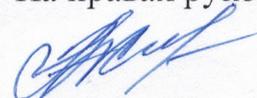


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Дальневосточный федеральный университет»
(ДФУ)

На правах рукописи



Журмилова Ирина Александровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ
ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ**

Специальность 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
Штым А.С. кандидат
технических наук, доцент

Владивосток - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ГРУНТА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	11
1.1 Аналитический обзор исследований по использованию низкопотенциальной энергии грунта для целей тепло- холодоснабжения зданий и сооружений.....	11
1.2 Типы грунтовых теплообменников и их конструктивные особенности.....	16
1.3 Монтаж вертикальных грунтовых теплообменников	24
1.4 Исследование теплофизических свойств бентонита - наполнителя скважин системы сбора низкопотенциальной энергии грунта.....	25
1.5 Выводы	31
1.6 Постановка цели и задач исследования	33
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ НАПОЛНИТЕЛЕЙ СКВАЖИН С ГРУНТОВЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ	34
2.1 Наполнитель скважины - сухой песок. Теплофизические свойства сухого песка.....	35
2.2 Наполнитель скважины - увлажненный песок. Теплофизические свойства увлажненного песка	37
2.3 Наполнитель скважины - водно-песчаный раствор	50
2.4 Обводненная скважина	52
2.5 Исследование различных наполнителей скважины на лабораторной установке	53
2.6 Выводы	57
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ГРУНТА	59
3.1 Математическая модель процессов теплопередачи системы сбора низкопотенциальной энергии грунта	59
3.2 Определение расстояния между скважинами с грунтовыми теплообменниками в вертикальной системе сбора низкопотенциальной энергии грунта.....	75

3.3 Разработка имитационной модели грунтового теплообменника для экспериментальных исследований.....	79
3.4 Планирование эксперимента на имитационной модели грунтового теплообменника	86
3.5 Выводы	91
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ГРУНТА	93
4.1 Анализ результатов эксперимента, полученных на имитационной модели..	93
4.2 Разработка методики расчета вертикальных систем сбора низкопотенциальной энергии грунта	100
4.3 Разработка компьютерной программы для расчета процессов теплопередачи в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта.....	105
4.4 Разработка новой конструкции грунтового теплообменника.....	108
4.5 Выводы	112
ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ НА БАЗЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В СОЧЕТАНИИ С ГРУНТОВЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ ...	114
5.1 Рекомендации для проектирования систем тепло- и холодоснабжения зданий на базе геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками	114
5.2 Практическая реализация систем сбора низкопотенциальной энергии грунта в Приморском крае.....	119
5.3 Оценка экономической эффективности источника тепло- и холодоснабжения, использующего низкопотенциальную энергию грунта.....	129
5.4 Выводы	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
Приложение 1	152
Приложение 2	153
Приложение 3	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Исследования в области возобновляемых источников энергии остаются актуальными и на сегодняшний день, это обусловлено стремлением всего мира найти неисчерпаемые и экономически выгодные источники энергии, которые будут экологически безопасными и позволят уменьшить потребность в технологиях, загрязняющих атмосферу выбросами парниковых газов. Энергетическая политика России направлена на исследования и развитие возобновляемых источников энергии, в соответствии с федеральным законом №261-ФЗ от 23 ноября 2009 года, который направлен на создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

В Париже на 21-ой конференции, проходившей в период с 30 ноября – 12 декабря 2015 года, которая была проведена в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата и 11-ой – в рамках совещания сторон по Киотскому протоколу, обсуждались вопросы о необходимости развития возобновляемой энергетики по всему миру.

Одним из перспективных, энергосберегающих и надежных вариантов для целей тепло- и холодоснабжения зданий и сооружений является применение геотермальных тепловых насосов, работающих на низкопотенциальной энергии грунта, что способствует снижению использования традиционных источников энергии.

В мире широкое распространение получили установки, работающие на низкопотенциальной энергии земли – геотермальные тепловые насосы, для которых извлечение низкопотенциальной энергии из грунта производится с помощью грунтовых теплообменников. Наиболее стабильный и эффективный тип грунтовых теплообменников - вертикальный. Для России применение таких установок имеет большие перспективы, так как большая часть грунтового массива имеет достаточно высокие значения коэффициента трансформации тепла: 4,14 на

юге, 2,73 на севере, 3,2 – 3,4 для средней полосы России и 3,5 для районов Дальнего Востока. [15]

Совокупность скважин с грунтовыми теплообменниками, заполненных наполнителем, и окружающий массив грунта представляют собой систему сбора низкопотенциальной энергии грунта. На сегодняшний день при проектировании и монтаже таких систем пользуются общими рекомендациями, исходя из которых, расстояние между скважинами грунтовых теплообменников принимают в среднем 5 метров, наполнитель (материал, заполняющий пространство в скважине) – бентонит, значение теплового потока 50 Вт с одного метра скважины [55, 62]. Пользуясь общими рекомендациями, не учитываются индивидуальные особенности объекта проектирования, что может привести к созданию менее эффективного источника, использующего низкопотенциальную энергию грунта для систем теплоснабжения и холодоснабжения здания, а также к завышению капиталовложений.

В связи с этим, совершенствование работы систем тепло- холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов, использующих низкопотенциальную энергию грунта, является актуальной задачей. Ввиду того, что на сегодняшний день около 50% единовременных денежных затрат приходится именно на грунтовые теплообменники, то необходимо решать вопросы, связанные с повышением эффективности их работы.

Степень разработанности темы исследования. В работах зарубежных авторов, J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, G. Hellstrom [101, 106, 109] и др., можно встретить много примеров практической реализации использования грунтовых теплообменников для теплоснабжения зданий. Помимо этого в работах этих и других авторов T. Kurevija, D. Vulin, V. Krapac [105], H.J. Zeng, N.R. Diao, Z.H. Fang [115], J.D. Spitler, J.R. Cullin, E. Lee, D.E. Fisher [110] встречаются разработки математических моделей работы грунтовых теплообменников. J.D. Spitler, J.R. Cullin, E. Lee, D.E. Fisher [110] исследовали работу U-образных

грунтовых теплообменников на базе созданных для расчета специальных компьютерных программ.

Среди российских авторов, исследования посвященные оценке эффективности и возможности внедрения систем, использующих низкопотенциальную теплоту грунта для целей теплоснабжения зданий и сооружений на территории России, можно найти в работах Г.П. Васильева [14], Н.В. Шилкина [15], В.Я. Федянина [75], В.А. Бутузова [12] и др. Совершенствование как самих систем извлечения низкопотенциальной теплоты грунта, так и методик их расчета, построение математических моделей, встречается в работах Е.А. Ададунова [1], К.Н. Сотниковой [64], А.А. Гришкова [21], В.М. Кротова [36] и др.

Анализируя, проведенные исследования в области использования низкопотенциальной тепловой энергии грунта для геотермальных теплонасосных систем тепло- и холодоснабжения зданий и сооружений, можно сделать вывод, что недостаточно изучен вопрос о наполнителях скважин, отсутствует методика создания системы сбора низкопотенциальной энергии грунта (СНЭГ) для целей теплоснабжения зданий и сооружений, учитывающая индивидуальные особенности объекта проектирования.

Цель работы - разработка эффективных технических решений для систем сбора низкопотенциальной энергии грунта и методики расчета грунтовых теплообменников U-образного типа с возможностью учета индивидуальных особенностей объекта строительства.

Для достижения цели в работе поставлены следующие **задачи**:

1. Провести исследования свойств альтернативного наполнителя и оценить возможность его применения в скважинах с грунтовыми теплообменниками.
2. Разработать физико-математическую модель работы U-образного грунтового теплообменника.

3. Для исследования процессов теплообмена при работе грунтовых теплообменников и проверки достоверности математической модели разработать имитационную установку грунтового теплообменника.

4. Разработать методику расчета вертикальной системы сбора низкопотенциальной энергии грунта, учитывающую индивидуальные особенности объекта проектирования.

5. Разработать новую эффективную конструкцию грунтового теплообменника.

6. Разработать рекомендации для проектирования систем тепло- и холодоснабжения зданий на базе геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложены зависимости, описывающие влияние влажности и плотности песка на его коэффициент теплопроводности, температуропроводность и теплоемкость.

2. Разработана математическая модель процесса теплообмена между массивом грунта, наполнителем и U-образным грунтовым теплообменником, позволяющая рассчитать количество извлекаемой энергии, в зависимости от теплофизических характеристик массива грунта, наполнителя скважины, материала труб теплообменника и типа теплоносителя.

3. На основе экспериментальных исследований, проведенных на имитационной модели, установлен характер влияния эксплуатационных характеристик грунтовых теплообменников и теплофизических свойств наполнителя скважины на процесс теплообмена.

4. Разработана методика расчета вертикальных грунтовых теплообменников и расстояния между скважинами в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта.

5. Разработана программа для определения количества теплоты, извлекаемой грунтовым теплообменником из массива грунта, параметров

теплоносителя и расстояния между скважинами в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта (свидетельство РФ № 2016614307).

6. Предложена новая конструкция геотермального устройства с повышенной теплопроизводительностью (патент РФ № 2529850).

Теоретическая и практическая значимость работы.

Приведено математическое описание процесса теплообмена при извлечении низкопотенциальной энергии грунта U-образным грунтовым теплообменником с учетом теплофизических свойств наполнителя скважины. Разработана методика и номограмма для определения количества скважин и расстояния между ними в вертикальной системе сбора низкопотенциальной энергии грунта, в зависимости от продолжительности отопительного периода, теплофизических свойств грунтового массива и параметров теплоносителя.

Получены зависимости и построены номограммы, для определения коэффициента теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости песка при различной его влажности и плотности.

Результаты исследований, полученные соискателем, использованы: при проектировании систем сбора низкопотенциальной энергии грунта для следующих объектов: демонстрационно-выставочный энергоэффективный «Экодом» по ул. Бородинская, 14 в г. Владивостоке; индивидуальный жилой дом по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке; индивидуальный жилой дом по ул. Главная, 23е в г. Владивостоке.

Методология и методы исследования. Работа выполнена с применением аналитического обобщения научных и технических решений, патентно-информационного анализа проблемы, методов математического моделирования, планирования эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных. Теоретической и методологической базой диссертационной работы являются законы и методы теории теплообмена.

Положения, выносимые на защиту:

- математическая модель процесса теплообмена между массивом грунта, наполнителем и U-образным грунтовым теплообменником;
- результаты экспериментальных исследований процесса теплообмена при эксплуатации грунтового теплообменника, полученные на имитационной модели;
- методика для расчета вертикальной системы сбора низкопотенциальной энергии грунта;
- программа для определения количества теплоты, извлекаемой грунтовым теплообменником из массива грунта, параметров теплоносителя и расстояния между скважинами в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта (свидетельство РФ № 2016614307);
- новая конструкция геотермального устройства с повышенной теплопроизводительностью (патент РФ № 2529850).

Степень достоверности полученных в работе результатов обеспечивается корректным применением фундаментальных методов теории теплообмена для разработки математических моделей; использованием метрологически поверенного оборудования и измерительных приборов, обеспечивающих достаточную точность измерения; математическими методами планирования эксперимента и обработки экспериментальных данных; сходимостью теоретических результатов и экспериментальных данных.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на: IX Международной научно-практической конференции в г. Пенза (2009-2010 гг.); региональных научно-практических конференциях «Молодежь и научно – технический прогресс» в г. Владивосток (2009-2011 гг.); конференции «Вологдинские чтения» в г. Владивосток (2009 г.); VII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодёжь и наука» в г. Красноярск (2011 г.); Всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием «Научно-техническое и

экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке» г. Хабаровск (2011 г.); Всероссийской молодежной конференции «Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств», г. Владивосток (2012 г.); Международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования», г. Владивосток (2015 г.); Международная научная конференция «Молодые исследователи – регионам», г. Вологда (2016 г.).

Результаты работы опубликованы в центральных изданиях - Вестник ВолгГАСУ 2011 г., Научное обозрение 2016 г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 15 работ, в том числе 3 статьи в журналах рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получен 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и трёх приложений. Работа содержит 138 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 20 таблиц, список литературы из 115 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ГРУНТА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1.1 Аналитический обзор исследований по использованию низкопотенциальной энергии грунта для целей тепло- холодоснабжения зданий и сооружений

Грунт является практически неисчерпаемым источником энергии. Использование низкопотенциальной энергии грунта посредством геотермальных тепловых насосов для целей тепло- холодоснабжения зданий и сооружений возможно практически повсеместно.

Изучением вопросов применения низкопотенциальной теплоты грунта для целей тепло- холодоснабжения зданий и сооружений занимаются как зарубежные, так и российские исследователи.

В работах зарубежных авторов, J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, G. Hellstrom [96, 101, 106, 109, 112, 113, 114] и др., можно встретить много примеров практической реализации использования грунтовых теплообменников для теплоснабжения зданий, наиболее применяемая конструкция - скважина с U-образными грунтовыми теплообменниками, как одиночными, так и сдвоенными. Мировое лидерство по использованию систем сбора низкопотенциальной энергии грунта сохраняют Соединенные Штаты Америки, Швеция, Германия, Швейцария, Канада и Австрия. L. Rybach [109] в своей работе приводит основные рекомендации для успешной работы грунтовых теплообменников, исходя из практического опыта, благодаря которому установлен ряд факторов, влияющих на эффективность работы данных устройств: относительно высокая теплопроводность наполнителя скважины, а также способность обеспечивать хороший тепловой контакт между теплообменником и окружающем массивом

грунта, правильно рассчитанная глубина и количество скважин, свойства окружающего грунта, наличие грунтов вод. Также автор дает оценку изменения энергетического потенциала грунта, при работе коаксиального грунтового теплообменника в режиме отопления, и скорости его восстановления, на основе полученных значений температур массива грунта вокруг труб грунтового теплообменника на протяжении 12 лет эксплуатации.

Данные работы подтверждают возможность применения геотермальных тепловых насосов с грунтовыми теплообменниками для целей теплохолодоснабжения зданий и сооружений, и показывают эффективность таких систем.

Помимо этого в работах этих и других авторов Т. Kurevija, D. Vulin, V. Крапес [105], H.J. Zeng, N.R. Diao, Z.H. Fang [115], J.D. Spitler, J.R. Cullin, E. Lee, D.E. Fisher [110], Saqib Javed [98], Cenk Yavuzturk [114], Corradi C. [95], встречаются разработки математических моделей работы грунтовых теплообменников.

H.J.Zeng, N.R. Diao, Z.H. Fang [115] для создания математической модели работы U-образного грунтового теплообменника, воспользовались некоторыми допущениями: рассмотрели грунт как однородную бесконечную среду с постоянными теплофизическими свойствами и равномерным распределением температур. Сам грунтовый теплообменник представили, как линейный источник конечной длины в бесконечной среде, при этом, радиальными размерами скважины пренебрегли. Подобные допущения возможны, и также встречаются в работах российских авторов, например, Г.П. Васильева [14].

Saqib Javed [98] в своей работе использовал другой подход при моделировании работы скважин грунтовых теплообменников. Он использовал технику преобразования координат и решал одномерную задачу теплопереноса. Помимо этого, сделал вывод, что, если рассмотреть грунтовый теплообменник, как источник конечной длины, то можно получить более точные данные.

J.D.Spitler, J.R. Cullin, E. Lee, D.E. Fisher [110] исследовали работу U-образных грунтовых теплообменников на базе созданных для расчета программ EnergyPlus, eQuest, HVACSIM+, TRNSYS, и EES. В результате их исследований программы выдавали разнящиеся между собой данные, следовательно, необходимо провести натурные эксперименты, чтобы установить какая из представленных моделей и программ точнее соответствует реальному процессу, выявить причины, полученных расхождений и доработать программу.

Оценку экономической выгоды от применения грунтовых теплообменников в качестве экологически чистого источника тепло- холодоснабжения зданий и сооружений можно найти в работах J. Hanova, H. Davlatabadi [100], L. Rybach [109] и др. Авторы дали разностороннюю оценку преимуществ использования системы геотермальных тепловых насосов с грунтовыми теплообменниками. Отмечены экологические преимущества данной технологии в сравнении с традиционными системами теплоснабжения, высокая удовлетворенность потребителей от использования геотермальных тепловых насосов, окупаемость этих систем, возможность применения скважин грунтовых теплообменников не только для теплоснабжения зданий, но и для холодоснабжения.

В зарубежных исследованиях есть работы [98, 101, 106, 107, 109, 114], затрагивающие вопрос о материалах, которыми заполняют пространство между трубами теплообменника и массивом грунта в скважине. В данных работах рассмотрены различные по составу и коэффициенту теплопроводности материалы: цементный раствор, вода, бентонит, смесь бентонита с дополнительными присадками и кварцевым песком, термически усовершенствованные растворы с кварцевым песком, чистый, насыщенный водой кварцевый песок, лед и бентонит с графитом. Очевидно, что чем будет выше коэффициент теплопроводности наполнителя, тем эффективнее будет работать скважина для геотермального теплового насоса. Среди рассмотренных материалов смесь бентонита с графитом обладает самым высоким коэффициентом теплопроводности $3,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, но при этом является

дорогостоящим материалом, что в случае монтажа систем СНЭГ является существенным фактором, так как такие системы требуют больших капиталовложений.

В настоящее время рекомендуемым и наиболее распространенным наполнителем скважин с грунтовыми теплообменниками является бентонит. При этом наиболее крупными запасами бентонитов обладают США, и на них приходится около 38% от общего объема добычи данного материала в мире. [47]

На сегодняшний день ориентировочная стоимость бентонита в России от 25000-30000 руб./тонна, доставка в регионы осуществляется только вагонами.

Среди российских авторов, исследования, посвященные оценке эффективности и возможности внедрения систем, использующих низкопотенциальную теплоту грунта для целей теплоснабжения зданий и сооружений на территории России, можно найти в работах Г.П. Васильева [14], Н.В. Шилкина [15], В.Я. Федянина [75], В.А. Бутузова [12] и др.

В частности, Г.П. Васильев [14], рассмотрел применимость таких систем на всей территории России, предложил математические модели, на базе аналитического метода – конечных интегральных преобразований, и на их основе реализовал компьютерную модель, которая описывает нестационарный пространственный тепловой режим грунтового массива систем теплосбора с поверхностных слоев Земли. При моделировании процессов тепломассопереноса автором были сделаны следующие допущения: грунтовый массив рассматривается как квазиоднородное тело, регистр труб грунтового теплообменника аппроксимируется линейным стоком тепла и реальная конфигурация не учитывается. И только при исследовании теплообмена между стенкой трубы грунтового теплообменника и теплоносителя системы теплосбора была рассмотрена конструкция коаксиального типа.

Работа Г.П. Васильева охватывает большое количество имеющихся знаний в области сбора низкопотенциальной энергии грунта. Благодаря, сделанному районированию территории России по эффективному использованию

геотермального тепла низкого потенциала для целей теплоснабжения зданий, можно утверждать о перспективности развития таких систем в нашей стране.

Совершенствование систем извлечения низкопотенциальной энергии грунта и методик для их расчета, а также построение математических моделей встречается в работах Е.А. Ададунова [1], К.Н. Сотниковой [64], А.А. Гришкова [21], В.М. Кротова [36] и др.

Кротов [36], используя численный метод решения – метод конечных разностей, разработал математическую модель первичного контура системы теплоснабжения, которая состоит из грунтовых теплообменников коаксиального типа, погруженных в скважины. Разработанная математическая модель учитывает взаимное влияние теплообменников, распространение теплового потока в горизонтальной и вертикальной плоскостях, позволяет задавать климатические условия различных регионов.

Основным различием между исследованиями зарубежных и российских авторов является наличие у первых большого опыта практической реализации систем извлечения низкопотенциальной теплоты грунта для целей тепло-холодоснабжения зданий и сооружений, а в публикациях отечественных авторов при моделировании работы системы сбора низкопотенциального тепла рассматривается грунтовый теплообменник коаксиального типа [1, 15, 21, 36, 64] и не учитывается, слой наполнителя, заполняющего пространство в скважине.

Анализируя, проведенные исследования в области использования низкопотенциальной тепловой энергии массива грунта в геотермальных теплонасосных системах тепло-холодоснабжения зданий и сооружений, можно сделать вывод, что недостаточно изучен вопрос о наполнителях скважин, несмотря на то, что данный материал является связующим звеном в процессе теплообмена между массивом грунта и трубами грунтового теплообменника. Чем меньше значение коэффициента теплопроводности наполнителя, тем хуже происходит теплосъем с грунтового массива, а при отсутствии данного материала в скважине, высока вероятность прекращения работы системы СНЭГ. Другой

важный аспект при проектировании системы СНЭГ - расстояние между скважинами с грунтовыми теплообменниками. На сегодняшний момент нет точных данных о том, на каком расстоянии необходимо располагать скважины друг от друга, учитывая разнообразие теплофизических свойств массива грунта, и возможные режимы эксплуатации теплообменного оборудования, а приближенный расчет, основанный на общих рекомендациях, может привести как завышению количества скважин при проектировании, так и к недостаточному их количеству.

1.2 Типы грунтовых теплообменников и их конструктивные особенности

Грунтовые теплообменники связывают теплонасосное оборудование с грунтовым массивом. Кроме «извлечения» тепла земли, грунтовые теплообменники могут использоваться и для накопления тепла (или холода) в грунтовом массиве. В общем случае можно выделить два вида систем использования низкопотенциальной тепловой энергии грунта:

– открытые системы: скважины с высоким дебетом воды, которая используется в качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии, для тепловых насосов;

– замкнутые системы: теплообменники расположены в грунтовом массиве; при циркуляции по ним теплоносителя с пониженной относительно грунта температурой происходит «отбор» тепловой энергии от грунта и перенос ее к испарителю теплового насоса (или, при использовании теплоносителя с повышенной относительно грунта температурой, его охлаждение). [54]

Достоинством открытых систем является возможность получения большого количества тепловой энергии при относительно низких затратах. Однако такие скважины требуют обслуживания. Кроме того, использование этих систем возможно не везде.

Замкнутые системы делятся на горизонтальные, вертикальные и наклонные.

Горизонтальный грунтовой теплообменник устраивается, как правило, рядом с домом на глубине ниже уровня промерзания грунта, в траншеях или котлованах. Размещение труб обычно выполняется двумя основными способами: прямые и свитые в спираль трубы (рисунок 1.1а, 1.1б). Существуют и другие варианты укладки труб горизонтального грунтового теплообменника (рисунок 1.2). Критичным условием для использования горизонтальных грунтовых теплообменников может стать размер имеющейся площадки. [49]

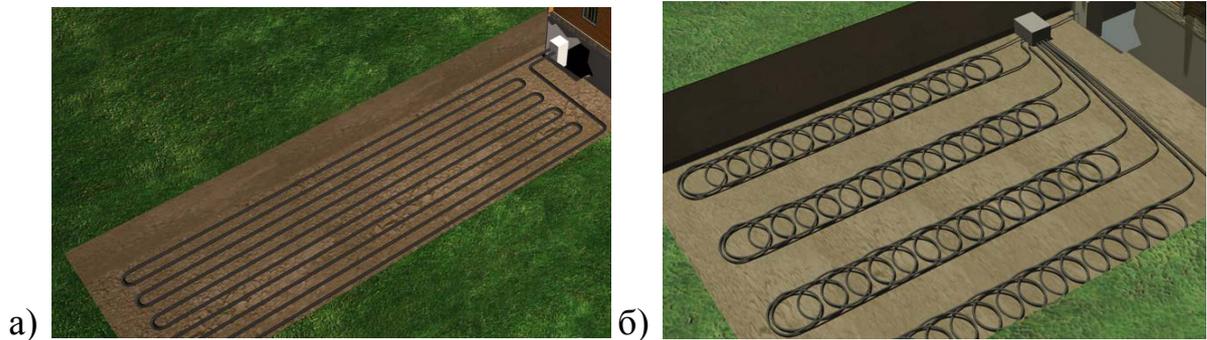


Рисунок 1.1- Размещение труб горизонтального грунтового теплообменника:

а) прямые трубы; б) свитые в спираль трубы.

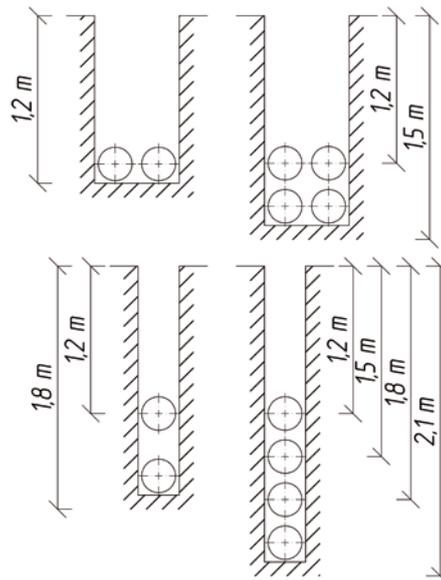


Рисунок 1.2 - Варианты укладки труб горизонтального грунтового теплообменника.

В среднем теплосъем с метра грунтового массива, в системе горизонтальных теплообменников, выполненных из полиэтиленовых труб,

составляет 20 Вт/м, данное значение зависит от множества факторов: вид грунтового теплообменника, глубина укладки труб, тип и влажность грунта, затенение площадки под теплообменник, сезонные и суточные изменения интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха и т.д. [22] Также на снижение эффективности теплосъема может повлиять и наличие воздушных зон, образующихся при засыпке труб грунтом.

По приблизительным расчетам для снятия 20 Вт с метра грунтового массива, в системе горизонтальных теплообменников, потребуется около 11 метров трубы. Таким образом, если надо получить 1000 Вт с горизонтального грунтового теплообменника, то потребуется 30 м² площади и 550 метров трубы.

Вертикальные грунтовые теплообменники позволяют использовать низкопотенциальную тепловую энергию грунтового массива, лежащего ниже «нейтральной зоны» (10 – 15 м от уровня земли). Системы с вертикальными грунтовыми теплообменниками не требуют участков большой площади и не зависят от интенсивности солнечной радиации, падающей на поверхность, так как их погружают в скважины глубиной 40 - 200 м и диаметром 100-200 мм. Они эффективно работают практически во всех видах геологических сред, за исключением грунтов с низкой теплопроводностью, например, сухого песка или гравия. [15]

Обычно используется два типа вертикальных грунтовых теплообменников (рисунок 1.3):

– U-образный, представляющий собой две параллельные трубы, соединенные в нижней части. В одной скважине располагаются одна или две пары таких труб. Преимуществом такой схемы является относительно низкая стоимость изготовления, высокий срок эксплуатации.

– Коаксиальный (концентрический) теплообменник. Простейший коаксиальный теплообменник представляет собой две трубы различного диаметра. Труба меньшего диаметра располагается внутри другой трубы. Коаксиальные теплообменники могут быть и более сложных конфигураций. [15]

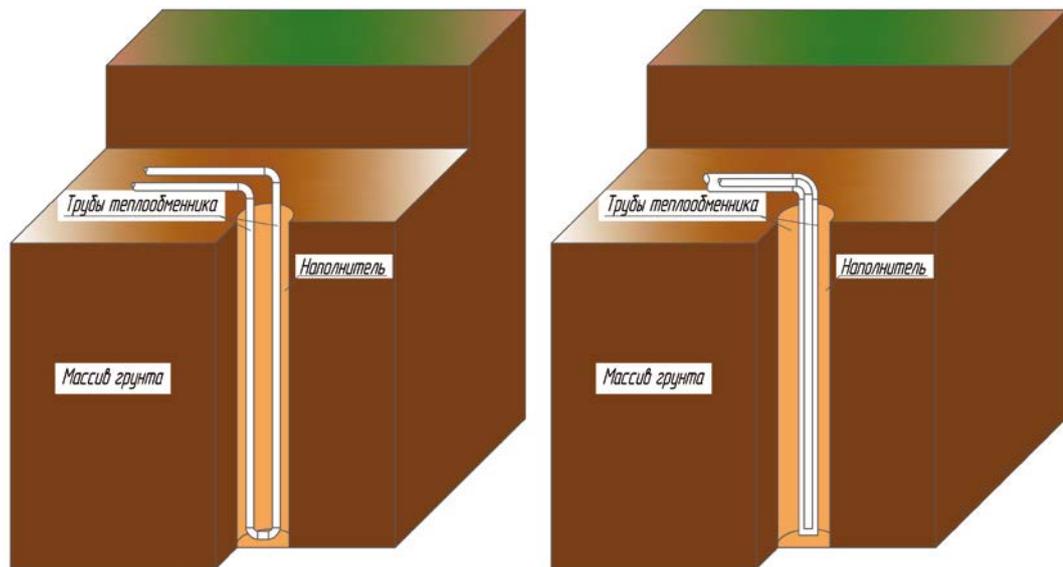


Рисунок 1.3 - Виды вертикальных грунтовых теплообменников (слева – U-образный, справа – коаксиальный)

В среднем теплосъем с метра грунтового массива, в системе вертикальных теплообменников, выполненных из полиэтиленовых труб, составляет 50 Вт/м. [14, 15, 21, 36, 87, 106] Однако реальные значения могут отличаться, в зависимости от вида породы, ее влажности, наличия грунтовых вод и других факторов.

В отличие от горизонтальных грунтовых теплообменников, по приблизительным расчетам для снятия 20 Вт с метра грунтового массива, в системе вертикальных теплообменников, потребуется около 0,8 метров трубы. Таким образом, если надо получить 1000 Вт с вертикального грунтового теплообменника, то потребуется скважина глубиной 20 м, которая будет занимать от 0,008 м² до 0,031 м² площади территории, и 40 метров трубы.

На основе приблизительных расчетов построен график, демонстрирующий количество затрачиваемых полиэтиленовых труб для обеспечения соответствующей тепловой нагрузки горизонтальным и вертикальным грунтовыми теплообменниками (рисунок 1.4), а также показан размер требуемой площадки под грунтовые теплообменники того или иного типа (рисунок 1.5). Для вертикальной системы, при расчете необходимой площадки, учтено расстояние между скважинами.

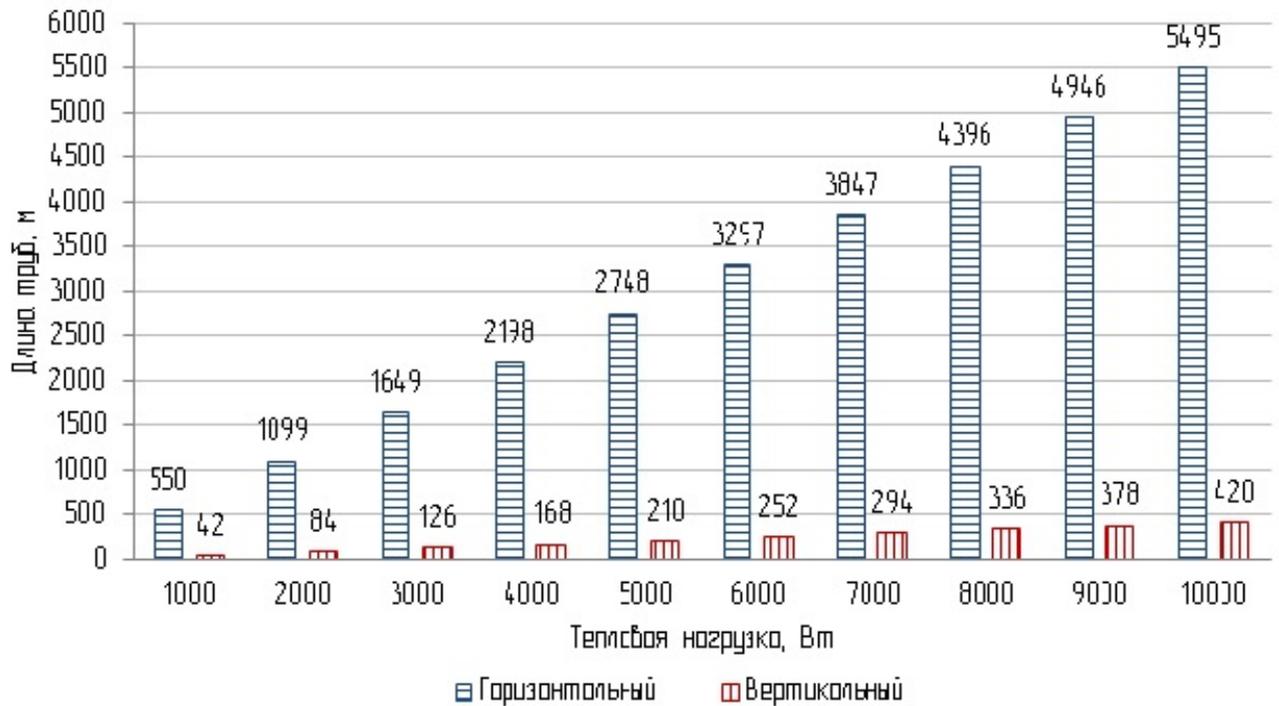


Рисунок 1.4 - Расход материала труб горизонтального и вертикального грунтовых теплообменников, в зависимости от требуемой тепловой нагрузки.

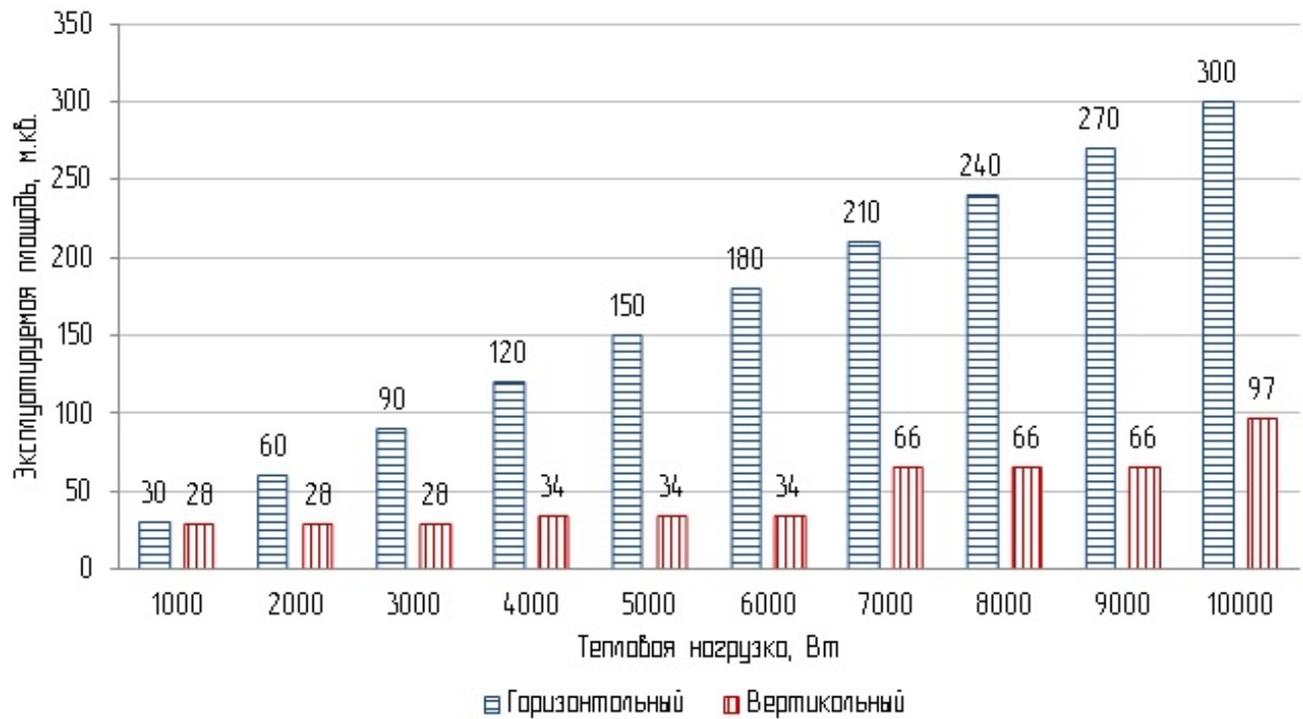


Рисунок 1.5 - Разница эксплуатируемой площади поверхности земли под горизонтальный и вертикальный грунтовые теплообменники, в зависимости от требуемой тепловой нагрузки.

Очевидно, что для системы с горизонтальными грунтовыми теплообменниками требуется гораздо большее количество полиэтиленовых труб, чем для системы с вертикальными грунтовыми теплообменниками, это относится и к эксплуатируемой площади поверхности земли.

Исходя из данных расчетов, были посчитаны примерные затраты на приобретение труб для грунтовых теплообменников, земляные работы (разработка грунта экскаваторами с погрузкой на самосвалы, перемещение грунта бульдозерами, ручная доработка рыхлого грунта) и стоимость эксплуатируемой площади (рисунок 1.6). Цены взяты ориентировочные, так стоимость 1 м трубы принята 80 руб., аренда 1 м² эксплуатируемой площади - 1000 руб., земляные работы оценивались следующим образом: для горизонтального грунтового теплообменника учитывались работы по разработке грунта экскаваторами с погрузкой на самосвалы - 135 руб./м³, перемещение грунта на 10 м бульдозерами - 85 руб./м³ и ручная доработка рыхлого грунта - 1950 руб./м³, а для вертикального к этим видам работ добавилось бурение скважин (с учетом стоимости наполнителя для скважины) - 3000 руб./м.

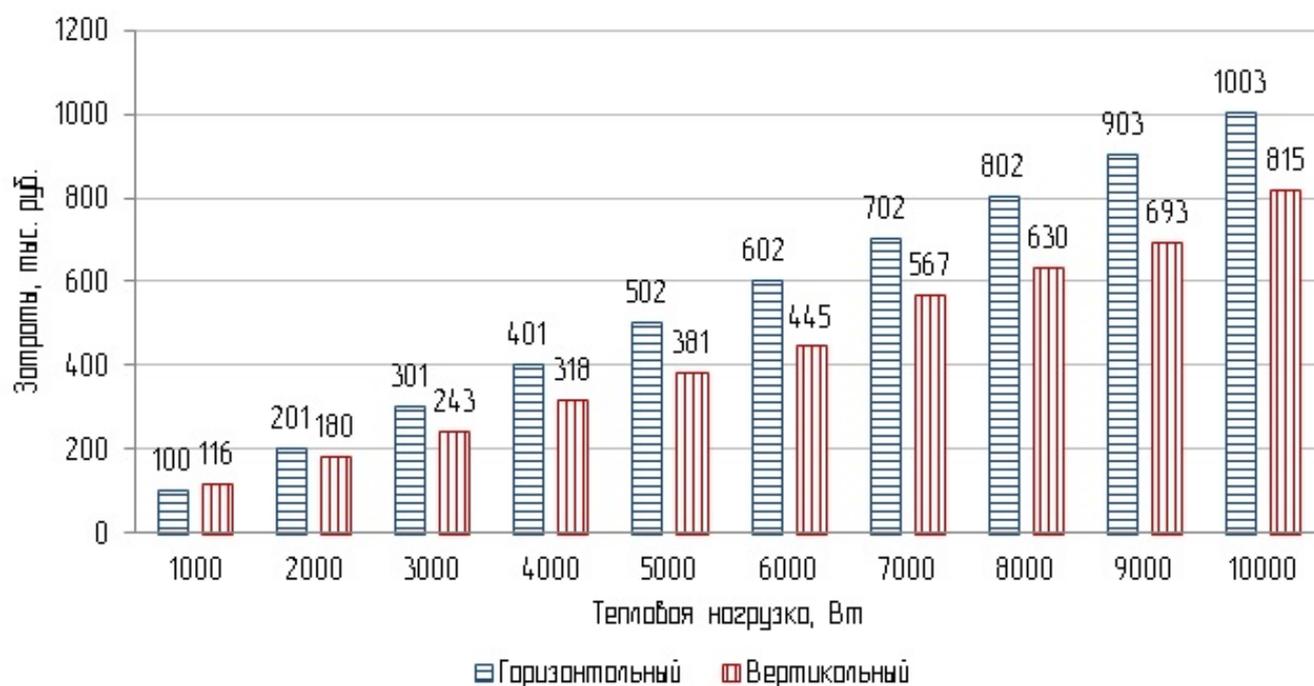


Рисунок 1.6 - Затраты на устройство систем с горизонтальными и вертикальными грунтовыми теплообменниками, в зависимости от требуемой тепловой нагрузки.

