы в теплоснабжении зданий и сооружений / А.В. Потанин, Д.Г. Закиров, Ю.Н. Чадов, В.А. Николаев //Горный информационно- аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 5, 2008. - С. 321-330.
46. Потенциал энергии [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.alfar.ru/smart/1/920/> (дата обращения 20.03.2016).

47. Пудовкин М.А. Задачи теплообмена в приложении к теории бурения скважин / М.А. Пудовкин, В.А. Чугунов, А.Н. Саламатин. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1977. – 183 с.
48. Ребрик Б.М. Практическая механика в разведочном бурении. – М.: Недра, 1982. – 319 с.
49. Рей Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. / Д. Рей, Д. Макмайкл – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
50. Семенов Б.А. Проблемы и особенности использования грунтовых тепловых насосов для автономного теплоснабжения объектов в центральных регионах России / Б.А. Семенов, В.А. Соловьёв // Вестник Саратовского государственного технического университета. Т. 2. № 1. 2009. - С. 167-172.
51. Соловьёв Н.В. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях / Н.В. Соловьёв, В.Ф. Чихошкин, Р.К. Богданов, А.П. Занора. - М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 1997. – 147 с.
52. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду / Д.Н. Башкатов, С.Л. Драхлис, В.В. Сафонов, Г.П. Квашнин и др. – М.: Недра, 1988. – 268 с.
53. Справочник инженера по бурению / В.И. Мищевич, Н.А. Сидоров и др. – М.: Недра, том 2, 1973. – 376 с.
54. Справочник по бурению геологоразведочных скважин / Под ред. Козловского Е.А. СПб.: ООО «Недра», 2000. – 743 с.
55. Справочник по промывке скважин / А.И. Булатов, А.И. Пеньков, Ю.М. Проселков и др. – М.: Недра, 1984. – 317 с.
56. Средний соник [Электронный ресурс]. – URL: <http://gortools.ru/userFiles/file/catalog/SonicSampDrill%20MS.pdf> (дата обращения 12.03.2016).
57. Страупник И.А. Системы теплоизоляции теплотехнических скважин//Труды международной конференции НГУ «Студент и научно-технический прогресс». – Новосибирск: Изд. НГУ, 2009. - С. 17.

58. Страупник И.А. Расчет теплотехнических скважин//Труды международной конференции НГУ «Студент и научно-технический прогресс». – Новосибирск: Изд. НГУ, 2008. - С. 38.

59. Страупник И.А. Тепло Земли – альтернативный источник энергии для отопления и кондиционирования помещений//Труды международной ежегодной конференции молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. - С. 469-471.

60. Страупник И.А. Расчет и оценка эффективности теплообменных скважин / И.А. Страупник, В.К. Чистяков //Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. - С. 84-89.

61. Страупник И.А. Аналитические и экспериментальные исследования скважинного коаксиального теплообменника / И.А. Страупник, В.К. Чистяков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/102-6069> (дата обращения: 24.04.2016).

62. Страупник И.А. Технологическая и экономическая эффективность добычи тепловой энергии приповерхностными циркуляционными системами на базе коаксиальных скважин [Электронный ресурс], URL: http://www.giab-online.ru/files/Data/2013/6/324-328_Straupnik_6_2013.pdf (дата обращения 17.03.2016).

63. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 557 с.

64. Тепловой насос. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.allianceneva.ru/?issue_id=46 (дата обращения 12.09.2015).

65. Теплоносители в системах отопления [Электронный ресурс]. – URL: <http://ru-stroyka.com/vodorazdel/725-teplonositeli-v-sistemah-otopleniya.html> (дата обращения 12.02.2015).

66. Техника и технология бурения гидрогеологических скважин / Дудля Н.А., Садовенко И.А. и др. под. ред. Г.Г. Пивняка. – Днепропетровск: Изд-во НГУ, 2007. – 399 с.

67. Филиппов С.П. Эффективность использования тепловых насосов для теплоснабжения малоэтажной застройки / С.П. Филиппов, М. Д. Дильман, М.С. Ионов //Теплоэнергетика. № 11. 2011. - С. 12-19.

68. Федеральный закон «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ [Электронный ресурс]. – URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=182747&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.27967448744498835> (дата обращения 12.01.2016).

69. Хузина Л.Б. Оптимальные частоты для вибрационного бурения / Л.Б. Хузина, М.С. Габдрахимов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). № 3, 2006. - С. 347-350.

70. Чистяков А.О. Разработка технологии бурения гидрогеологических скважин с использованием двойных концентрических колонн и гидроударных машин: дис. канд. техн. наук: 25.00.14 / Чистяков Алексей Олегович. – М., 2001. – 108 с.

71. Шамшев Ф.А. Технология и техника разведочного бурения. – М.: Недра, 1983. – 565 с.

72. Шкурко А.К. Бурение скважин забойными ударными машинами. – Л.: Недра, 1982. – 168 с.

73. Штым А.С. Пути повышения энергетической эффективности тепловых схем геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, С.А. Горбанев, А.А. Зимба //Вологдинские чтения. № 48. 2005. - С. 54-55.

74. Шувалов Ю.В. Термодинамика. Учебное пособие / Ю.В. Шувалов, С.Г. Гендлер и др. – СПб: Изд-во: СПГГИ (ТУ), 2006. – 102 с.

75. Aktualni vizualizace namerenych hodnot [Электронный ресурс]. – URL: trt.vsb.cz (дата обращения 01.04.2016).

76. Desmedt J. Case studies of vertical ground source heat pumps in Belgian hospitals / J. Desmedt, H. Hoes [Электронный ресурс]. – URL: www.vito.be (дата обращения 01.02.2016).

77. European heat pump statistics // Overview of European heat pump association [Электронный ресурс]. – URL: www.ehpa.org (дата обращения 20.02.2016).

78. Geoseal. Технические характеристики [Электронный ресурс]. – URL: www.panceratubi.it/rus/pdf/Scheda%20tecnica%20geoseal.pdf (дата обращения 25.04.2016).

79. Geothermal energy. The direct source of natural heat [Электронный ресурс]. – URL: http://www.thyssenkrupp-bautechnik.com/uploads/media/Geothermal_energy_02_2010.pdf (дата обращения 09.04.2016).

80. K40 drilling rig [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rigkits.com/geothermal-drilling-rigs.html> (дата обращения 12.04.2016).

81. KB 10/2D drilling rig [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.kurthbohrtechnik.de/> (дата обращения 15.04.2016).

82. Tavino P. Geothermal heat pumps for small buildings [Электронный ресурс]. – URL: s3.amazonaws.com/suncam/npdocs/045.pdf (дата обращения 27.01.2016).

83. Thermo-seal. Технические характеристики [Электронный ресурс]. – URL: www.panceratubi.it/rus/pdf/Scheda%20tecnica%20Thermo-Seal.pdf (дата обращения 25.04.2016).