

На правах рукописи



КАДЦЫН
Иван Ильич

**УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ТЕПЛОТРАНСФОРМАТОРОВ**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Ведрученко Виктор Родионович

Официальные оппоненты:

Мунц Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Теплоэнергетика и теплотехника», заведующий кафедрой.

Цветков Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Теплогазоснабжение и инженерные системы в строительстве», заведующий кафедрой.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет»

Защита диссертации состоится «21» сентября 2022 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена необходимостью улучшения эксплуатационных и технико-экономических характеристик геотермальных теплотрансформаторов в климатических условиях Сибири.

Теплотрансформаторы, используемые в качестве источника тепловой энергии тепло грунта, относятся к наиболее перспективному тепловому оборудованию. Такие устройства активно внедряются на территории Европы в зонах с мягким климатом и непродолжительных отрицательных температурах.

Степень разработанности темы. Существенный вклад в решение теоретических проблем, экономической выгоды, вопросов экспериментального, математического моделирования грунтовых зондов для целей тепло-холодоснабжения зданий и сооружений внесли А. С. Штым, И. А. Журмилова, Д. И. Карабарин, С. Л. Елистратов, М. В. Кобылкин, В. А. Михельсон, Г. П. Васильев, В.М. Кротов, У. Томсон, Д. Холден, L. Rybach, J. Lund, B. Sanner, H. J.Zeng, J. D. Spitler, J. Hanova, H. Davlatabadi и др. Однако в опубликованных материалах исследований недостаточное внимание уделено влиянию температурного режима и свойств грунтов (теплоемкости, влажности, типа грунтового массива), а также климатических условий на работу теплового оборудования, использующего низкопотенциальную энергию земли.

Отсутствие достоверных физических и теплофизических характеристик грунтов приводит к ошибочным расчетам при проектировании грунтовых зондов, что в процессе эксплуатации приводит к вымораживанию грунта между скважинами, низкой технико-экономической эффективности теплообменного оборудования и теплотрансформаторов в сравнении с заявляемыми характеристиками производителей. Необходимость системного подхода при производстве проектных работ по использованию низкопотенциальной энергии грунтов обуславливает актуальность выполненного исследования.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-технических работ Омского государственного университета путей сообщения (тема НИР ГБ 246 «Повышение технико-экономических и экологических показателей источников тепловой энергии») в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ Пр–577 «Энергосберегающие технологии», критические технологии «Системы жизнеобеспечения и защиты человека», «Энергосбережение».

Курс повышения энергетической эффективности и энергосбережения Российской Федерации направлен на изучение и развитие возобновляемых источников энергии, что отражено в указе Президента РФ №899 от 07.07.2011 г. "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации", №623 от 16.12.2015 г. "О Национальном центре развития технологий и базовых элементов робототехники", №642 от 01.12.2016 г. "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации", которые выражаются в создании правовых, экономических и организационных ос-

нов стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности зданий и сооружений. На 21-ой конференции в Париже, 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 со-вещения сторон по Киотскому протоколу, обсуждались вопросы о необходимости развития возобновляемой энергетики в различных регионах мира.

Особенность данного диссертационного исследования заключается в определении физико-механических, теплофизических характеристик грунтов на примере г. Омска; во введении ранее отсутствующего понятия нейтральная зона грунта и установлении его глубины; в разработке новых конструктивных решений, позволяющих эффективнее использовать грунтовые зонды; в создании методики проектирования каскада геотермальных зондов, учитывающих результаты полученных исследований.

Цель работы – совершенствование грунтовых зондов для повышения энергоэффективности геотермальных теплотрансформаторов в климатических условиях Сибири.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Выполнен анализ существующих методов проектирования геотермальных теплотрансформаторов и результатов исследования грунтов г. Омска; зафиксирована нейтральная зона грунта, формирующаяся под солнечной радиацией;
2. Обоснована математическая модель определения наилучшей глубины односкважинного коаксиального геотермального коллектора, усовершенствованы методы расчеты количества грунтовых скважин и расстояния между ними;
3. Созданы и предложены новые конструктивные решения, в низкопотенциальном контуре земли, позволяющие повысить эксплуатационные показатели работы грунтовых теплотрансформаторов;
4. Представлено технико-экономическое обоснование применения теплотрансформатора с усовершенствованными U-образными грунтовыми зондами.

Объекты исследования – грунтовые зонды геотермальных теплотрансформаторов.

Предмет исследования – эксплуатационные и технико-экономические характеристики геотермальных теплотрансформаторов.

Методология исследования. В основу работы положены теоретические и экспериментальные исследования. Изыскания выполнены при помощи аналитических, лабораторных, натурных исследований грунтового массива г. Омска и обработки экспериментальных данных с применением сертифицированного оборудования, компьютерных программ (Microsoft Office 2010, NanoCAD СПДС 5.0, Arduino) и электронно-картографических справочников (Яндекс.Карта).