По результатам расчетов видно, что для устройства системы с горизонтальными грунтовыми теплообменниками требуется больше затрат, чем для системы с вертикальными теплообменниками. Безусловно, приведенные цифры по стоимости работ условны, и на практике они будут отличаться, но при этом всё равно сохранится такая же разница между данными системами, с небольшой погрешностью в ту или другую сторону.

Таким образом, становится очевидным преимущество вертикальных грунтовых теплообменников относительно горизонтальных.

Частным случаем вертикальных замкнутых систем является использование в качестве грунтовых теплообменников строительных конструкций, например, фундаментных свай с замоноличенными трубопроводами. Грунтовой массив и строительные конструкции с грунтовыми теплообменниками могут использоваться не только как источник, но и как естественный аккумулятор тепловой энергии или «холода», например, тепла солнечной радиации. [15]

Еще один вид замкнутой системы - наклонные грунтовые теплообменники. Конструктивно они состоят из двух магистральных труб, двух коллекторов и испарителей - U-образные теплообменники, выполненные из медных или высококачественных стальных труб диаметром 1/2" - 1/4". Особенность такой системы заключается в том, что трубки грунтового теплообменника располагают под углом $30^\circ - 45^\circ$ относительно поверхности земли на глубину 15-30 метров и фактически из одной точки (рисунок 1.7). [94, 97]



Рисунок 1.7 - Наклонные грунтовые теплообменники.

Такие теплообменники удобно применять, если отсутствует свободная площадь на участке для строительства вертикальных грунтовых теплообменников и тем более горизонтальных. Фактически для устройства геотермального поля для целей тепло-холодоснабжения дома с отапливаемой площадью до 600 м² достаточно площади 4 м² на территории непосредственно прилегающей к дому.[94] А относительно небольшая глубина скважин, по сравнению с системой вертикальных грунтовых теплообменников, связана с использованием труб, имеющих высокий коэффициент теплопроводности, и то, что теплообменники являются "испарителем" теплового насоса, всё это повышает теплосъем с метра скважины. Но между тем, интенсивное выкачивание тепла из грунтового массива может привести к его обмерзанию вокруг труб, следовательно, требуется большее время для восстановления энергетического потенциала грунта и специализированные мероприятия.

Существуют системы использования низкопотенциального тепла земли, которые нельзя однозначно отнести к открытым или замкнутым. Например, одна и та же глубокая (глубиной от 100 до 450 м) скважина, заполненная водой, может быть, как эксплуатационной, так и нагнетательной. Диаметр скважины обычно составляет 15 см. В нижнюю часть скважины помещается насос, посредством которого вода из скважины подается к испарителям теплового насоса. Обратная вода возвращается в верхнюю часть водяного столба в ту же скважину. Происходит постоянная подпитка скважины грунтовыми водами, и открытая система работает подобно замкнутой. Но применение такой технологии извлечения низкопотенциального тепла возможно не везде и затраты на такую систему достаточно велики не только при монтаже, но и при ее эксплуатации. [14]

Таким образом, в мире накоплен достаточный опыт, разработано множество вариантов конструкций грунтовых теплообменников для систем тепло- и холодоснабжения зданий, использующих низкопотенциальное тепло массива грунта. Эти системы представляют собой надежный источник энергии, который может быть использован в течение достаточно длительного времени. В

зависимости от имеющихся возможностей, выбирают тот или иной вид грунтового теплообменника, но очевидным преимуществом, по моему мнению, обладает вертикальный грунтовой теплообменник, так как он в меньшей степени зависит от сезонных колебаний температуры наружного воздуха и солнечной радиации, не требует наличия большой территории, и может быть установлен практически везде, несмотря на то, какой дебет имеет скважина.

1.3 Монтаж вертикальных грунтовых теплообменников

Вертикальные грунтовые теплообменники опускаются в предварительно пробуренные скважины. Чаще всего применяется мокрое вращательное или шнековое бурение.

При мокром вращательном бурении необходимо предусмотреть меры (использование стальных обсадных труб, глинизация), чтобы скважины оставались открытыми довольно значительное время до того, как в них будут опущены трубы.

Для большей гарантии герметичности все стыки труб, укладываемых в землю, должны соединяться термической сваркой, а не соединяться чисто механическими способами. [54] Применение полиэтиленовых труб, при изготовлении грунтовых теплообменников, позволяет обеспечить герметичность соединений, а также увеличить срок службы данных устройств.

Грунтовые теплообменники U-образного типа, выполненные из полиэтиленовых труб, поставляются в бухтах по 60-90 метров. Герметичный грунтовой теплообменник погружается в скважину, по мере погружения через каждые 7-8 метров специальными фитингами фиксируется расстояние между подъемной и опускной трубой. После погружения, U-образный теплообменник заполняется незамерзающей жидкостью и до заключительного этапа на выпуски труб временно устанавливаются заглушки.

Оставшееся пустое пространство в скважине, после погружения труб грунтового теплообменника, заполняют наполнителем. На сегодняшний момент, рекомендуемым наполнителем для скважин является бентонит, в редких случаях применяют цементные растворы.

Цементные растворы легко перекачиваются и смешиваются, могут быть легко изменены, применяя различные добавки, но кроме того, они имеют ряд недостатков: усадка, продолжительный период затвердевания, эффекты, связанные с гидратацией цемента. [107] Применение цементных растворов не позволяет производить ремонтные работы скважины в случае необходимости.

Заполнение объема скважины наполнителем необходимо для увеличения удельного теплосъема с одного погонного метра длины грунтового теплообменника и удаления из скважины воздуха, снижающего усредненное значение теплоемкости и теплопроводности грунта.

Заключительный этап работ включает соединение выпусков вертикальных теплообменников в коллекторы и их ввод в здание через отверстия в фундаменте.

1.4 Исследование теплофизических свойств бентонита - наполнителя скважин системы сбора низкопотенциальной энергии грунта

Знание теплофизических свойств наполнителя скважин является важным моментом при расчетах теплообменных процессов, происходящих в системах сбора низкопотенциальной энергии грунта.

Бентонитовыми глинами (бентонитами) принято называть тонкодисперсные глины, состоящие не менее чем на 60-70 % из минералов группы монтмориллонита, обладающие высокой связующей способностью, адсорбционной и каталитической активностью, сильно набухают, превращаясь в студнеобразную массу. В качестве примесей в бентонитах встречаются смешанослойные минералы, гидрослюда, палыгорскит, цеолиты, каолинит, галлуазит и др. [47]

По химическому составу бентониты можно подразделить на щелочные и щелочноземельные.

Щелочные бентониты характеризуются высокой набухаемостью, коллоидальностью, пластичностью и максимально возможной для глин связующей способностью. Они относятся в основном к категории высококачественного сырья, которое используется во многих отраслях промышленности. В связи со спецификой их образования и почти повсеместным их переходом в приповерхностных зонах (зона окисления) в щелочноземельные, залежи щелочных бентонитов, доступные для открытой разработки, крайне редки.[47]

Щелочноземельные бентониты характеризуются меньшей гидрофильностью и связующей способностью. Они, как правило, уступают по качеству щелочным бентонитам, в естественном состоянии к использованию в ряде отраслей народного хозяйства пригодны мало. Щелочноземельные бентониты при облагораживании натриевыми препаратами (в количестве 2-5% от веса бентонита) преобразуются в щелочные, с присущими им свойствами. [47]

Плотность бентонитов изменяется в среднем от $1,4 \text{ т/м}^3$ до $2,84 \text{ т/м}^3$, в зависимости от плотности частиц, слагающих их, содержания влаги и наличия примесей.

При увеличении содержания железа плотность бентонитов изменяется в среднем от $2,66 \text{ т/м}^3$ до $2,84 \text{ т/м}^3$. Повышение плотности бентонитов связано также с минералами-примесями, например с хлоритом, гидромусковитом, карбонатами кальция и магния, тяжелыми терригенными и аутогенными минералами. Чем больше в бентонитах минералов монтмориллонитовой группы, а также органических веществ, тем меньше будет их плотность. [34, 61]

Чем больше плотность у бентонита, тем выше значение его коэффициента теплопроводности, и соответственно температуропроводности. Данное утверждение основано на результатах, полученных экспериментальным путем, некоторыми исследователями [48, 103, 108, 111].

Бентониты, как и любые глины, являются трехкомпонентной системой, состоящей из минерального скелета, воды и воздуха. Минеральные частицы бентонитов занимают лишь часть объема (55 – 68%), остальную часть объема составляют поры, заполненные водой, и небольшое количество (2%) воздуха.

В средних значениях бентониты характеризуются как среднепористые породы. Коэффициент пористости их колеблется в пределах от 0,48 до 0,80, а у железистых монтмориллонитов до 1, в среднем составляет 0,55. Соответственно изменяются и значения естественной пористости.

Пористость различных в генетическом отношении бентонитов неодинакова. Она отображает колебания гранулярного и минерального составов пород. Там, где больше содержится мелкопелитовых частиц, всегда больше породообразующего монтмориллонита и в соответствии с этим изменяется пористость. Наибольшая пористость (44,4 %) присуща элювиальным бентонитам. Близкими значениями пористости характеризуются осадочные (32,4 %) и вулканогенно-осадочные (34,2 %) бентониты. Гидротермальные бентониты обладают пористостью в среднем 32,9 %. [34, 61]

Значения теплоемкости, коэффициента теплопроводности и температуропроводности играют важную роль в процессах теплообмена. На значения данных показателей влияет множество факторов. В работах зарубежных исследователей [103, 107, 108, 111], приводятся значения теплофизических параметров бентонита, полученных как экспериментальным путем, так и теоретическим. Наиболее полные данные по значениям теплоемкости, коэффициента теплопроводности и температуропроводности представлены в работе [103], таблица 1.1. Автором проведены экспериментальные исследования для образцов из бентонита, при различной плотности и влажности, и сопоставлены с математическими моделями других авторов [99, 102 104].

Значения коэффициента теплопроводности, полученные в работе [103] экспериментальным путем для образцов с одинаковой влажностью 4,2%, схожи со значениями, приведенными в работе [101], а также были сопоставлены с

математическими моделями, позволяющих получить данный параметр теоретически, у других авторов (рисунок 1.8). Согласно одной из моделей [99, 104], значение коэффициента теплопроводности бентонита ненасыщенного водой можно рассчитать по формуле:

$$\lambda = \lambda_0 + K_e \cdot (\lambda_1 - \lambda_0) \quad (1.1)$$

$\lambda_0 = 0,034 \cdot n^{-2,1}$ - коэффициент теплопроводности полностью сухого образца;

$\lambda_1 = 0,56^n \cdot 2^{1-n}$ - коэффициент теплопроводности насыщенного водой образца;

$$K_e = 1 + \log S_r \quad (1.2)$$

где n - пористость, S_r - влажность, %.

Таблица 1.1 - Теплофизические параметры для образцов из бентонита с постоянной влажностью и различной плотности [103]

Образец	Плотность, т/м ³	Влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Температура проводность, 10 ⁻⁷ м ² /с	Теплоемкость, 10 ⁶ , Дж/м ³ ·К
1	1,96	4,2	0,84	4,11	2,05
2	1,97	4,2	0,82	4,62	1,79
3	2,09	4,2	0,96	4,95	1,95
4	2,17	4,1	1,08	4,78	2,26
5	2,17	11,0	1,01	4,08	2,48
6	2,12	13,9	1,15	4,28	2,69
7	2,11	12,1	1,08	4,25	2,54
8	2,11	9,5	1,05	4,15	2,53

Данная модель дает приемлемые прогнозы коэффициента теплопроводности для уплотненного бентонита с низкой степенью влажности, но она имеет тенденцию к завышению значений при более высокой плотности (кривая А, рисунок 1.8).

Другая модель [102], представленная на рисунке 1.8 кривой В, недооценивает экспериментально полученные данные (рисунок 1.8, точки в форме ромба) систематически, примерно на 25 %.

Из полученных значений коэффициента теплопроводности и температуропроводности бентонита, можно получить величину объемной теплоемкости:

$$c = \frac{\lambda}{a} \quad (1.3)$$

где λ - коэффициент теплопроводности (Вт/м·К), a - температуропроводность ($\text{м}^2/\text{с}$), c - объемная теплоемкость ($\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$).

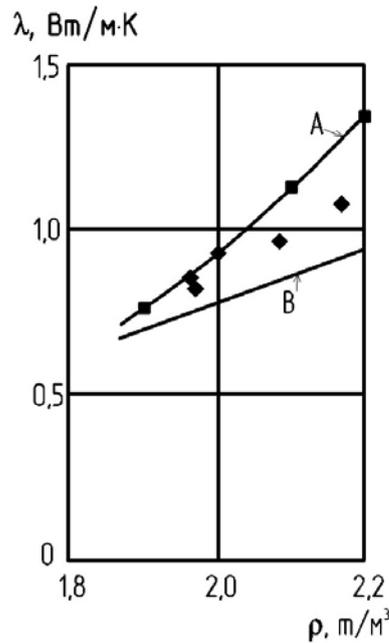


Рисунок 1.8 - Зависимость коэффициента теплопроводности бентонита от его плотности. Кривая А - иллюстрирует модель [99, 104], кривая В - иллюстрирует модель [102], точки в форме ромба - экспериментальные данные работы [103].

Если содержание влаги оказывает сильное влияние на бентонит, то с практической точки зрения, величину объемной теплоемкости считают по другой формуле:

$$c = \frac{\rho}{1+w} \cdot (c_s + c_w \cdot w) \quad (1.4)$$

где c_w - массовая теплоемкость воды ($4,2 \text{ кДж}/\text{кг}\cdot\text{К}$), w - содержание воды, c_s - массовая теплоемкость бентонита, ρ - объемная плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$).

Данная формула отражает зависимость между объемной и массовой теплоемкостями по отношению к содержанию воды в бентоните.

На практике для заполнения пустого пространства в скважине сухой бентонит не применяют, следовательно, в дальнейшем будут учитываться только свойства образцов насыщенных водой.

Выбор бентонита, в качестве наполнителя скважин, основывался не только на рассмотренных выше свойствах, но и на его хорошей проникающей способности, благодаря которой он обеспечивает плотный контакт между массивом грунта и трубами грунтового теплообменника. Также еще одной важной особенностью данного материала, является его способность при взаимодействии с водой превращаться в плотное гелеобразное вещество, что, в свою очередь, должно было обеспечить возможность замены или ремонта грунтовых теплообменников, в случае аварии. При практическом применении оказалось, что бентонит из плотной гелеобразной массы, со временем превращается в более твердый материал, вследствие чего становится невозможным извлечь и отремонтировать грунтовый теплообменник.

Серьезным недостатком раствора бентонита является его чувствительность к отрицательным температурам, которые могут возникать в грунтовом теплообменнике при работе геотермального теплового насоса. Бентонитовая смесь с высоким содержанием воды, в случае замораживания, может привести к увеличению давления на сжатие труб, за счет объемного расширения при фазовом переходе воды в лёд, и возникает угроза повреждения труб теплообменника. [107]

Большинство месторождений во всех странах содержат щелочноземельные бентониты, в то время как высококачественные щелочные бентониты имеют ограниченное распространение и сосредоточены в месторождениях вулканогенно-осадочного и гидротермально-метасоматического геолого-промышленного типов. Наиболее крупными запасами щелочных бентонитов обладают США, Турция, Греция. [47]

Следует отметить, что около 38% от общего объема добычи щелочных бентонитов приходится на США, второе и третье места по объемам добычи занимают Греция (9%) и Турция (6%). [47]

Следовательно, можно предположить, что бентонит был выбран в качестве рекомендуемого наполнителя скважин благодаря США, так как они обладают большими запасами бентонитовых глин и являются одними из первых стран, где начали применять технологии по сбору низкопотенциальной энергии грунта.

Добыча и производство высококачественных бентонитовых глин в России в настоящее время сильно отстают от потребностей в них народного хозяйства, это касается и приготовления буровых растворов. [47]

В нашей практике по созданию системы СНЭГ, мы столкнулись с трудностью доставки бентонита и его высокой стоимостью: на сегодняшний день ориентировочная стоимость бентонита в России от 25000-30000 руб./тонна, доставка в регионы осуществляется только вагонами. А так как наполнитель скважин необходим для обеспечения хорошего контакта между массивом грунта и трубами грунтового теплообменника, следовательно, обойтись без него нельзя. Соответственно, нужен другой материал с сопоставимыми бентониту теплофизическими свойствами.

1.5 Выводы

Анализируя, проведенные исследования в области использования низкопотенциальной тепловой энергии массива грунта в геотермальных теплонасосных системах тепло- холодоснабжения зданий и сооружений, можно сделать вывод, что недостаточно изучен вопрос о наполнителях скважин, их влиянии на процесс теплообмена между грунтом и трубами грунтового теплообменника, а также нет индивидуального подхода при проектировании системы сбора низкопотенциальной теплоты грунта.

Исследования процессов теплообмена, представленные в работах российских авторов, моделировались на грунтовом теплообменнике только коаксиального типа, и не учитывался наполнитель скважины, который обязательно должен использоваться при монтаже таких систем. Исходя из этого, можно сделать вывод, что отсутствует методика расчета вертикальных грунтовых теплообменников U-образного типа с учетом наполнителя скважин. Помимо этого нет точных данных о необходимом расстоянии между скважинами с грунтовыми теплообменниками, учитывая разнообразие теплофизических свойств массива грунта, и возможные режимы эксплуатации теплообменного оборудования.

На основе опыта применения систем сбора низкопотенциальной энергии грунта в зарубежных странах, рекомендуемым наполнителем скважин является бентонитовая глина. Но так как добыча и производство высококачественных бентонитовых глин в России в настоящее время сильно отстают от потребностей в них, и данный материал имеет высокую стоимость, то возникает необходимость в нахождении альтернативного материала для заполнения скважин грунтовых теплообменников.

На основе рассмотренных типов грунтовых теплообменников, самым оптимальным является вертикальный, как наиболее стабильный, эффективный, и который практически везде можно устанавливать. Намечены пути повышения его эффективности:

- разработка новой конструкции вертикального грунтового теплообменника, имеющего развитую поверхность для теплообмена с грунтовым массивом;
- разработка новой конструкции вертикального грунтового теплообменника, с учетом влияния свойств наполнителя на процесс теплообмена в скважине;
- разработка новой конструкции вертикального грунтового теплообменника, позволяющего интенсивнее производить процесс восстановления энергетического потенциала грунта.

1.6 Постановка цели и задач исследования

Выполненный аналитический обзор исследований в области использования низкопотенциальной тепловой энергии массива грунта в геотермальных теплонасосных системах тепло- холодоснабжения зданий и сооружений, позволил установить не до конца изученные вопросы и на их основе осуществить постановку:

- цели работы: разработка эффективных технических решений для систем сбора низкопотенциальной энергии грунта и методики расчета грунтовых теплообменников U-образного типа с возможностью учета индивидуальных особенностей объекта строительства.

- задачи исследования:

1. Провести исследования свойств альтернативного наполнителя и оценить возможность его применения в скважинах с грунтовыми теплообменниками.

2. Разработать физико-математическую модель работы U-образного грунтового теплообменника.

3. Для исследования процессов теплообмена при работе грунтовых теплообменников и проверки достоверности математической модели разработать имитационную установку грунтового теплообменника.

4. Разработать методику расчета вертикальной системы сбора низкопотенциальной энергии грунта, учитывающую индивидуальные особенности объекта проектирования.

5. Разработать новую эффективную конструкцию грунтового теплообменника.

6. Разработать рекомендации для проектирования систем тепло- и холодоснабжения зданий на базе геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ НАПОЛНИТЕЛЕЙ СКВАЖИН С ГРУНТОВЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ

Грунтовые теплообменники являются важным элементом системы сбора низкопотенциальной энергии грунта. Анализ различных типов грунтовых теплообменников показал, что наилучшими эксплуатационными и теплотехническими характеристиками обладают грунтовые теплообменники, устанавливаемые в вертикальных скважинах. В настоящее время скважины, в которые опускают трубы теплообменников, рекомендуется заполнять бентонитом – разновидностью глины.

При практической реализации системы сбора низкопотенциальной энергии грунта, возникла необходимость поиска материала, альтернативного бентониту, для заполнения свободного пространства в скважине. Очевидно, что необходим такой материал, при заполнении которым не будет пустот в скважине и обеспечивается хороший контакт массива грунта с трубами теплообменника, кроме того, обладающий свойствами схожими с теплофизическими свойствами бентонита, при меньшей стоимости и большей доступности.

Основываясь на данных о рекомендуемом наполнителе - бентоните, и своих наблюдениях при практической реализации вертикальных систем СНЭГ, альтернативный материал для заполнения скважин должен отвечать следующим требованиям:

- равномерное заполнение всего свободного пространства в скважине;
- создавать хороший контакт, без воздушных зон, с массивом грунта и трубами грунтового теплообменника;
- коэффициент теплопроводности не менее $0,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;
- легкодоступный материал;
- низкая стоимость.

Изучив рынок строительных материалов, и исследования, приведенные в работе [101], предложено рассмотреть в качестве наполнителя скважины - песок, как наиболее распространенный и недорогой материал. Стоимость песка составляет 900 руб./тонна с учетом доставки, что примерно в 30 раз дешевле стоимости бентонита. Для проверки соответствия песка предъявляемым требованиям к наполнителю скважин с грунтовыми теплообменниками, необходимо исследовать его теплофизические свойства.

Основными показателями, определяющими теплофизические свойства материала, являются теплоемкость, коэффициент теплопроводности и температуропроводность.

Очевидно, что увлажненный песок будет обладать лучшими теплофизическими свойствами, чем сухой, но необходимо провести сравнительный анализ, рассмотреть несколько вариантов заполнения скважины: два крайних случая, когда скважина заполнена сухим песком или водой, и промежуточные варианты, когда наполнителем является увлажненный песок и водно-песчаный раствор. В результате сравнительного анализа, выявить достоинства и недостатки перечисленных наполнителей и установить какие из них лучше подходят для обеспечения эффективного процесса теплообмена в системе СНЭГ.

2.1 Наполнитель скважины - сухой песок. Теплофизические свойства сухого песка

Песок - это рыхлое физическое тело, состоящее из минералов и обломков горных пород с размерностью зерен 1-0,05 мм и обладающих свойством сыпучести. По размеру фракций наиболее распространены крупный, средний, мелкий и тонкий пески. [18]

Песок состоит из твердых минеральных частиц и расположенных между ними пустот - пор, которые могут быть заполнены воздухом или водой. Таким

образом, твердые минеральные частицы, вода и воздух являются основными компонентами песка, и в общем случае он представляет собой трехфазную систему. Но в случаях, когда все поры полностью заполнены только водой или только воздухом, песок можно рассматривать как двухфазную систему. В естественных условиях практически не встречаются абсолютно сухие породы, так как они всегда содержат некоторое количество воды, поэтому под сухим песком принимается дисперсная система, в которой содержание воды минимально.

Теплофизические параметры сухого песка имеются в справочной и нормативной литературе, в таблице 2.1 приведены значения этих параметров из [70, приложение Г].

Таблица 2.1 - Теплофизические свойства сухого песка плотностью
1600 кг/м³

Влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Температуропроводность, 10 ⁻⁷ м ² /с	Теплоемкость, 10 ⁶ , Дж/м ³ ·К
0	0,35	2,60	1,34

Очевидно, что применение сухого песка в качестве наполнителя скважины не удовлетворяет требованию по коэффициенту теплопроводности - менее 0,8 Вт/(м·К), и он будет служить теплоизолятором, а не теплопроводящим материалом. Кроме того, скважина, заполненная сухим песком, содержит большое количество воздуха, что еще больше понизит значение коэффициента теплопроводности такого наполнителя. Следовательно, сухой песок не рекомендуется применять в качестве наполнителя скважины.

А так как известно, что даже при незначительном увлажнении песка его коэффициент теплопроводности увеличивается, следовательно, стоит рассмотреть свойства увлажненного песка и оценить возможность его применения в качестве наполнителя скважины.

2.2 Наполнитель скважины - увлажненный песок. Теплофизические свойства увлажненного песка

Теплофизические характеристики увлажненного песка, как и всякой дисперсной системы, тесно связаны с гранулометрическим составом ее твердой фазы. От размеров частиц, контактов между ними, общей пористости и размера отдельных пор непосредственно зависят теплопроводность и температуропроводность материала. Преобладание в песках крупных и средних пор обеспечивает их высокую воздухо- и водопроницаемость. Необходимо установить степень влияния тех или иных факторов на теплофизические свойства песка.

Исследованиями теплофизических характеристик зернистых материалов различной степенью влажности занимались Б.Н. Кауфман [32], А.Ф. Чудновский [80], А.У. Франчук [77] и другие специалисты [5, 13, 18, 24, 79]. На основе указанных работ изучены свойства увлажненного песка, определен характер влияния различных факторов на его теплофизические параметры, и получены математические зависимости для определения данных параметров.

Количественная оценка теплофизических параметров увлажненного песка представляет собой сложную задачу, поскольку требуется рассмотрение процесса теплопередачи в трехфазной системе. [80]

Для расчета коэффициента теплопроводности увлажненного песка необходимо иметь представление о формах связи влаги с зернами на различных стадиях увлажнения материала. Незнание механизма связи влаги с зернами не позволяет рассмотреть трехфазный вариант. Для того чтобы избежать трудностей расчета, связанных с неизвестностью точной картины распределения влаги в междузерновом пространстве, можно не рассматривать промежуточные стадии увлажнения, а решение задачи свести к рассмотрению увлажненного песка, как дисперсного материала, представляющего собой двухфазную систему, так как для

описания термодинамической системы используются макроскопические физические величины, характеризующие не свойства составляющих ее частиц, а свойства самой системы в целом.

В своих исследованиях Б.Н. Кауфман [32], рассматривая влажные зернистые материалы, как двухфазную систему, сделал следующие выводы о влиянии влагосодержания на коэффициент теплопроводности зернистых материалов:

1. Величина прироста коэффициента теплопроводности $\left(\delta_w = \frac{\partial \lambda}{\partial w}\right)$ на 1% объемной влажности уменьшается с повышением веса материала;

2. Величина прироста коэффициента теплопроводности не изменяется до той степени влагосодержания, которая соответствует переходу влаги из внутризерновых в междузерновые поры. При последующем увлажнении прирост коэффициента теплопроводности резко уменьшается (рисунок 2.1);

3. Линейная зависимость коэффициента теплопроводности наблюдается в первый период увлажнения зернистых материалов до влажности в 15-20%.

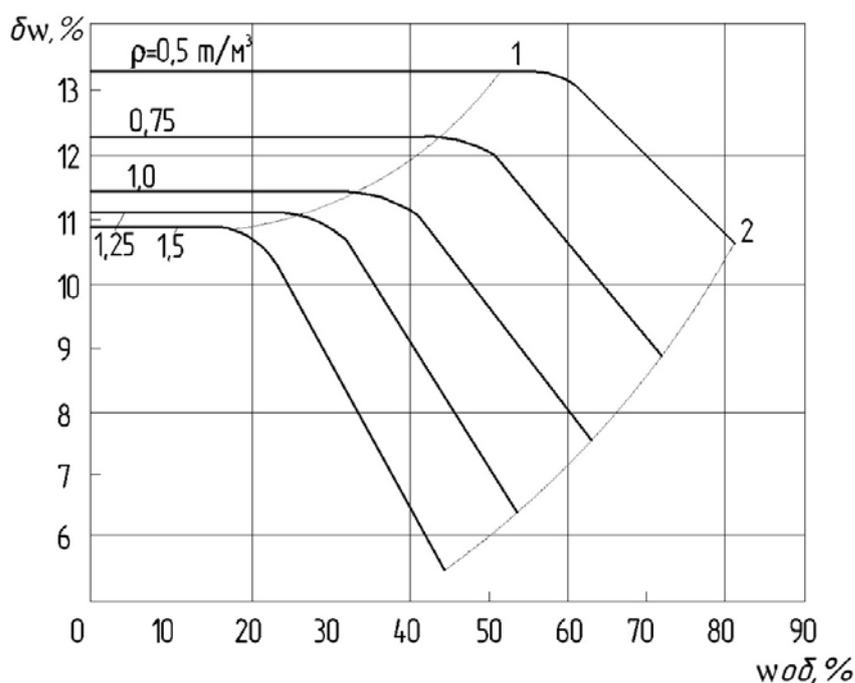


Рисунок. 2.1 - Кривые влияния влажности на теплопроводность зернистых материалов разной плотности. 1 - граница полного влагонасыщения зерен, 2 - граница полного влагонасыщения междузерновых пустот. [32]

Из рисунка видно, что момент снижения интенсивности прироста коэффициента теплопроводности, соответствует моменту превышения общего содержания влаги в зернистых материалах над степенью полного влагонасыщения зерен.

В соответствии с выводами автора [32], для зернистых материалов объемной влажностью до 20%, рост коэффициента теплопроводности можно принять линейным и рассчитать по следующей формуле:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \left(1 + \frac{\delta_w \cdot w}{100} \right) \quad (2.1)$$

где λ , λ_0 - коэффициент теплопроводности расчетный и соответственно в сухом состоянии (Вт/м·К), δ_w - величина прироста коэффициента теплопроводности (%), w - влагосодержание (%).

Однако, теоретические вычисление величины прироста коэффициента теплопроводности ($\delta_w, \%$) для зернистых материалов кристаллической структуры автором не определено, а выбор данного значения, используя рисунок 2.1, вносит ограничения по плотности – не более $1,5 \text{ т/м}^3$. Таким образом, можно сделать вывод, что применение формулы (2.1) для определения ориентировочного значения коэффициента теплопроводности увлажненного песка возможно при условии, плотность песка не более $1,5 \text{ т/м}^3$ и его объемная влажность не более 20 %.

Также в работе [32] автором не отмечено, что на характер зависимости $\lambda=f(w)$, имеют влияние такие факторы как: плотность, пористость и дисперсность материала. Общая характеристика влияния данных факторов на зависимость $\lambda=f(w)$ рассмотрена в другой работе [80], где указано, что плотность имеет качественное влияние на коэффициент теплопроводности, наблюдается интенсивный рост теплопроводности с увеличением влажности при различной пористости (рисунок 2.2), а также экспериментально установлено, что у крупнодисперсных материалов коэффициент теплопроводности выше, в

сравнении с мелкодисперсными (рисунок 2.3). Однако описанная выше характеристика приведена на основе экспериментальных данных и теоретически не подкрепляется какой-либо математической зависимостью, позволяющей определить коэффициенты теплопроводности увлажненных зернистых материалов.

Так как целью исследования является увлажненный песок, то для получения математического описания, зависимости коэффициента теплопроводности увлажненного песка от различных факторов, изучены экспериментальные данные теплотехнических показателей песка различной плотности и степенью влажности.

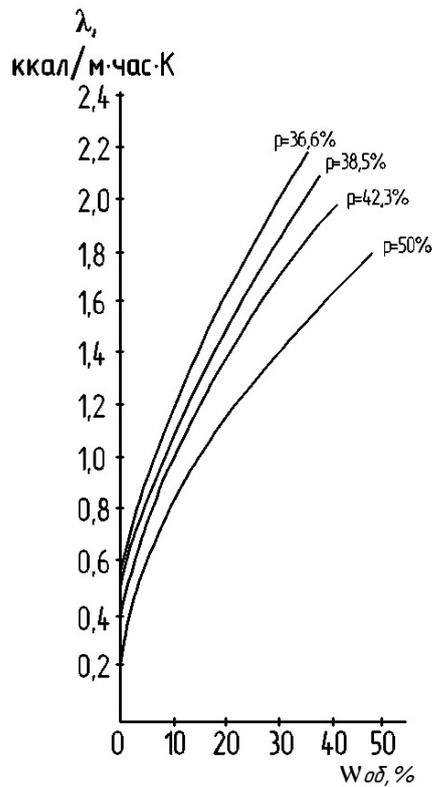


Рисунок 2.2 - Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности при различной степени пористости зернистых материалов.

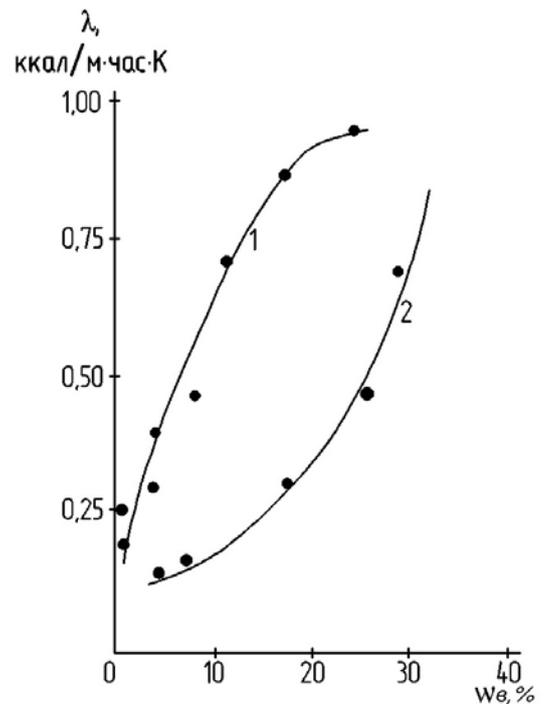


Рисунок 2.3 - Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности для крупнозернистых (1) и мелкозернистых (2) материалов.

Учитывая, что необходимо найти зависимость коэффициента теплопроводности только для песка различной степени влажности, то дисперсность материала можно не рассматривать и, следовательно, имеющихся

экспериментальных данных достаточно для получения требуемой математической модели.

Таким образом, необходимо исследовать зависимость $\lambda=f(\rho, w)$, математическое описание для которой примет вид линейного уравнения регрессии, представляющего собой полином первой степени: $y=a+b_1 \cdot x_1+b_2 \cdot x_2$. Здесь y - коэффициент теплопроводности песка (Вт/м·К), x_1 - плотность песка (т/м³), x_2 - объемная влажность песка (%), a, b_1, b_2 - коэффициенты регрессии.

Используя методы математической статистики, было проведено аппроксимирование экспериментальных данных и определены коэффициенты регрессии, с учетом этого, зависимость, описывающая коэффициент теплопроводности песка от плотности и влажности имеет следующий вид:

$$y = -1,337 + 1,245 \cdot x_1 + 0,01 \cdot x_2 \quad (2.2)$$

Коэффициент детерминации для данного уравнения равен $R^2=0,917$, следовательно, 91,7 % вариаций результата объясняется вариацией представленных в уравнении факторов и указывает на весьма их тесную связь с ним.

Частные коэффициенты корреляции, найденные для этой модели, $r_{yx_1x_2}=0,938$ и $r_{yx_2x_1}=0,524$, свидетельствуют о том, что при совместном влиянии плотности и влажности на коэффициент теплопроводности, более существенное воздействие оказывает первый фактор. Но оценивая целесообразность включения фактора x_1 после фактора x_2 и x_2 после x_1 , с помощью частного критерия Фишера: $F_{x_1}=243,82$ и $F_{x_2}=12,49$ при уровне значимости $\alpha=0,05$ (в данном случае оба показателя больше табличного $F_{\text{табл}}=4,14$), можно сделать вывод, что включение каждого фактора в модель статистически оправдано и коэффициенты регрессии b_1 и b_2 статистически значимы. Значимость коэффициентов регрессии b_1 и b_2 также подтверждает фактическое значение t-критерия Стьюдента, рассчитанного для каждого из них: $t_{b_1}=15,615 > t_{\text{табл}}=2,034$, $t_{b_2}=3,534 > t_{\text{табл}}=2,034$ при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Оценка надежности уравнения в целом с помощью F-критерия Фишера показала, что $F_{\text{факт}}=182,127 > F_{\text{табл}}=3,284$ при уровне значимости $\alpha=0,05$, следовательно, уравнение линейной регрессии (2.2) признается статистически значимым и подтверждает тесноту связи факторов с результатом.

Таким образом, зависимость $\lambda=f(\rho, w)$ для песка, достоверно и надежно аппроксимируется, полученным уравнением:

$$\lambda = -1,337 + 1,245 \cdot \rho + 0,01 \cdot w \quad (2.3)$$

Значения коэффициентов теплопроводности песка, рассчитанные согласно (2.3) хорошо согласуются со значениями, полученными в ходе экспериментальных исследований, средняя ошибка аппроксимации составляет 7,7 %. На основе (2.3) построена номограмма для определения коэффициента теплопроводности песка различной плотности и влажности (рисунок 2.4).

С помощью полученного уравнения (2.3) рассчитаны значения коэффициента теплопроводности песка при степени влажности 5 %, 10 %, 15 %, 20 % и 25 %, и плотности 1600-1900 кг/м³, данные приведены в таблице 2.2.

Характер зависимости температуропроводности от влажности $a=f(w)$ для зернистых материалов, в том числе и песка, описан в работе [80] на основе экспериментальных исследований, в результате которых установлено, что с увеличением влажности значение температуропроводности сначала растет, достигает максимума (для песка значение максимума достигается в районе 10 % влажности), затем падает, стремясь в некоторых случаях к постоянному значению.

Также в работе [80] отмечено, что на характер зависимости $a=f(w)$, как в случае с коэффициентом теплопроводности, влияют такие факторы как плотность, пористость и дисперсность материала, но математическая зависимость, описывающая изменение температуропроводности зернистых материалов, под влиянием различных факторов не приведена.

Для получения математического описания, характеризующего зависимость температуропроводности песка от различных факторов, в данном случае от

влажности и плотности, изучены экспериментальные данные теплотехнических показателей песка из работы [77].

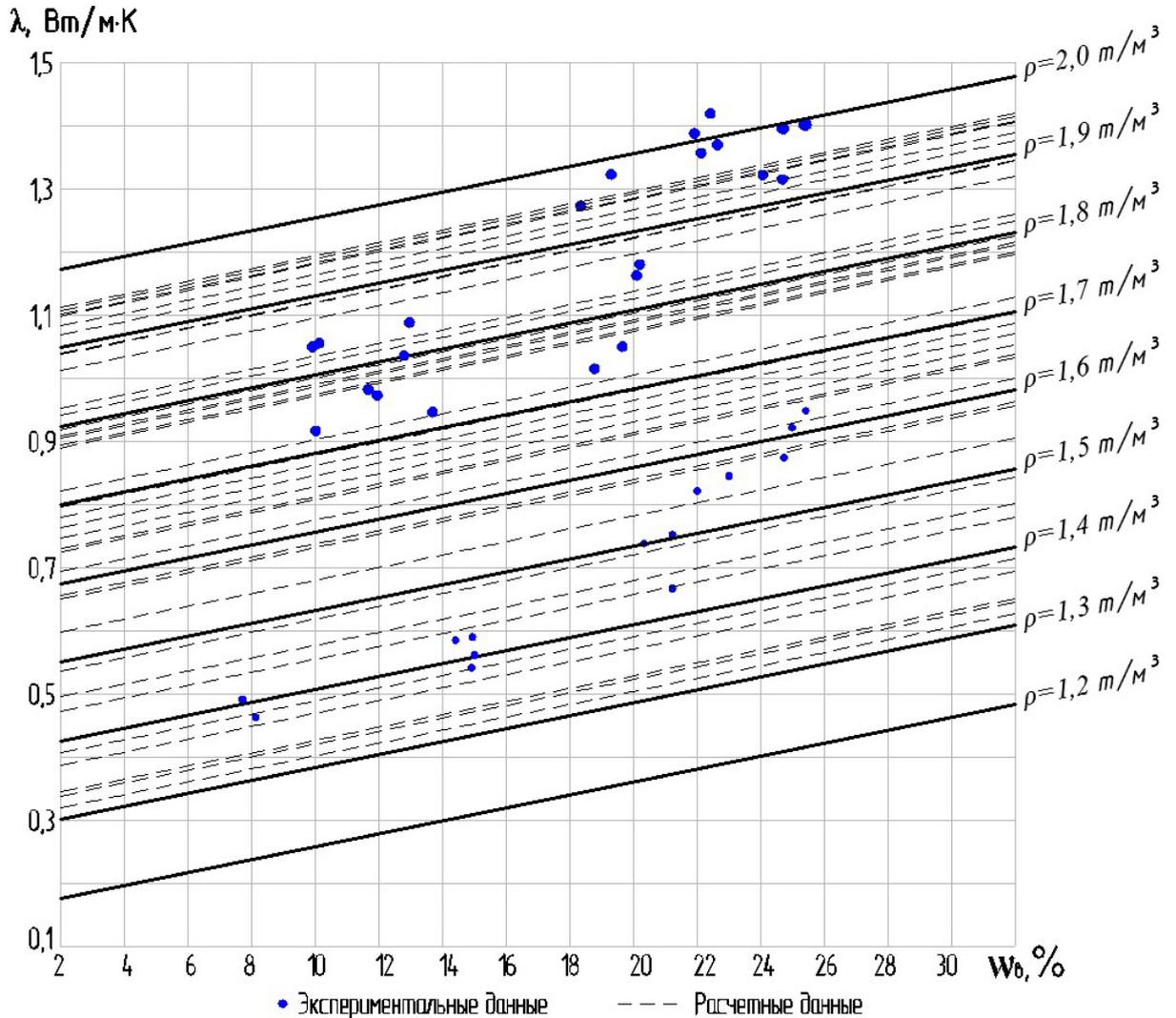


Рисунок 2.4 - Результаты аппроксимации экспериментальных данных коэффициента теплопроводности песка различной плотности и влажности.

Исследуемая зависимость $a=f(\rho, w)$, при этом введя обозначение y - температуропроводность песка (м²/с), x_1 - плотность песка (т/м³), x_2 - объемная влажность песка (%), предполагая, что между переменными y , x_1 , x_2 существует линейная корреляционная зависимость, для которой необходимо найти уравнение регрессии.

Математическая модель примет вид линейного уравнения регрессии, представляющего собой полином первой степени: $y=a+b_1 \cdot x_1+b_2 \cdot x_2$. Применяя

метод наименьших квадратов, получены коэффициенты регрессии для этого уравнения и зависимость температуропроводности от плотности и влажности примет следующий вид:

$$y = -2,103 + 3,997 \cdot x_1 - 0,0163 \cdot x_2 \quad (2.4)$$

Коэффициент детерминации для данной модели равен $R^2=0,852$, следовательно, 85,2 % вариаций результата объясняется вариацией представленных в уравнении факторов и указывает на весьма их тесную связь с ним.

Оценка надежности уравнения в целом с помощью F-критерия Фишера показала, что $F_{\text{факт}}=95,209 > F_{\text{табл}}=3,284$ при уровне значимости $\alpha=0,05$, следовательно, уравнение линейной регрессии (2.4) признается статистически значимым и подтверждает тесноту связи факторов с результатом.

Частные коэффициенты корреляции, найденные для этой модели, $r_{yx_1x_2}=0,916$ и $r_{yx_2x_1}=0,257$, свидетельствуют о том, как в случае с моделью для коэффициента теплопроводности, что при совместном влиянии плотности и влажности, более существенное воздействие оказывает плотность. Проведя оценку целесообразности включения фактора x_1 после фактора x_2 и x_2 после x_1 , с помощью частного критерия Фишера: $F_{x_1}=171,52 > F_{\text{табл}}=4,14$ и $F_{x_2}=2,32 < F_{\text{табл}}=4,14$ при уровне значимости $\alpha=0,05$, можно прийти к выводу, что включение фактора x_1 в модель статистически оправдано и коэффициент чистой регрессии b_1 статистически значим, а дополнительное включение фактора x_2 , после того, как уже введен фактор x_1 нецелесообразно. Незначимость коэффициента регрессии b_2 подтверждает фактическое значение t-критерия Стьюдента: $t_{b_2}=1,525 < t_{\text{табл}}=2,034$ при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Таким образом, отбросив из уравнения фактор x_2 , и уточнив при этом оставшиеся в уравнении коэффициенты регрессии, получается зависимость $a=f(\rho)$ для песка, с высоким значением коэффициента детерминации и надежностью, которую можно описать следующим уравнением:

$$a = -2,087 + 3,812 \cdot \rho \quad (2.5)$$

Для измененной модели (2.5) коэффициент детерминации $R^2=0,842$, оценка надежности уравнения в целом по критерию Фишера $F_{\text{факт}}=87,858 > F_{\text{табл}}=3,284$ при уровне значимости $\alpha=0,05$, сохранила значение больше табличного, соответственно уравнение линейной регрессии (2.5) признается статистически значимым с высокой степенью тесноты связи фактора с результатом.

Значения температуропроводности песка, рассчитанные с помощью уравнения (2.5), сопоставлены с данными полученными в ходе экспериментальных исследований, отклонение в среднем составляет 6,2 % (рисунок 2.5).

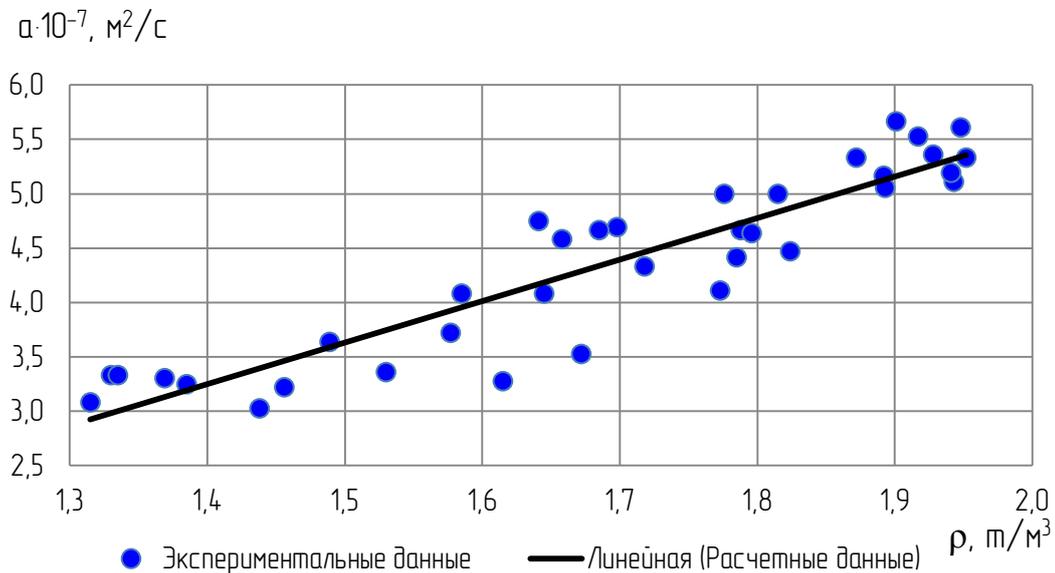


Рисунок 2.5 - Результаты аппроксимации экспериментальных данных температуропроводности песка различной плотности и влажности.

С помощью (2.5) рассчитаны значения температуропроводности песка плотности 1600-1900 $\text{кг}/\text{м}^3$, данные приведены в таблице 2.2.

Используя экспериментальные данные работы [77, таблица 14], а именно значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности песка различной плотности и влажности, по формуле 2.6 были определены значения объемной теплоемкости.

$$c = \frac{\lambda}{a} \quad (2.6)$$

где c - объемная теплоемкость ($\text{Дж}/\text{м}^3\cdot\text{К}$), λ - коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$), a - температуропроводность ($\text{м}^2/\text{с}$).

Применяя методы математической статистики, для рассчитанных значений объемной теплоемкости песка, и исследуя их взаимосвязь с влажностью и плотностью, было получено линейное уравнение регрессии:

$$y = -0,018 + 0,944 \cdot x_1 + 0,031 \cdot x_2 \quad (2.7)$$

Коэффициент детерминации для (2.7) равен $R^2=0,987$, следовательно, 98,7 % вариаций результата объясняется вариацией представленных в уравнении факторов и указывает на их тесную связь с ним.

Частные коэффициенты корреляции, найденные для этой модели, $r_{yx_1x_2}=0,980$ и $r_{yx_2x_1}=0,976$, свидетельствуют о том, что оба фактора оказывают существенное влияние на объемную теплоемкость. Оценка целесообразности включения фактора x_1 после фактора x_2 и x_2 после x_1 , с помощью частного критерия Фишера: $F_{x_1}=815,88$ и $F_{x_2}=671,07$ при уровне значимости $\alpha=0,05$ (в данном случае оба показателя больше табличного $F_{\text{табл}}=4,14$), показала, что включение каждого фактора в модель статистически оправдано и коэффициенты регрессии b_1 и b_2 статистически значимы. Вывод о значимости коэффициентов регрессии b_1 и b_2 подтверждает фактическое значение t -критерия Стьюдента рассчитанного для каждого из них: $t_{b_1}=28,564 > t_{\text{табл}}=2,034$, $t_{b_2}=25,905 > t_{\text{табл}}=2,034$ при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Оценка надежности уравнения в целом по F -критерию Фишера показала, что $F_{\text{факт}}=1268,579 > F_{\text{табл}}=3,284$ при уровне значимости $\alpha=0,05$, следовательно, уравнение линейной регрессии (2.7) признается статистически значимым и подтверждает тесноту связи факторов с результатом.

Таким образом, зависимость $c=f(\rho, w)$ для песка, достоверно и надежно аппроксимируется, полученным уравнением:

$$c = -0,018 + 0,944 \cdot \rho + 0,031 \cdot w \quad (2.8)$$

Значения коэффициентов объемной теплоемкости песка, рассчитанные согласно модели (2.8) хорошо согласуются со значениями, полученными на

основе экспериментальных данных, средняя ошибка аппроксимации 1,1 %. На основе (2.8) построена номограмма для определения теплоемкости песка различной плотности и влажности (рисунок 2.6).

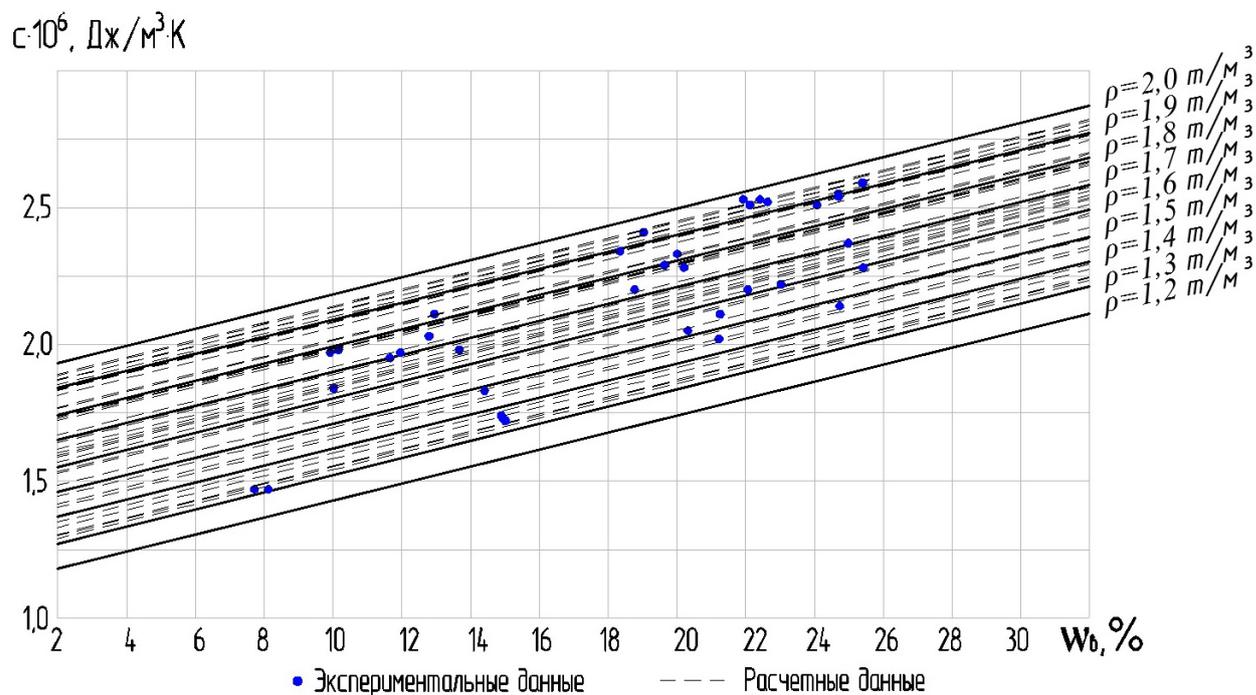


Рисунок 2.6 - Результаты аппроксимации экспериментальных данных объемной теплоемкости песка различной плотности и влажности.

С помощью (2.8) рассчитаны значения объемной теплоемкости песка при степени влажности 5 %, 10 %, 15 %, 20 % и 25 %, и плотности 1600-1900 кг/м³, данные приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Теплофизические свойства песка, рассчитанные на основе предложенных зависимостей (2.3, 2.5, 2.8)

Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Температуро- проводность, 10 ⁻⁷ м ² /с	Теплоемкость, 10 ⁶ , Дж/м ³ ·К
5	1600	0,71	4,012	1,65
10		0,76		1,81
15		0,81		1,96
20		0,86		2,12
25		0,91		2,27

Продолжение таблицы 2.2

5	1700	0,83	4,393	1,74
10		0,88		1,90
15		0,93		2,06
20		0,98		2,21
25		1,04		2,37
5	1800	0,96	4,774	1,84
10		1,01		1,99
15		1,06		2,15
20		1,11		2,31
25		1,16		2,46
5	1900	1,08	5,155	1,93
10		1,13		2,09
15		1,18		2,24
20		1,23		2,40
25		1,28		2,56

По результатам, полученным на основе уравнений (2.3, 2.5, 2.8) можно сделать вывод, что с увеличением только влажности песка при одинаковом объемном весе, коэффициент теплопроводности увеличивается в среднем на 5 %, объемная теплоемкость на 7 %, а значение температуропроводности при этом практически не изменяется и влиянием влажности на этот параметр можно пренебречь. Однако на изменение теплофизических свойств увлажненного песка большое влияние оказывает его плотность, что подтверждает выводы, сделанные в работе [80]. При этом рост коэффициента теплопроводности песка, при постоянной влажности и увеличивающейся плотности, происходит в среднем на 12 %, значение объемной теплоемкости увеличивается в среднем на 4 %, а температуропроводность - на 8 %.

Таким образом, влияние влажности на изменение теплофизических характеристик песка необходимо рассматривать совместно с данными о его плотности.

В соответствии с расчетами, представленными в таблице 2.2 и предъявляемыми требованиями к коэффициенту теплопроводности наполнителя скважины $\lambda \geq 0,8$ Вт/(м·К), в качестве наполнителя можно использовать песок

плотностью 1600 кг/м^3 влажностью от 15 % до 25 %, а также песок плотностью $1700\text{-}1900 \text{ кг/м}^3$ влажностью от 5 % до 25 %. Кроме того, значения теплофизических параметров песка в диапазоне указанном выше сопоставимы с теплофизическими параметрами бентонита (таблица 1.1, 1.2). Однако проведенное исследование увлажнения сухого песка, показало, что песок объемной влажностью от 5 % до 25 % представляет собой рыхлую неоднородную структуру (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 - Песок влажностью 20%.

Практический опыт создания систем СНЭГ, выявил технологическую проблему при заполнении пустого пространства в скважине подобным материалом. Увлажненный песок неравномерно распределяется в пространстве скважины, и, как следствие, происходит образование воздушных зон, которые понижают значение коэффициента теплопроводности материала, и ухудшают процесс теплообмена между массивом грунта и трубами грунтового теплообменника, так как не обеспечивается плотный контакт между ними. Таким образом, применение увлажненного песка в качестве наполнителя скважины не рекомендуется.

Утрамбовка увлажненного песка позволила бы решить проблему образования воздушных зон, но для скважин глубиной в среднем 60 метров это трудновыполнимо. Предотвратить возникновение пустот в скважине и решить проблему технологии заполнения наполнителем, возможно применением водно-песчаного раствора, в качестве наполнителя скважины.

2.3 Наполнитель скважины - водно-песчаный раствор

Водно-песчаный раствор – дисперсный материал, в котором достигнуто полное влагонасыщение зерен и междузерновых пустот песка, а также присутствует некоторое количество воды, не связанной с его твердыми частицами. Технология заполнения скважины подразумевает следующее: водно-песчаный раствор заливают в скважину, благодаря воде песок равномерно распределяется по всему ее объему, его твердые частицы плотно укладываются друг на друга, в процессе оседания, а по мере завершения наполнения свободного пространства в скважине, может наблюдаться излитие свободной воды на ее поверхности.

Для того чтобы определить минимальные пропорции песка и воды, необходимые для образования водно-песчаного раствора, было проведено поэтапное увлажнение высушенного песка средней крупности, плотностью $1,6 \text{ т/м}^3$. Так как его вес в процессе сушки не изменялся, то песок можно было считать сухим, согласно [24]. Было взято три образца высушенного песка одинаковой массы, в каждый из которых постепенно добавлялось определенное количество воды, пока не образовался водно-песчаный раствор. В результате проведенных исследований установлено, что песок плотностью $1600\text{-}1800 \text{ кг/м}^3$ и объемной влажностью 30%-35% представляет собой водно-песчаный раствор (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 - Песок влажностью 30%.

Теплофизические характеристики данного раствора рассчитываются с помощью полученных уравнений (2.3, 2.5, 2.8), которые описывают зависимости $\lambda=f(\rho, w)$, $a=f(\rho)$, $c=f(\rho, w)$. Результаты расчета для 30% водно-песчаного раствора представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Теплофизические свойства водно-песчаного раствора

Влажность, %	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Температу- ропроводность, 10 ⁻⁷ м ² /с	Теплоемкость, 10 ⁶ , Дж/м ³ ·К
30	1600	0,96	4,01	2,43
	1700	1,09	4,39	2,52
	1800	1,21	4,77	2,62

Коэффициент теплопроводности водно-песчаного раствора отвечает требованию $\lambda \geq 0,8$ Вт/(м·К), кроме того, его теплофизические свойства сопоставимы со свойствами бентонита, если сравнить средние значения свойств каждого из материала, то водно-песчаный раствор обладает лучшими показателями для процесса теплообмена (таблица 2.4).

Основным достоинством водно-песчаного раствора является возможность равномерного распределения в пространстве скважины, благодаря воде он частично проникнет в прилегающий массив грунта, создавая плотный контакт, а также обволакивает трубы грунтового теплообменника, тем самым улучшает в целом процесс теплообмена в скважине.

Таблица 2.4 - Средние значения теплофизических свойств водно-песчаного раствора и бентонита

Вид наполнителя	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Температу- ропроводность, 10 ⁻⁷ м ² /с	Теплоемкость, 10 ⁶ , Дж/м ³ ·К
Водно-песчаный раствор	1,15	4,58	2,57
Бентонит	1,00	4,40	2,29

Однако, учитывая, хорошую проникающую способность воды, в более сухие среды, во избежание высыхания водно-песчаного раствора, можно предусмотреть систему периодического увлажнения наполнителя скважины.

Таким образом, водно-песчаный раствор отвечает всем требованиям, предъявляемым к наполнителю скважины и, следовательно, его можно рекомендовать к использованию.

2.4 Обводненная скважина

Последний крайний и возможный случай заполнения скважины водой. На практике встречаются обводненные скважины с различным дебетом воды, малым и большим. Если погрузить трубы грунтового теплообменника в скважину заполненную водой, то очевидно, что процесс теплообмена будет протекать стабильно и эффективно, в силу однородности среды и высокого значения теплоемкости воды, несмотря на более низкие показатели других ее теплофизических параметров (таблица 2.5).

Скважины с высоким дебетом воды редко встречаются и их, как правило, используют для открытых низкопотенциальных систем сбора, так как в этом случае есть возможность получения большого количества тепловой энергии при относительно низких затратах. Однако такие скважины требуют тщательного обслуживания.

Таблица 2.5 -Теплофизические свойства воды [17, 35]

Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Температуропроводность, 10^{-7} м ² /с	Теплоемкость, 10^6 , Дж/м ³ ·К
0,60	1,43	4,18

Погружать грунтовой теплообменник в скважину с малым дебетом воды может оказаться не эффективным, так как в данном случае часть скважины

останется пустой, и соответственно трубы не будут соприкасаться с грунтовым массивом, что потребует данную скважину заполнить наполнителем. Кроме того, всегда есть вероятность, что обводненная скважина может осушиться.

Таким образом, проведен сравнительный анализ теплофизических свойств сухого и увлажненного песка, водно-песчаного раствора и воды со свойствами бентонита, результаты показали одинаковый диапазон варьирования количественных значений теплофизических свойств увлажненного песка и водно-песчаного раствора с бентонитом, следовательно, данные материалы можно использовать в качестве его замены. Учитывая, установленные требования к наполнителю скважины с грунтовым теплообменником, из предложенных вариантов выбран водно-песчаный раствор, как рекомендуемый материал для заполнения пустого пространства в скважине, после погружения в нее труб грунтового теплообменника.

2.5 Исследование различных наполнителей скважины на лабораторной установке

Для подтверждения возможности применения водно-песчаного раствора в качестве наполнителя скважин с грунтовыми теплообменниками, были проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке, которая представляет собой устройство теплового насоса (рисунок 2.9).

Данная установка является имитационной моделью теплового насоса с размещенными на горизонтальной панели компрессором, на вертикальной панели теплообменниками и приборами для измерения давления, температуры, напряжения, тока, расхода электроэнергии. Диапазон рабочих температур, при котором может работать установка: $-55...+125^{\circ}\text{C}$. В качестве рабочего тела используется хладагент R134a. [72]

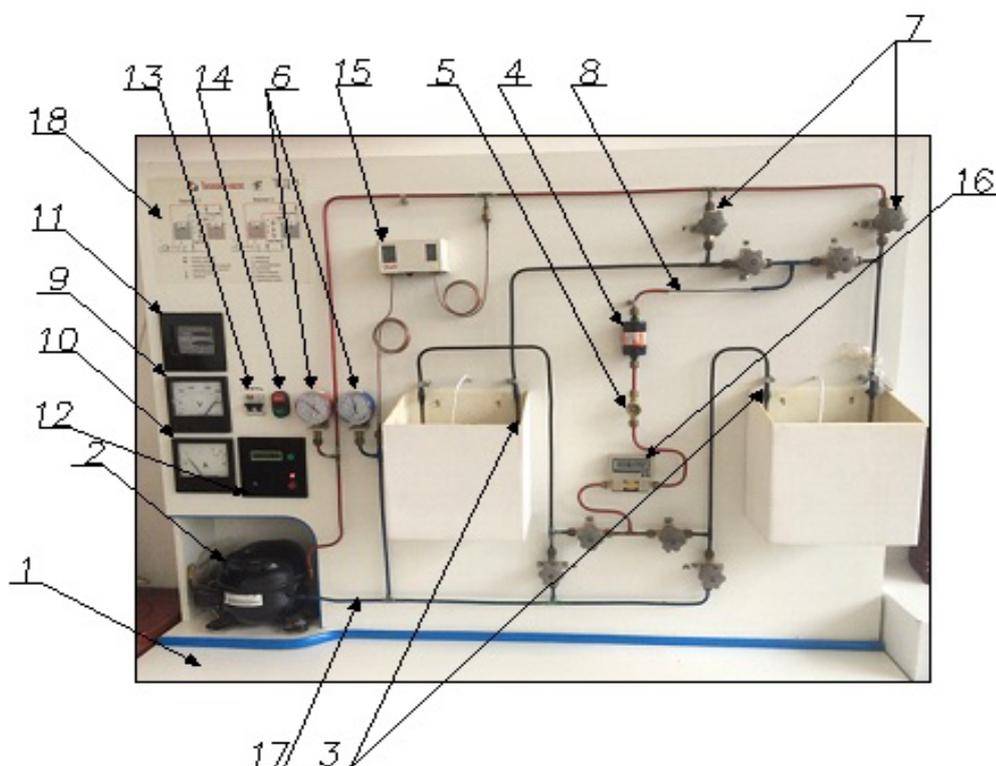


Рисунок 2.9 - Лабораторная установка, основанная на принципе действия теплового насоса: 1- стол рабочий; 2- компрессор; 3- теплообменники; 4 - фильтр-осушитель; 5 - смотровое стекло; 6 - манометры; 7 - вентили; 8- капиллярная трубка; 9 - вольтметр; 10 - амперметр; 11- счетчик электрический; 12 - измеритель температуры; 13 -рычажок автомата защитного отключения; 14 - магнитный пускатель; 15 - реле давления; 16 - расходомер; 17 - трубопроводы; 18 - стойка.

Модель теплового насоса представляет собой замкнутую герметичную, систему. Мотор-компрессор (2), закреплен болтами на столе через резиновые амортизаторы. Мотор-компрессор хладоновый, герметичный, кривошипно-кулисный с вертикальной осью вращения, одноступенчатый и предназначен для осуществления термодинамического цикла с целью передачи тепла на более высокий температурный уровень, электродвигатель компрессора однофазный двухполюсный асинхронный. Теплообменники (3) гладкотрубные помещены в емкости. В зависимости от направления движения хладагента, задаваемого вентилями (7), каждый из теплообменников может работать как в режиме конденсатора, так и испарителя. Фильтр осушитель (4) осуществляет очистку

хладагента от механических примесей и влаги. Смотровое стекло (5) позволяет визуально контролировать агрегатное состояние фреона, и наличие или отсутствие в нем влаги. Манометры (6) высокого и низкого давлений позволяют измерять давление в двух точках гидропневматической системы установки. Капиллярная трубка (8) выступает в виде дроссельного устройства теплового насоса. Вольтметр (9) производит электрические измерения напряжения. Амперметр (10) производит электрические измерения тока.

Проведена серия экспериментов, при которых исследованы различные наполнители скважины: песок сухой, песок объемной влажностью 10% и 30%, и вода. Исследуемыми материалами заполняли емкость с находящимся в ней теплообменником, который работал, как испаритель теплового насоса, и в зависимости от того чем наполнена была данная ёмкость, тот материал считался наполнителем скважины. Для каждого исследуемого материала количество опытов определялось периодом установления стационарного режима жидкости, которая находилась в ёмкости с теплообменником, работающего как конденсатор теплового насоса.

Параметры, измеряемые при проведении экспериментальных исследований: температура охлаждаемого наполнителя, измеряемая эталонным ртутным термометром и установленными термопарами t_1 и t_2 ($^{\circ}\text{C}$); показания вольтметра U (В); показания амперметра I (А); время, фиксируемое секундомером Δt (с); затраченная электроэнергия, измеряемая дисковым счетчиком, встроенным в установку P (кВт·ч); температура фреона после дросселя на входе в охлаждаемую ёмкость, измеряемую встроенными термопарами t_5 ($^{\circ}\text{C}$); температура фреона после испарителя на выходе из охлаждаемой ёмкости, измеряемую встроенными термопарами t_6 ($^{\circ}\text{C}$); масса охлаждаемого наполнителя, измеряемая электронными весами $m_{\text{нап.}}$ (кг); температура нагреваемого наполнителя, измеряемая эталонным ртутным термометром t_3 и t_4 ($^{\circ}\text{C}$); масса нагреваемой жидкости, измеряемая электронными весами $m_{\text{воды}}$ (кг); температура фреона после компрессора, на входе в нагреваемую ёмкость, измеряемая встроенными термопарами t_7 ($^{\circ}\text{C}$);

температура фреона после конденсатора на выходе из нагреваемой ёмкости, измеряемая встроенными термодатчиками t_8 (°C).

Параметры, рассчитанные на основе полученных данных, в ходе экспериментальных исследований: количество удельной теплоты, воспринятое нагреваемой жидкостью q_1 (Вт); количество удельной теплоты, отбираемое от охлаждаемого наполнителя q_2 (Вт); затраченная работа, подводимая от внешнего источника $I_{\text{затр.}}$ (Вт); коэффициент преобразования теплового насоса ϵ ; холодильный коэффициент теплового насоса $\epsilon_{\text{хл}}$.

Для подтверждения возможности применения водно-песчаного раствора в качестве наполнителя скважин с грунтовыми теплообменниками, интерес представляют количество удельной теплоты, воспринятое жидкостью, находящейся в ёмкости с теплообменником, работающего как конденсатор теплового насоса, и отбираемое от холодного источника, находящегося в ёмкости с теплообменником, работающего как испаритель теплового насоса (рисунки 2.10 и 2.11).

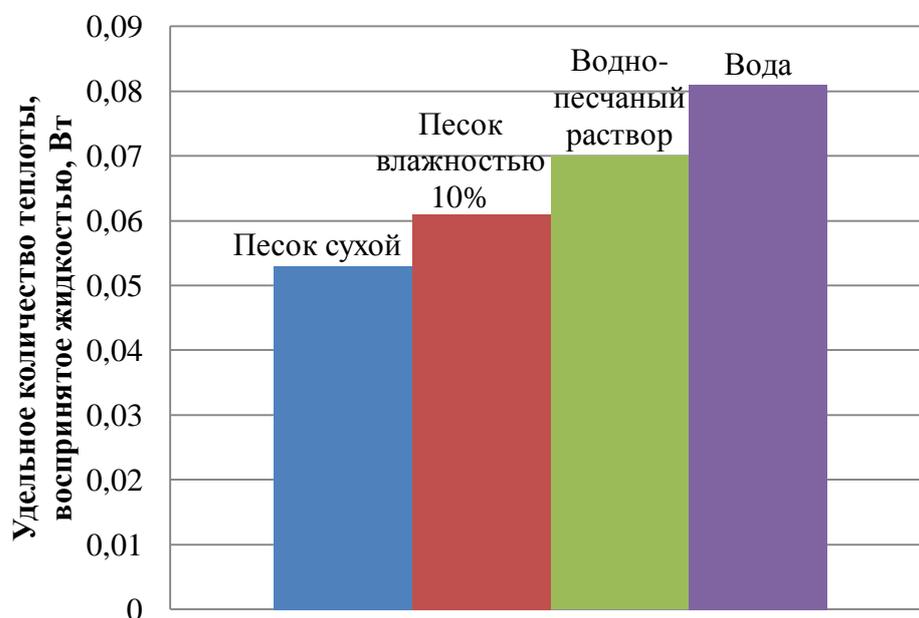


Рисунок 2.10 - Влияние вида наполнителя на количество удельной теплоты, воспринятое жидкостью, находящейся в ёмкости с конденсатором.

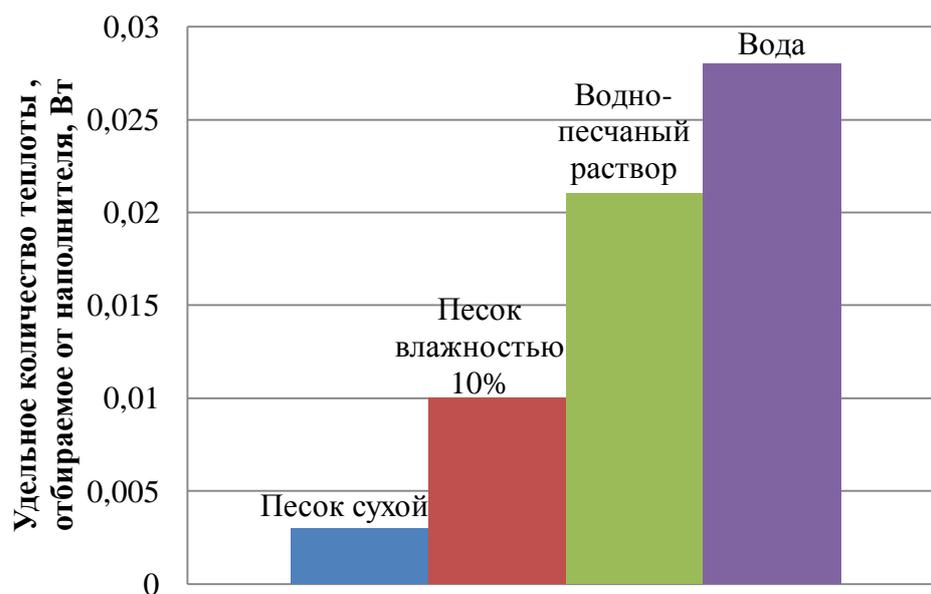


Рисунок 2.11 - Влияние вида наполнителя на количество удельной теплоты, отбираемого от наполнителя, находящегося в ёмкости с испарителем.

Данные параметры, позволяет подтвердить выводы, сделанные при рассмотрении теплофизических свойств песка различной степени влажности и воды, а также предложенную гипотезу о применении водно-песчаного раствора в качестве наполнителя скважины с грунтовыми теплообменниками.

2.6 Выводы

На основе проведенных исследований теплофизических свойств наполнителей для скважин грунтовых теплообменников, можно сделать следующие выводы:

- применение сухого песка в качестве наполнителя не рекомендуется, так как он обладает низким коэффициентом теплопроводности ($\lambda=0,35$ Вт/м·К).

- применение песка объемной влажностью от 5 % до 25 % в качестве наполнителя скважины не рекомендуется, так как он обладает рыхлой и неоднородной структурой, вследствие чего не способен создать плотный контакт

с грунтовым массивом и трубами грунтового теплообменника, кроме того возникает проблема в технологии заполнения скважины.

- обводненные скважины с высоким дебетом воды выгодно применять для открытых систем сбора низкопотенциальной энергии. Скважины с низким дебетом воды требуется заполнять наполнителем.

- водно-песчаный раствор рекомендуется как альтернативный бентониту материал для заполнения скважин с грунтовыми теплообменниками. Данный раствор отвечает всем предъявляемым требованиям к наполнителю скважины, а именно: равномерное заполнение свободного пространства в скважине, обеспечение хорошего контакта с массивом грунта и трубами грунтового теплообменника; значение его коэффициента теплопроводности больше требуемого $0,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; является легкодоступным и недорогим материалом: стоимость песка составляет 900 руб./тонна с учетом доставки.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ГРУНТА

3.1 Математическая модель процессов теплопередачи системы сбора низкопотенциальной энергии грунта

Процесс теплопередачи, протекающий в период эксплуатации вертикальной системы сбора низкопотенциальной энергии грунта, представляет собой явление сложного теплообмена: процесс теплоотдачи при вынужденном течении рабочей жидкости в трубах грунтового теплообменника и процесс теплопроводности, протекающий в стенке трубы грунтового теплообменника, наполнителе скважины и массиве грунта [28]. Таким образом, можно произвести условное деление на две задачи: внутренняя - процессы, протекающие в трубе грунтового теплообменника, и внешняя - процессы, теплопередачи до внутренней стенки трубы теплообменника.

Моделирование задач, связанных с нахождением температурного поля, осуществляется на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности.

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T) \quad (3.1)$$

где $T=T(x,y,z,t)$ – температура, °С; $c \cdot \rho$ – объемная теплоемкость, Дж/(К·м³); λ – теплопроводность, Вт/(м·К); t – время, с; $Q_w(x, y, z, t, T)$ – удельная производительность внутренних источников тепла, Вт/м³.

В связи с некоторой информативной неопределенностью факторов, влияющих на процесс теплопроводности, при решении внешней задачи, и их многообразием, моделирование таких систем требует введения определенных упрощений.

Систему СНЭГ, а именно: грунтовой теплообменник, наполнитель скважины и массив грунта; геометрически можно представить как многослойный

цилиндр (рисунок 3.1) [88]. Однако при создании математической модели, описывающей процесс теплопередачи в подобном многослойном цилиндре, возникают определенные трудности в задании начальных и граничных условий, связанные с параллельным размещением двух труб теплообменника, движение теплоносителя в которых направлено в разные стороны, и соответственно потоки жидкости в них отличаются по температуре. Для возможности создать математическую модель произведено геометрическое преобразование: условное "распрямление" U-образной трубы грунтового теплообменника (рисунок 3.1), разделяя цилиндр в середине.

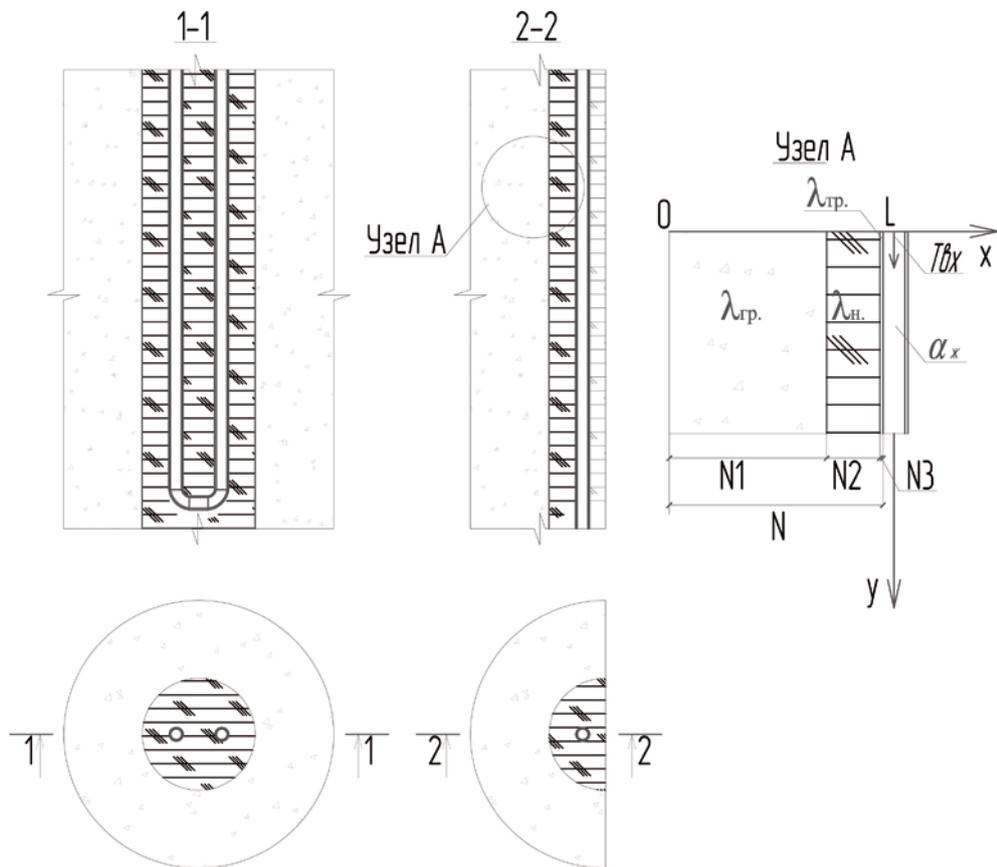


Рисунок 3.1 -Фрагмент системы сбора низкопотенциальной энергии грунта: слева - в виде многослойного цилиндра; справа - с "распрямленной" U-образной трубой грунтового теплообменника. N1 – номер слоя грунтового массива, N2 – номер слоя наполнителя, N3 – номер слоя стенки трубы.

Данная процедура позволит рассмотреть процесс теплопередачи относительно одной длинной трубы. Для удобства рассмотрения и моделирования

процесса теплопередачи, в этом случае будет взят плоский элемент, состоящий из слоя грунта, наполнителя и стенки трубы, соприкасающейся с рабочей жидкостью. Таким образом, будет проведено исследование изменение температуры вдоль оси x - по радиусу, для того чтобы учесть эти изменения вдоль оси y необходимо выполнить отдельный расчет для рабочей жидкости.

Помимо видоизмененной геометрической модели системы СНЭГ, вводится дополнительное упрощение: грунт рассматривается как твердая, сплошная, изотропная среда, в которой распространение тепла происходит лишь за счет теплопроводности. Очевидно, что грунт представляет собой сложную многофазную систему, теплопередача внутри которой осуществляется одновременно: теплопроводностью внутри частиц-элементов твердой фазы и в местах их непосредственных контактов; излучением от частицы к частице; конвекцией и теплопроводностью в межпоровом пространстве при переносе влаги [92]. Нахождение температурного поля в среде, где действуют все эти факторы, является сложной задачей, но учитывая невысокие значения температуры массива грунта в естественном состоянии, ниже глубины промерзания (для г. Владивостока от $+1^{\circ}\text{C}$ до $+16^{\circ}\text{C}$) [85], то согласно [80] влиянием конвекции, излучения и переноса влаги можно пренебречь.

Стоит отметить, что на формирование температурного режима грунта в естественном состоянии в основном оказывают влияние интенсивность падающей на поверхность солнечной радиации, сезонные и суточные колебания температуры наружного воздуха, а также поток радиогенного тепла. При этом влияние солнечной радиации и температур наружного воздуха распространяется только до глубины 10 метров, ниже начинается «нейтральная зона», где влияет только радиогенное тепло и наблюдается постоянство температуры массива грунта [15, 107], для Владивостока равное $+8^{\circ}\text{C}$ [85].

Выбор теплофизических характеристик грунта производился на основе сведений, собранных по 12 разведочным скважинам в г. Владивостоке для наиболее распространенных их видов. В соответствии с данными геолого-

технических разрезов, начиная с глубины 11 метров, чаще встречаются скальные грунты, такие как туфы, сланцы и цементированный песчаник.