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены физико-механические и теплофизические характеристики грунтов г. Омска, зафиксирована нейтральная зона грунта, формирующаяся под воздействием солнечной радиации;
2. Обоснована математическая модель эффективной глубины односкважинного коаксиального геотермального коллектора, отличающаяся от известных возможностью учета зависимости температуры рабочей жидкости от заглубления зонда;

3. Улучшена методика определения количества скважин и расстояния между ними. Усовершенствована номограмма расстояния между геотермальными зондами с учетом полученных экспериментальных данных.

Теоретическая значимость работы обусловлена предложенными моделями и методами, которые могут послужить основой для разработки инженерных методик проектирования геотермальных зондов различных конструкций.

Практическая значимость работы.

1. Произведены теоретические и экспериментальные исследования грунтового массива, установлена нейтральная зона грунта на территории г. Омска, позволяющие использовать, ранее отсутствующие данные, для проектирования геотермальных зондов;

2. Разработаны и предложены новые конструктивные решения (полезная модель № 198052), свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611929 от 12.02.2020, патент № 2529850), в низкопотенциальном контуре земли, которые позволят повысить эксплуатационные показатели работы грунтовых теплотрансформаторов, а также выполнять мониторинг (анализ) работы температурного режима и промышленного оборудования;

3. Выполнен технико-экономический расчет применения теплотрансформатора с усовершенствованными U-образными грунтовыми зондами, по результатам которого установлено фактическое уменьшение на 31 % расхода электроэнергии (в сравнении с аналогичным тепловым оборудованием).

Научные и практические результаты работы используются при мониторинге технологического оборудования в АО «Федеральный научно-производственный центр «Прогресс» (акт внедрения от 20.07.2021 г.), выполнении изыскательских работ в АО «Омская геологоразведочная экспедиция» (акт внедрения от 18.08.2020 г.), используются в Омском государственном университете путей сообщения при подготовке студентов по направлениям: Теплоэнергетика и теплотехника в бакалаврской программе «Промышленная теплоэнергетика» в курсе дисциплины «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», а также в научно-исследовательской работе студентов ОмГУПС.

Достоверность и обоснованность полученных результатов достигается корректным применением математического аппарата теории эксперимента и математической статистики также подтверждается результатами измерений аттестованных лабораторий, применением сертифицированного измерительного оборудования и аппаратуры, фактическими показаниями измерительных приборов учета электрической и тепловой энергии.

Апробация результатов работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Повышение энергоэффективности объектов и систем теплоснабжения» (Омск, 2019), всероссийской конференции с международным участием «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2019), международной научной конференции «Научные исследования стран ШОС: синергия и интеграция» (Пекин, 2019), научной конференции «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» (Омск, 2020), XXVI всероссийской научно-

практической конференции «Научно-исследовательские решения современной России в условиях кризиса» (Ростов-на-Дону, 2020), научном семинаре кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПСа (Омск, 2018, 2019, 2020, 2021).

Личный вклад автора состоит в определении цели и задач исследования, разработке математической модели эффективной глубины односкважинного коаксиального геотермального коллектора, проведении экспериментальных работ, формулировании положений, вынесенных на защиту. Постановка задач и анализ результатов обсуждались совместно с научным руководителем. В совместных публикациях вклад автора составляет от 50 до 85 %.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 14 печатных работ, в том числе три статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, одна статья – в зарубежном издании, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus, один патент РФ на изобретение, один патент РФ на полезную модель и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, семь научных работ, опубликованные в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Материалы диссертации изложены на 162 страницах основного текста, включающего в себя 53 рисунка и 17 таблиц. Работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 112 наименований и 13-ти приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность, цель, объект и предмет исследования, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, цели и задачи исследования.

В первом разделе представлены предпосылки промышленного производства теплотрансформаторов, анализ производства теплового оборудования в России, результаты аналитического исследования работ российских и зарубежных ученых в области использования низкопотенциальной энергии грунтового массива в геотермальных теплотрансформаторах для отопления, холодоснабжения, горячего водоснабжения зданий и сооружений.

При сравнительном анализе работы компаний выпускающих теплотрансформаторы российского производства установлено:

1. Комплектуемые отечественного производства, требующиеся для изготовления теплотрансформаторов, выпускаются в объеме 5 %, на локальных предприятиях - не более 85 %;
2. Существует высокий потенциал импортозамещения оборудования и комплектующих, необходимых для изготовления теплотрансформаторов, не выпускаемых на территории Российской Федерации;

Описаны виды, типы использования грунтовых зондов в грунтовом массиве, в несущих строительных конструкциях. Поставлены цели и задачи исследований.

Во втором разделе отражены результаты исследований физико-механических и теплофизических характеристик грунтов г. Омска, необходимых для проектирования геотермальных зондов. Необходимость выполнения изысканий обусловлена отсутствием информации по теплофизическим показателям грунтовых массивов, приводящим к ошибочным расчетам при проектировании грунтовых

зондов, выражающимся в некорректном определении глубины скважин, их количества и расстояния между ними, что в итоге является причиной неэффективной работы теплотрансформаторов.

По полученным результатам лабораторных исследований сформирована ведомость показателей физико-механических и теплофизических характеристик исследованных разновидностей грунтов по ГОСТ 25100–2011 (таблица 1).