Протекание процесса теплопередачи в наполнителе скважины также учитывается только теплопроводностью. Основная причина такого допущения температурный режим при работе системы сбора низкопотенциальной энергии грунта; помимо этого в мелкозернистых системах конвекция практически отсутствует, а возможный прирост к общей теплопередаче может составить лишь 1,6 % согласно [80]. Для того чтобы учитывать эффекты конвекции, излучения и переноса влаги, температура среды должна быть выше +50 °С.

С учетом, сделанных упрощений, нахождение температурного поля осуществляется одномерным уравнением теплопроводности (3.2) для выделенного элемента:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} \right), 0 < x < x_{(N1)}^* \\ \rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \right), x_{(N1)}^* < x < x_{(N2)}^{**} \\ \rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \right), x_{(N2)}^{**} < x < L_{(N)} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Начальные и граничные условия запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} t = 0 : T &= T_0, 0 \leq x \leq L \\ x = 0 : -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} &= q_0, t > 0 \\ x = L : \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha_{жс} \cdot (T_3 - T_{жс}), t > 0, \alpha_{жс} > 0 \\ \left. \begin{aligned} T_1(t, x_{(N1)}^*) &= T_2(t, x_{(N1)}^*) \\ T_2(t, x_{(N2)}^{**}) &= T_3(t, x_{(N2)}^{**}) \end{aligned} \right\} \\ -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_{(N1)}^*} &= -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_{(N1)}^*} \\ -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_{(N2)}^{**}} &= -\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x_{(N2)}^{**}} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

где T_0 - температура в начальный момент времени, °С; L - длина многослойной стенки, м; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\alpha_{жс}$ - коэффициент

теплоотдачи рабочей жидкости, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $T_{\text{ж}}$ - температура рабочей жидкости, омывающая правую границу, $^{\circ}\text{C}$; индекс 1 соответствует массиву грунта, 2 - наполнитель, 3 - стенка трубы.

На левой границе происходит приток радиогенного тепла q_0 (значение количества радиогенной теплоты можно принять равным $0,1 \text{ Вт}/\text{м}^2$ [14]) и задается температура грунта $T_{\text{гр}}$. Значение температуры $T_{\text{гр}}$ в расчетах принимается одинаковой по всей глубине скважины, так как согласно [15, 74, 85, 107] средние значения температур, начиная с глубины промерзания до «нейтральной зоны», равны температуре массива грунта, расположенного ниже «нейтральной зоны». Таким образом, на границе $x=0$ задаются граничные условия второго рода, так как происходит процесс нагрева массива грунта за счет радиогенного тепла.

На правой границе задается температура рабочей жидкости $T_{\text{ж}}$, омывающая стенку трубы. В начальный момент времени температура рабочей жидкости равна температуре на входе в грунтовый теплообменник, а в следующий момент времени она рассчитывается, методика расчет изложена ниже. В данном случае на границе $x=L$ задаются граничные условия третьего рода, так как происходит процесс теплообмена между поверхностью внутренней стенки трубы и рабочей жидкостью.

На границах разделяющие между собой слои стенки задаются граничные условия четвертого рода, характеризующие идеальный контакт между ними, обеспечивающие равенство температур и тепловых потоков по обе стороны от границы раздела.

Для решения одномерного дифференциального уравнения теплопроводности применяется метод конечных разностей на равномерной сетке. Для этого стенка разбивается по толщине на $N-1$ равных промежутков, т.е. строится конечно-разностная сетка с шагом по пространственной координате Δx . Определяется значение температуры в i -ом узле в момент времени $t=t_n=n \cdot \tau$ как $T(x_i, t_n) = T_i^n$, здесь τ - шаг интегрирования по временной координате, n - номер шага по времени.

В результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями получается следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{T_{1,i}^{n+1} - T_{1,i}^n}{\tau} &= \lambda_1 \cdot \left(\frac{T_{1,i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{1,i}^{n+1} + T_{1,i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right), i = 1, 2, \dots, N1-1, n \geq 0 \\ \rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{T_{2,i}^{n+1} - T_{2,i}^n}{\tau} &= \lambda_2 \cdot \left(\frac{T_{2,i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{2,i}^{n+1} + T_{2,i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right), i = N1, \dots, N2-1, n \geq 0 \\ \rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{T_{3,i}^{n+1} - T_{3,i}^n}{\tau} &= \lambda_3 \cdot \left(\frac{T_{3,i+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{3,i}^{n+1} + T_{3,i-1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right), i = N2, \dots, N-1, n \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Используется четырехточечная неявная разностная схема, где для определения поля температур на новом временном слое необходимо решить систему линейных уравнений (3.4).

Аппроксимация дифференциальной задачи (3.2), (3.3) конечно-разностной (3.4) выполнена с первым порядком точности по времени и вторым по координате. При этом неявная разностная схема является абсолютно устойчивой, т.е. можно проводить интегрирование краевой задачи (3.2), (3.3) с любым разностным шагом по времени [2, 3, 83, 37].

Полученную систему можно решить, используя метод прогонки, для этого необходимо (3.4) свести к наиболее общему виду, таким образом, получив трехточечные разностные уравнения второго порядка (3.5).

$$\left. \begin{aligned} A_i \cdot T_{1,i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_{1,i}^{n+1} + C_i \cdot T_{1,i-1}^{n+1} &= F_{i,n} \\ A_i \cdot T_{2,i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_{2,i}^{n+1} + C_i \cdot T_{2,i-1}^{n+1} &= F_{i,n} \\ A_i \cdot T_{3,i+1}^{n+1} - B_i \cdot T_{3,i}^{n+1} + C_i \cdot T_{3,i-1}^{n+1} &= F_{i,n} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

где

при $i=1, 2, \dots, N1-1, n \geq 0$

$$A_i = C_i = \frac{\lambda_1}{\Delta x^2}, B_i = \frac{2 \cdot \lambda_1}{\Delta x^2} + \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\tau}, F_{i,n} = -\frac{\rho_1 \cdot c_1}{\tau} \cdot T_{1,i}^n$$

при $i=N1, \dots, N2-1, n \geq 0$

$$A_i = C_i = \frac{\lambda_2}{\Delta x^2}, B_i = \frac{2 \cdot \lambda_2}{\Delta x^2} + \frac{\rho_2 \cdot c_2}{\tau}, F_{i,n} = -\frac{\rho_2 \cdot c_2}{\tau} \cdot T_{2,i}^n$$

при $i=N2, \dots, N-1, n \geq 0$

$$A_i = C_i = \frac{\lambda_3}{\Delta x^2}, B_i = \frac{2 \cdot \lambda_3}{\Delta x^2} + \frac{\rho_3 \cdot c_3}{\tau}, F_{i,n} = -\frac{\rho_3 \cdot c_3}{\tau} \cdot T_{3i}^n$$

Прогоночные коэффициенты в данном случае определяются из следующих соотношений при всех $i=1, 2, \dots, N-1$:

$$\gamma_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \gamma_{i-1}}, \beta_{i,n} = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_{i,n}}{B_i - C_i \cdot \gamma_{i-1}}, \quad (3.6)$$

Для определения здесь γ_i и β_i необходимо знать γ_0 и β_0 , которые определяются из левого граничного условия, после проведения дискретизации граничных условий второго рода с погрешностью $O(x^2)$:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{2 \cdot a_1 \cdot \tau}{\Delta x^2 + 2 \cdot a_1 \cdot \tau} \\ \beta_0 &= \frac{\Delta x^2}{\Delta x^2 + 2 \cdot a_1 \cdot \tau} \cdot T_0^n + \frac{2 \cdot a_1 \cdot \tau \cdot \Delta x \cdot q_0}{\lambda_1 \cdot (\Delta x^2 + 2 \cdot a_1 \cdot \tau)} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Правое граничное условие используется для определения температуры T_N^{n+1} . Дискретизация граничных условий третьего рода проведена с погрешностью $O(x^2)$:

$$T_N^{n+1} = \frac{\lambda_3 \cdot \Delta x^2 \cdot T_N^n + 2 \cdot \frac{\lambda_3}{\rho_3 \cdot c_3} \cdot \tau \cdot (\lambda_3 \cdot \beta_{N-1,n} + \Delta x \cdot \alpha_{жс} \cdot Te)}{\lambda_3 \cdot \Delta x^2 + 2 \cdot \frac{\lambda_3}{\rho_3 \cdot c_3} \cdot \tau \cdot (\Delta x \cdot \alpha_{жс} + \lambda_3 \cdot (1 - \gamma_{N-1}))}, \quad (3.8)$$

Для определения прогоночных коэффициентов на границах стыка слоев используются граничные условия четвертого рода, при проведении аппроксимации второго порядка получают следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{N1(N2)} &= \frac{2 \cdot a_{1(2)} \cdot a_{2(3)} \cdot \tau \cdot \lambda_{2(3)}}{2 \cdot a_{1(2)} \cdot a_{2(3)} \cdot \tau \cdot (\lambda_{2(3)} + \lambda_{1(2)} \cdot (1 - \gamma_{N1(N2)-1})) + \Delta x^2 \cdot (\lambda_{1(2)} \cdot a_{2(3)} + \lambda_{2(3)} \cdot a_{1(2)})} \\ \beta_{N1(N2)} &= \frac{2 \cdot a_{1(2)} \cdot a_{2(3)} \cdot \tau \cdot \lambda_{1(2)} \cdot \beta_{N1(N2)-1} + \Delta x^2 \cdot (\lambda_{1(2)} \cdot a_{2(3)} + \lambda_{2(3)} \cdot a_{1(2)}) \cdot T_i^n}{2 \cdot a_{1(2)} \cdot a_{2(3)} \cdot \tau \cdot (\lambda_{2(3)} + \lambda_{1(2)} \cdot (1 - \gamma_{N1(N2)-1})) + \Delta x^2 \cdot (\lambda_{1(2)} \cdot a_{2(3)} + \lambda_{2(3)} \cdot a_{1(2)})} \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

Таким образом, определив коэффициенты $A_i, B_i, C_i, F_{i,n}$, и рассчитав прогоночные коэффициенты γ_i и β_i при $i=1, \dots, N-1$, совершается прямая прогонка,

затем получение неизвестных T_i^{n+1} определяются при обратной прогонке при $i=N-1, \dots, 1$ по формуле (3.10):

$$T_i^{n+1} = \gamma_i \cdot T_{i+1}^{n+1} + \beta_{i,n}, \quad (3.10)$$

Прогонка считается корректной, если знаменатели прогоночных коэффициентов в формуле (3.6) не обращаются в нуль, и устойчивой, если $|\gamma_i| < 1$ при всех $i=0, \dots, N-1$.

Достаточное условие корректности и устойчивости прогонки уравнений (3.11), которые во многих приложениях метода выполняются автоматически [37]:

$$|B_i| > |A_i| + |C_i| \quad \text{при всех } i=1, \dots, N-1 \text{ и } |\gamma_i| < 1 \quad (3.11)$$

После того как определены температуры на новом временном слое на каждом шаге по пространственной координате осуществляется переход к расчету изменений температуры рабочей жидкости вдоль оси y . Зная температуру входа жидкости в трубу грунтового теплообменника, и определив тепловой поток из решения системы уравнений (3.2), по формуле (3.12), из уравнения теплового баланса можно рассчитать температуру жидкости в следующий момент времени τ на следующем шаге по координате Δy (3.18).

Формула для определения теплового потока, который идет на нагрев рабочей жидкости из массива грунта в процессе теплопередачи:

$$q = \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot \alpha_{\text{жс}} \cdot (T_{\text{СТ}} - T_{\text{ж1}}), \quad (3.12)$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы грунтового теплообменника, м; $\alpha_{\text{жс}}$ – коэффициент теплоотдачи на границе стенка трубы и рабочая жидкость, Вт/(м²·К); $T_{\text{СТ}}$ – температура внутренней стенки трубы грунтового теплообменника, определяемая в процессе решения системы (3.2) $T_{\text{СТ}} = T_{N,n+1}$, °С; $T_{\text{ж1}}$ – температура рабочей жидкости (в начальный момент $T_{\text{ж1}}$ задается на входе в грунтовый теплообменник), °С;

Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{жс}} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{жс}}}{d_{\text{вн}}}, \quad (3.13)$$

где Nu – безразмерный комплекс - критерий Нуссельта, характеризующий теплообмен на границе стенки трубы и рабочая жидкость, который можно определить по формулам (3.14, 3.15); $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности рабочей жидкости, Вт/(м·К); $d_{вн}$ – то же, что и в формуле (3.12).

В трубе грунтового теплообменника рабочая жидкость может двигаться с различной скоростью, в зависимости от того какой режим работы теплового насоса выбран и какие параметры необходимо для него поддерживать, это, в свою очередь, влияет на значение коэффициента теплоотдачи на границе стенки трубы и рабочей жидкости.

Рекомендуемый температурный перепад в трубах грунтового теплообменника, необходимый для стабильной и эффективной работы геотермального теплового насоса, составляет 2-5°C, такой диапазон определен техническим паспортом теплового насоса [55]. Величина теплового потока, который идет на нагрев жидкости в грунтовом теплообменнике, может варьироваться в зависимости от многих факторов, но исходя из анализа работ [14, 21, 36, 101, 106] установлено среднее значение равное 50 Вт с метра скважины. Учитывая выше сказанное, можно выявить наиболее вероятные режимы течения жидкости при работе грунтового теплообменника: переходный, когда $2 \cdot 10^3 < Re_{ж} < 1 \cdot 10^4$ и турбулентный $Re_{ж} > 1 \cdot 10^4$.

Сложный характер течения в переходной области чисел Рейнольдса затрудняет количественное описание процесса теплообмена, теплоотдача резко меняется в зависимости от многих случайных факторов и удовлетворительного метода расчета теплообмена не имеется. Предлагаемые зависимости в данном случае для определения числа Nu отличаются [6, 44, 46, 76, 114]. Однако наиболее схожие между собой результаты можно получить, используя для приближенного определения значение критерия Nu зависимости (3.14а), (3.14б):

$$Nu = K_0 \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \quad (3.14а)$$

Наиболее вероятные в переходной области средние значения комплекса $K_0 = f(Re_{ж})$ приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Значения комплекса $K_0=f(Re_{ж})$

$Re_{ж} \cdot 10^3$	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	3	4	5	6	8	10
K_0	1,9	2,2	3,3	3,8	4,4	6,0	10,3	15,5	19,5	27,0	33,3

$$Nu=0,008 \cdot Re_{ж}^{0,9} \cdot Pr_{ж}^{0,433} \quad (3.146)$$

Условия применимости уравнения (3.146) при $Re_{ж}=2300...10000$, $Pr_{ж}=20...140$, по данным Ю.А. Васильченко и др. [6].

Для расчета коэффициента теплоотдачи при развитом турбулентном течении различных жидкостей в трубах можно воспользоваться формулой, предложенной М.А. Михеевым [44]:

$$Nu=0,021 \cdot Re_{ж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \quad (3.15)$$

где $Re_{ж}$ – безразмерный комплекс – число Рейнольдса, характеризующий соотношение сил инерции и сил вязкости, определяемый по формуле:

$$Re_{ж} = \frac{\omega \cdot d_{вн}}{\nu} \quad (3.16)$$

где ω – скорость движения рабочей жидкости, м/с; $d_{вн}$ – то же, что и в формуле (3.12); ν – кинематическая вязкость рабочей жидкости, м²/с.

$Pr_{ж}$, $Pr_{ст}$ – безразмерный комплекс – число Прандтля, которое определяется по формуле:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (3.17)$$

где ν – то же, что и в формуле (3.16); a – коэффициент температуропроводности рабочей жидкости, м²/с.

Множитель $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$, характеризующий переменчивость физических свойств капельных жидкостей при разнице температуры поверхности стенки и температуры самой жидкости для систем СНЭГ можно не учитывать, в связи с тем, что такие системы являются низкотемпературными и процессы теплопередачи протекают с малой интенсивностью, в данном случае эта разница температур не превышает 1 °С, а свойства 20% раствора этиленгликоля или воды меняются незначительно, в пределах 2% [23, 25, 35].

Таким образом, зная скорость движения жидкости и ее температуру, можно определить коэффициент теплоотдачи, что позволит рассчитать тепловой поток по формуле (3.12) и приступить к следующему этапу расчета.

Применяя уравнение теплового баланса для рабочей жидкости, можно рассчитать ее температуру в следующий момент времени на следующем шаге по координате:

$$T_{ж2} = \frac{(q \cdot \tau \cdot \Delta y)}{M \cdot c} + T_{ж1}, \quad (3.18)$$

где выражение $(q \cdot \tau \cdot \Delta y) = Q$ представляет собой общее количество теплоты, которое подводится к жидкости за промежуток времени τ , Вт; Δy - шаг по пространственной координате $0 < y < H$, здесь H - длина трубы грунтового теплообменника, м; M - масса рабочей жидкости, кг; c - теплоемкость рабочей жидкости, Дж/кг·К.

В данном случае стоит отметить, что шаг по времени τ выбирается исходя из того, что рабочая жидкость с заданной скоростью пройдет Δy за определенное время:

$$\tau = \frac{\Delta y}{\omega}, \quad (3.19)$$

Для того чтобы расчетные точки сетки при решении системы (3.4) совпадали с точками при решении уравнения (3.18), необходимо для данных уравнений шаг по времени сделать одинаковым и при этом учесть, что для решения уравнений (3.2) и (3.3) весь временной интервал равен времени, за которое рабочая жидкость проходит грунтовой теплообменник.

Таким образом, рассчитав температуру рабочей жидкости на первом шаге по времени и координате, затем сделав ее начальной температурой для следующего шага, можно получить конечную температуру жидкости на втором шаге и, продолжая выполнять подобную перестановку, вычислить изменения температуры рабочей жидкости по всей длине трубы грунтового теплообменника.

После того как температура жидкости вычислена на новом шаге, она принимается в качестве температуры рабочей жидкости, омывающей правую

границу $T_{ж}$ в (3.3) и снова проводится расчет по нахождению температурного поля в многослойной стенке при новых условиях, такая последовательность расчета выполняется по мере прохождения рабочей жидкостью всего пути по трубе грунтового теплообменника. На рисунке 3.2 приведена схема совместного расчета системы уравнений (3.2), (3.3) и уравнений (3.12), (3.18). На рисунке 3.4 показано распределение температур, получаемых при вычислениях по представленной математической модели.

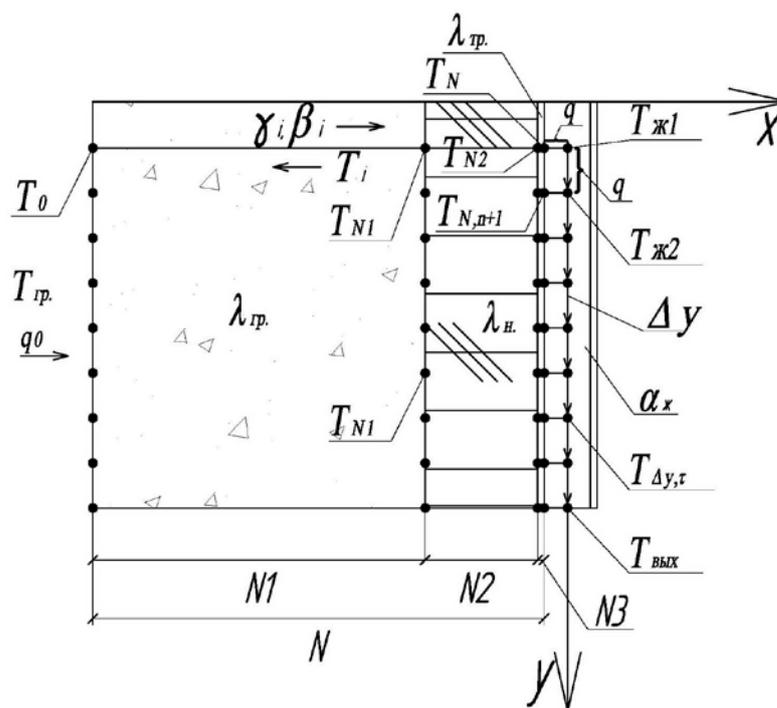


Рисунок 3.2 - Схема совместного расчета системы уравнений (3.2), (3.3) и уравнений (3.12), (3.18).

Полученная математическая модель не позволяет рассмотреть и оценить взаимное влияние труб грунтового теплообменника друг на друга, так как рассматривается «распрямленная» U-образная труба. Для нахождения температурного поля в окрестностях труб внутри скважины при взаимном влиянии, применен метод Е.П. Шубина [92] для подсчета тепловых потерь нескольких труб, уложенных в грунт.

В данном методе взаимное влияние труб учитывается условным сопротивлением, определяемым по формуле:

$$R_{усл} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{нап}} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot h_0}{b} \right)^2}, \quad (3.20)$$

где $\lambda_{нап}$ – коэффициент теплопроводности наполнителя скважины, Вт/(м·К); h_0 – расстояние от оси труб до оси x , м; b – расстояние между осями труб, м.

Получив температуры рабочей жидкости по всей длине грунтового теплообменника и температуру на границе скважины, при совместном решении уравнений (3.2), (3.3), (3.12) и (3.18), можно определить какой тепловой поток приходится на каждую трубу при их взаимном влиянии друг на друга в пределах скважины, при этом рассматривается только сечение скважины. Расчетная схема отдельно взятого сечения представлена на рисунке 3.3.

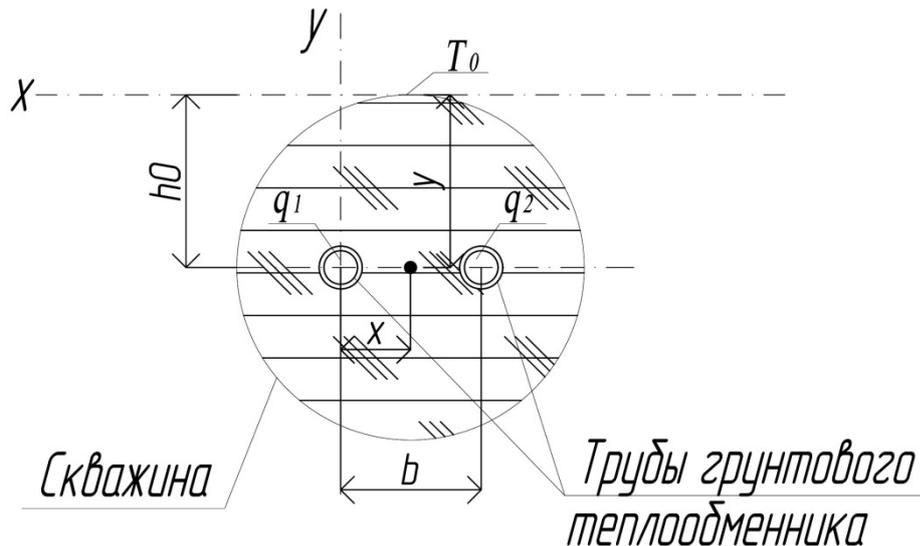


Рисунок 3.3 - Расчетная схема взаимного влияния труб грунтового теплообменника.

Тепловой поток для первой трубы, по которой рабочая жидкость опускается в скважину, можно определить по формуле:

$$q_1 = \frac{(T_{ж1} - T_0) \cdot \sum R_2 - (T_{ж2} - T_0) \cdot \sum R_{усл}}{\sum R_1 \cdot \sum R_2 - R_{усл}^2} \quad (3.21)$$

Тепловой поток для второй трубы, по которой рабочая жидкость поднимается из скважины, можно определить по формуле:

$$q_2 = \frac{(T_{ж2} - T_0) \cdot \sum R_1 - (T_{ж1} - T_0) \cdot \sum R_{усл}}{\sum R_1 \cdot \sum R_2 - R_{усл}^2} \quad (3.22)$$

где $T_{ж1}$, $T_{ж2}$ – температура рабочей жидкости в первой и во второй трубах, °С; T_0 – температура на границе контакта наполнителя скважины и массива грунта, для рассматриваемого сечения, °С; $R_{усл}$ – условное термическое сопротивление, определенное по формуле (3.20), м·К/Вт; $\sum R_1$, $\sum R_2$ – суммарные термические сопротивления для первой и второй труб, м·К/Вт.

В данном случае суммарное термическое сопротивление труб учитывает сопротивление перехода тепла от теплоносителя к стенке трубы, термическое сопротивление материала труб, так как часто грунтовые теплообменники выполняют из полиэтиленовых труб, которые имеют низкий коэффициент теплопроводности, и термическое сопротивление наполнителя скважины:

$$\sum R_1 = \sum R_2 = R_{жс} + R_{тр} + R_{нап} \quad (3.23)$$

где $R_{жс} = \frac{1}{\alpha_{жс} \cdot d_{вн}}$ – термическое сопротивление теплоотдачи на границе стенки трубы и рабочей жидкости, м·К/Вт; $\alpha_{жс}$ – коэффициент теплоотдачи на границе стенка трубы и рабочая жидкость, определяемый по формуле (3.13), Вт/(м²·К); $d_{вн}$ – то же, что и в формуле (3.12);

$R_{тр} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{тр}} \cdot \ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}}$ – термическое сопротивление теплопроводности трубы, м·К/Вт; $\lambda_{тр}$ – коэффициент теплопроводности материала труб грунтового теплообменника, Вт/(м·К); $d_{нар}$ – наружный диаметр трубы грунтового теплообменника, м;

$R_{нап} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{нап}} \cdot \ln \left[2 \cdot \frac{h_0}{d_{нар}} + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot h_0}{d_{нар}} \right)^2 - 1} \right]$ – термическое сопротивление теплопроводности наполнителя скважины, м·К/Вт; $d_{нар}$ – наружный диаметр трубы грунтового теплообменника, м; $\lambda_{нап}$ – то же, что и в формуле (3.20); h_0 – то же, что и в формуле (3.20).

Температуру в любой точке скважины в соответствии с рисунком 3.4 можно определить:

$$T = T_0 + \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{нап}}} \cdot \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y + h_0)^2}{x^2 + (y - h_0)^2}} + \frac{q_2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{нап}}} \cdot \ln \sqrt{\frac{(x - b)^2 + (y + h_0)^2}{(x - b)^2 + (y - h_0)^2}} \quad (3.24)$$

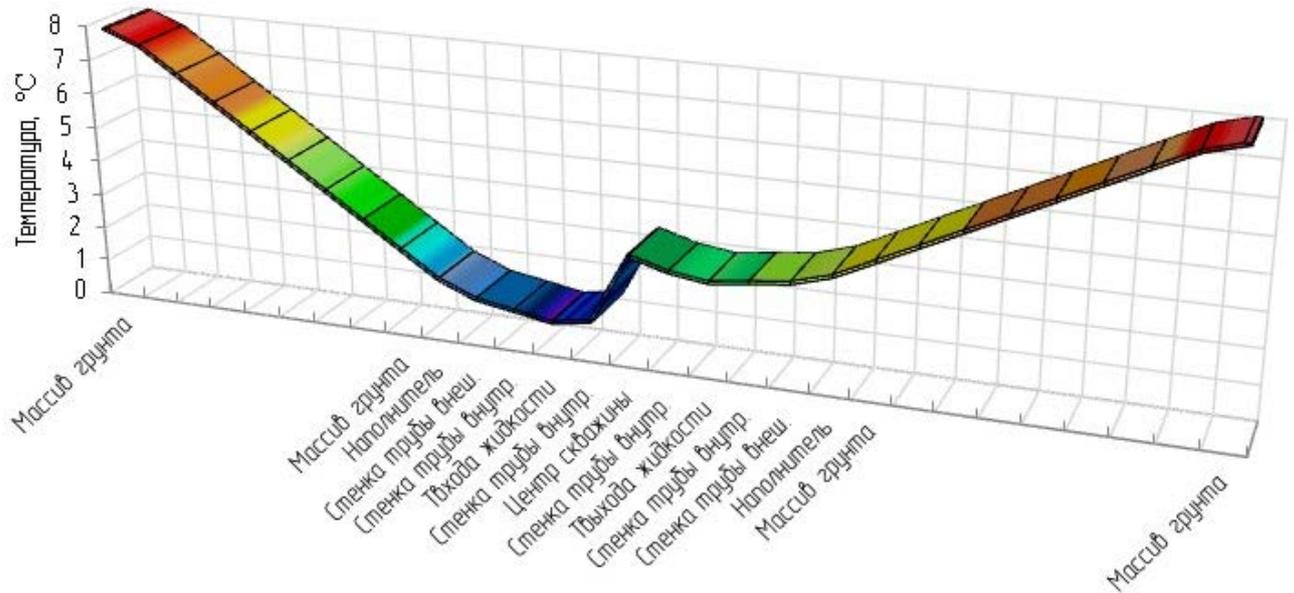
где T_0 – то же, что и в формуле (3.22); q_1 и q_2 – теплопоступления для первой и второй трубы соответственно, определяемые по формулам (3.20) и (3.21), Вт/м; $\lambda_{\text{нап}}$ – то же, что и в формуле (3.20); x – расстояние от точки до вертикальной оси, м; y – расстояние от точки до горизонтальной оси, м; h_0 – то же, что и в формуле (3.20); b – то же, что и в формуле (3.20).

Оценка взаимного влияния труб произведена для основных сечений, первое – зона наибольшей разницы температур теплоносителя в трубах грунтового теплообменника, второе – зона одинаковых температур теплоносителя в трубах грунтового теплообменника.

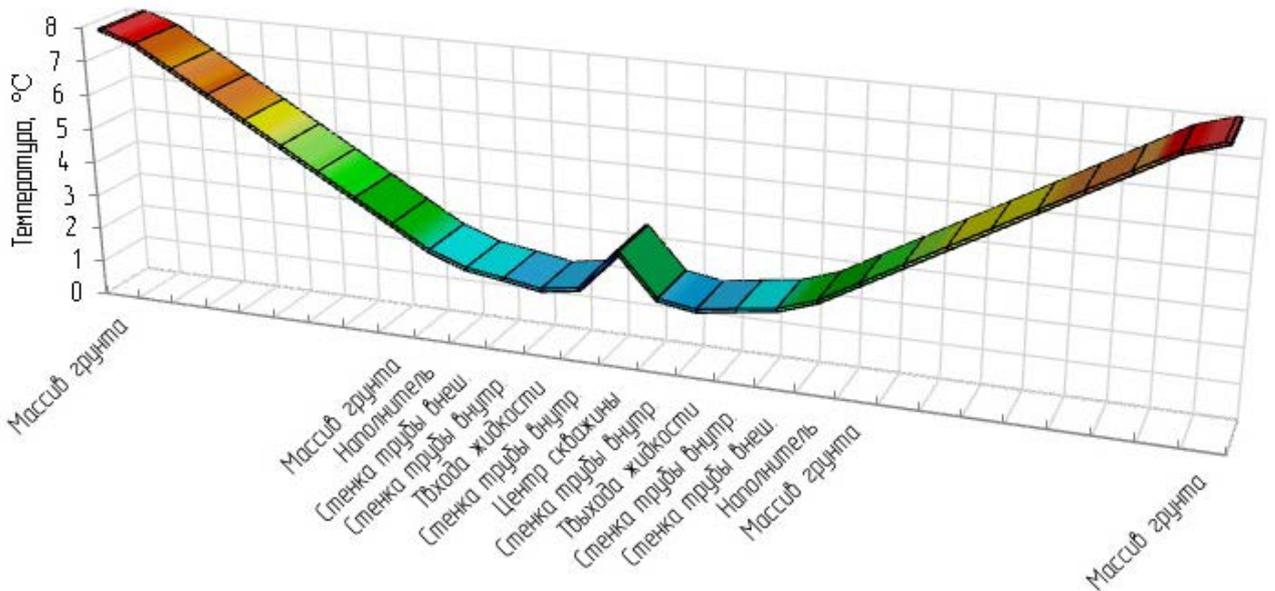
В результате расчетов определено температурное поле в различных сечениях скважины и установлено, что взаимное влияние труб грунтового теплообменника незначительное, и на изменение температуры теплоносителя может оказывать воздействие только при расположении опускной и подъемной труб на расстоянии 0,04 м и менее, при большем расстоянии, такого эффекта не наблюдается. Данные утверждения относятся к грунтовым теплообменникам, выполненным из полиэтиленовых труб с наружным диаметром 0,032 м и толщиной стенки 0,003 м, очевидно, что для стальных, медных и других труб, имеющих высокое значение коэффициента теплопроводности, минимально допустимое расстояние между опускной трубой и подъемной следует пересчитывать. Для наибольшего снижения влияния теплоносителя в опускной трубе, на теплоноситель в подъемной, необходимо трубы грунтового теплообменника располагать ближе к краям скважины.

Результаты, полученные в соответствии с разработанной математической моделью и при оценке взаимного влияния труб грунтового теплообменника, позволяют определить температурное поле, которое формируется в скважине и грунте при работе теплообменного оборудования. На рисунке 3.4 изображены фрагменты температурного поля для зоны наибольшей разницы температур

теплоносителя в трубах грунтового теплообменника и зоны одинаковых температур теплоносителя в трубах грунтового теплообменника.



а) Фрагмент температурного поля в зоне наибольшей разницы температур теплоносителя в трубах грунтового теплообменника.



б) Фрагмент температурного поля в зоне одинаковых температур теплоносителя в трубах грунтового теплообменника.

Рисунок 3.4 - Распределение температур, получаемое при совместном решении уравнений (3.2), (3.3), (3.12), (3.18) и (3.24).

3.2 Определение расстояния между скважинами с грунтовыми теплообменниками в вертикальной системе сбора низкопотенциальной энергии грунта

Важной задачей при проектировании вертикальной системы СНЭГ является определение «рабочего» массива грунта, то есть нахождение расстояния между скважинами с грунтовыми теплообменниками. На данный момент в инструкциях по проектированию таких систем приводится рекомендуемое расстояние между скважинами равное 5-6 метров, независимо от режима их эксплуатации и от величины теплового потока, идущего на нагрев теплоносителя [55, 62].

Однако необходимо учитывать, что при интенсивном теплосъеме рекомендованного расстояния между скважинами может быть недостаточным, в связи, с чем начинает происходить обмерзание массива грунта вокруг труб теплообменника, что вызывает нестабильность в работе теплового насоса и приводит к снижению энергетического потенциала грунта с течением времени. Для восстановления энергетического потенциала грунтового массива естественным путем потребуется продолжительное время, а применение специальных мер не всегда возможно.

Таким образом, расстояние между скважинами должно быть таким, чтобы их температурные поля не пересекались, и соответственно в период эксплуатации окружающий грунтовый массив не подвергался замораживанию.

Решение данной задачи позволит установить необходимые границы площадки под поле скважин и произвести наиболее оптимальную разбивку территории.

Применяя, математическую модель (3.2), (3.3) при совместном решении с (3.12) и (3.18), можно определить какое количество энергии грунтовой теплообменник выкачивает из массива грунта, при этом учитываются свойства теплоносителя, его температура на входе в грунтовой теплообменник, свойства материала труб теплообменника, наполнителя скважины и массива грунта.

Используя полученные данные, можно рассчитать объем грунта необходимый для покрытия требуемой нагрузки на систему теплоснабжения, а так как геометрически массив грунта, окружающий скважину, представлен как цилиндр, то не сложно вычислить его радиус, который и определит расстояние между скважинами (рисунок 3.5).

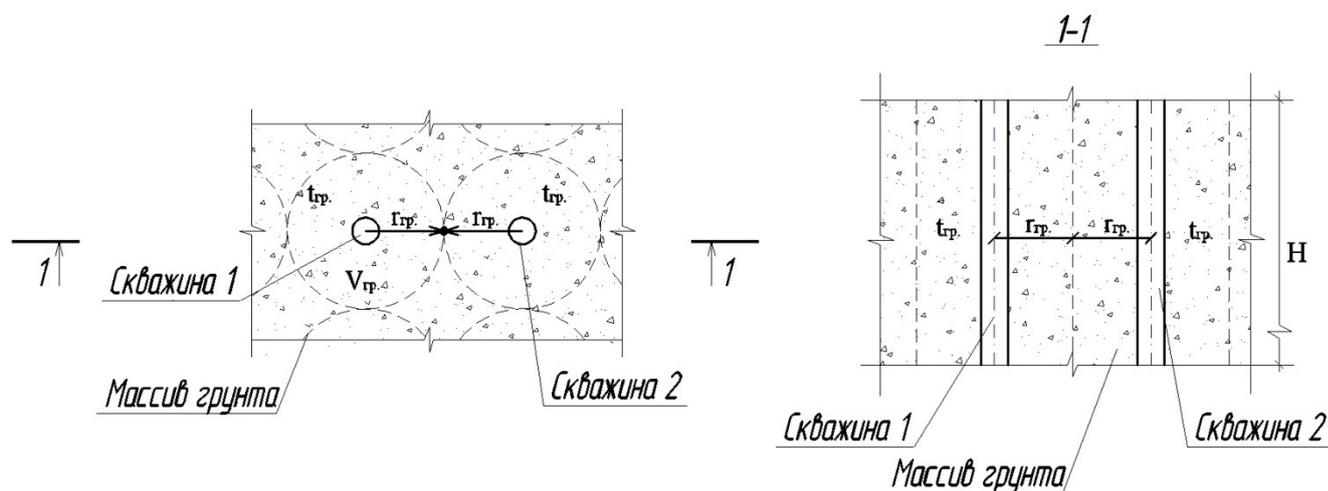


Рисунок 3.5 - Схема для расчета расстояния между скважинами системы сбора низкопотенциальной энергии грунта.

Методика расчета следующая:

1. Определить количество теплоты, извлекаемое одной скважиной за отопительный период, $Q_{\text{треб.}}$, Дж:

$$Q_{\text{треб.}} = 86400 \cdot q_{\text{скв.}} \cdot H \cdot z_{\text{от.}} \quad (3.25)$$

где $q_{\text{скв.}}$ - средний тепловой поток с одного метра скважины, Вт/м; H - глубина скважины, м; $z_{\text{от.}}$ - продолжительность отопительного периода, принимаемая по [69] в соответствии с [70], сут./год.

2. Определить объем грунта¹, способный покрыть требуемую нагрузку, при эксплуатации одной скважины, $V_{\text{гр.}}$, м³:

$$V_{\text{гр.}} = \frac{Q_{\text{треб.}}}{c_{\text{гр.}} \cdot \rho_{\text{гр.}} \cdot \left[T_{\text{гр.}} - \left(\frac{T_{\text{вх.}} + T_{\text{вых.}}}{2} \right) \right]} \quad (3.26)$$

¹Наполнитель скважины не учитывается, так как его доля относительно эксплуатируемого массива грунта, по проведенным расчетам составляет примерно 0,1%.

где $c_{гр.}$ – удельная теплоемкость грунтового массива, Дж/кг·К; $\rho_{гр.}$ – плотность грунтового массива, кг/м³; $T_{гр.}$ – температура грунтового массива, °С; $T_{вх.}$ и $T_{вых.}$ – температура входа и выхода рабочей жидкости в грунтовом теплообменнике, °С.

3. Определение расстояния от центра скважины с грунтовым теплообменником, до границы эксплуатируемого массива грунта, $r_{зр.}$, м:

$$r_{зр.} = \sqrt{\frac{V_{зр.}}{\pi \cdot H}} \quad (3.27)$$

В соответствии с представленной методикой расчета, (3.27) можно преобразовать, объединив в ней (3.25) и (3.26), и получить общую формулу для определения расстояния между скважинами:

$$R_{скв} = 2 \cdot \sqrt{\frac{86400 \cdot q_{скв} \cdot z_{от}}{\pi \cdot c_{зр.} \cdot \rho_{зр.} \cdot \left[T_{зр.} - \left(\frac{T_{вх.} + T_{вых.}}{2} \right) \right]}} \quad (3.28)$$

Таким образом, получена формула для определения расстояние между скважинами, которая учитывает теплофизические параметры грунта, величину теплового потока, температурный перепад между массивом грунта и теплоносителем, а также позволяет для конкретного региона учесть продолжительность отопительного периода.

По (3.28) произведены вычисления расстояния между скважинами с грунтовыми теплообменниками, в условиях г. Владивостока, при различных комбинациях теплофизических свойств грунтов, наполнителя и материал труб теплообменника. Полученные значения расстояния между скважинами характерны для ее эксплуатации при постоянном значении количества теплоты, извлекаемой в течение отопительного периода, то есть не учитывается возможная неравномерность в работе скважины, что гарантирует сохранение грунтового массива в области положительных температур.

Согласно расчетам для условий г. Владивостока, получено, что рекомендуемое расстояние между скважинами, согласно [55, 62], можно применять для грунтов, у которых значение объёмной теплоёмкости не ниже $4 \cdot 10^3$ кДж/м³·К при тепловом потоке до 60 Вт/м, для грунтов с более высоким

значении объёмной теплоёмкости величина теплового потока может быть увеличена до 250 Вт/м (таблица 3.2).

Таблица 3.2 - Рекомендуемые расстояния между скважинами с грунтовыми теплообменниками для горных пород, выбранных по 12 разведочным скважинам в г. Владивостоке

Виды грунтов	ср·10 ³ , кДж/м ³ ·К	q _{скв.} , Вт/м						
		40	50	60	70	80	90	100
Малотеплоёмкие грунты	1,8-2	9	10	11	12	13	14	14
	2,1-2,4	8	9	10	10	11	12	13
	2,5-2,7	8	8	9	10	11	11	12
Среднетеплоёмкие грунты	4,3	6	7	7	8	8	9	9
	4,8	6	6	7	7	8	8	9
	6,1	5	6	6	7	7	7	8
Высокотеплоёмкие грунты	12	4	4	4	5	5	5	6
	14	3	4	4	4	5	5	5
	18	3	3	4	4	4	4	5
	22	3	3	3	4	4	4	4

Однако чаще встречаются грунты, у которых значение объёмной теплоёмкости варьируется в пределах от $1,8 \cdot 10^3$ кДж/м³·К до $2,7 \cdot 10^3$ кДж/м³·К, для этих грунтов при различных значениях теплового потока расстояния между скважинами получились больше рекомендуемых (таблица 3.2).

По полученным данным, грунты подразделены на мало-, средне- и высокотеплоёмкие (таблица 3.2), очевидно, что в грунтах, обладающих значениями объёмной теплоёмкости ниже $1,8 \cdot 10^3$ кДж/м³·К, расстояния между скважинами необходимо делать более 10 метров, даже при низких значениях теплового потока - менее 40 Вт/м скважины, следовательно применение грунтовых теплообменников в таких условиях может быть экономически не выгодно, и наоборот, грунты, обладающие средней и высокой объёмной теплоемкостью, являются наиболее приемлемыми для создания систем СНЭГ.

3.3 Разработка имитационной модели грунтового теплообменника для экспериментальных исследований

Для проверки достоверности, математической модели процессов теплопередачи системы СНЭГ, создана имитационной модель скважины с грунтовым теплообменником (рисунок 3.6, 3.7), на основе метода «геометрических вырезок», так как сложно произвести полное геометрическое подобие реальной модели грунтового теплообменника с массивом окружающего его грунта. Имитационная модель позволяет исследовать i -ый элемент установки в натуральную величину, где процессы теплообмена идентичны процессам в реальной системе СНЭГ, кроме того апробировать различные режимы ее работы.

Для решения внутренней задачи принято, что достаточным условием подобия при вынужденном движении теплоносителя является равенство критериев Рейнольдса и Пекле, составленных для реальной системы и имитационной, так что согласно [8, 9, 16, 30, 43, 45, 58, 78] и метода анализа размерностей справедлива связь:

$$Nu_{ж} = f(Re_{ж}, Pe_{ж}) = \varphi(Re_{ж}, Re_{ж} \cdot Pr_{ж}) = \psi(Re_{ж}, Pr_{ж}) \quad (3.29)$$

При вынужденном движении теплоносителя гидромеханическая картина течения не зависит от теплообмена, так как количественное изменение физических свойств теплоносителя в пределах температурных перепадов 2-5°C, не велико и этот эффект не учитывается. Поэтому условия гидромеханического подобия являются необходимой предпосылкой теплового подобия и сводятся к подобию полей скорости и давления во входном сечении системы, и к выполнению условия $Re_{ж} = idem$.

Исходя из анализа работ, посвященных исследованию работы грунтовых теплообменников (см. главу 1) и рекомендаций по их проектированию [55, 62], установлено среднее значение линейного теплового потока равное 50 Вт с метра скважины. В соответствии с этой величиной было посчитано, что со скважины глубиной 60 метров можно получить 3 кВт тепловой энергии, при этом, учитывая

пределы температурного перепада теплоносителя в 2-5 °С, определен требуемый расход и скорость движения теплоносителя.

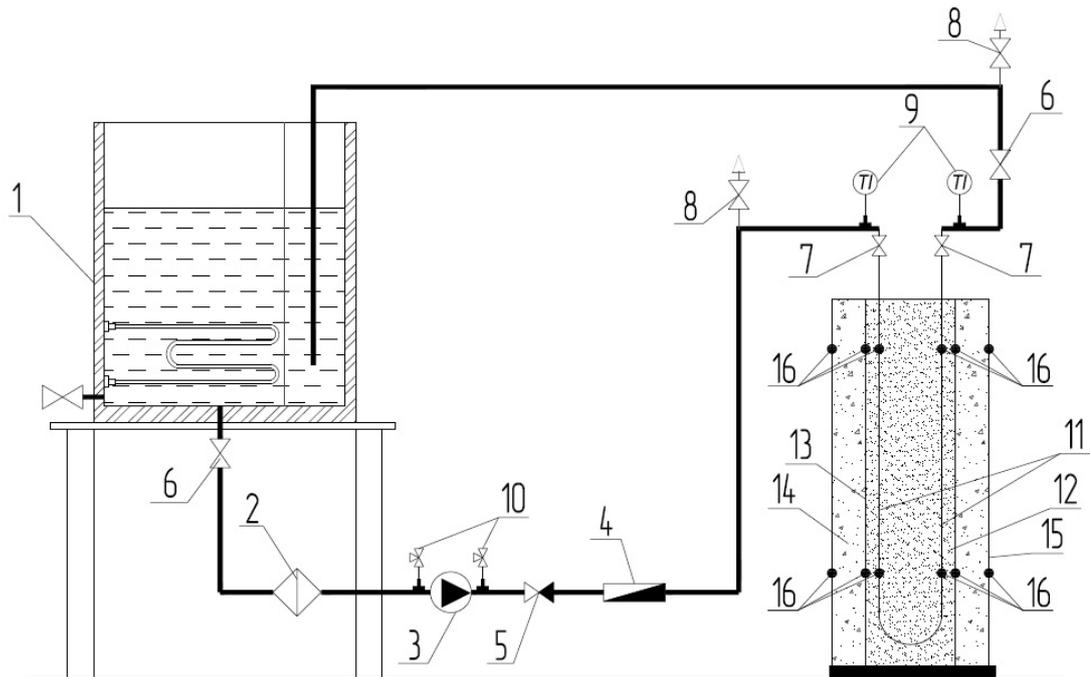


Рисунок 3.6 - Схема имитационной установки. 1 - бак объемом 100 л, 2 - фильтр, 3 - насос, 4 - водосчетчик, 5 - обратный клапан, 6 - вентиль, 7 - кран шаровой, 8 - воздухоотводчик, 9 - термометр, 10 - трёхходовой кран, 11 - теплообменник, 12 - наполнитель, 13 - обсадная труба, 14 - грунт, 15 - внешняя обсадная труба; 16 - датчики температуры.

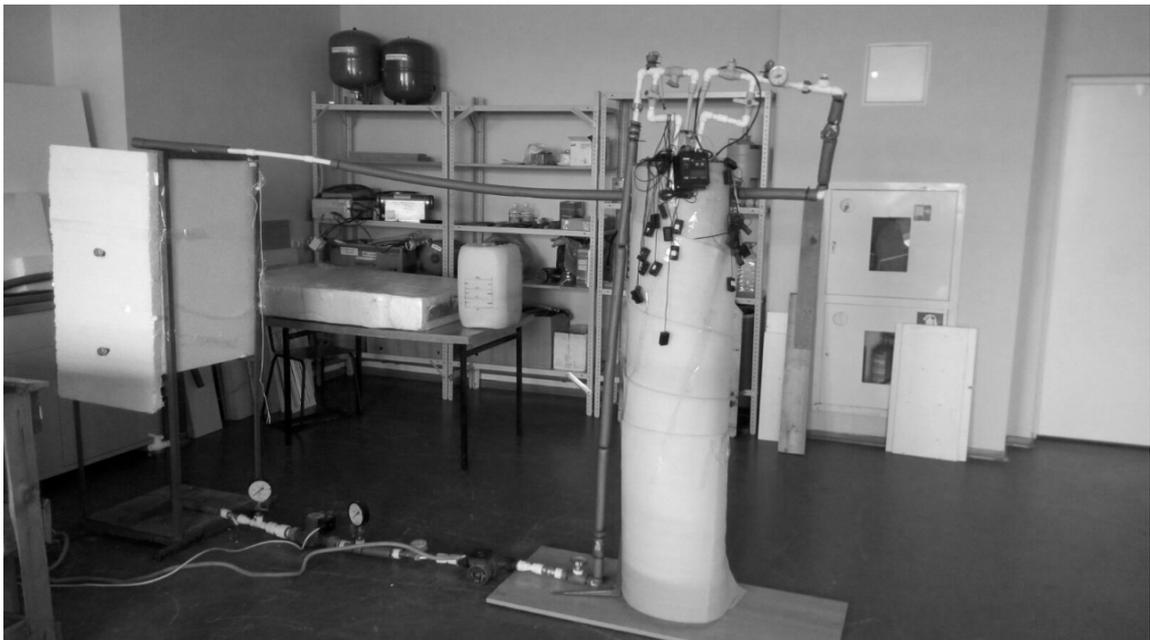


Рисунок 3.7 - Фотография имитационной установки

По имеющимся данным установлен диапазон варьирования числа Рейнольдса: для 20 % раствора этиленгликоля $2,4 \cdot 10^3 < Re < 6,8 \cdot 10^3$, что соответствует переходному режиму течения жидкости в трубах; для воды $3,9 \cdot 10^3 < Re < 10^4$, что соответствует переходному и турбулентному режимам течения жидкости в трубах.

Ранее было указано, что для переходного режима течения жидкости определение коэффициента теплоотдачи может быть произведено только приближенно с помощью уравнений (3.14а, 3.14б), а для турбулентного режима, используя формулу (3.15).

Таким образом, выполнение условий $Re_{ж} = idem$ и $Pr_{ж} = idem$ обеспечит подобие процессов конвективного теплообмена при вынужденном течении жидкости, а одинаковость чисел $Nu_{ж}$ будет являться следствием установившегося подобия. При этом моделирование процесса производится по числу $Pr_{ж}$, а по числу $Re_{ж}$ обеспечивается приближенное подобие в диапазоне характерном для реальной установки.

Для решения внешней задачи, подобие процесса теплопроводности между реальной системой СНЭГ и имитационной, обеспечивается использованием материалов с равными или близкими по значению теплофизическими параметрами для труб грунтового теплообменника, наполнителя скважины и грунта, а также выполнением теплового подобия, то есть обеспечение температурного перепада между температурой окружающей среды (грунт) и теплоносителем в начальный момент времени. При этом сохраняется возможность изменения параметров наполнителя скважины для оценки его влияния на эффективность работы грунтового теплообменника и всей системы в целом.

Описание установки:

Имитационная установка представляет собой «геометрическую вырезку» i-го элемента многослойного цилиндра, который состоит из пластмассовой трубы $d_{н315} \times 7,7$, изолированной с внешней стороны, и предназначенной для

ограничения исследуемого объема; обсадной пластмассовой трубы $\text{dn}160 \times 4,0$, создающей контур скважины, в которую помещена полиэтиленовая труба $\text{dn}20 \times 2,0$, выполняющая функцию U-образного вертикального грунтового теплообменника. В качестве наполнителя скважины, заполняющего свободное пространство между обсадной трубой и трубами грунтового теплообменника, используется песок, влажность которого можно изменять в процессе экспериментальных исследований. Пространство между внешней трубой $\text{dn}315 \times 7,7$ и обсадной заполнено щебеночным отсеком для имитации некоторого количества грунта. Для обеспечения запаса рабочей жидкости, предусмотрен бак объемом 100 л, циркуляцию теплоносителя осуществляют два насоса: Wilo Star-RS 25/4 и Grundfos UPS 25-60 180; показания расхода регистрирует водосчетчик (универсальный) - МЕТЕР СВ-15. Для измерения температуры рабочей жидкости, на входе и выходе из грунтового теплообменника, установлен измеритель микропроцессорный двухканальный 2ТРМО, эти же данные фиксировались лабораторными ртутными и контактными термометрами, непосредственно в баке. Для отслеживания характера изменений температур в наполнителе, грунте и на стенках всех труб, в процессе проведения экспериментальных исследований, установлены электронные датчики температуры ТРМ-10, в количестве 26 штук, располагающиеся согласно представленной схеме (рисунок 3.8), показания этих датчиков в расчетах не учитывались. Измерения температур на внешней поверхности теплообменника и внутренней поверхности обсадной трубы, а также плотности теплового потока производились с помощью пятиканального «Измерителя плотности теплового потока ИТП-МГ4.03/Х(У) «ПОТОК».

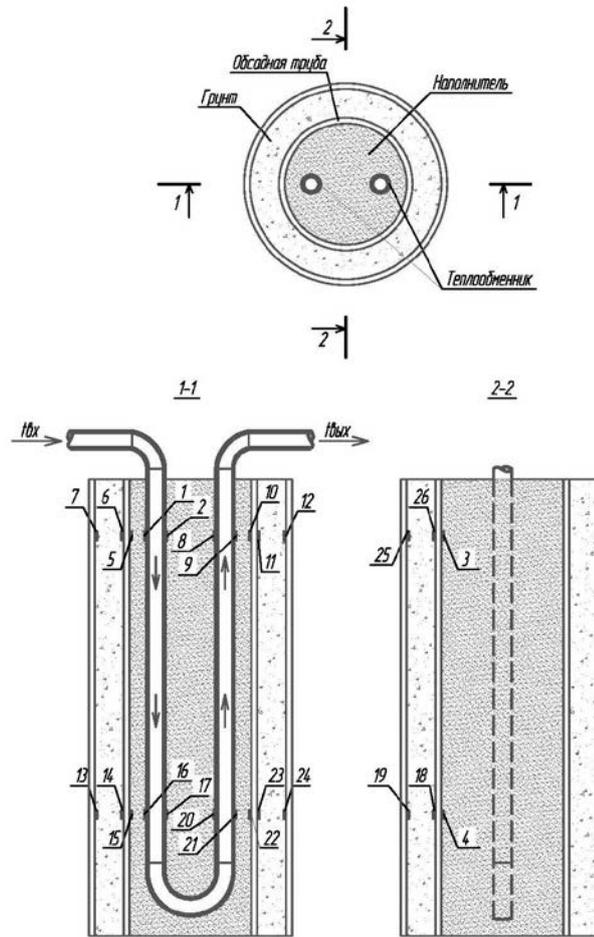


Рисунок 3.8 - Схема расположения электронных датчиков температуры ТРМ-10 на имитационной установке.

Таблица 3.3 - Характеристика приборов измерения

Наименование прибора	Характеристика прибора
Измерителя плотности теплового потока ИТП-МГ4.03/Х(У) «ПОТОК» [31]	<p>диапазон измерений:</p> <ul style="list-style-type: none"> - каналов плотности теплового потока 10...999 Вт/м²; - каналов температуры -30...+100°C; <p>цена деления 0,1 °С;</p> <p>относительная погрешность при измерении плотности теплового потока ±6 %;</p> <p>абсолютная погрешность при измерении температуры ±0,2 °С.</p>
Измеритель микропроцессорный двухканальный 2ТРМО (с термометрами сопротивления ДТС054-50М.В3.60/2)	<p>диапазон измерения -50...+150 °С;</p> <p>цена деления 0,1 °С;</p> <p>относительная погрешность измерения ±0,25 %.</p>

Водосчетчик универсальный (МЕТЕР СВ-15)	диапазон измерения 0,03...3 (м ³ /ч); цена единицы младшего разряда 0,0001 м ³ ; допустимая погрешность измерения в диапазоне Gmin-Gt (переходный) ±5 %; допустимая погрешность измерения в диапазоне Gt-Gmax ±2 %;
Термометр контактный цифровой ТК-5.09	диапазон измерения -40...+200 °С; цена деления 0,1 °С; абсолютная погрешность измерения ±0,5 °С.
Лабораторный ртутный термометр ТЛС-2	диапазон измерения 0...+55 °С; цена деления 0,1 °С; абсолютная погрешность измерения ±0,05 °С.
Электронный датчик температуры ТРМ-10	диапазон измерения -50...+120 °С; цена деления 0,1 °С; абсолютная погрешность измерения ±1 °С.

Перед планированием эксперимента предварительно проведена оценка величины неисключенной систематической погрешности измерения температур, теплового потока, количества теплоты, коэффициента теплоотдачи и других основных параметров (таблица 3.4, 3.5).

Таблица 3.4 - Оценка максимальной погрешности прямых измерений по паспортным данным измерительных приборов

Параметр	Базовое значение	Характеристики измерительного прибора	Максимальная погрешность измерения	
		Предел измерения	Абсолютная	Относительная
t жид., °С	10	0 - +55	0,05 °С	0,5 %
t жид., °С	10	-50 - +150	0,025 °С	0,25 %
t ст., °С	18	-30 - +100	0,2 °С	1,10 %
Расход, L, м ³ /ч	0,82	0,03 - 3	0,04 м ³ /ч	5 %
Тепловой поток, q, Вт/м ²	270	10 - 999	15 Вт/м ²	6 %
Толщина стенки, lt, мм	3,0		0,05 мм	1,6 %

Длина окружности, l_{0T} , мм	62,83		0,15 мм	0,24 %
Толщина стенки, $l_{об}$, мм	4		0,05 мм	1,2 %
Длина окружности, $l_{об}$, мм	502,6		0,15 мм	0,015 %
Толщина стенки, l_n , мм	7,7		0,05 мм	0,6 %
Длина окружности, l_{0H} , мм	989,6		0,15 мм	0,03 %
Длина внешней трубы, Нвн, мм	1700		0,15 мм	0,01 %
Длина трубы теплообменника, Нт, мм	2000		0,15 мм	0,01 %

Таблица 3.5 - Оценка погрешностей косвенных измерений

Аргументы	Формула определяющей функции	Базовое значение аргумента	Формула суммирования погрешностей	Погрешность	
				Абсолютная	Относительная
ρ , кг/м ³	$\rho = -0,011 \cdot t^2 - 0,041 \cdot t + 1019$	1017,36	$\delta(\rho) = \sqrt{(2 \cdot \delta(t))^2 + (1 \cdot \delta(t))^2}$	5,67	0,56%
c , Дж/кг·К	$c = 0,031 \cdot t^2 - 1,653 \cdot t + 4053$	4039,17	$\delta(c) = \sqrt{(2 \cdot \delta(t))^2 + (1 \cdot \delta(t))^2}$	22,5	0,56%
λ , Вт/м·К	$\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 8 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 0,002 \cdot t + 0,489$	0,503	$\delta(\lambda) = \sqrt{(3 \cdot \delta(t))^2 \cdot (2 \cdot \delta(t))^2 + (1 \cdot \delta(t))^2}$	0,005	1,06%
μ , МПа·с	$\mu = 0,002 \cdot t^2 - 0,155 \cdot t + 4,2$	2,793	$\delta(\mu) = \sqrt{(2 \cdot \delta(t))^2 + (1 \cdot \delta(t))^2}$	0,016	0,56%
ν , м ² /с	$\nu = \mu / \rho$	$2,75 \cdot 10^{-6}$	$\delta(\nu) = \sqrt{(\delta(\mu))^2 + (\delta(\rho))^2}$	$2,18 \cdot 10^{-8}$	0,80%
a , м ² /с	$a = \lambda / c \rho$	$1,224 \cdot 10^{-7}$	$\delta(a) = \sqrt{(\delta(\lambda))^2 + (\delta(c))^2 + (\delta(\rho))^2}$	$1,571 \cdot 10^{-9}$	1,33%
G , кг/с	$G = (L \cdot \rho) / 3600$	0,23	$\delta(G) = \sqrt{(\delta(L))^2 + (\delta(\rho))^2}$	0,01	6,53%
D_T , мм	$D_T = l_{0T} / \pi$	20,1	$\delta(D_T) = \sqrt{(\delta(l_{0T}))^2}$	0,05	0,24%
d_T , мм	$d_T = D_T - 2 \cdot l_T$	16	$\Delta(d_T) = \sqrt{(\Delta(D_T))^2 + (2 \cdot \Delta(l_T))^2}$	0,11	0,69%
$D_{об}$, мм	$D_{об} = l_{об} / \pi$	160,0	$\delta(D_{об}) = \sqrt{(\delta(l_{об}))^2}$	1,90	1,20%
$d_{об}$, мм	$d_{об} = D_{об} - 2 \cdot l_{об}$	152	$\Delta(d_{об}) = \sqrt{(\Delta(D_{об}))^2 + (2 \cdot \Delta(l_{об}))^2}$	1,90	1,20%
D_H , мм	$D_H = l_{0H} / \pi$	315,0	$\delta(D_H) = \sqrt{(\delta(l_{0H}))^2}$	0,09	0,03%
d_H , мм	$d_H = D_H - 2 \cdot l_H$	299,6	$\Delta(d_H) = \sqrt{(\Delta(D_H))^2 + (2 \cdot \Delta(l_H))^2}$	0,13	0,04%

Продолжение таблицы 3.5

$F, \text{ м}^2$	$F=\pi \cdot D_{\text{T}} \cdot H_{\text{T}}$	0,1263	$\delta(F) = \sqrt{(\delta(D_{\text{T}}))^2 + (\delta(H_{\text{T}}))^2}$	0,0003	0,24%
$\omega, \text{ м/с}$	$\omega=4G/(\pi \cdot d_{\text{T}} \cdot 2 \cdot \rho)$	1,11	$\delta(\omega) = \sqrt{(\delta(G))^2 + (\delta(d_{\text{T}}))^2 + (\delta(\rho))^2}$	0,07	6,59%
$Q, \text{ Вт}$	$Q=q \cdot F$	36	$\delta(Q) = \sqrt{(\delta(q))^2 + (\delta(F))^2}$	2,04	6,00%
	$Q=G \cdot c \cdot (t_{\text{жид}_2} - t_{\text{жид}_1})$		$\delta(Q) = \sqrt{(\delta(G))^2 + (\delta(c))^2 + (\delta(t_{\text{жид}}))^2}$	2,16	6,38%
$q_l, \text{ Вт/м}$	$q_l = Q/H_{\text{T}}$	18	$\delta(q) = \sqrt{(\delta(Q))^2 + (\delta(H_{\text{T}}))^2}$	1,02	6,00%
				1,08	6,38%
$\alpha, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$	$\alpha=Q/(H_{\text{T}} \cdot \pi \cdot d_{\text{T}} \cdot (t_{\text{сг}} - t_{\text{жид}}))$	1600	$\delta(\alpha) = \sqrt{(\delta(Q))^2 + (\delta(H_{\text{T}}))^2 + (\delta(d_{\text{T}}))^2 + (\delta(t_{\text{сг}}))^2 + (\delta(t_{\text{жид}}))^2}$	92,6	6,14%
				97,9	6,52%
Re	$Re=(\omega \cdot d_{\text{T}})/\nu$	6498	$\delta(Re) = \sqrt{(\delta(\omega))^2 + (\delta(d_{\text{T}}))^2 + (\delta(\nu))^2}$	407	6,68%
Pr	$Pr=\nu/a$	22,5	$\delta(Pr) = \sqrt{(\delta(\nu))^2 + (\delta(a))^2}$	0,3	1,55%
Nu	$Nu=\alpha \cdot d_{\text{T}}/\lambda$	70	$\delta(Nu) = \sqrt{(\delta(\alpha))^2 + (\delta(d_{\text{T}}))^2 + (\delta(\lambda))^2}$	4,13	6,27%
				4,36	6,64%

В качестве базовых значений таблицы 3.4 использованы такие значения варьируемых параметров, при измерении которых относительная приборная погрешность будет достигать максимальной величины. Базовые значения таблицы 3.5 выбраны, исходя из условий планирования эксперимента, и рассмотрены ниже.

3.4 Планирование эксперимента на имитационной модели грунтового теплообменника

Для выбора лучших условий проведения экспериментальных исследований по изучению процессов теплообмена в скважине с грунтовым теплообменником, проведено его планирование.

Первая часть исследований посвящена исследованию внешней задаче, которая позволит установить величину теплового потока с метра трубы (Вт/м) и оценить влияние на него таких факторов, как расход теплоносителя (кг/с), изменение коэффициента теплопроводности наполнителя скважины (Вт/м·К) и

температуры входа рабочей жидкости в грунтовый теплообменник ($^{\circ}\text{C}$), то есть $q=f(G, \lambda_{\text{нап.}}, t_{\text{вх.}})$.

Соответственно вторая часть исследований посвящена внутренней задаче, где экспериментальным путем изучается зависимость $\text{Nu}_{\text{ж}}=f(\text{Re}_{\text{ж}}, \text{Pr}_{\text{ж}})$.

Для определения границ области эксперимента, приняты скорость движения рабочей жидкости в трубах реального грунтового теплообменника и соответственно ее расход (таблица 3.6), взяты данные о свойствах увлажненного песка влажностью 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, водно-песчаного раствора при плотности 1800 кг/м^3 (глава 2, таблицы 2.2, 2.3), и выбран диапазон возможного изменения температуры рабочей жидкости на входе в грунтовый теплообменник: от 1 до 3 $^{\circ}\text{C}$.

Таблица 3.6 - Минимальные и максимальные значения критериев подобия для реальной системы СНЭГ

Тип рабочей жидкости	Плотность ρ , кг/м^3	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^{-6}$, $\text{м}^2/\text{с}$	Температуропроводность $a \cdot 10^{-7}$, $\text{м}^2/\text{с}$	Диаметр $d_{\text{вн}}$, м	Скорость ω , м/с	Расход G , кг/с	Критерии подобия	
							$\text{Re}_{\text{ж}}$	$\text{Pr}_{\text{ж}}$
Вода	999,85	1,86	1,324	0,026	0,67	0,36	9402	12,3
	999,89	1,95	1,314		0,34	0,28	4473	13,2
Раствор 20% этиленгликоля	1025,00	2,73	1,275	0,026	0,71	0,39	6792	21,4
		2,90	1,269		0,48	0,26	4265	22,9

Расчеты выполнены для несколько возможных режимов работы грунтового теплообменника, при постоянном среднем значении линейного теплового потока с метра скважины равного 50 Вт/м, а также, с учетом проведенных предварительных исследований, которые свидетельствуют о том, что применяя полиэтиленовые трубы, достичь температурного перепада выше 3 $^{\circ}\text{C}$ трудновыполнимо, ввиду низкого коэффициента теплопроводности материала труб. Теплофизические параметры жидкостей были выбраны для средней возможной температуры, учитывая значения температурного перепада. В

соответствии с принятыми условиями, также определены критерии подобия $Re_{ж}$, $Pr_{ж}$.

Для имитационной модели, учитывая необходимость равенства критериев подобия, следует произвести пересчет скорости движения теплоносителя и соответственно расхода, так как в качестве грунтового теплообменника вместо полиэтиленовой трубы диаметром наружным 0,032 м, толщиной стенки 0,003 м, используется труба меньшим наружным диаметром 0,02 м с толщиной стенки 0,002 м (таблица 3.7). Кроме того, вместо раствора 20 % этиленгликоля, исследования будут проводиться на растворе пропиленгликоля, учитывая токсичность первого, а соблюсти все меры безопасности нет возможности.

Таблица 3.7 -Таблица пересчета скоростей и расхода для имитационной модели в сравнении с реальной моделью системы СНЭГ

Тип рабочей жидкости	Реальная модель			Тип рабочей жидкости	Имитационная модель		
	$d_{вн}$, м	ω , м/с	G , кг/с		$d'_{вн}$, м	ω' , м/с	G' , кг/с
Раствор 25 % этиленгликоля	0,026	0,7	0,39	Раствор 20 % пропиленгликоля	0,016	1,1	0,23
		0,5	0,26			0,7	0,15

Чтобы произвести замену рабочей жидкости требуется подобрать нужную концентрацию раствора пропиленгликоля, таким образом, чтобы числа Прандтля были равны.

Так как экспериментальная установка располагается в лабораторном помещении, следовательно, грунт и наполнитель скважины будут стремиться принять температуру окружающего воздуха, которая на момент проведения опытов в среднем равнялась +19 °С, а для соблюдения условий теплового подобия необходимо обеспечить разницу между температурой среды (грунт) и теплоносителем не более 8 °С - это наиболее вероятная разница между температурой грунта и температурой теплоносителем на входе в грунтовой теплообменник, работающего в реальных условиях в режиме теплоснабжения.

Случаи с отрицательной температурой на входе в грунтовый теплообменник не рассматриваются, так как подобные режимы эксплуатации плохо влияют на стабильность в работе теплового насоса.

Исходя из условия теплового подобия, для проведения экспериментальных исследований, в данном случае подходит раствор 20 % пропиленгликоля [25]. Исследуемые значения температур теплоносителя для имитационной установки получаются в диапазоне от +10,0 °С до +12,0 °С.

Стоит отметить, что вода для проведения экспериментов не подходит из-за невозможности выполнить условия теплового подобия.

Для составления матрицы планирования эксперимента первой части (таблица 3.8) принят рототабельный центральный композиционный план (РЦКП), ядром которого в данном случае является полнофакторный эксперимент (ПФЭ) типа 2^k . Общее число опытов для трех факторов составило $N=2^k+2k+6=20$ и значение звездного плеча равно 1,682 [10, 58].

Имитационная математическая модель зависимости теплового потока q (Вт/м) от трех факторов: расхода теплоносителя G (кг/с), теплопроводности наполнителя скважины $\lambda_{\text{нап}}$ (Вт/м·К) и температуры входа рабочей жидкости $t_{\text{вх}}$ (°С), можно представить в виде полинома второго порядка:

$$y_1 = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 \quad (3.30)$$

где y_1 - тепловой поток, представленный функцией отклика; x_1 - расход теплоносителя или первый фактор, влияющий на функцию отклика; x_2 - теплопроводность наполнителя скважины или второй фактор, влияющий на функцию отклика; x_3 - температура входа рабочей жидкости в грунтовый теплообменник.

Выбор верхних и нижних значений уровней варьирования факторов произведен на основе данных из таблиц 3.7, 2.2, 2.3 и данных о температуре теплоносителя.

Таблица 3.8 - Матрица планирования первой части эксперимента

Части РЦКП	№ опыта	Уровни факторов						Отклик
		Натуральные			Нормализованные			
		X_1 G, кг/с	X_2 $\lambda_{\text{нап.}}$, Вт/м·К	X_3 $t_{\text{вх.}}$, °C	X_1^*	X_2^*	X_3^*	Y
Ядро плана	1	0,17	1,05	10,4	-1	-1	-1	q_1
	2	0,23	1,05	10,4	+1	-1	-1	q_2
	3	0,17	1,17	10,4	-1	+1	-1	q_3
	4	0,23	1,17	10,4	+1	+1	-1	q_4
	5	0,17	1,05	11,6	-1	-1	+1	q_5
	6	0,23	1,05	11,6	+1	-1	+1	q_6
	7	0,17	1,17	11,6	-1	+1	+1	q_7
	8	0,23	1,17	11,6	+1	+1	+1	q_8
Звездные точки	9	0,15	1,11	11,0	-1,682	0	0	q_9
	10	0,25	1,11	11,0	+1,682	0	0	q_{10}
	11	0,20	1,01	11,0	0	-1,682	0	q_{11}
	12	0,20	1,21	11,0	0	+1,682	0	q_{12}
	13	0,20	1,11	10,0	0	0	-1,682	q_{13}
	14	0,20	1,11	12,0	0	0	+1,682	q_{14}
Центр плана	15	0,20	1,11	11,0	0	0	0	q_{15}
	16	0,20	1,11	11,0	0	0	0	q_{16}
	17	0,20	1,11	11,0	0	0	0	q_{17}
	18	0,20	1,11	11,0	0	0	0	q_{18}
	19	0,20	1,11	11,0	0	0	0	q_{19}
	20	0,20	1,11	11,0	0	0	0	q_{20}

Вторая часть исследований - изучение зависимости $Nu_{\text{ж}}=f(Re_{\text{ж}}, Pr_{\text{ж}})$. На основе научно-технической литературы [7, 8, 43, 45, 46, 55, 58, 114], предполагается, что данная зависимость описывается степенной функцией (3.31):

$$Nu_{\text{ж}}=A \cdot Re_{\text{ж}}^{m1} \cdot Pr_{\text{ж}}^{m2} \quad (3.31)$$

Установленные условия проведения эксперимента, описанные выше, определяют область для исследования зависимости (3.31): число Рейнольдса в диапазоне $4,3 \cdot 10^3 < Re_{\text{ж}} < 6,8 \cdot 10^3$, число Прандтля $21,4 < Pr_{\text{ж}} < 22,9$. Планирование первой части эксперимента позволяют получить необходимые данные в указанных диапазонах.

Для изменения расхода или скорости теплоносителя при проведении экспериментальных исследований, на имитационной установке предусмотрена регулирующая арматура, а также последовательно установлено два циркуляционных насоса, имеющих трёхскоростные режимы работы. Изменение коэффициента теплопроводности возможно выполнить только с помощью увлажнения наполнителя, поэтому проведение опытов началось при наименьшем значении коэффициента теплопроводности. Обеспечение требуемой температуры теплоносителя выполнялось ее охлаждением при помощи пластиковых бутылок, наполненных льдом, по мере достижения необходимого значения, бутылки вынимались.

Таким образом, на имитационной установке исследованы различные возможные режимы работы грунтового теплообменника при различных внешних условиях, которые можно менять, увлажнением наполнителя - песка. Продолжительность каждого опыта определялась установлением стационарного режима.

3.5 Выводы

Полученная математическая модель, описывающая процесс теплопередачи вертикальной системы СНЭГ, позволяет определить тепловой поток, идущий на нагрев теплоносителя, изменения температуры теплоносителя по ходу движения по трубе грунтового теплообменника и таким образом установить тепловой режим, формирующийся в процессе эксплуатации скважины с грунтовым теплообменником, для целей теплоснабжения здания.

В результате расчетов установлено, что взаимное влияние труб грунтового теплообменника, выполненного из полиэтиленовых труб с наружным диаметром 0,032 м и толщиной стенки 0,003 м, незначительное, и на изменение температуры теплоносителя может оказывать воздействие только при расположении опускной

и подъемной труб на расстоянии 0,04 м и менее, при большем расстоянии, такого эффекта не наблюдается.

Рекомендуемое расстояние между скважинами в 5-6 метров, можно применять для грунтов, у которых значение объёмной теплоёмкости не ниже $4 \cdot 10^3$ кДж/м³·К при тепловом потоке до 60 Вт/м.

Для грунтов, у которых значение объёмной теплоёмкости варьируется в пределах от $1,8 \cdot 10^3$ кДж/м³·К до $2,7 \cdot 10^3$ кДж/м³·К, расстояние между скважинами больше рекомендуемых в 1,5-2 раза.

В грунтах, обладающих значениями объёмной теплоёмкости ниже $1,8 \cdot 10^3$ кДж/м³·К, расстояния между скважинами необходимо делать более 10 метров, даже при низких значениях теплового потока - менее 40 Вт/м скважины, следовательно, применение грунтовых теплообменников в таких условиях может быть экономически не выгодно.

Грунты, обладающие объёмной теплоемкостью выше $4,3 \cdot 10^3$ кДж/м³·К, являются наиболее приемлемыми для создания систем СНЭГ.

Разработана имитационная установка, с применением теории подобия, для исследований процессов теплообмена грунтового теплообменника при различных эксплуатационных режимах работы.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ГРУНТА

4.1 Анализ результатов эксперимента, полученных на имитационной модели

Произведена статистическая обработка и анализ данных после проведения экспериментальных исследований, процессов теплообмена в скважине с грунтовым теплообменником, на имитационной установке в соответствии с планом эксперимента, представленного в таблице 3.8 главы 3.

Первая часть эксперимента выполнена с постановкой параллельных опытов только в центральной точке плана. Условия проведения опытов и результаты эксперимента представлены в таблице 4.1.

По результатам параллельных наблюдений (опыты 15-20) посчитаны: среднеарифметическое значение отклика $\bar{y}_0 = 17,58$, сумма квадратов ошибок $SUM_{\text{ош}} = 1,63$ и дисперсия воспроизводимости эксперимента $S_{(y)}^2 = 0,33$ в центральной точке плана. Используя суммы по столбцам вспомогательных комплексов, и табличные значения постоянных [58] рассчитаны коэффициенты регрессии полиномиальной математической модели второго порядка и проверена их значимость по величине доверительного интервала, найденного с использованием t-критерия Стьюдента. При уровне доверительной вероятности $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $m = 5$ критерий Стьюдента $t_{\alpha} = 2,571$, в связи этим получается 5 значимых коэффициентов из 11.

Таким образом, нормализованная математическая модель функции отклика представляется в виде следующего уравнения регрессии второго порядка:

$$\hat{y} = 17,60 + 1,56 \cdot x_1^* + 0,78 \cdot x_2^* - 2,60 \cdot x_3^* - 0,52 \cdot (x_1^*)^2 \quad (4.1)$$

Для проверки адекватности уравнения (4.1), в него подставляются значения нормализованных уровней, и вычисляются расчетные значения откликов, которые сопоставляются с осредненными экспериментальными данными, полученными при тех же условиях, также определяется дисперсия адекватности математической модели и значение F-критерия Фишера.

Так как $F_{\text{факт}}=1,96$ меньше $F_{\text{табл}}=4,75$ (при $m_1=10$, $m_2=5$, $\alpha=0,05$), полученная нормализованная математическая модель второго порядка (4.1) признается адекватной с доверительной вероятностью 95%.

Анализ регрессионных коэффициентов уравнения (4.1) показал, что все основные факторы оказывают влияние на величину теплового потока с метра трубы, при этом температура теплоносителя на входе в теплообменник имеет наибольшее влияние. Данное обстоятельство не уменьшает значимости других факторов, так как наличие квадратичного члена в уравнении, подчеркивает сложность механизма процесса теплопередачи при эксплуатации грунтового теплообменника, поэтому при рассмотрении таких процессов необходимо учитывать совместное взаимодействие факторов.

После получения статистического подтверждения адекватности (4.1), реализована процедура приведения нормализованной математической модели к натуральному виду, в результате чего получено следующее уравнение:

$$q = 17,24 + 282,16 \cdot G + 13,08 \cdot \lambda_{\text{нап}} - 4,33 \cdot t_{\text{ex}} - 575,17 \cdot G^2 \quad (4.2)$$

На основе экспериментальных исследований получена зависимость теплового потока от расхода и температуры теплоносителя в грунтовом теплообменнике, а также от теплопроводности наполнителя заполняющего скважину. Подтверждена значимость пяти коэффициентов и адекватность полученного уравнения, в результате проверки статистической гипотезы по критерию Фишера с уровнем значимости 0,05. Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных уравнением (4.2) составила 3,2%.

В результате сравнения тепловых потоков, определенных по теоретической математической модели процессов теплопередачи системы СНЭГ (см. главу 3) с

экспериментальными данными (4.2) установлено, что отклонение между значениями теплового потока в среднем составило 6,4 %, данный показатель подтверждает достоверность теоретической математической модели, и свидетельствуют о достаточно высокой ее точности (рисунок 4.1-4.5).

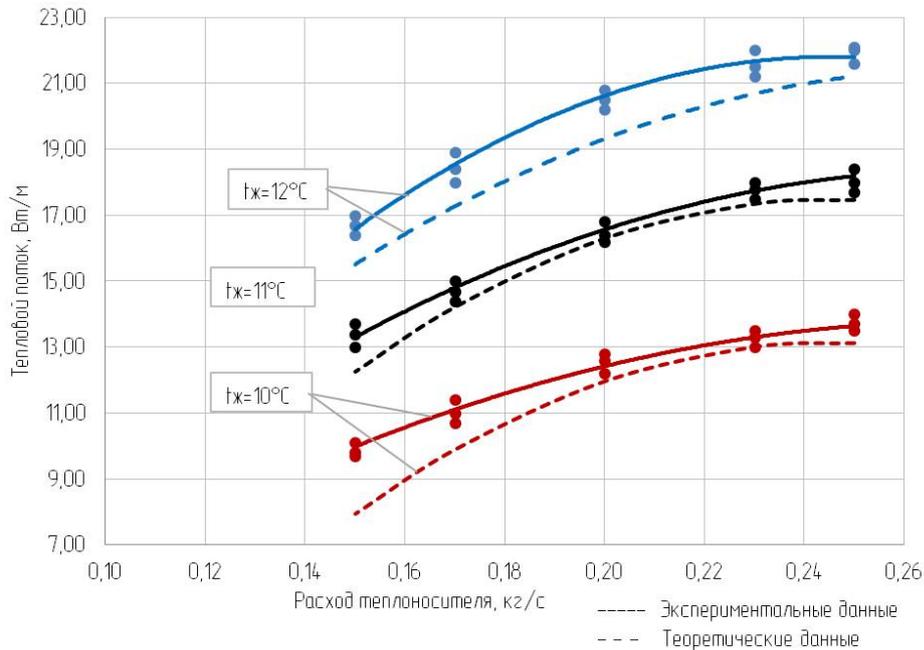


Рисунок 4.1 - Сравнение экспериментальных и теоретических данных при рассмотрении зависимости теплового потока с метра трубы от расхода теплоносителя при $\lambda_{\text{нап}}=1,01$ Вт/м·К.