Определены исходные данные для выполнения проектных расчетов:

- средний коэффициент теплопроводности грунтового массива - 1,52 Вт/(м·К);
- средняя объемная теплоемкость - 3461 кДж/(м³·К).

Таблица 1 – Ведомость результатов лабораторных исследований по физико-механическим и теплофизическим характеристикам исследованных разновидностей грунтов

Разновидность грунта	Естественная влажность грунта, д. ед	Пористость грунта, %	Коэффициент пористости	Коэффициент водонасыщения	Плотность частиц грунта, г/см ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Объемная теплоемкость, МДж/(м ³ ·К)
Супесь твердая	0,15	30,5	0,44	0,92	2,69	1,815	3,291
Супесь пластичная	0,20	34,8	0,53	1	2,69	1,793	3,522
Супесь текучая	0,18	35,9	0,56	0,85	2,69	1,636	3,461
Глина твердая	0,12	34,7	0,53	0,62	2,75	1,223	3,649
Глина полутвердая	0,22	40,4	0,68	0,90	2,75	1,392	3,604
Глина тугопластичная	0,25	42,6	0,74	0,92	2,75	1,412	3,662
Глина мягкопластичная	0,34	46,9	0,88	1	2,69	1,714	3,928
Суглинок твердый	0,13	33,2	0,50	0,71	2,72	1,331	3,755
Суглинок полутвердый	0,13	34,4	0,52	0,68	2,72	1,294	3,554
Суглинок тугопластичный	0,20	38,7	0,63	0,86	2,72	1,426	3,039
Суглинок мягкопластичный	0,23	43,5	0,77	0,81	2,72	1,375	3,365
Суглинок текучепластичный	0,25	41,4	0,71	0,97	2,72	1,323	3,190
Песок пылеватый плотный влажный	0,14	33,3	0,51	0,78	2,67	1,734	3,140
Песок мелкий	0,16	39,3	0,66	0,70	0,67	1,806	3,292

В третьем разделе сформированы и проанализированы результаты изучения температурного режима скважин в период с 01.11.2020 по 27.02.2021, установлены величины нейтральной зоны грунта, в зависимости от влияния солнечной радиации.

Нейтральная зона грунта – максимальная глубина влияния солнечной радиации, после прохождения которой температура грунтового массива не уменьшается.

На основании результатов исследований института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, составлены и опубликованы средние значения температуры земной коры до 5 км (таблица 2), которые позволяют получить предварительные данные для выполнения изыскательских работ. Отсутствие материалов по тепловому режиму грунтов до глубины 0,5 км, необходимых для проектирования грунтовых зондов, подтверждает необходимость выполнения исследовательских работ теплового режима земли. Физико-механические характеристики исследуемых грунтов были установлены в лабораторных условиях. Для определения теплофизических характеристик отобранных монолитов использован метод теплового импульса и прибор KD2 Pro в условиях грунтовой лаборатории.

Таблица 2 – Средние значения температуры земной коры (до 5 км) основных геологических структур Сибири

№ п/п	Геологическая структура	Температура (° C) на глубинах, км				
		0,5	1	2	3	5
Платформы						
1	Западно-Сибирская	13	29	60	92	140
2	Сибирская	8	15	30	47	82
Складчатые области						
4	Алтае-Саянская	15	25	47	70	100
5	Забайкальская	11	22	42	62	100
6	Верхояно-Колымская	5	27	57	81	130
7	Байкальская рифтовая зона (без байкала)	16	27	50	73	115
8	Байкальская впадина	20	75	75	110	150

Для определения температуры грунта выполнено устройство трех термоскважин, характеристики которых представлены в таблице 3.

Для измерений температуры в скважинах, использовано устройство ЛЦД -1/100-PM (рисунок 1), представляющее собой гирлянду электрических датчиков температуры с устройством записи и передачи данных через радиопередачу на переходник USB/PM с антенной работающий совместно со специализированным программным обеспечением на компьютере.

Таблица 3 – Характеристики исследуемых термометрических скважин

№ скв.	Место расположения термометрических скважин	Диаметр скважины, м	Глубина скважины, м	Глубина установленных термокос, м
1	Омская область, Омский район, с. Надеждино, ул. Дружбы, 2	0,165	32	20
2	г. Омск, Сибирский садовод 1, ул. 3-я Аллея, уч. 38-39	0,165	35	20
3	г. Омск, ул. 4-я Енисейская, 27	0,165	35	20



Рисунок 1 – Общий вид комплекта ЛЦД-1/100-PM: 1 – ЛЦД-1/100-PM; 2 – датчиков температуры МЦДТ 0922; 3 – термокоса; 4 – схема установки термодатчиков; 5 – переходник USB/PM с антенной; 6 – антенна

Полученные результаты данных записаны за период выполнения работ с 01.11.2020 по 27.02.2021. Период выполнения работ обоснован фиксированием температурного режима массива грунта при наиболее холодной пятидневке температуры воздуха.