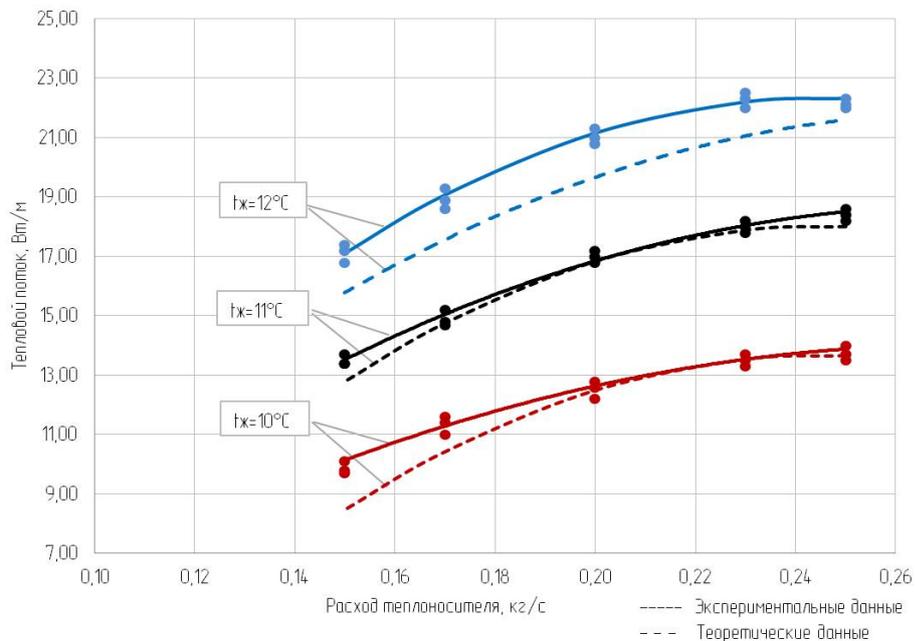


Рисунок 4.2 - Сравнение экспериментальных и теоретических данных при рассмотрении зависимости теплового потока с метра трубы от расхода теплоносителя при $\lambda_{\text{нап}}=1,05$ Вт/м·К.

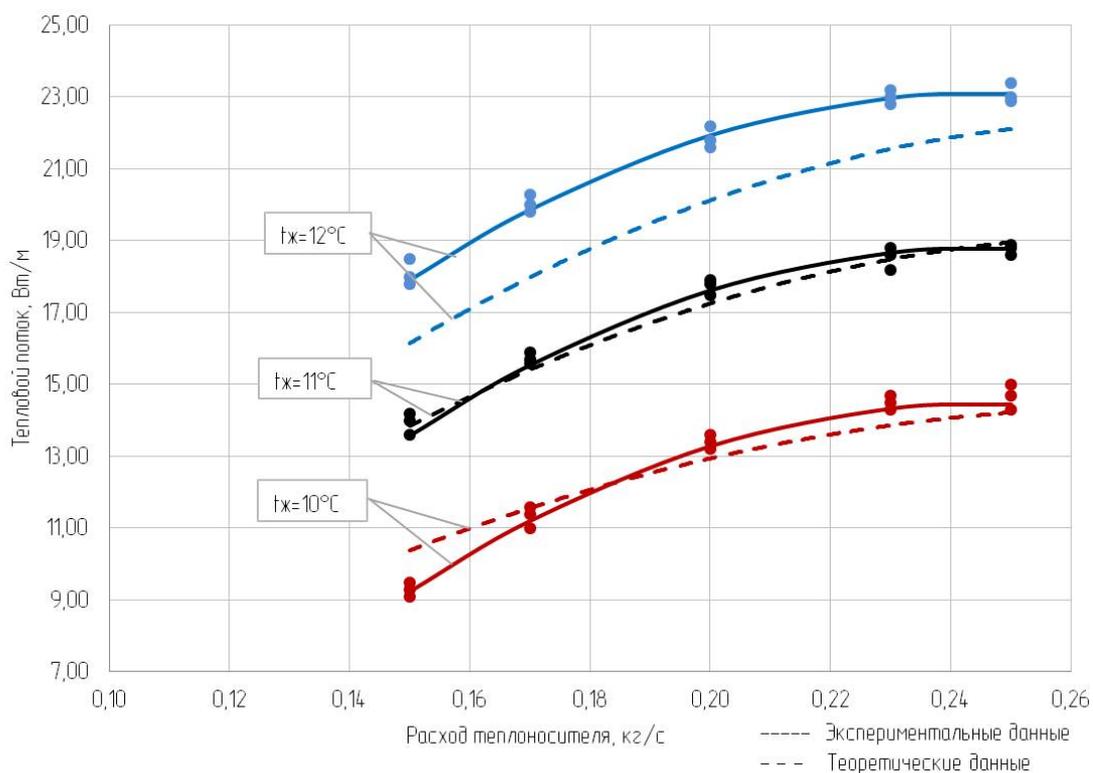


Рисунок 4.3 - Сравнение экспериментальных и теоретических данных при рассмотрении зависимости теплового потока с метра трубы от расхода теплоносителя при $\lambda_{\text{нап}} = 1,11 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

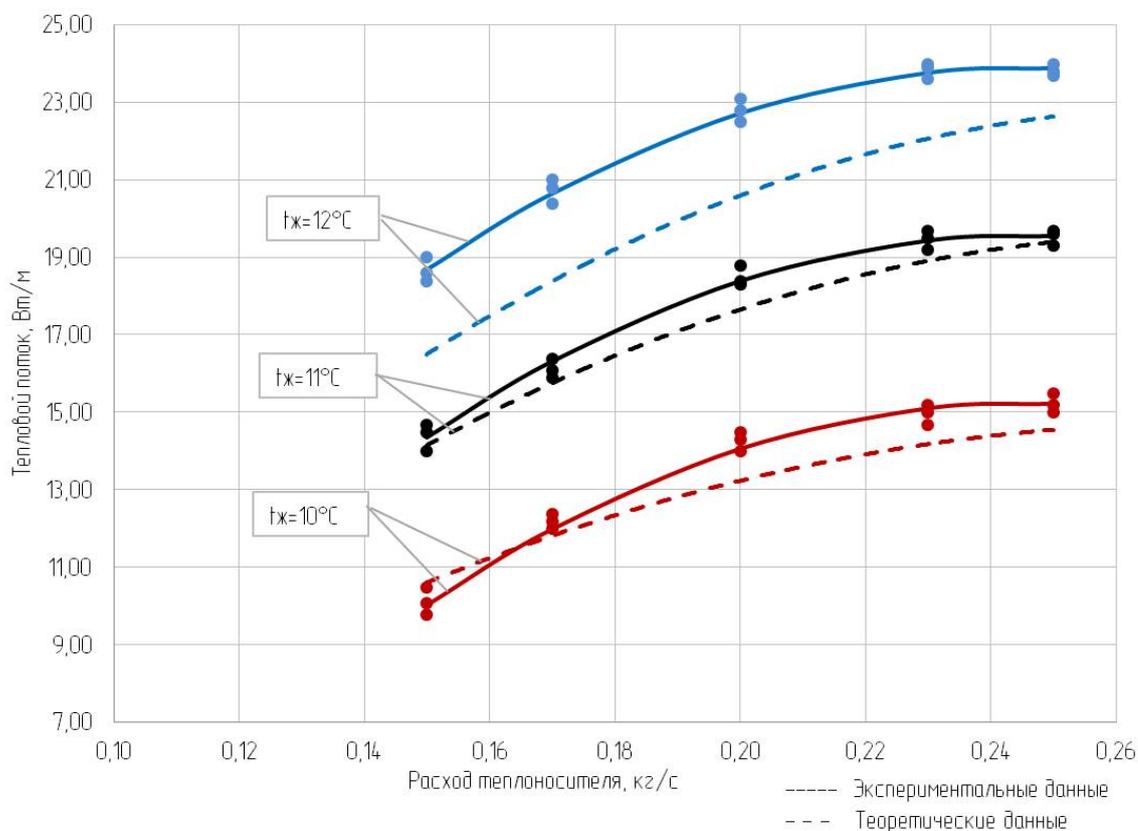


Рисунок 4.4 - Сравнение экспериментальных и теоретических данных при рассмотрении зависимости теплового потока с метра трубы от расхода теплоносителя при $\lambda_{\text{нап}} = 1,17 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

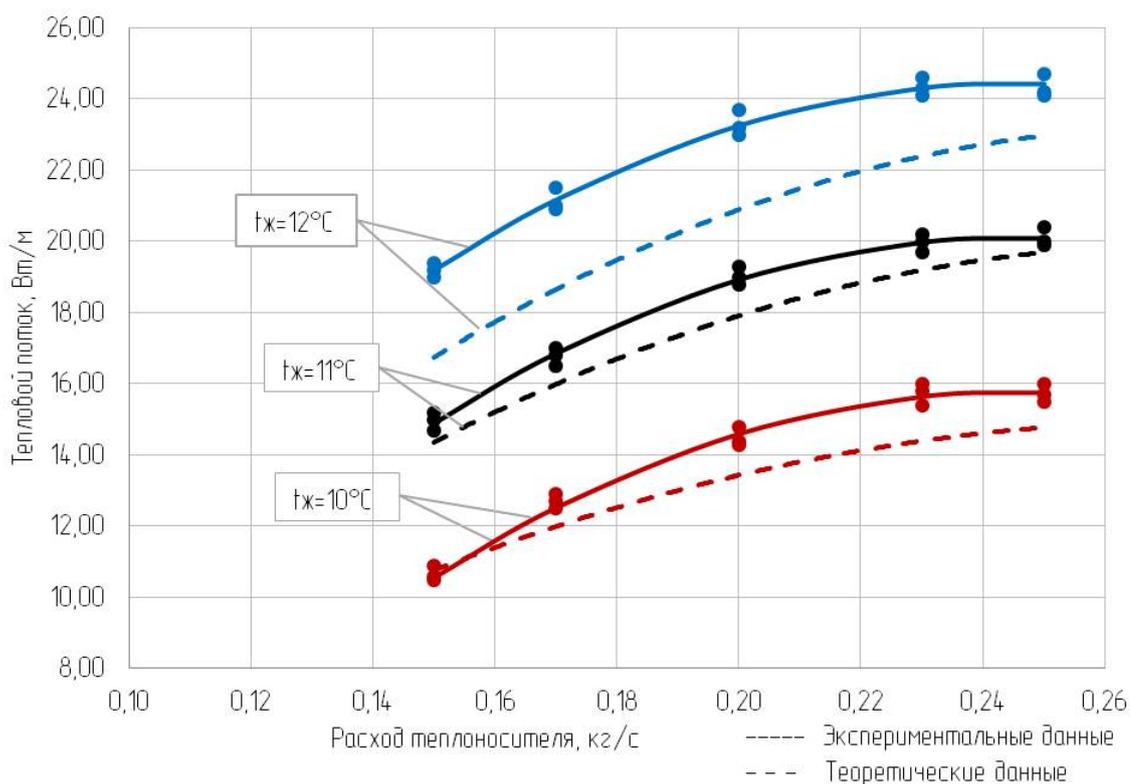


Рисунок 4.5 - Сравнение экспериментальных и теоретических данных при рассмотрении зависимости теплового потока с метра трубы от расхода теплоносителя при $\lambda_{\text{нап}}=1,21$ Вт/м·К

Необходимо также проверить сходимость теоретических и экспериментальных результатов относительно процесса конвективной теплоотдачи внутри трубы геотермального теплообменника.

Используя методы математической статистики, проведено аппроксимирование экспериментальных данных и определены коэффициенты регрессии, с учетом этого получено уравнение:

$$y = 27,645 + 0,009 \cdot x_1 + 0,261 \cdot x_2 \quad (4.3)$$

где y – число Нуссельта, $Nu_{ж}$; x_1 – число Рейнольдса, $Re_{ж}$; x_2 – число Прандтля, $Pr_{ж}$.

Коэффициент детерминации для данного уравнения равен $R^2=0,71$. Оценка надежности уравнения в целом с помощью F-критерия Фишера показала, что $F_{\text{факт}}=20,545 > F_{\text{табл}}=3,595$ при уровне значимости $\alpha=0,05$, следовательно, уравнение линейной регрессии (4.3) признается статистически значимым и подтверждает тесноту связи факторов с результатом.

Частные коэффициенты корреляции, найденные для данного уравнения, $r_{yx_1x_2}=0,84$ и $r_{yx_2x_1}=0,14$, свидетельствуют о том, что при совместном влиянии $Re_{ж}$ и $Pr_{ж}$, существенное воздействие оказывает число Рейнольдса. Проведя оценку целесообразности включения фактора x_1 после фактора x_2 и x_2 после x_1 , с помощью частного критерия Фишера: $F_{x_1}=39,98 > F_{табл}=4,46$ и $F_{x_2}=0,04 < F_{табл}=4,46$ при уровне значимости $\alpha=0,05$, можно прийти к выводу, что включение фактора x_1 в модель статистически оправдано, а дополнительное включение фактора x_2 , после того, как уже введен фактор x_1 нецелесообразно. Незначимость коэффициента регрессии при факторе x_2 подтверждает фактическое значение t -критерия Стьюдента: $t_{факт,2}=0,193 < t_{табл}=2,101$ при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Таким образом, для рассматриваемого случая число Прандтля незначительно влияет на критерий Нуссельта, отбросив данный фактор, по оставшимся данным в логарифмических координатах построена зависимость $Nu_{ж}=f(Re_{ж})$, для получения критериальной зависимости вида $Nu_{ж}=A \cdot Re_{ж}^{m_1}$. По тангенсу угла наклона кривой к оси абсцисс определен показатель степени m_1 , а затем определена постоянная $A=Nu_{ж}/Re_{ж}^{m_1}$, в результате получено:

$$Nu_{ж}=0,097 \cdot Re_{ж}^{0,78} \quad (4.4)$$

Средняя ошибка аппроксимации экспериментальных данных зависимостью (4.4) составляет 4%. Таким образом, получена зависимость для расчета критерия Нуссельта при эксплуатации грунтового теплообменника, которая характеризует переходный режим течения жидкости: $4,3 \cdot 10^3 < Re_{ж} < 6,8 \cdot 10^3$.

Проведено сравнение значений экспериментальных данных чисел Нуссельта со значениями, получаемыми при использовании уравнения (3.14б), расхождение составило порядка 7 %, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов (рисунок 4.6).

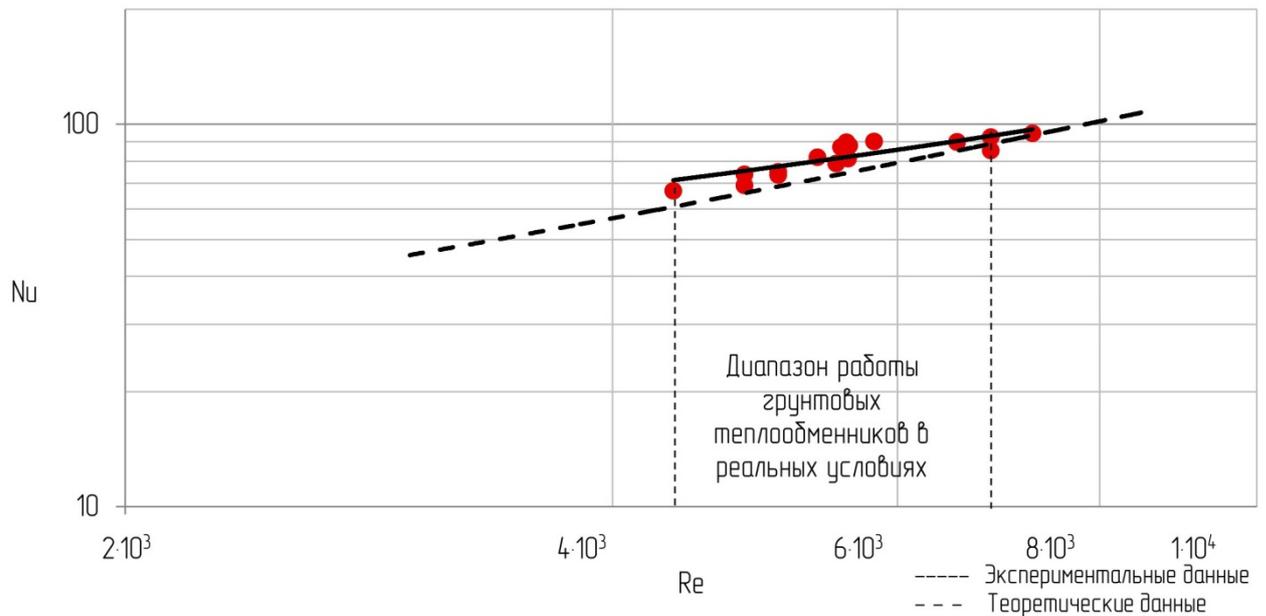


Рисунок 4.6 - Сравнение экспериментальных и расчетных данных при рассмотрении зависимости $Nu=f(Re_{ж}, Pr_{ж})$.

Таким образом, результаты проведенных экспериментальных исследований показали хорошую сходимость с теоретическими исследованиями и не противоречат результатам, полученными [14, 33, 36, 44, 101, 114], что еще раз подтверждает достоверность теоретической математической модели для системы СНЭГ.

4.2 Разработка методики расчета вертикальных систем сбора низкопотенциальной энергии грунта

На сегодняшний день при проектировании системы СНЭГ применяют приближенные расчеты, основанные на общих рекомендациях, в результате не учитываются индивидуальные особенности места проектирования, что может привести к завышенному количеству скважин с грунтовыми теплообменниками, либо наоборот их количества будет недостаточно. Данные обстоятельства, в свою очередь, приводят к увеличению капиталовложений и к неэффективной работе источника.

Основные параметры необходимые при проектировании вертикальной системы сбора низкопотенциальной энергии грунта:

- теплофизические свойства грунтового массива;
- теплофизические свойства наполнителя скважины;
- данные о материале труб грунтового теплообменника;
- требуемая нагрузка на скважинное поле;
- период эксплуатации скважинного поля;
- технические характеристики геотермального теплового насоса.

Алгоритм расчета:

1. Определение теплофизических характеристик грунтового массива места застройки.

Для определения точных значений теплофизических характеристик грунтового массива места застройки, необходимо проведение инженерно-геологических изысканий, которые позволят получить пробы горных пород и изучить их свойства. При невозможности провести предварительные изыскания, для приблизительных расчетов можно принять средние значения необходимых параметров грунтового массива, исходя из диапазона, в котором изменяется тот или иной параметр.

Так, например, для города Владивостока среднее значение коэффициента теплопроводности горных пород равно $1,86 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, плотности – 2374 кг/м^3 , удельной теплоемкости – $2089 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$. Температура массива грунта в начальный момент времени по всему объему принимается в среднем $+8 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Вычисление требуемой нагрузки на систему сбора низкопотенциальной энергии грунта.

Производится расчет тепловых потерь здания $Q_{зд}$, Вт, в соответствии с [19, 42, 65, 69, 70].

3. Выбор наполнителя скважины и определение его теплофизических характеристик.

В данной работе предлагается в качестве наполнителя для скважин использовать водно-песчаный раствор, который обладает свойством равномерного распределения в пространстве скважины и частичного проникновения в прилегающий массив грунта, создавая плотный контакт с трубами грунтового теплообменника.

Среднее значение коэффициента теплопроводности водно-песчаного раствора равно 1,15 Вт/м·К, объемной теплоемкости – $2,57 \cdot 10^6$ Дж/м³·К, температуропроводности – $4,58 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

4. Выбор конструкции грунтового теплообменника и материала труб, для его изготовления.

Грунтовые теплообменники могут быть выполнены из различных труб, как металлических, так и пластмассовых. Наиболее простым, надежным и технологичным по конструкции является U-образный грунтовый теплообменник, выполненный из полиэтиленовых труб, который поставляется на объект в бухте с U – образным наконечником заводского исполнения. Несмотря на то, что данные трубы имеют низкий коэффициент теплопроводности равный 0,42 Вт/м·К, их срок службы достигает 50 лет, так как температура теплоносителя, который они транспортируют не превышает 40 °С [20, 63].

5. Определение среднего теплового потока с одного метра скважины, $q_{скв}$, Вт/м.

Определяется средний тепловой поток с одного метра U-образного грунтового, согласно разработанной математической модели глава 3, п. 3.1.

Тепловой поток с одного метра скважины при применении U-образного грунтового теплообменника вычисляется по формуле:

$$q_{скв} = 2 \cdot q_{cp} \quad (4.10)$$

6. Расчет количества скважин для грунтовых теплообменников.

$$N_{cp} = \frac{Q_{зд}}{q_{скв} \cdot H} \quad (4.11)$$

где $Q_{зд}$ – нагрузка на систему сбора низкопотенциальной энергии грунта, Вт; $q_{скв}$ – средний тепловой поток с одного метра скважины, Вт/м; H – глубина одной скважины, м.

Глубина скважин варьируется в диапазоне 40 – 90 метров. Оптимальная глубина скважин 60 метров.

7. Определение расстояния между скважинами.

Зная тепловой поток, можно рассчитать необходимое расстояние между скважинами по формуле (3.28) либо воспользоваться номограммой (рисунок 4.7), созданной на основе методики представленной в главе 3, п. 3.2.

Путь движения по номограмме: зная отопительный период района застройки, пройти на линию $q_{скв} \cdot H$ (Вт), затем на кривую температурного перепада, на линии ординат получится количество энергии, полученное со скважины за отопительный период; с линии температурного перепада опуститься на линию объемной теплоемкости породы в скважине; далее на ординату – расстояние между скважинами.

Рассчитав количество скважин, и определив расстояние между ними, можно произвести разбивку территории. Если территории не достаточно под скважинное поле, то увеличением глубины до максимального значения - 90 метров, можно повысить производительность грунтовых теплообменников. Другой вариант увеличения производительности грунтового теплообменника – изменение параметров теплоносителя, но в пределах того диапазона, при котором обеспечивается стабильная работа геотермального теплового насоса. Еще способы увеличения производительности: применение труб для грунтового теплообменника из материала с высоким коэффициентом теплопроводности; увлажнение скважин.

4.3 Разработка компьютерной программы для расчета процессов теплопередачи в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта

Для расчета вертикальных систем СНЭГ разработана компьютерная программа «Расчет параметров устройства теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта» на основе математической модели (см. главу 3, п. 3.1, п. 3.2) и методики расчета систем СНЭГ, написанная на языке программирования Object Pascal (приложение 1). Данная программа позволяет определить количество тепловой энергии, которое грунтовый теплообменник может извлечь из массива грунта, при его работе в режиме теплоснабжения.

В программе, как и в методике, реализован индивидуальный подход для расчета и проектирования систем сбора низкопотенциальной энергии грунта, так как есть возможность учета продолжительности отопительного периода места строительства, теплофизические параметры грунтового массива, а так же свойства наполнителя скважины и теплоносителя (таблица 4.2, рисунок 4.8).

Таблица 4.2 - Пример исходных данных в программе «Расчет параметров устройства теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта» в условиях г. Владивостока

1	Продолжительность отопительного периода, сут/год	198
Исходные данные для массива грунта		
2	Расчетное расстояние массива грунта, м	2,95
3	Коэффициент теплопроводности грунта, Вт/м·К	1,74
4	Плотность грунта, кг/м ³	2203
5	Удельная теплоемкость грунта, Дж/кг·К	836
6	Начальная температура грунта, °С	8
Исходные данные для наполнителя скважины		
7	Коэффициент теплопроводности наполнителя, Вт/м·К	1,21
8	Плотность наполнителя, кг/м ³	1800
9	Удельная теплоемкость наполнителя, Дж/кг·К	2618
Исходные данные для грунтового теплообменника		
10	Длина трубы грунтового теплообменника, м	120
11	Наружный диаметр трубы, мм	0,032

12	Внутренний диаметр трубы, мм	0,026
13	Коэффициент теплопроводности материала труб грунтового теплообменника, Вт/м·К	0,42
14	Плотность материала труб грунтового теплообменника, кг/м ³	950
15	Удельная теплоемкость материала труб грунтового теплообменника, Дж/кг·К	2500
Исходные данные для теплоносителя		
16	Плотность теплоносителя, кг/м ³	1025
17	Температура теплоносителя на входе в грунтовой теплообменник, °С	1
18	Расход теплоносителя, кг/с	0,39

Особенностью программы является расчет расстояния между скважинами с грунтовыми теплообменниками. В практике проектирования таких систем данный параметр обычно выбирается исходя из общих усредненных рекомендаций, которые как показали расчеты (см. главу 3, п. 3.2), могут занизить его в 2 раза, и в таком случае будет происходить снижение энергетического потенциала грунта.

В результате расчета по исходным данным, указанным в таблице 4.2, вычисляются параметры, представленные в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Пример расчетных данных в программе «Расчет параметров устройства теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта» для г. Владивостока

1	Скорость теплоносителя, м/с	0,71
2	Температура теплоносителя на выходе из грунтового теплообменника, °С	2,75
3	Среднее значение теплового потока с метра трубы, Вт/м	21,92
4	Общее количество теплоты с одной скважины, Вт	2631,59
5	Расстояние между скважинами, м	6,5
6	Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·К	1597,49
7	Коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/м·К	0,5
8	Теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·К	3853,25
9	Кинематическая вязкость, м ² /с	2,9·10 ⁻⁶
10	Число Рейнольдса	6416,44

11	Число Прандтля	23,34
12	Число Нуссельта	82,78

Для наглядности распределения тепловых температурных полей в расчетной области, в программе реализована графическая интерпретация результатов расчета (рисунок 4.8).

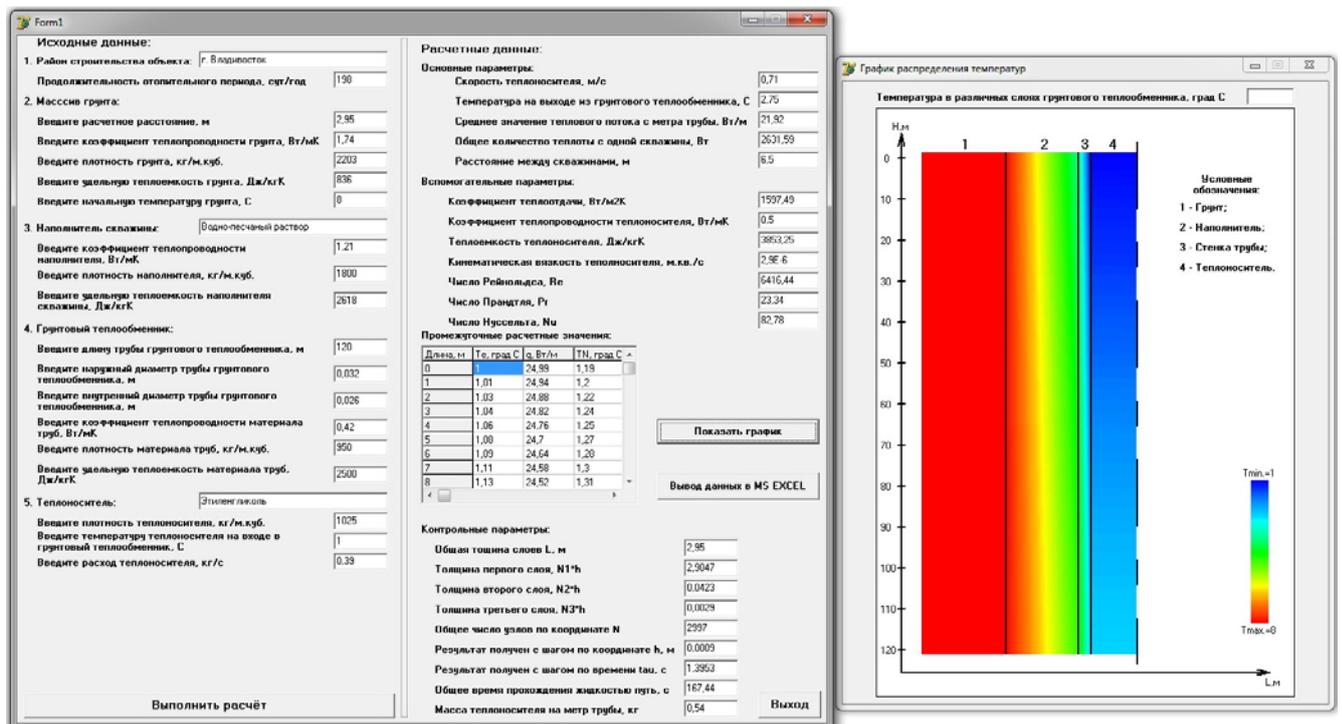


Рисунок 4.8 - Окна программы «Расчет параметров устройства теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта».

По данной программе «Расчет параметров устройства теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта» получено свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614307 [57].

Таким образом, разработанная методика и компьютерная программа расчета вертикальных систем СНЭГ позволяют рассчитать необходимые параметры для проектирования таких систем, выбрать наиболее оптимальный вариант для конкретного района строительства и создать эффективную, стабильную вертикальную систему СНЭГ для геотермальных тепловых насосов [29].

4.4 Разработка новой конструкции грунтового теплообменника

В результате выполнения исследований разработана новая конструкция грунтового теплообменника, которая объединяет в себе ряд факторов, повышающих эффективность работы такого устройства, которое может быть использовано в системах теплоснабжения производственных и жилых зданий [27].

Задача, на решение которой направлено данное изобретение, состоит в создании грунтового теплообменника (геотермальное устройство) с повышенной теплопроизводительностью. Научная новизна подтверждается патентом РФ на изобретение № 2529850 [51].

Цель изобретения состоит в повышении эффективности процесса теплообмена между массивом грунта и грунтовым теплообменником.

Схема устройства приведена на рисунках 4.9 и 4.10. Геотермальное устройство представляет собой скважину 1, опускную 2 и подъемные 3 трубы, наполнитель 4 геотермальной скважины 1, оголовок 5, накопительная камера 6, узел контроля 7 количества дренирующей жидкости в накопительной камере 6, средство доставки 8 дренирующей жидкости, насадка 9 опускной трубы 2, сборный коллектор 10, коническая полость 11, сетки 12, выхлопная водяная 13 и воздушная 14 трубы накопительной камеры 6, трехходовой кран 15 воздушной трубы 14, а также сетки 16, стакан 17, запорный клапан 18, спускные окна 19, шток 20, поплавков 21, сборная камера 22 узла контроля 7.

Опускная труба 2 имеет условный диаметр 32 мм, а подъемные трубы 3 - условный диаметр 15 мм.

В качестве наполнителя 4 геотермальной скважины 1 с высокой дренирующей способностью использован крупнозернистый песок.

Оголовок 5 выполнен условным диаметром 50 мм. Накопительная камера 6 имеет возможность сбора дренирующей жидкости с помощью конической

полости 11 и сетки 12, а также удаления дренирующей жидкости с помощью выхлопной водяной 13 и воздушной 14 труб.

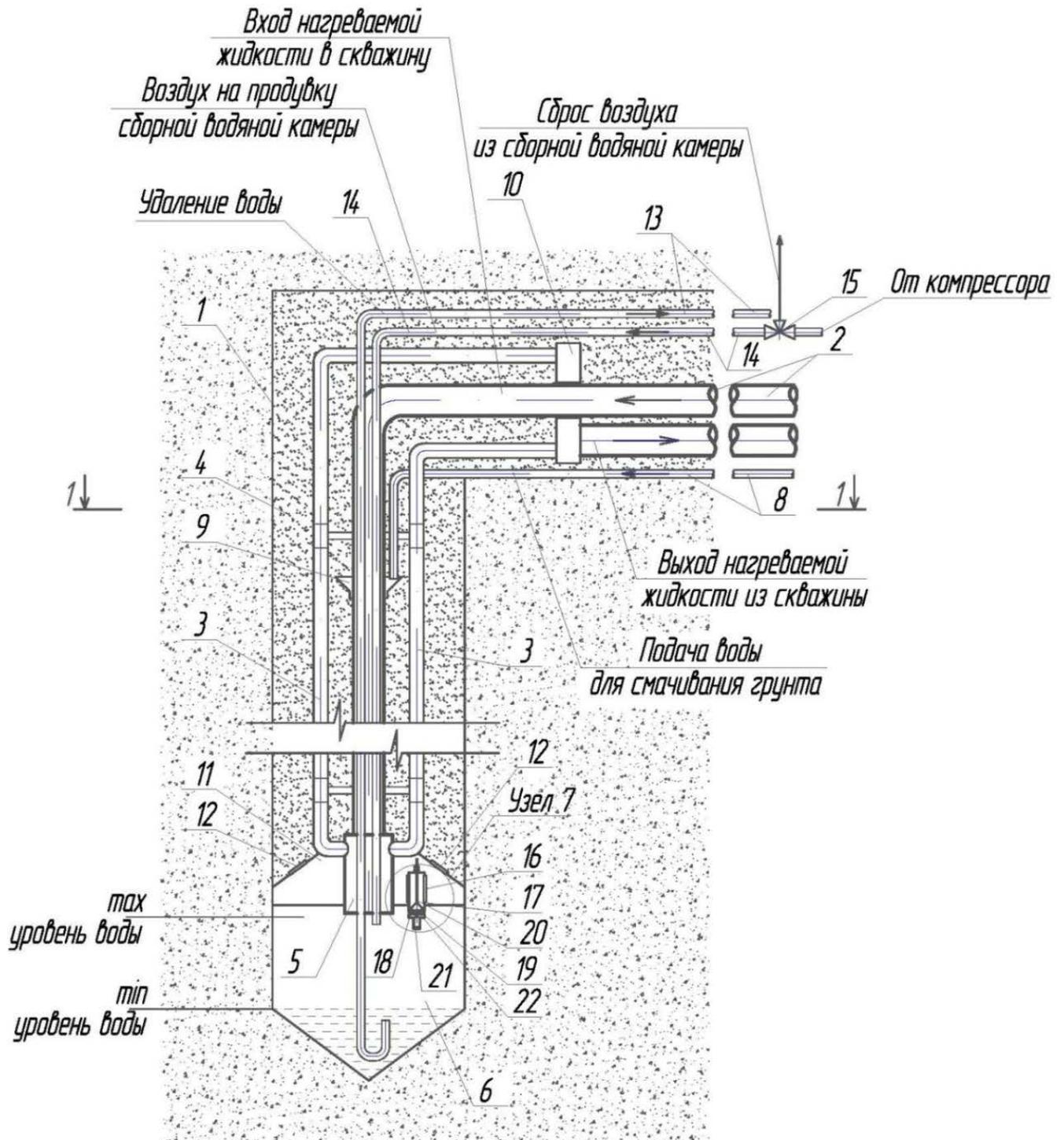


Рисунок 4.9 - Вертикальный разрез геотермального устройства.

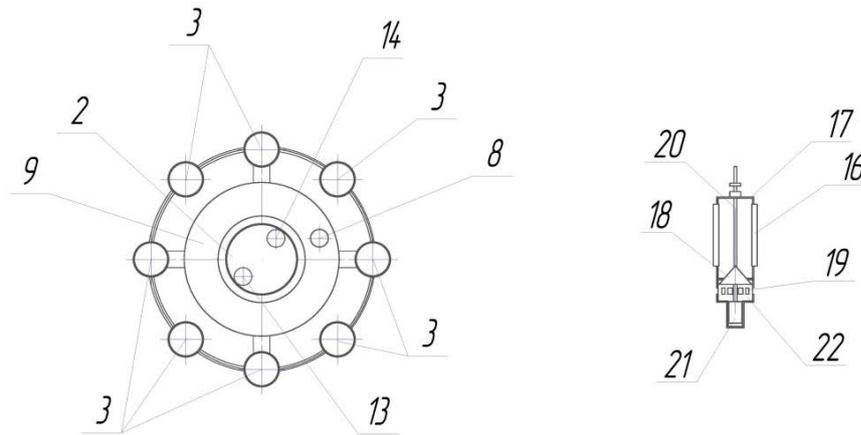


Рисунок 4.10 - Геотермальное устройство. Слева - горизонтальный разрез геотермального устройства; справа - узел контроля количества дренирующей жидкости в накопительной камере.

Узел контроля 7 количества дренирующей жидкости в накопительной камере 6 включает сетки 16, стакан 17, запорный клапан 18, спускные окна 19, шток 20, поплавков 21, сборная камера 22.

Средство доставки 8 дренирующей жидкости выполнено в виде трубы.

Насадка 9 выполнена в виде конического раструба, установленного на опускной трубе 2 с образованием кольцевого зазора, причем диаметр верхней кромки насадки 9 превышает диаметр нижней кромки.

Воздушная труба 14 снабжена трехходовым краном 15.

Запорный клапан 18 имеет коническую форму и выполнен пустотелым, а также он снабжен пустотелым поплавком 21, закрепленным на штоке 20.

При необходимости восстановления температурного потенциала грунта по средству доставки 8 дренирующей жидкости может быть подан теплоноситель в виде воды с повышенной температурой.

Принцип работы:

Рабочее тело, в виде незамерзающей жидкости, проходя по опускной трубе 2, через оголовок 5 и подъемные трубы 3, нагревается, после чего через сборный коллектор 10 попадает в теплообменник теплового насоса.

Нагрев рабочего тела происходит за счет теплоты грунта геотермальной скважины 1 при увлажненном наполнителе 4.

Для этого по средству доставки 8 от источника (на схеме не показан) в насадку 9 подают дренирующую жидкость, которая через кольцевой зазор насадки 9 стекает по внешней поверхности опускной трубы 2, одновременно увлажняя наполнитель 4 геотермальной скважины 1 по диаметру и глубине.

Далее дренирующая жидкость через сетки 12 поступает в коническую полость 11 и при ее наполнении попадает через сетки 16 узла контроля 7 в корпус стакана 17, нижнее основание которого является посадочным местом для запорного клапана 18.

Нормальное положение запорного клапана 18 открытое, при этом его основание располагается ниже спускных окон 19. В накопительную камеру 6 дренирующая жидкость поступает из сборной камеры 22 узла контроля 7 через спускные окна 19.

В процессе заполнения накопительной камеры 6 уровень дренирующей жидкости достигает максимального при подъеме поплавка 21 и закрытии запорного клапана 18. После чего, открывая трехходовой кран 15, по воздушной трубе 14 подают сжатый воздух от компрессора (на чертежах не показан). В результате чего запорный клапан 18 поджимается давлением сжатого воздуха, и дренирующая жидкость удаляется из накопительной камеры 6 по водяной трубе 13. Далее подачу воздуха прекращают.

Технический результат, достигаемый при решении поставленной задачи, выражается в повышении теплопроизводительности грунтового теплообменника вследствие следующих факторов:

- максимальное использование поверхности грунтового теплообменника за счет включения в процесс теплообмена опускной трубы и подъемных труб цилиндрического контура, а также увеличения количества и площади внешней поверхности подъемных труб;

– увлажнение наполнителя геотермальной скважины увеличивает его коэффициент теплопроводности и позволяет повысить эффективность отбора теплоты у грунта;

– возможность при необходимости более эффективного восстановления энергетического потенциала грунта за счет утилизации низкопотенциальных сбросных теплоносителей без включения в работу теплового насоса;

– повышение эффективности работы грунтовых теплообменников в условиях низкой естественной влажности глубинных грунтов и нарушении контактов теплообменных поверхностей геотермальной скважины с грунтом (вследствие деформаций, просадок и т.д.) благодаря возможности регулирования степени увлажнения наполнителя.

4.5 Выводы

Получена зависимость, характеризующая влияние эксплуатационных характеристик грунтовых теплообменников и теплофизических свойств наполнителя скважины на процесс теплообмена.

Результаты экспериментов, проведенных на имитационной модели, позволили установить, что на величину теплового потока наибольшее влияние оказывает температура входа теплоносителя.

Получена критериальная зависимость процесса конвективной теплоотдачи в трубе грунтового теплообменника, характеризующая переходную область течения жидкости $4,3 \cdot 10^3 < Re < 6,8 \cdot 10^3$.

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали хорошую сходимость с теоретическими исследованиями, что подтверждает достоверность теоретической математической модели.

Разработана методика и компьютерная программа (свидетельство РФ № 2016614307) расчета вертикальных систем СНЭГ, которая позволяет рассчитать необходимые параметры таких систем и выбрать наиболее оптимальный вариант,

учитывая теплофизические свойства грунтового массива, теплоносителя, материала труб теплообменника, а также район строительства объекта.

Разработана номограмма, которая позволяет определить необходимое расстояние между скважинами.

Разработанная новая конструкция грунтового теплообменника (патент РФ № 2529850), имеет следующие технические решения, повышающие его эффективность: увеличение поверхности теплообмена; возможность производить увлажнение наполнителя геотермальной скважины; возможность выполнять более эффективное восстановление энергетического потенциала грунта.

ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СИСТЕМ ТЕПЛО- И ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ НА БАЗЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В СОЧЕТАНИИ С ГРУНТОВЫМИ ТЕПЛООБМЕННИКАМИ

5.1 Рекомендации для проектирования систем тепло- и холодоснабжения зданий на базе геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками

При проектировании систем тепло- и холодоснабжения зданий с применением геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками следует руководствоваться следующими нормативными документами: СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»; СП 60.13330.2012 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»; СП 30.13330.2012 «Внутренний водопровод и канализация зданий»; СП 41-101-95 «Проектирование тепловых пунктов»; СП 124.13330.2012 «Тепловые сети», СП 41-104-2000 «Проектирование автономных источников теплоснабжения» и другими нормативными документами.

На стадии проектирования необходимо добиваться согласованности технических решений по архитектуре, конструкции и инженерным системам с целью выбора оптимальных схем внедрения энергосберегающих технологий, обеспечивающих минимальные сроки окупаемости дополнительных капитальных затрат [54].

Источник теплоснабжения на базе ГТН в сочетании с грунтовыми теплообменниками, на стадии проектирования объекта обосновано выбирают при наличии определенных предпосылок:

- здание имеет очень высокий (А++, А+, А) и высокий (В+, В) классы энергосбережения, в соответствии с [70];
- нет возможности подключения к централизованной системе теплоснабжения;

- выделяемой электрической мощности для объекта недостаточно для систем тепло- холодоснабжения;
- наличие холодильной нагрузки;
- применяются низкотемпературные системы отопления;
- наличие средне- и высокотеплоёмких грунтов (объёмная теплоёмкость выше $4 \cdot 10^3$ кДж/м³·К).

Соответственно, первоначально необходимо определить нагрузки на системы отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и горячее водоснабжение, и рассмотреть возможности их снижения. Далее провести оценку доступного энергетического потенциала для вертикальной системы СНЭГ (см. глава 4, п. п. 4.2, 4.3). После подтверждения выбора грунтовых теплообменников, в качестве источника энергии для ГТН, производится подбор данного оборудования на максимальную требуемую нагрузку (тепловая или холодильная), учитывая рекомендации фирм-производителей теплонасосного оборудования [55, 62].

Для обеспечения надежной и стабильной работы источника предусматривается несколько тепловых насосов, за исключением случаев, когда их надежность обеспечивается внутренним устройством. В качестве дополнительных традиционных источников тепловой энергии, целесообразно применять нагреватели, легко поддающиеся автоматизации, например, электрические или газовые. Нагреватели могут устанавливаться по отношению к тепловым насосам как параллельно (со смешиванием потоков теплоносителя), так и последовательно (догревание теплоносителя). [54]

В регионах, для которых свойственно интенсивное и продолжительное поступление солнечной энергии в течение года, например Приморский край, целесообразно применять гибридные установки [86, 89], то есть совместно использовать ГТН и солнечные коллекторы (СК), схема комбинированного источника защищена патентом РФ №85989 [52]. При этом производительность СК определяется нагрузкой на систему горячего водоснабжения (ГВС), с целью

выравнивания суточной неравномерности потребления горячей воды применяются аккумулирующие ёмкости.

Достоинством гибридной установки, является возможность осуществлять восстановление энергетического потенциала грунта в летний период времени за счет избытков тепловой энергии, поступающих от СК, которые сбрасываются в грунтовый теплообменник. Восстанавливать энергетический потенциал грунтового массива также позволяет работа ГТН в режиме холодоснабжения.

На рисунках 5.1, 5.2 приведены два варианта базовых принципиальных схем источника тепло- и холодоснабжения на базе ГТН, использующих низкопотенциальную энергию грунта. Данные схемы могут быть изменены, учитывая индивидуальные особенности теплонасосного оборудования, закладываемые производителем, а также дополнены оборудованием, необходимым для конкретного объекта, подбор и установку которого следует производить в соответствии с [68]. Важным пунктом при реализации такого вида источника, является установка средств автоматизации и контроля, обеспечивающих стабильную, надежную и максимально эффективную его работу.

Также создание энергоэффективного тепло- холодоснабжения здания подразумевает выбор энергоэффективных схемных решений для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, общие принципы которых приведены в [65, п. 11].

Применение геотермальных тепловых насосов с грунтовыми теплообменниками целесообразно в том случае, когда применяются низкотемпературные системы отопления, которые могут быть реализованы с помощью радиаторов, конвекторов, системы теплый пол и фанкойлов. Из перечисленных вариантов, с экономической точки зрения, оптимальной является система с фанкойлами, так как они могут работать в режиме тепло- и холодоснабжения. Применение других видов систем для отопления здания потребует устройства отдельных систем для кондиционирования воздуха в помещениях.

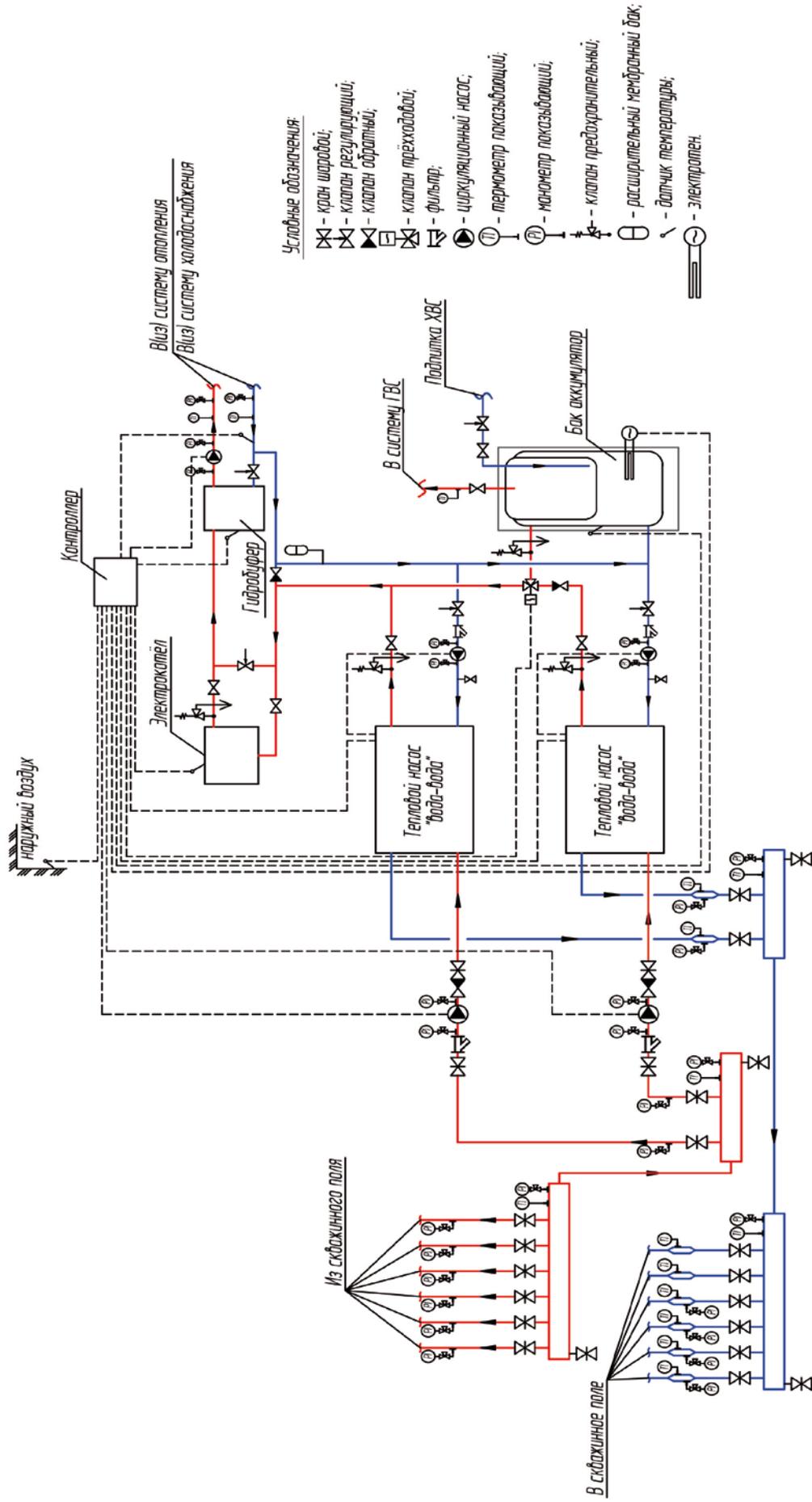


Рисунок 5.1 - Принципиальная схема индивидуального источника тепло- и холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов

НАСОСОВ

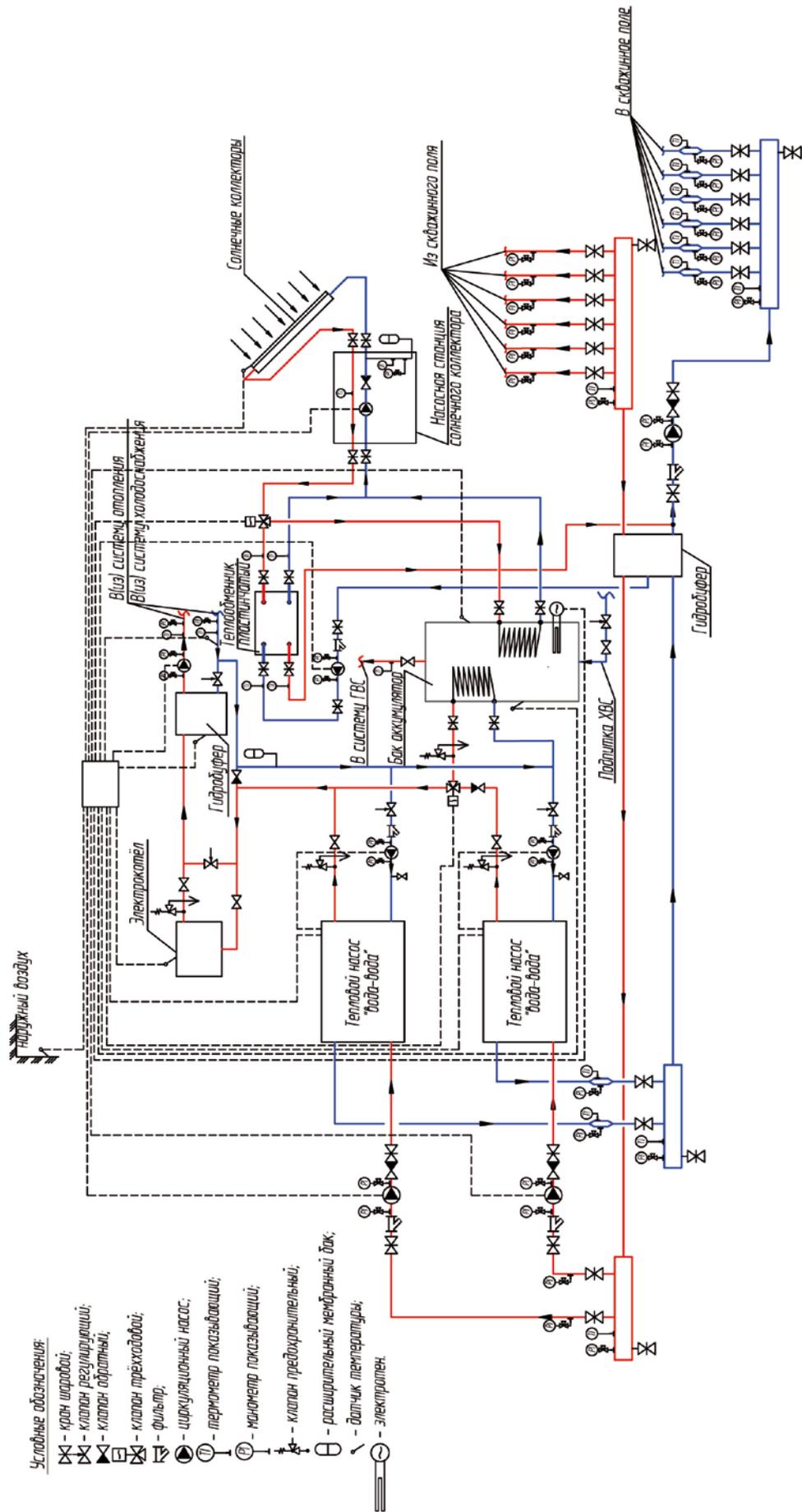


Рисунок 5.2 - Принципиальная схема индивидуального источника тепло- и холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов и солнечных коллекторов

Соответственно при проектировании зданий и сооружений с применением геотермальных тепловых насосов (ГТН), использующих низкопотенциальную энергию грунта, объект рассматривается как единое целое и требует предварительного технико-экономического обоснования.

5.2 Практическая реализация систем сбора низкопотенциальной энергии грунта в Приморском крае

Практическая реализация систем сбора низкопотенциальной энергии грунта в Приморском крае, может быть представлена, выполненными проектными работами, монтажом систем и длительными сроками эксплуатации различных объектов: демонстрационно-выставочный энергоэффективный «Экодом» по ул. Бородинская, 14 в г. Владивостоке [91]; индивидуальный жилой дом по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке; индивидуальный жилой дом по ул. Главная, 23е в г. Владивостоке (приложение 2, 3).

Для всех этих объектов запроектирован гибридный источник теплоснабжения на базе ГТН и СК.

Более подробное рассмотрение схем и принципа работы гибридного источника теплоснабжения на базе ГТН и СК (рисунок 5.5, 5.6) приводится на примере двух объектов: индивидуальный жилой дом по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке, индивидуальный жилой дом по ул. Главная, 23е в г. Владивостоке.

Первый объект - индивидуальный жилой дом по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке, расположен в пригороде г. Владивостока без возможности подключения к центральной системе теплоснабжения. Площадь отапливаемой части дома составляет 467 м².

Расчетные параметры наружного воздуха приняты:

- в холодный период года - температура воздуха минус 24 °С;
- в теплый период года - температура воздуха плюс 23,6 °С;
- скорость движения воздуха 9 м/сек.

Нагрузка на систему отопления составляет 20 кВт.

Нагрузка на систему вентиляции составляет 6 кВт.

Нагрузка на систему кондиционирования составляет 30 кВт.

Нагрузка на ГВС составляет 10 кВт.

Учитывая особенности расположения и нагрузки на системы жизнеобеспечения дома, с целью максимальной экономии электрической энергии, были выбраны следующие технические решения для обеспечения требуемых параметров микроклимата:

Система отопления жилого дома выполнена с использованием фанкойлов, теплого пола, радиаторов. Теплоноситель в системе отопления дома - вода.

Параметры теплоносителя:

- расчетная температура в подающем трубопроводе 45 °С;
- расчетная температура в обратном трубопроводе 35 °С;

Система вентиляции - приточно-вытяжная механическая.

Охлажденный воздух системы кондиционирования поступает в помещения по воздуховодам, а также дополнительное охлаждение воздуха происходит за счет местных доводчиков - фанкойлов.

Для покрытия нагрузки на тепло- и холодоснабжение дома предусмотрено два ГТН «вода-вода» с функцией реверса, фирмы FHP, марки WP-036-A (минимальная производительность по теплу 7,26 кВт; по холоду 8,29 кВт) и WP-072-A (минимальная производительность по теплу 13,41 кВт; по холоду 15,19 кВт) и один тепловой насос «вода-воздух» фирмы FHP, марки GT-036-A (минимальная производительность по теплу 6,43 кВт; по холоду 8,77 кВт) (рисунок 5.1, 5.2). Подбор тепловых насосов произведен на полное покрытие нагрузки систем тепло- и холодоснабжения дома.



Рисунок 5.3 - Фотография тепловых насосов, установленных в жилом доме по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке.

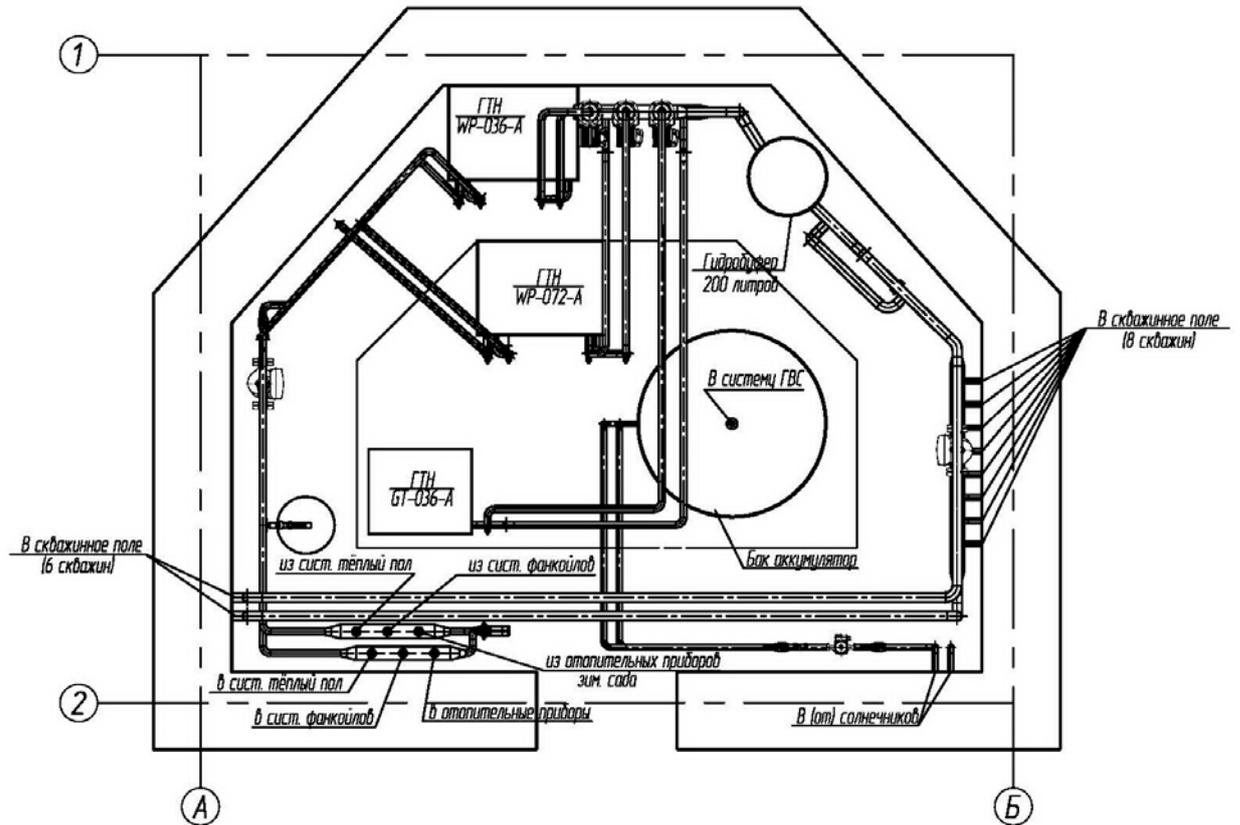


Рисунок 5.4 - План технического помещения в жилом доме по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке.

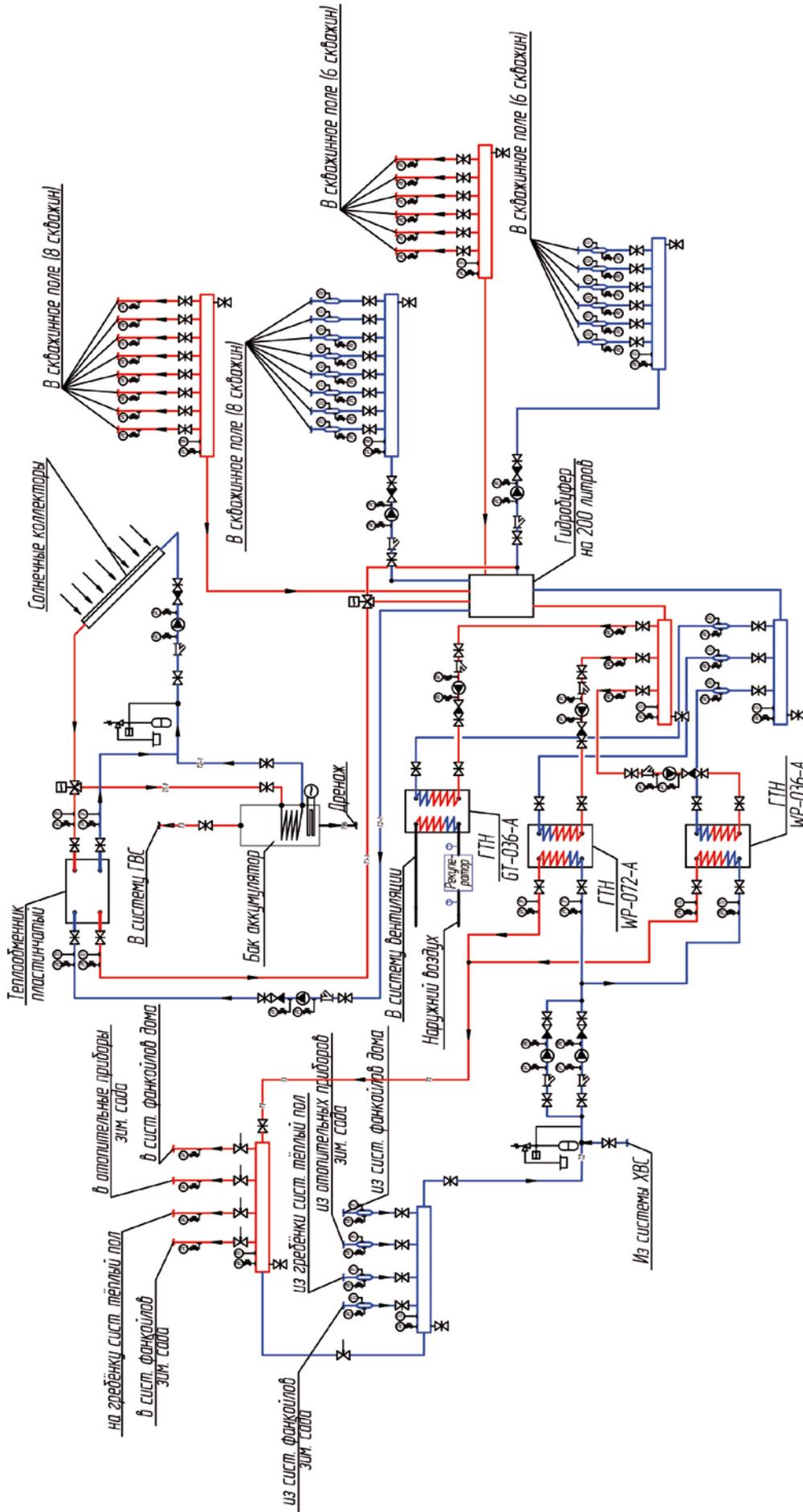


Рисунок 5.5 - Принципиальная схема индивидуального источника тепло- и холодоснабжения жилого дома по ул. Земляничная, 17 в

г. Владивостоке

В качестве низкопотенциального источника энергии для ГТН используется скважинное поле из 8 скважин по 40 метров и 6 скважин по 60 метров. Количество скважин определено из расчета покрытия нагрузки на систему теплоснабжения.

Для устройства скважинного поля производилось рытье траншей на глубину ниже глубины промерзания грунта. Скважины пробурены диаметром 150 мм на расстоянии 6 метров друг от друга. Применены грунтовые теплообменники U-образного типа, которые выполнены из полиэтиленовых труб, специально предназначенных для этих целей, «Geo-black» фирмы «Vanguard Piping Systems Inc», США. Пустое пространство в скважине заполнено бентонитом.

Обвязка скважинного поля осуществлена по двухтрубной схеме с попутным движением теплоносителя. Для стабилизации гидравлического режима работы геотермальных тепловых насосов, подключение к грунтовым теплообменникам осуществляется через гидравлический буфер. На каждый ГТН устанавливается по циркуляционному насосу и отдельные насосы (один основной, один резервный) на скважинное поле.

Четыре плоских солнечных коллектора АЕ-40, фирмы «АЕЕ-Solar», производительностью 2,5 кВт каждый, используются в качестве источника для ГВС в летний и переходный период года, а также для дополнительного подогрева теплоносителя скважинного поля в зимний период года, что благоприятно влияет на работу ГТН и увеличивает коэффициент трансформации.

Приготовление горячей воды осуществляется в скоростном пластинчатом водонагревателе (пластинчатый теплообменник) «Alfa Laval», который работает на бак-аккумулятор ГВС.

С целью снижения теплотерь трубопроводы теплового узла покрываются тепловой изоляцией толщиной не менее 20 мм.

Описание режимов работы источника:

В летний и переходный период, когда нет нагрузки на отопление, запроектированный источник работает следующим образом. Основной задачей

СК является нагрев воды в баке-аккумуляторе ГВС. Нагрев производится при падении температуры в баке до 40 °С и ниже, и прекращается при достижении температуры 60 °С. Если температура воды для целей ГВС удовлетворяет поставленным условиям, то циркуляция теплоносителя от СК происходит через теплообменник, предназначенный для подогрева теплоносителя скважинного поля. Таким образом, в летний период теплота аккумулируется в грунте, что благоприятно влияет на работу ГТН в отопительный период. Теплота в скважинное поле сбрасывается до тех пор, пока не возникнет потребность в нагреве воды для ГВС. В случае неисправности СК нагрузка на ГВС обеспечивается электрическим водонагревателем, встроенным в бак аккумулятор, или тепловым насосом.

В летний период ГТН, благодаря функции реверса, работают на систему кондиционирования помещений жилого дома, обеспечивая тем самым восстановление и повышение энергетического потенциала грунтового массива.

В отопительный период работа теплоисточника изменяется следующим образом: нагрузка на отопление и горячее водоснабжение обеспечивается ГТН «вода-вода» WP-036-A и WP-072-A. Солнечные коллекторы в зимний период работают менее эффективно и используются только для дополнительного нагрева теплоносителя скважинного поля. Нагрузка на вентиляцию жилого дома обеспечивается ГТН «вода-воздух» GT-036-A, для которого первоначальный нагрев наружного воздуха происходит за счет рекуператора, что обеспечивает более эффективную и стабильную работу ГТН.

Владельцами жилого дома по адресу: Земляничная, 17, была предоставлена возможность 29 января ($t_{н.} = -16$ °С) снять показания работы ГТН в режиме теплоснабжения (таблица 5.1).

На основе полученных показаний, посчитан средний тепловой поток, приходящийся на метр скважины, который равен 27,1 Вт/м. Произведено сравнение данного значения с величиной среднего теплового потока 32,6 Вт/м, получаемого при расчете по разработанной математической модели глава 3, п. 3.1,

расхождение составило 16,8 %, что указывает на удовлетворительную сходимость результатов расчета.

Таблица 5.1 - Показатели работы тепловых насосов в жилом доме по адресу:
ул. Земляничная, 17, в г. Владивостоке

Марка теплового насоса	$G_{\text{эт.}}$, л/с	$G_{\text{воды}}$,	$T_{\text{вх. исп.}}$, °С	$T_{\text{вых. исп.}}$, °С	$T_{\text{вых. конд.}}$, °С	$T_{\text{вх. конд.}}$, °С	P, кВт	COP
		л/с						
WP-072-A	1,043	0,287	0,1	2,4	56,9	45	5,059	2,8
		-						
WP-036-A	0,633	0,174	0,3	2,4	54,7	44	2,675	2,9
		-						
GT-036-A	0,525	-	0,4	2,4	22	-2,2	2,154	2,9
		885						

Второй объект - индивидуальный жилой дом по ул. Главная, 23е в г. Владивостоке, расположен в рекреационной зоне и удален от центральных систем теплоснабжения. Площадь отапливаемой части дома составляет 275 м².

Расчетные параметры наружного воздуха приняты такими же, как и для предыдущего объекта.

Для данного дома определяющая нагрузка - на систему теплоснабжения:
нагрузка на систему отопления составляет 13 кВт;
нагрузка на систему горячего водоснабжения (ГВС) составляет 3 кВт.

Система отопления жилого дома выполнена с использованием фанкойлов, теплого пола, радиаторов. Теплоноситель в системе отопления дома - вода.

Расчетные параметры теплоносителя в системе отопления:

- расчетная температура в подающем трубопроводе 40 °С;
- расчетная температура в обратном трубопроводе 30 °С.

Расход теплоносителя 1,3 м. куб./ч.

При необходимости, охлаждение воздуха, в летний период, осуществляется системой фанкойлов.

Источниками теплоснабжения служат: скважинное поле, состоящее из 6 скважин по 60 м с U-образными грунтовыми теплообменниками; солнечная энергия, воспринимаемая тремя СК, и электроэнергия. Принципиальная схема источника теплоснабжения жилого дома изображена на рисунке 5.6.

На кровле жилого дома, установлены солнечные коллекторы (Nibe FP215 P) под углом 45° , ориентированные на юг. Рядом с домом располагается скважинное поле из 6 скважин по 60 метров.

В тепловом пункте установлено следующее оборудование: бак аккумулятор системы ГВС на 450 литров; ГТН (Nibe F1145 17) мощность 17 кВт; насосная станция Nibe SPS10, осуществляющая циркуляцию незамерзающей жидкости в контуре СК; электродкотёл Zota-12, мощностью 12 кВт, служащий для поддержания требуемой температуры теплоносителя в системе отопления; насос Grundfos UPS 25-55 180 (1 рабочий, 1 резервный), обеспечивающий циркуляцию теплоносителя в системе отопления (тёплый пол); насос Grundfos UPS 32-120 F (1 рабочий, 1 резервный), обеспечивающий циркуляцию теплоносителя скважинное поле и бак гидробуфер; клапан редукционный RP204 dy20, необходимый для подпитки бака аккумулятора ГВС при водоразборе; трёхходовой клапан ESBE 3MG32-25 dy32, обеспечивающий переключение движения потока теплоносителя между ГТН и электродкотлом Zota-12; трёхходовой клапан Nibe dy20, осуществляющий переключение потока теплоносителя от СК в бак аккумулятор ГВС или на теплообменник (утилизация избытков теплоты от солнечных коллекторов в скважинное поле); клапан предохранительный КПП 096-01 dy25; приборы КиП.

На трубопроводах предусмотрены автоматические воздушосбросники для выпуска воздуха в верхних точках и сбросники с условным проходом dy 15 мм для спуска воды в нижних точках трубопроводов.

Защита от превышения давления при работе установки обеспечивается установкой предохранительных клапанов. Сброс воды от предохранительных клапанов предусмотрен в напорный дренажный приямок.

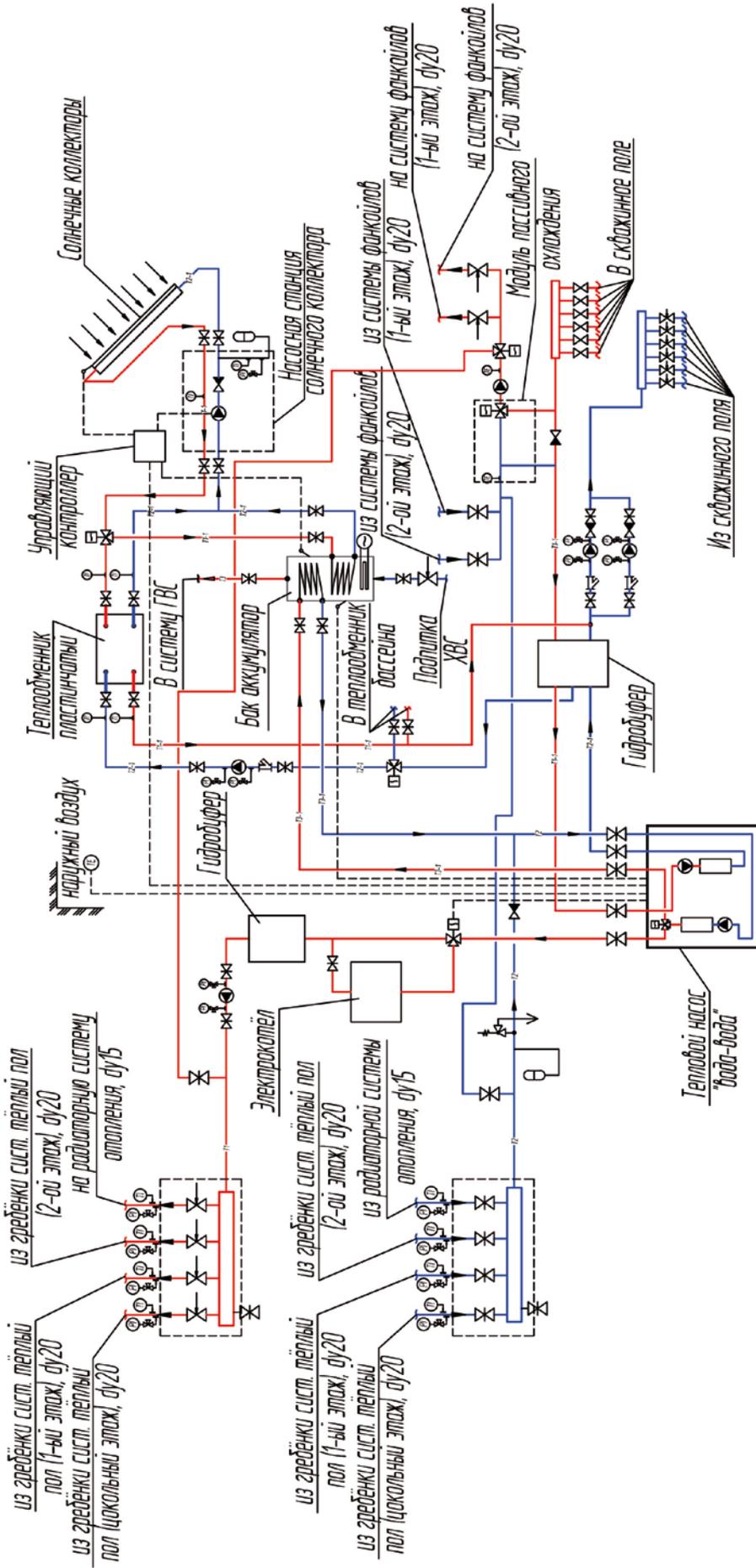


Рисунок 5.6 - Принципиальная схема индивидуального источника тепло- и холодоснабжения жилого дома по ул. Главная, 23е в г.

Владивостоке

Трубопроводы теплового узла покрываются тепловой изоляцией толщиной не менее 20 мм.

Описание работы источника:

В режиме теплоснабжения основную нагрузку обеспечивают ГТН (Nibe F1145 17) мощностью 17 кВт и три плоских СК (Nibe FP215 P), в случае необходимости в работу источника включается электродом Zota-12. Полученная теплота от СК идёт на нагрев бака аккумулятора системы ГВС. В случае неисправности СК нагрузка на ГВС обеспечивается ГТН и электрическим водонагревателем.

В отопительный период грунтовые теплообменники извлекают энергию грунта, и теплоноситель из скважинного поля поступает в испаритель ГТН с температурой 2-4 °С, при этом со стороны потребителя температура теплоносителя составляет 40-50 °С.

В летний период времени излишки неиспользуемой теплоты от СК сбрасываются в скважинное поле, для поддержания его температурного потенциала, а также используются для подогрева воды в бассейне.

Работу источника в режиме холодоснабжения обеспечивает специальный модуль пассивного охлаждения Nibe PCS44, который является дополнительным устройством для ГТН.

Тепловой насос оборудован управляющим компьютером, который позволяет планировать работу систем отопления, горячего водоснабжения, а также кондиционирования для каждого дня недели или более длительных периодов, что обеспечивает комфорт, экономию и безопасность работы оборудования.

Основные требования к работе установки: для бесперебойной работы системы теплоснабжения жилого дома, установить дизельный электрогенератор и «бесперебойники»; «бесперебойники» должны обеспечивать работоспособность системы в момент отключения электроснабжения и включения дизельного электрогенератора; циркуляция в

контуре "солнечные коллектора и бак аккумулятор" должна осуществляться, когда температура теплоносителя в СК выше температуры в баке ГВС на 5 °С, если равна и ниже, циркуляция отключается; предусмотреть включение циркуляции солнечного контура в зимний период времени, для оттаивания снега на СК, отдельным выключателем; избытки солнечной энергии утилизировать через теплообменник в скважинное поле, для поддержания его температурного потенциала; в контуре тепловой насос и грунтовый теплообменник циркулирует специальная жидкость этиленгликоль или спирт.

В системе отопления необходимо поддерживать параметры теплоносителя 40/30 °С. При падении температуры теплоносителя, его догрев осуществляется электрическим котлом Zota -12 мощностью на 12 кВт.

К достоинствам запроектированных источников следует отнести взаимозаменяемость источников, что обеспечивает бесперебойность теплоснабжения объектов; рациональное потребление традиционных источников энергии и соответственно минимальное влияние оборудования на окружающую среду.

5.3 Оценка экономической эффективности источника тепло- и холодоснабжения, использующего низкопотенциальную энергию грунта

Для жилого дома, расположенного по адресу: г. Владивосток, ул. Земляничная, 17, проведено сопоставление, с точки зрения экономической эффективности, запроектированного комбинированного источника тепло-холодоснабжения на базе ГТН, использующих низкопотенциальную энергию грунта, с наиболее распространенным источником тепло-холодоснабжения для жилых домов коттеджного типа в Приморском крае: на базе

жидкотопливного котла (резервный источник – электрический котел) и чиллера.

При проведении оценки экономической эффективности выполнено сравнение только основного оборудования источника систем тепло-холодоснабжения дома, без учета внутренних систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, так как принимается, что для всех вариантов внутренние инженерные системы одинаковы.

Начальные капиталовложения для устройства комбинированного источника тепло- и холодоснабжения на базе ГТН и СК складываются из следующих величин: стоимость и монтаж теплового насоса; стоимость бурения скважин; стоимость трубопроводов скважинного поля и их монтаж.

Стоимость монтажных работ, исходя из сложившихся на рынке Приморского края цен, как правило, составляет 25% - 35% стоимости оборудования. Для расчетов принято среднее значение стоимости монтажных работы - 30% стоимости оборудования.

Единовременные затраты на устройство источника на базе ГТН и СК:

$$K_1 = 1,3 \cdot (K_{Г.Т.Н.} + K_{ТР.} + K_{С.К.}) + K_{СКВ}. \quad (5.1)$$

где $K_{Г.Т.Н.}$ – стоимость теплового насоса, руб.; $K_{ТР.}$ – стоимость трубопроводов скважинного поля, руб.; $K_{С.К.}$ – стоимость солнечных коллекторов, руб.; $K_{СКВ.}$ – стоимость бурения скважин (стоимость бурения принимается с учетом стоимости наполнителя), руб.

$$K_1 = 1,3 \cdot (856414 + 85680 + 275880) + 1904000 = 3487366 \text{ руб.}$$

Из полученного результата видно, что 55 % денежных затрат, при создании комбинированного источника тепло- холодоснабжения на базе ГТН и СК, приходится на бурение скважин для грунтовых теплообменников.