На основании зарегистрированных и апробированных результатов исследуемых территорий, при помощи программы Viper 3.0.0 03.01.2021 зафиксирована минимальная температура воздуха – 39,76 °С в районе скважины № 2. Результаты проведения изысканий представлены на графике температурного режима грунтового массива в зависимости от времени (рисунок 2). Температурные режимы датчиков при наиболее холодной пятидневке, представлены на рисунке 3. Абсолютная неопределенность результатов измерений в соответствии с паспортом на оборудование составляет не более $\pm 0,23$ °С.

На основании апробации выполненных работ по исследованию грунтового массива, при помощи комплекта ЛЦД-1/100-PM с термокосой, антенной и программного обеспечения – RadioMania1.0, Viper 3.0.0, установлено:

1. средняя температура грунтового массива для г. Омска составляет – $+8,6$ °С $\pm 0,23$ °С;

2. максимальная глубина влияния солнечной радиации на грунтовой массив, являющаяся нейтральной зоной грунта установлена на отметке –8,7 м от уровня земли.

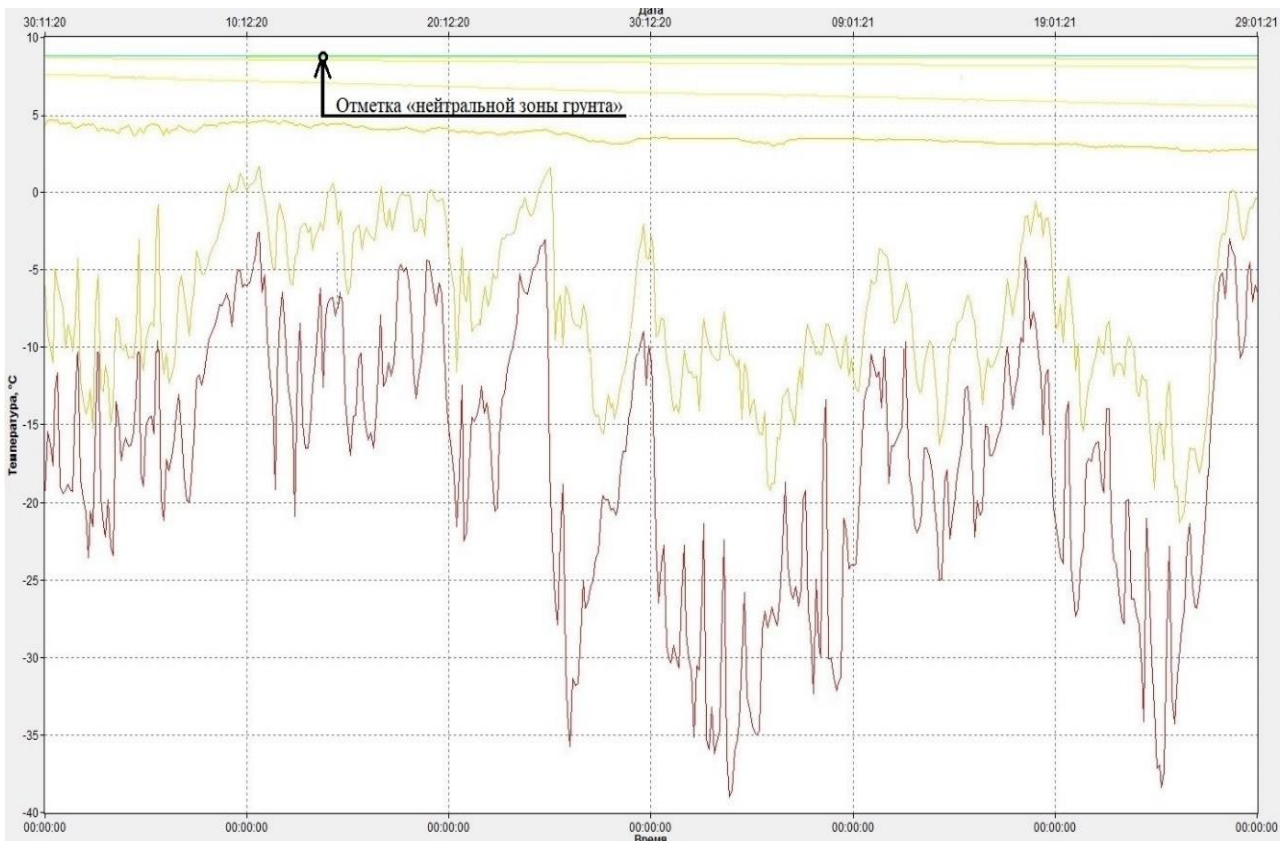


Рисунок 2 – График температурного режима грунтового массива скважины № 2 с 01.11.2020 по 27.02.2021

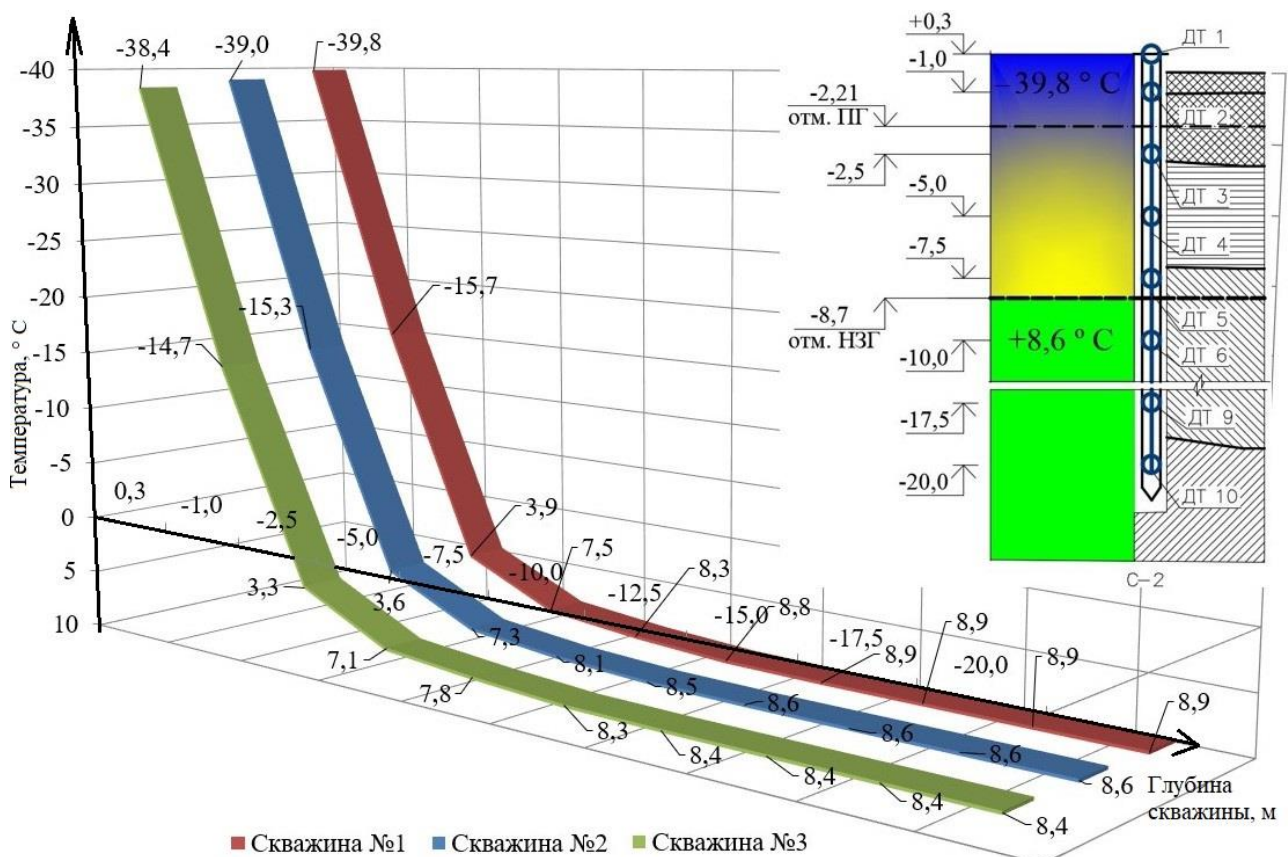


Рисунок 3 – Показания датчиков температуры 1-10 скважин в период минимальных температур воздуха: 1 – скважина № 1; 2 – скважина № 2; 3 – скважина № 3.

В четвертом разделе представлена разработанная математическая модель наилучшей глубины односкважинного коаксиального геотермального коллектора, при которой температура пропиленгликоля приближается к температуре грунта, соответственно дальнейшее увеличение глубины зонда технически неэффективно.

В расчетной схеме (рисунок 4) наружная труба используется в виде нагревающего контура, внутренняя – для транспортировки нагретого теплоносителя низкопотенциальной тепловой энергии в контур теплотрансформатора.

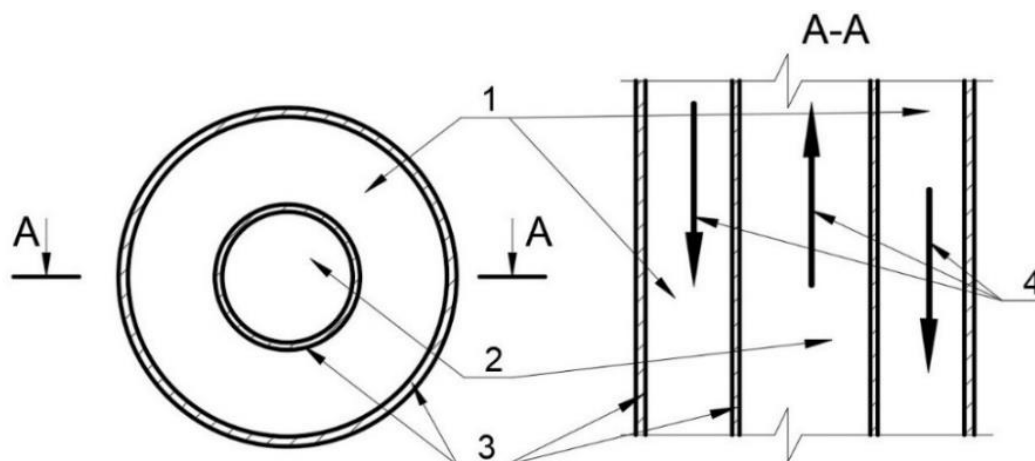


Рисунок 4 – Схема коаксиального коллектора: 1 – нагреваемый пропиленгликоль в низкопотенциальном тепловом контуре грунта; 2 – нагретый пропиленгликоль; 3 – трубы коллектора; 4 – направление движения пропиленгликоля