Начальные капиталовложения для устройства источника теплоснабжения на базе жидкотопливного котла (резервный источник – электрический котел) складываются из следующих величин: стоимость и монтаж жидкотопливного котла; стоимость и монтаж электрического котла, а

также стоимость подключения дома на нагрузку свыше 15 кВт; стоимость и монтаж чиллера.

$$K_2 = 1,3 \cdot (K_{Ж.К.} + K_{Р.К.} + K_{Ч.}) \quad (5.2)$$

где $K_{Ж.К.}$ – стоимость жидкотопливного котла, руб.; $K_{Р.К.}$ – стоимость резервного котла, руб.; $K_{Ч.}$ – стоимость чиллера, руб.

$$K_2 = 1,3 \cdot (62200 + 96820 + 556326) = 929950 \text{ руб.}$$

Годовые расходы теплоты на систему отопления составляют $Q_{от}^{zod} = 52,5$ МВт, на систему вентиляции $Q_{вент}^{zod} = 18,9$ МВт, на горячее водоснабжение за зимний период - $Q_h^w = 19,8$ МВт, за летний период - $Q_h^s = 9,7$ МВт. Средний коэффициент замещения тепловой нагрузки на горячее водоснабжение за счет солнечной энергии в летний период времени для г. Владивостока равен 0,8. Годовой расход холода составит $Q_{хол}^{zod} = 13,7$ МВт.

При определении эксплуатационных затрат источника тепло-холодоснабжения на базе ГТН и СК, учитывались стоимость потребляемой тепловыми насосами электроэнергии (тариф на электроэнергию в Приморском крае 2,66 руб./кВт·ч на 2016 г.), амортизационные отчисления (приняты равными 3% в год от суммы единовременных затрат [93]), затраты на сервисное обслуживание (приняты равными 3,5% в год от затрат на амортизацию [93]) и прочие эксплуатационные затраты (приняты равными 3% в год от общей суммы эксплуатационных затрат [93]), в результате получено $C_1 = 212503$ руб./год.

Эксплуатационные затраты источника тепло-холодоснабжения на базе жидкотопливного котла и чиллера, равные $C_2 = 481263$ руб./год, определены с учетом потребления котлом дизельного топлива (средняя стоимость жидкого топлива для г. Владивостока равна 37 руб./л), потребляемой электроэнергии для работы чиллера, амортизационных отчислений (приняты равными 3% в год от суммы единовременных затрат), затрат на сервисное обслуживание (приняты равными 5,5% в год от затрат на амортизацию [93]) и прочих затрат

(приняты равными 5% в год от общей суммы эксплуатационных затрат [93]). Значение процентов на сервисное обслуживание и прочие затраты в данном случае выбраны, исходя из технологических особенностей жидкотопливного котла.

Приведенные затраты для рассматриваемых вариантов определяются по формуле:

$$P_i = C_i \cdot T_n + K_i \quad (5.3)$$

где P_i – приведенные затраты, руб./год; C_i – эксплуатационные затраты, руб./год; K_i – единовременные затраты, руб.; T_n – нормативный срок окупаемости требуемых капитальных вложений за счёт уменьшения эксплуатационных затрат, год (равный 10 лет для солнечно-теплонасосных систем тепло- холодоснабжения [53]).

Проведя сравнение затратным методом, установлено, что при данных параметрах экономически целесообразным является источник тепло- и холодоснабжения на базе ГТН и СК:

$$P_1 = 212503 \cdot 10 + 3487366 = 561240 \text{ руб./год};$$

$$P_2 = 481263 \cdot 10 + 929950 = 574258 \text{ руб./год}.$$

Для окончательного принятия решения об экономической эффективности применения наиболее целесообразного варианта определен простой срок окупаемости единовременных затрат (5.4) и коэффициент сравнительной эффективности (5.5), при этом сравнение производится по нормативным значениям $T_n = 10$ лет и $E_n = 10\%$.

Срок окупаемости без учета фактора времени равен:

$$T_{\phi} = \frac{K_1 - K_2}{C_2 - C_1} \quad (5.4)$$

Фактический коэффициент экономической эффективности определяется по формуле:

$$E_{\phi} = \frac{C_2 - C_1}{K_1 - K_2} \quad (5.5)$$

По результатам расчета получен простой срок окупаемости $T_{\phi}=9,5$ лет, что не превышает нормативного $T_n=10$ лет, и по фактическому коэффициенту экономической эффективности $E_{\phi}=0,105 \geq E_n=0,01$, условие также выполняется. Соответственно эффективность капитальных вложений для источника тепло- и холодоснабжения на базе ГТН и СК без приведения результатов к году оценки по сроку окупаемости обеспечена.

Используя методику [26], рассчитан экономический эффект при реализации первого варианта источника тепло- и холодоснабжения для жилого дома, расположенного по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке, в сравнении со вторым, в ценах 2016 года:

$$\Delta_{\phi}=(481263-212503) \cdot 10+(929950-3487366)=130182 \text{ руб./год}$$

Полученное значение свидетельствует о незначительном экономическом эффекте, это объясняется большими единовременными затратами, необходимыми при создании источника тепло- и холодоснабжения на базе ГТН и СК, что безусловно является недостатком таких систем. Снижение единовременных затрат возможно за счет применения более дешевых аналогов геотермальных тепловых насосов, солнечных коллекторов, например, производства Китай, применением доступного и менее дорогого наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками, а также увеличения эффективности работы грунтовых теплообменников, что позволит уменьшить затраты на бурение скважин.

В соответствии с проведенными исследованиями относительно поиска альтернативного наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками (см. главу 2) предложено использовать водно-песчаный раствор. В связи с этим, вновь проведен расчет основных технико-экономических показателей для рассмотренных выше вариантов источников тепло- и холодоснабжения жилого дома, расположенного по адресу: г. Владивосток, ул. Земляничная, 17, только с учетом изменений по первому варианту, в части касающейся наполнителя для скважин. Результаты расчета сведены в таблицу 5.2.

По результатам расчета получен фактический срок окупаемости $T_{\phi}=6,5$ лет, что не превышает нормативного $T_n=10$ лет, и фактический коэффициент экономической эффективности $E_{\phi}=0,15 \geq E_n=0,01$, условия выполняется.

Таблица 5.2 – Основные технико-экономические показатели различных вариантов источников тепло- холодоснабжения жилого дома, по адресу: г.

Владивосток, ул. Земляничная, 17

Вид источника тепло- и холодоснабжения	Единовременные затраты, руб.	Эксплуатационные затраты, руб./год	Приведенные затраты, руб./год
ГТН и СК (наполнитель водно-песчаный раствор)	2807366	192491	473227
Жидкотопливный котел и чиллер	929950	481263	574258

Экономический эффект в данном случае, в ценах 2016 года, составит:

$$Э_{\phi}=(481263-192491) \cdot 10+(929950-2807366)=1010307 \text{ руб./год}$$

На основе рассмотренного примера определены удельные значения единовременных затрат 24497 руб./МВт и эксплуатационных затрат 1680 руб./год на 1 МВт, используя которые, рассчитан годовой экономический эффект в ценах 2016 года для двух других объектов практической реализации комбинированного источника тепло- холодоснабжения на базе ГТН в сочетании с грунтовыми теплообменниками и СК (таблица 5.3).

Результаты технико-экономического сравнения показали, что при принятых условиях расчета, цены оборудования, тарифов на электроэнергию, дизельное топливо, срок окупаемости источника тепло- и холодоснабжения на базе ГТН, использующих низкопотенциальную энергию грунта, экономически привлекателен и входит в предел нормируемого срока окупаемости, а применение альтернативного наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками, предложенного в рамках исследований,

проведенных в данной работе, позволяет улучшить технико-экономические показатели.

Таблица 5.3 – Основные технико-экономические показатели объектов практической реализации комбинированного источника тепло- и холодоснабжения на базе ГТН в сочетании с грунтовыми теплообменниками и СК

Название объекта	Единовременные затраты, руб.	Эксплуатационные затраты, руб./год	Экономический эффект в ценах 2016 г., руб./год	
			Наполнитель бентонит	Наполнитель водно-песчаный раствор
Индивидуальный жилой дом по ул. Главная, 23е в г. Владивостоке (площадь 275 м ²)	1374663	83765	51316	398246
Демонстрационно-выставочный энергоэффективный «Экодом» по ул. Бородинская, 14 в г. Владивостоке (площадь 363 м ²)	2758883	168113	102988	799262

Кроме экономических показателей стоит отметить минимальное воздействие на окружающую среду при использовании геотермальных тепловых насосов, грунтовых теплообменников и солнечных коллекторов, а также высокий срок эксплуатации грунтовых теплообменников, который в настоящее время может составлять 50-70 лет.

На сегодняшний день, оценка перспективы широкомасштабного внедрения ГТН в сочетании с грунтовыми теплообменниками и СК, свидетельствует о том, что для повышения коммерческой эффективности инвестиционных проектов данной направленности должен быть

отрегулирован и реально защищён экономический комплекс мероприятий, предусмотренный программой энергосбережения в РФ, ввиду высоких капиталовложений необходимых при создании таких систем.

5.4 Выводы

Предложены общие рекомендации и принципиальные схемы для проектирования систем тепло- и холодоснабжения зданий на базе геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками.

Комбинированный источник тепло- и холодоснабжения на базе тепловых насосов с вертикальными системами СНЭГ, реализован в следующих объектах Приморского края: демонстрационно-выставочный энергоэффективный «Экодом» по ул. Бородинская, 14 в г. Владивостоке; индивидуальный жилой дом по ул. Земляничная, 17 в г. Владивостоке; индивидуальный жилой дом по ул. Главная, 23е в г. Владивостоке.

Сравнительный анализ экономической эффективности комбинированного источника тепло- холодоснабжения на базе ГТН в сочетании с грунтовыми теплообменниками, позволяет сделать вывод о положительном экономическом эффекте и перспективности внедрения таких технологий для зданий, расположенных в рекреационных зонах и в районах без возможности подключения к централизованной системе теплоснабжения.

Экономический эффект в ценах 2016 года, при реализации источника тепло- и холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов, работающих с грунтовыми теплообменниками, для жилых и общественных зданий г. Владивостока, в случае применения альтернативного наполнителя для скважин, рекомендуемого в данной работе, в среднем составляет 735938 руб./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Доказана целесообразность использования 30%-35% водно-песчаного раствора в качестве альтернативного наполнителя для скважин с грунтовыми теплообменниками.

2. На основе разработанной физико-математической модели, описывающей процесс теплопередачи вертикальной системы сбора низкопотенциальной энергии грунта, создана методика расчета грунтовых теплообменников U-образного типа для целей тепло- и холодоснабжения зданий.

3. В результате анализа экспериментальных данных, полученных на имитационной модели, установлены факторы, влияющие на величину теплового потока в грунтовом теплообменнике, а также определена степень их влияния на процесс теплообмена.

4. Получена критериальная зависимость, характеризующая процесс конвективной теплоотдачи в трубе грунтового теплообменника для области чисел Рейнольдса $4,3 \cdot 10^3 < Re < 6,8 \cdot 10^3$, характерной при работе реальных грунтовых теплообменников.

5. Разработаны методика и компьютерная программа (свидетельство РФ № 2016614307) расчета вертикальных систем сбора низкопотенциальной энергии грунта, которые позволяют рассчитать необходимые параметры при проектировании таких систем для конкретного района строительства.

6. Разработана новая конструкция грунтового теплообменника (патент РФ № 2529850), позволяющая по сравнению с ее аналогами увеличить поверхность теплообмена, регулировать увлажнение наполнителя геотермальной скважины, а также эффективнее восстанавливать энергетический потенциал грунта.

7. Предложены общие рекомендации и принципиальные схемы для проектирования систем тепло- и холодоснабжения зданий на базе

геотермальных тепловых насосов в сочетании с грунтовыми теплообменниками.

8. Экономический эффект в ценах 2016 года, при реализации источника тепло- и холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов, работающих с грунтовыми теплообменниками, для жилых и общественных зданий г. Владивостока, в случае применения альтернативного наполнителя для скважин, рекомендуемого в данной работе, в среднем составляет 735938 руб./год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ададунов, Е. А. Повышение эффективности использования аккумуляторов теплоты с возобновляемыми источниками энергии: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.08 /Ададунов Евгений Анатольевич. – Краснодар., 2004. - 178 с.
2. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Т. 1: Пер. с англ. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р.Плетчер. - М.: Мир, 1990 - 384 с.
3. Андерсон, Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: В 2-х т. Т. 2: Пер. с англ. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р.Плетчер. - М.: Мир, 1990 - 392 с.
4. Архангельский, А.Я. Delphi 7. Справочное пособие. / А.Я. Архангельский. – М.: ООО "Бином-Пресс", 2004. - 1024 с.
5. Бабаев, В.В. Теплофизические свойства горных пород / В.В. Бабаев, В.Ф. Будымка, Т.А. Сергеева и др. – М.: Недра, 1987. - 156 с.
6. Бажан, П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов – М.: Машиностроение, 1989. - 362 с.
7. Баженова, И.Ю. Delphi 7. Самоучитель программиста / И.Ю. Баженова - М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2005. - 448 с.
8. Баренблатт, Г.И. Автомодельные явления - анализ размерностей и скейлинг: Пер. с англ.: Учебное пособие / Г.И. Баренблатт - Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2009. - 216 с.
9. Беннетт, К.О. Гидродинамика, теплообмен и массообмен / К.О. Беннетт, Дж. Е Майерс. Пер. с англ. под ред. Н.И. Гельперина и И.А. Чарного. - М.: Недра, 1966. - 726 с.
10. Блохин, В.Г. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / В.Г. Блохин, О.П. Глудкин, А.И. Гуров, М.А. Ханин. - М.: Радио и связь, 1997 - 232 с.

11. Богуславский, А.Д. Экономика теплогазоснабжения и вентиляции / А.Д. Богуславский, А.А. Симонова, М.Ф. Митин. - М.: Стройиздат, 1988. - 351 с.
12. Бутузов В.А., Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе использования возобновляемых источников энергии: дис. ...д-ра. тех. наук: 05.14.08 / Бутузов Виталий Анатольевич. – М., 2007. - 297 с.
13. Вадюнина, А.Ф. Методы исследования физических свойств почв / А.Ф. Вадюнина, З.А. Корчагина. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Агропромиздат. 1986. - 416 с.
14. Васильев, Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли / дис... д-ра. техн. наук: 05.23.03 / Васильев Григорий Петрович. – М., 2006. - 432 с.
15. Васильев, Г. П. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России / Г.П. Васильев, Н.В. Шилкин // АВОК. – 2003. – №2. – С. 52-60.
16. Вильям Х. Мак-Адамс. Теплопередача / Вильям Х. Мак-Адамс - Пер. с англ. под ред. Л.С. Эйгенсона и К.Д. Воскресенского. - М.: Metallurgizdat, 1961. - 686 с.
17. Вукалович, М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара / М.П. Вукалович. – М.: Машиностроение, 1967. - 160 с.
18. Гаель, А.Г. Пески и песчаные почвы / А.Г. Гаель, Л.Ф. Смирнова. - М.: ГЕОС, 1999. - 252 с.
19. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Стандартинформ, 2013. - 11 с.
20. ГОСТ 18599-2001 Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. - 23 с.
21. Гришков, А.А. Совершенствование режимных и технологических характеристик систем теплоснабжения малоэтажных жилых зданий при

использовании источников низкопотенциальной теплоты: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Гришков Алексей Александрович. - Пермь, 2010. - 127 с.

22. Грунтовые теплообменники для геотермального теплового насоса [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://solarsoul.net/gruntovye-teploobmenniki-dlya-geotermalnogo-teplovogo-nasosa>.

23. Данилова, Г.Н. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности / Г.Н. Данилова, В.Н. Филаткин, М.Г. Щербов, Н.А. Бучко. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 240 с.

24. Дортман, Н.Б. Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых / Н.Б. Дортман, М.Л. Озерской. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1962 - 458 с.

25. Дымент, О.Н. Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена / О.Н. Дымент, К.С. Казанский, А.М. Мирошников. - М.: Химия, 1976. - 376 с.

26. Ерёмкин, А.И. Экономика энергосбережения в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учебное пособие / А.И. Ерёмкин, Т.И. Королёва, Г.В. Данилик, В.В. Бызеев, А.Г. Аверкин. – М.: Ассоциации строительных вузов, 2008. – 184 с.

27. Журмилова, И.А. Грунтовый теплообменник с системой увлажнения / И.А. Журмилова, А.С. Штым // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). - М.: Горная книга. – 2014. - № 9421. – С. 96-101.

28. Журмилова, И. А. Процессы теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта / И.А. Журмилова, А.С. Штым // Научное обозрение. - 2016. - № 2. - С. 62-69.

29. Журмилова, И. А. Методика расчета систем сбора низкопотенциальной энергии грунта / И.А. Журмилова, А.С. Штым // Научное обозрение. - 2016. - № 9. - С. 77-83.
30. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
31. Измеритель плотности тепловых потоков и температуры ИТП-МГ 4.03/Х(У) «ПОТОК». Руководство по эксплуатации. – Челябинск: ООО «СКБ Стройприбор», 2015. - 26 с.
32. Кауфман, Б.Н. Теплопроводность строительных материалов / Б.Н. Кауфман. - М.: Гос. издат. литературы по строительству и архитектуре, 1955 - 157 с.
33. Корепанов, Е.В. Методика определения теплового потенциала вертикального U-образного грунтового коллектора теплонасосной установки / Е.В. Корепанов, И.Н. Булдакова // Вестник ИжГТУ им М.Т. Калашникова. – 2015. – 1 (65) – С. 108-112.
34. Корнев, В.А. Анализ структуры различных бентонитов и возможности их использования в качестве сорбентов нефтепродуктов / В.А. Корнев, Ю.Н. Рыбаков // Проблемы современной науки и образования. – 2016. – 1 (43) - С. 84-87.
35. Коротких, А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / А.Г. Коротких. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 - 97 с.
36. Кротов, В.М., Совершенствование методики расчета первичного контура систем теплоснабжения, использующих низкопотенциальную теплоту грунта: дис. ... канд. техн. Наук: 05.23.03 / Кротов Владимир Михайлович. - Тюмень, 2011 - 139 с.
37. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: ТПУ, 2007. - 172 с.

38. Культин, Н.Б. Основы программирования в Delphi 7 / Н.Б. Культин. - СПб.: БХВ-Петербург, 2009. - 640 с.
39. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе С.С. – М.: Атомиздат, 1979. - 416 с.
40. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967. – 596 с.
41. Лысенко, М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. / М.П. Лысенко. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Недра, 1980. - 272 с.
42. Малявина, Е.Г. Теплотери здания. Справочное пособие / Е.Г. Малявина. - 2-е изд., испр. - М.: АВОК-ПРЕСС, 2011. - 144 с.
43. Мигай, В.К., Моделирование теплообменного энергетического оборудования / В.К. Мигай - Ленинград.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. - 264 с.
44. Михеев, М.А. Краткий курс теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 206 с.
45. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. - Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
46. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учебное пособие для вузов / В.В. Нащокин. - М.: Высшая школа, 1980. - 469 с.
47. Обзор рынка бентонитовых глин в СНГ: отчет / Объединение независимых консультантов и экспертов в области минеральных ресурсов, металлургии и химической промышленности. – М., 2005. – 21 с.
48. Обливанцев, Д.Ю. Вопросы использования бентонита в качестве защитного барьера хранилищ радиоактивных отходов / Д.Ю. Обливанцев, Е.П. Щербакова // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. - №11. - С.116-123.
49. Основы методики проектирование теплонасосных систем с горизонтальными грунтовыми теплообменниками [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=405.

50. Патент РФ на изобретение № 2359183. Ермаков С.А. Тепловой аккумулятор. Зарегистрировано в гос. реестре изобретений 20.06.2009, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
51. Патент РФ на изобретение №2529850. Журмилова И.А., Захаров Г.А., Штым А.С., Савина Т.Г., Цыганкова К.В. Геотермальное устройство. Зарегистрировано в гос. реестре изобретений 08.08.2014, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
52. Патент РФ на полезную модель №85989. Штым А.С., Хвостик П.Е., Журмилов А.А., Маркелова И.А., Путилина Е.О. Комбинированная система теплоснабжения. Зарегистрировано в гос. реестре изобретений 20.04.2009, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
53. Рекомендации по технико-экономическому обоснованию применения нетрадиционных солнечных и солнечно-теплонасосных систем теплоснабжения на гражданских и промышленных объектах / Ф.М. Гусакова, Э.В. Сарнацкий, Е.П. Антонов, Р.А. Хачатурян, Р.И. Карагезов. - М.: Госкомитет по гражданскому строительству и архитектуре при Госстрое СССР, 1987. - 53 с.
54. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов нетрадиционных возобновляемых источников энергии. ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ». Утверждено указанием Москомархитектуры от 31.01.2001 г. №8. – М., 2001.
55. Руководство монтажника NIBE F1145. Геотермальный тепловой насос. ИНВ RU 1343-2231699. NIBE AB Sweden [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://nibe.com.ru/sites/default/files/catalogs/Technical-NIBE-F1145.pdf>.
56. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 656 с.

57. Программа для расчета параметров устройства теплообмена в системе сбора низкопотенциальной энергии грунта [Текст]: свид. 2016614307 / И.А. Журмилова, А.С. Штым, А.А. Журмилов, А.А. Бочарова. - № 2016610357; заявл. 20.01.2016; опубл. 20.04.2016.
58. Семенов, Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях: Учебное пособие / Б.А. Семенов. - 2-е изд., доп. - СПб.: Лань, 2013. - 400 с.
59. Светозаров, В.В. Основы статистической обработки результатов измерений / В.В. Светозаров. - М.: МИФИ, 1983. - 52 с.
60. Светозаров, В.В. Элементарная обработка результатов измерений / В.В. Светозаров. - М.: МИФИ, 1983. - 52 с.
61. Свойства бентонитов, глин. Химические и структурно-механические свойства бентонитов [Электронный ресурс]. – Научно-информационный журнал «Биофайл». - Режим доступа: <http://biofile.ru/geo/3303.html>.
62. Системы тепловых насосов. Инструкция по проектированию. 5829 122-2-GUS [Электронный ресурс] / Viessmann Werke GmbH & Co. - 2/2000.- Режим доступа: <http://forum.abok.ru/index.php?act=attach&type=post&id=19331>.
63. СН 550-82 Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб. - М.: Госстрой СССР, 1983. – 34 с.
64. Сотникова, К. Н. Комбинированные системы теплоснабжения, сочетающие традиционные и возобновляемые источники энергии: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.03 / Сотникова Ксения Николаевна. – Воронеж., 2009. – 200 с.
65. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095527>.
66. СП 41-104-2000 Проектирование автономных источников теплоснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ruteplo.com/images/uslugi/gas-kotly/sp-41-104-2000.pdf>.

67. СП 41-109-2005 Проектирование и монтаж внутренних систем водоснабжения и отопления зданий с использованием труб из «сшитого» полиэтилена [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/45/45423/.
68. СП 41-101-95 Проектирование тепловых пунктов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/4/4920/
69. СП 131.13330.2012 Строительная климатология [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546>.
70. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200095525>.
71. Щекин, Р.В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Кн.1. Отопление и теплоснабжение / Р.В. Щекин, С.М. Кореневский, Г.Е. Бем и др.- 4-е изд., перераб. и доп. - Киев: Будивельник, 1976. – 418 с.
72. Упский, М.В. Методические указания к лабораторной работе: Изучение работы теплового насоса / М.В. Упский. – Владивосток: ДВФУ, 2008 – 32 с.
73. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»: принят Гос. Думой 11 ноября 2009 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/.
74. Федоров, В.Д. Экология / В.Д. Федоров, Т.Г. Гильманов. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 464 с.
75. Федянин, В. Я. Оценка эффективности использования возобновляемых источников энергии в системах теплоснабжения для условий юга Западной Сибири: дис....д-ра.техн.наук: 01.04.14, 05.14.08 / Федянин Виктор Яковлевич. - Барнаул., 2004. - 241 с.

76. Филатов, С.О., Работа теплообменников утилизации теплоты грунта / С.О. Филатов, В.И. Володин // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. - 2011. - №3. - С. 179-184.
77. Франчук, А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А.У. Франчук. - М.: Отдел информационно-издательской и патентно-лицензионной работы, 1969 - 142 с.
78. Цирельман, Н.М. Теория и прикладные задачи тепломассопереноса Часть I: Учебное пособие / Н.М. Цирельман. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т., 2002 - 108с.
79. Чаповский, Е.Г. Инженерная геология (Основы инженерно-геологического изучения горных пород). Учебное пособие для студентов геолог. спец. Вузов / Е.Г. Чаповский. - М.: "Высшая школа", 1975 - 296 с.
80. Чудновский, А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А.Ф. Чудновский. - М.: ФМ, 1962. - 456 с.
81. Чудновский, А.Ф. Теплофизика почв: монография / А.Ф. Чудновский. - М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука", 1976. - 352 с.
82. Шалабанов, А.К. Учебно-методическое пособие: Эконометрика / А.К. Шалабанов, Д.А. Роганов. – Казань: Академия управления «ТИСБИ», 2008. – 203 с.
83. Ши, Л. Численные методы в задачах теплообмена: Пер. с англ. кандидатов физ.-мат.наук Е.И. Зино и В.Л. Грязнова под редакцией д-ра физ.-мат.наук В.И. Полежаев. / Ши Л. - М.: Мир, 1988. - 544 с.
84. Штым, А.С. Влияние на процесс теплообмена различных наполнителей в грунтовых теплообменниках геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова, А.О. Калинин // ЭПИ Вестник инженерной школы ДВФУ. - 2013. - № 4 (17). - С. 45-51.
85. Штым, А.С. Восстановление энергетического потенциала системы теплосбора геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова,

Т.Г. Савина // Материалы научно-практической конференции «Вологдинские чтения». – Владивосток. – 2012. – С. 51-53.

86. Штым, А.С. Использование низкопотенциальной энергии грунта для работы геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова, А.О. Калинин, Ю.А. Фильчикова // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). - М.: Горная книга. – 2014. - № 9421. – С. 102-110.

87. Штым, А.С. Распределение температур в системе теплосбора для геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова (Маркелова), С.А. Чечётко // Теплоэнергетика и энергосбережение / под ред. А.Н. Штыма; Дальневост. федерал. ун-т. - 2011. - С. 225-235.

88. Штым, А.С. Системы теплосбора для геотермальных тепловых насосов / А.С. Штым, И.А. Журмилова (Маркелова) // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. - 2011. - № 23(42). - С. 126-133.

89. Штым, А.С. Создание микроклимата в жилых домах при использовании возобновляемых источников энергии / А.С. Штым, И.А. Журмилова, А.О. Калинин, Е.В. Тарасова, М.В. Потапова // Сборник статей «Опыт эффективного использования энергетических ресурсов Дальнего Востока. (Научно-технический журнал, спец. выпуск). - М.: Горная книга. – 2014. - № 9421. - С. 111-119.

90. Штым, А.С. Сравнение эффективности работы «U»-образного и коаксиального грунтовых теплообменников / А.С. Штым, И.А. Журмилова // Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств: материалы Всероссийской молодежной конференции / под ред. А.С. Штым; Дальневост. федерал. ун-т. - 2012. - С. 286-289.

91. Штым, А.С. Энергосберегающие технологии в системах теплохолодоснабжения зданий / А.С. Штым, И.А. Журмилова (Маркелова) // ЭПИ

Вестник Дальневосточного государственного технического университета. - 2010. - № 2 (4). - С. 60-68.

92. Шубин, Е.П. Новый метод подсчета тепловых потерь нескольких труб, уложенных в грунт / Е.П. Шубин // Известия ВТИ - 1934. - №8 - С. 42-50.

93. Экономика систем ТГСИВ: метод. указания / А.А. Ильин, Д.В. Попов. - Владивосток: ДВГТУ, 2007. - 54 с.

94. Эффективный геотермальный источник для тепловых насосов [Электронный ресурс]. – Украина. - Режим доступа: <http://www.geotherm.com.ua/files/Geoterm%20sheet%20description%20CL.pdf>

95. Corradi, C. Numerical Simulation of the Thermal Response Test Within Comsol Multiphysics Environment / C. Corradi, L. Schiavi, S. Rainieri, G. Pagliarini // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. – Hannover, 2008.

96. Gordon R. Bloomquist, Ph.D. Washington State University Energy Program / Geothermal heat pumps four plus decades of experience // GHC Bulletin, December 1999. - pp. 13-18.

97. Earthlinked technologies geothermal renewable energy systems [Электронный ресурс]. – USA, Florida: 2015. – Режим доступа: <http://earthlinked.com/wp-content/uploads/2015/01/EarthLinked-Technologies-Product-Guide.pdf>.

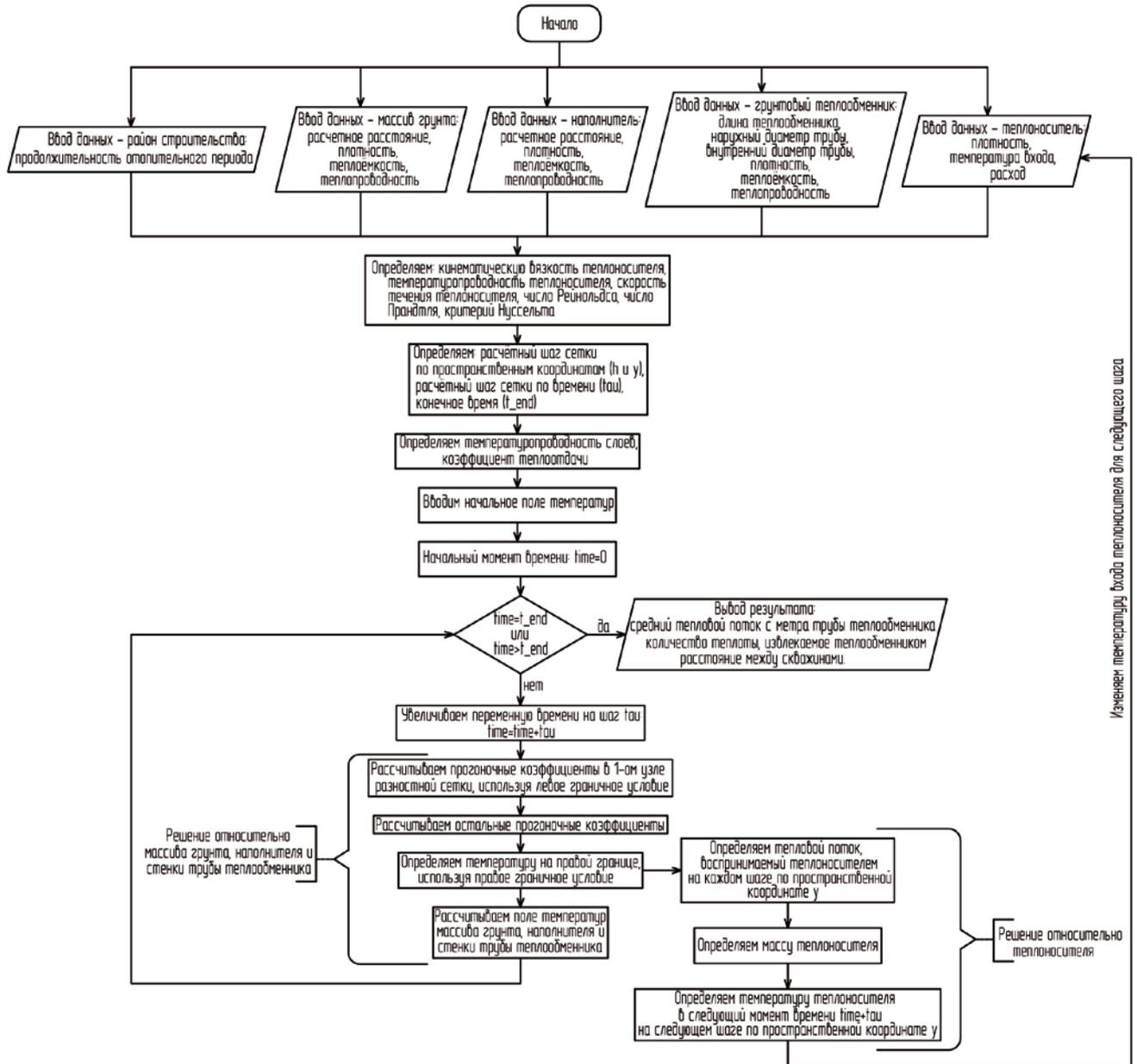
98. Javed, S. Design of ground source heat pump systems - Thermal modeling and evaluation of boreholes: Licentiate thesis, Building service engineering / Saqib Javed // Technical report D2010:02. - Sweden, 2010. - p. 125.

99. Johansen, O. and Frivik, P.E. Thermal properties of soils and rock materials. The 2nd International Symposium on Ground Freezing. – Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1980. - pp. 427-453.

100. Hanova J., Davlatabadi H. Strategic GHG reduction through the use of ground source heat pump technology / Environmental Research Letters 2 (2007) 044001 - 8 pp.

101. Hellström, G. Thermal performance of borehole heat exchangers / G. Hellström // The Second Stockton International Geothermal Conference – Sweden: Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, 1998. – pp. 38-48.
102. Kahr, G. Wärmeleitfähigkeit von bentonit MX-80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode / G. Kahr, M. Muller-von Moos // Technischer Bericht 82-06. – Zurich: Institut für Grundbau und Bodenmechanik ETH, Dezember, 1982.. – p. 27.
103. Knutsson, S. On the thermal conductivity and thermal diffusivity of highly compacted bentonite / Sven Knutsson // SKB Report, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. - Sweden: University of Lulea. - October 1983. – SKB 83-72.
104. Knutsson, S. Värmeledningsförsök på buffertsubstans av kompakterad bentonit: KBS Technical Report 72/ Sven Knutsson. – Sweden: Högskolan i Luleå, 1977. - p. 55.
105. Kurevija, T. Influence of undisturbed ground temperature and geothermal gradient on the sizing of borehole heat exchangers / T. Kurevija, D. Vulin, V. Krapec // World renewable energy congress. – Sweden, 2011. – pp. 1360-1367.
106. Lund, J. Geothermal (ground-source) heat pumps a world overview / J. Lund, B. Sanner, L. Rybach, R. Curtis, G. Hellström // GHC Bulletin. - September 2004. - pp. 218-227.
107. Dr. Maureen Mc Corry with EurGeol. Gareth Ll. Jones. Geotrained training manual for designers of shallow geothermal systems. - Brussels: Geotrained, EFG. - 2011.
108. Plötze, M. Thermophysical properties of bentonite / M. Plötze, U. Schärli, A. Koch, H. Weber. - France: International Meeting, Lille. - 2007. - pp. 579-580.
109. Rybach, L. Design and performance of borehole heat exchanger/heat pump systems / L. Rybach // Proc. European Summer School of Geothermal Energy Applications. - Oradea/Romania. – 2001.- pp. 173-181.

110. Spitler, J.D. Preliminary inter model comparison of ground heat exchanger simulation models / J.D. Spitler, J.R. Cullin, E. Lee, D.E. Fisher // Proceedings of 11th International Conference on Thermal Energy Storage. – Stockholm, 2009/6. – pp. 14-17.
111. Tang Anh-Minh. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites / Tang Anh-Minh, CUI Yu-Jun, Trung-Tinh LE. // Applied Clay Science. – October, 2008. Vol. 41, 3-4. - pp. 181-189.
112. Walter J. Eugster. Sustainable production from borehole heat exchanger systems / Walter J. Eugster, Ladislaus Rybach // Proceedings World Geothermal Congress 2000 Kyushu. - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000. - pp. 825-830.
113. Walter J. Eugster. How renewable are borehole heat exchanger systems? Walter J. Eugster, Thomas Megel, Ladislaus Rybach // Transactions-Geothermal Resources Council 23:563-566. - January, 1999.
114. Yavuzturk Cenk. Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems: Doctoral Thesis / Yavuzturk Cenk. - USA, Oklahoma State, 1999. - p. 251.
115. Zeng H.J. A finite line-source model for boreholes in geothermal heat exchangers / H.J. Zeng, N.R. Diao, Z.H. Fang // Heat transfer - Asian Research. 2002. – 31 (7). - pp. 558-567.





ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«Энергосервис МКТ»

Россия, 690078, г. Владивосток, ул. Амурская, д. 25, оф. 10,
тел. 89147904841, 89147910556,

Адрес для корреспонденции: 690090, г. Владивосток, а/я 90/436
ИНН 2540093035, р/с 40702810200060000569 в ОАО «Дальневосточный банк»,
к/с 30101810900000000705, БИК 040507705

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Составлен «01» сентября 2015 г.

Данным актом подтверждается внедрение результатов научной работы Журмиловой И.А., по применению энергосберегающих технологий в системах тепло- и холодоснабжения зданий на основе геотермальных тепловых насосов, работающих на низкопотенциальной энергии грунта, и солнечных коллекторов.

В 2011 году разработан проект комбинированного источника тепло- и холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов, использующих низкопотенциальную энергию грунта для индивидуального жилого дома по адресу: г. Владивосток, ул. Главная, дом 23е. Требуемые параметры микроклимата жилого дома обеспечиваются запроектированными системами отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Расчетный годовой экономический эффект при применении геотермальных тепловых насосов, использующих низкопотенциальную энергию грунта, для данного объекта составляет 398246 руб./год.

Благодаря разработанным техническим решениям, здание обеспечено необходимыми нагрузками для систем тепло- и холодоснабжения, при отсутствии возможности подключения к централизованным системам теплоснабжения и ограниченном лимите подключения к электрическим сетям.

Руководитель проектно-конструкторского
отдела ООО «Энергосервис МКТ»
канд. техн. наук



 Е.Ю. Дорогов



Автономная некоммерческая организация ДВФУ
 Научно-технический и внедренческий центр
 "МОДЕРНИЗАЦИЯ КОТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ"
 (АНО ДВФУ «НТВ Центр «МКТ»)

690990, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10 Тел. 8 (423) 270-48-41
 ОГРН 1022501289337, ИНН 2536007570, КПП 253601001, БИК 040507795
 код по ОКОНХ 95120, 95130, 95300, 92110, код по ОКПО 20779221
 р/с 40703810200000181901 в ПАО АКБ "Приморье" г. Владивостока, корр.сч.30101810800000000795
 e-mail: centrmkt@mail.ru

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Составлен «15» октября 2015 г.

Данным актом подтверждается внедрение результатов научной работы Журмиловой И.А., по применению энергосберегающих технологий в системах тепло- и холодоснабжения зданий на основе геотермальных тепловых насосов, работающих на низкопотенциальной энергии грунта, и солнечных коллекторов, что способствует снижению потребления и рациональному использованию традиционных источников энергии.

В 2008 году разработан и реализован проект гибридной установки «Демонстрационно-выставочный энергоэффективный «Экодом», по адресу: г. Владивосток, ул. Бородинская, 14 (Договор № Б14/08-ЦМКТ, ОВ, ВК, ТМ). В проекте предусмотрены системы автономного жизнеобеспечения при минимальном потреблении электроэнергии. Запроектированы: система грунтовых теплообменников для геотермальных тепловых насосов, обеспечивающих работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования помещений; проект систем отопления, вентиляции и кондиционирования демонстрационно-выставочного здания; проект системы холодного и горячего водоснабжения (на базе солнечных коллекторов) и водоотведения. Данный проект отличался оригинальностью предложенных технических решений, и схема установки защищена патентом на полезную модель № 85989.

Расчетный годовой экономический эффект при применении геотермальных тепловых насосов, использующих низкопотенциальную энергию грунта, для данного объекта составил 799262 руб./год.

В 2008 году разработан и реализован проект гибридной установки на основе геотермальных тепловых насосов и солнечных коллекторов для системы микроклимата индивидуального жилого дома по адресу: г. Владивосток, ул. Земляничная, дом 17 (договор № 81-Ш(ТГ)-317/08-ЦМКТ).

Выполнен проект систем отопления, вентиляции, кондиционирования и горячего теплоснабжения. Журмиловой И.А. разработан проект системы теплосбора низкопотенциальной энергии грунта, а также сложный тепловой узел, в котором заложен алгоритм эффективности и надежности работы всех его элементов и систем.

Результаты технико-экономического расчета показали экономическую привлекательность источника тепло- и холодоснабжения на базе геотермальных тепловых насосов, использующих низкопотенциальную энергию грунта, расчетный годовой экономический эффект для жилого дома по адресу: г. Владивосток, ул. Земляничная, дом 17 составил 130182 руб./год.

Руководитель отдела энергосбережения
Центра МКТ, канд. техн. наук



 В.П. Черненко