Для получения математической модели нагрева пропиленгликоля использовано уравнение теплопроводности для определения температуры в точках полупространства при нагреве от сосредоточенного источника тепловой энергии, распределенного по поверхности:

$$T(R, t) = \frac{Q}{c\gamma(4\pi at)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{R^2}{4at}} + T_0, \quad (1)$$

где R – расстояние от источника тепла до произвольной точки тела; Q – количество тепла, сосредоточенное в источнике энергии; t – время с начала процесса нагрева; T_0 – начальная температура нагреваемой среды (пропиленгликоля); c – теплоемкость; γ – плотность среды; a – коэффициент температуропроводности.

При нагреве пропиленгликоля, движущегося в цилиндрической трубе, задача будет осесимметричной и ее можно свести к нагреву пластины (рисунок 5) с распределенным по ее грани источником тепловой энергии.

Температуру трубы в точке A принимаем равной температуре грунта $T_{гр}$ в этой точке, которая зависит от расстояния Z . Качественный график зависимости распределения рабочей жидкости по глубине представлен на рисунок 6. Значе-

ния температуры грунта определялись непосредственными замерами термодатчиками по глубине выполнения разведочной скважины.

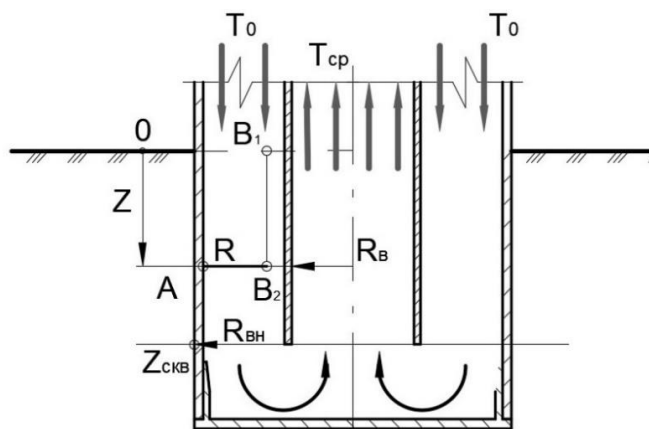


Рисунок 5 – Схема движения пропиленгликоля в скважине: T_0 – начальная температура нагреваемой среды (пропиленгликоля); $T_{сп}$ – температура нагретого пропиленгликоля; Z – расстояние от поверхности грунта до точки A ; $Z_{скв}$ – глубина скважины; R – расстояние от источника тепла до произвольной точки тела; $R_{вн}$ – внутренний радиус наружной трубы; $R_в$ – внутренний радиус внутренней трубы; B_1 – начальная точка нагреваемого элемента; B_2 – конечная точка элемента через пройденное время t .

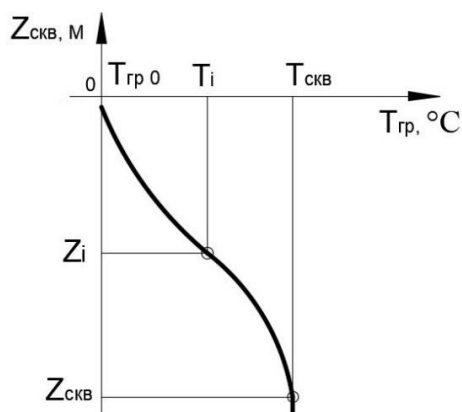


Рисунок 6 – График распределения температуры рабочей жидкости по глубине: $T_{гр}$ – температура грунта; $T_{скв}$ – температура рабочей жидкости на дне скважины; $T_{гр 0}$ – температура грунта в точке (глубине) промерзания; Z – глубина грунта; $Z_{скв}$ – глубина скважины; Z_i – глубина скважины в точке i ; T_i – температура рабочей жидкости на глубине в точке i

Эту зависимость можно аппроксимировать формулой:

$$T_{гр} = (T_{гр 0} - T_{скв})e^{-BZ^2} + T_{скв}, \quad (2)$$

где $T_{гр 0}$ – температура грунта в точке (глубине) промерзания; $T_{скв}$ – температура грунта на дне скважины.

Формула (2) является аппроксимирующей для графика, представленного на рисунке 6. Все факторы, влияющие на распределение температуры принимаются

по результатам замеров геологической разведки массива грунтов и технического задания на выполнение проектных работ.

Применив зафиксированные (определенные) значения и введя замены получена формула для расчета температуры в произвольной точке $B_2(R,Z)$ потока пропиленгликоля в трубе:

$$T(R, Z) = \frac{T_{Гр}(z)}{\left(\frac{4\pi az}{v}\right)^{\frac{3}{2}}} e^{-\frac{R^2 v}{4az}} + T_0, \quad (3)$$

Формула (3) позволяет исследовать зависимость температуры теплоносителя, поступающего в теплообменник, от глубины скважины и от скорости движения потока пропиленгликоля в трубе.

При неизменных значениях параметров $R_{вн}$; $R_{в}$; v ; T_0 ; $T_{Гр}$ произведен расчет температуры пропиленгликоля в зависимости от глубины скважины:

$$T_{ср} = \frac{T_{Гр}(z_{скв})}{(R_{вн} - R_{в}) \left(\frac{2z_{скв}}{v}\right)^2 \sqrt{8\pi^3}} \int_0^{(R_{вн} - R_{в}) \sqrt{\frac{v}{2az_{скв}}}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx + T_0, \quad (4)$$

Результаты расчета температуры пропиленгликоля от глубины скважины приведены на рисунок 7. Температура промерзания грунта принята 2,2 м. Анализ данного графика позволил установить наилучшую глубину скважины. Таким образом, математическая модель позволяет вычислять эффективную глубину ($Z_{эф}$) коаксиального геотермального коллектора.

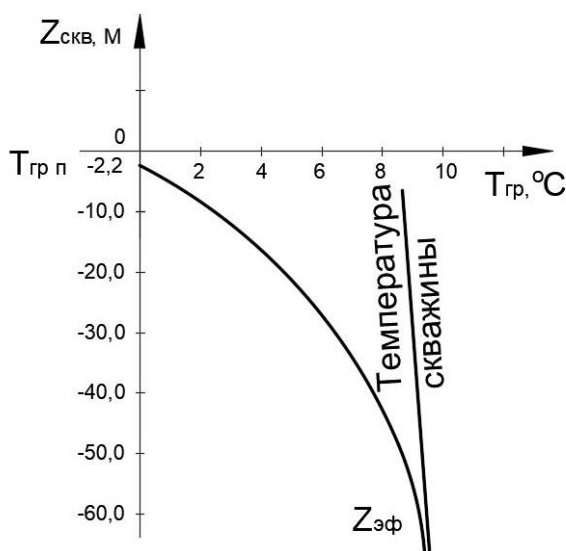


Рисунок 7 – График зависимости средней температуры пропиленгликоля от глубины скважины: $T_{Гр}$ – температура грунта; $T_{гр п}$ – температура промерзания грунта; $Z_{скв}$ – глубина скважины; $Z_{эф}$ – эффективная глубина скважины

Рассмотрение формулы (5), показало, что при выполнении расчета расстояния между скважинами в рассмотренном грунтовом массиве окружающего скважину в виде цилиндра, не учтен радиус цилиндра, который является определяемым значением.

$$R_{\text{РГС}} = 2 \sqrt{\frac{86400q_{\text{СКВ}}z_{\text{от п}}}{\pi c_{\text{ГР}}\rho_{\text{ГР}} \left[t_{\text{ГР}} - \left(\frac{t_{\text{ВХ}} + t_{\text{ВЫХ}}}{2} \right) \right]}} \quad (5)$$

где $q_{\text{СКВ}}$ – средний тепловой поток с одного метра скважины, Вт/м; $R_{\text{РГС}}$ – расстояние между грунтовыми скважинами; $z_{\text{от п}}$ – продолжительность отопительного периода, сут/год; $c_{\text{ГР}}$ – удельная теплоемкость грунтового массива, Дж/(кг·К); $\rho_{\text{ГР}}$ – плотность грунтового массива, кг/м³; $t_{\text{ГР}}$ – температура грунтового массива, °С; $t_{\text{ВХ}}$ и $t_{\text{ВЫХ}}$ – температура входа и выхода рабочей жидкости в грунтовом теплообменнике, °С.

Для исключения существующей погрешности в уравнении учтены радиусы скважин. Усовершенствованная зависимость представлена в формуле (6):

$$R_{\text{РГС}} = 2 \sqrt{\frac{86400q_{\text{СКВ}}z_{\text{от п}}}{\pi c_{\text{ГР}}\rho_{\text{ГР}} \left[t_{\text{ГР}} - \left(\frac{t_{\text{ВХ}} + t_{\text{ВЫХ}}}{2} \right) \right]}} + 2R_{\text{СКВ}}, \quad (6)$$

где $R_{\text{СКВ}}$ – радиус скважины, м.

Для выполнения расчета необходимого количества скважин использовано известное математическое решение:

$$N_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{зд}}}{Hq_{\text{СКВ}}}, \quad (7)$$

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

Анализ формулы (7), показал отсутствие влияния солнечной радиации в период эксплуатации при отрицательных температурах. Выявленный недостаток расчета является существенным по причине того, что тепловой поток в нейтральной зоне грунта при воздействии отрицательных температур окружающей среды до отметки промерзания грунта является отрицательным, а с увеличением глубины до отметки нейтральной зоны грунта существенно отличается от установленных теплофизических характеристик грунтового массива. Для исключения указанной неточности в расчетах учтена нейтральная зона грунта. Подставляя $H_{\text{нз}}$ в формулу (6), получаем уточненное уравнение для расчета количества скважин:

$$N_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{зд}}}{(H - H_{\text{н.з}})q_{\text{скв}}}, \quad (8)$$

где $H_{\text{н.з}}$ – глубина нейтральной зоны грунта.

Формула (8) позволяет учесть влияние солнечной радиации, существенно увеличивая точность выполнения расчета количества скважин.

Проведенные исследования позволили усовершенствовать ранее разработанную номограмму расстояния между скважинами с U-образными грунтовыми зондами. Пример определения расстояния между скважинами, при наличии выполненных изыскательских работ представлен на рисунке 8.

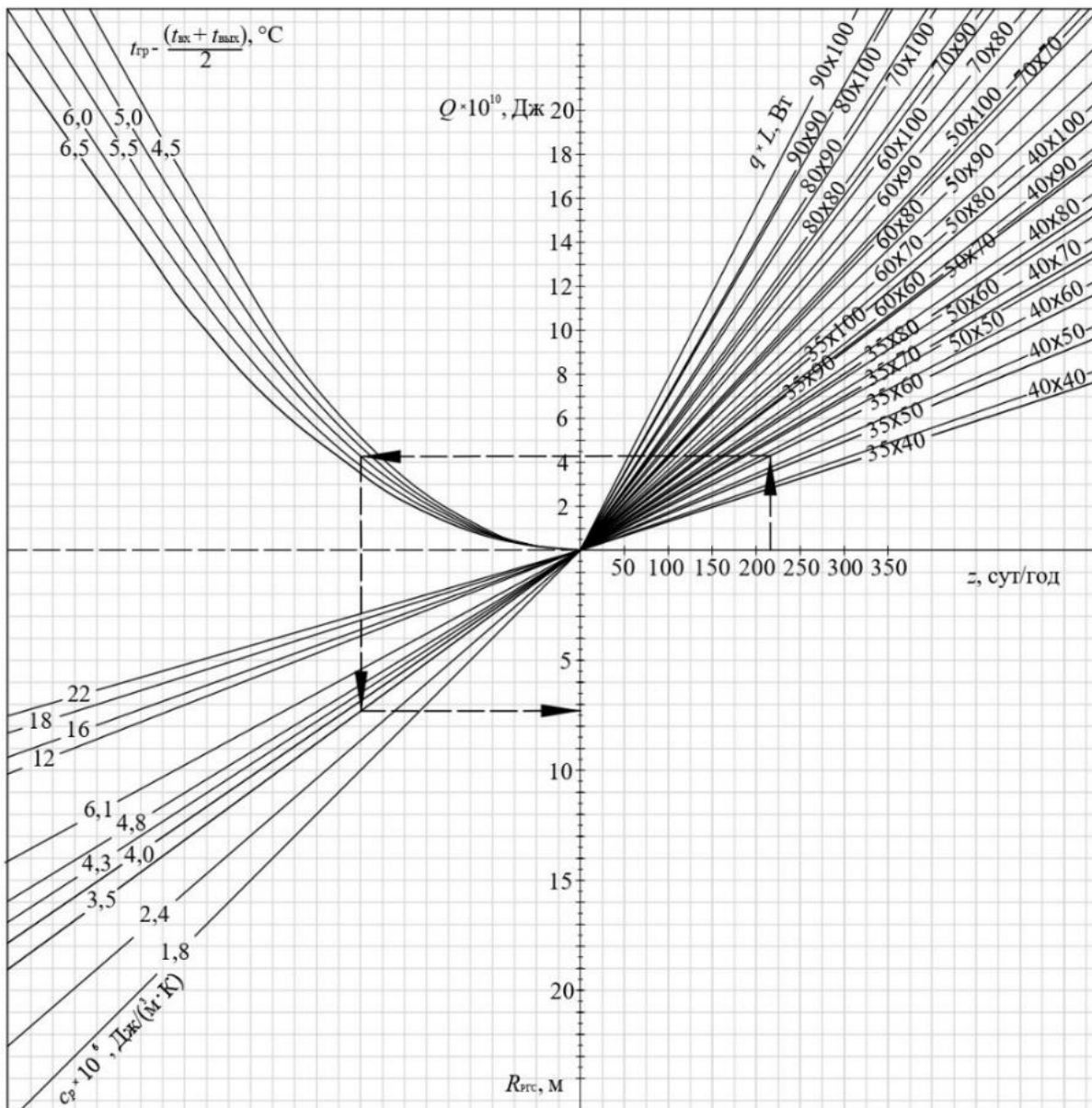


Рисунок 8 – Номограмма определения расстояния между скважинами: z – продолжительность отопительного периода, сут/г; q – тепловой поток с метра скважины, Вт/м; L – глубина скважины, м; Q – количество теплоты, извлекаемой одной скважиной за отопительный период, Дж; c_p – объемная теплоемкость грунтового массива, Дж/(м³·К); R – расстояние между скважинами с грунтовыми теплообменниками, м

Выполненные расчеты с учетом различных комбинаций теплофизических свойств грунтов позволили сформировать таблицу с рекомендуемыми расстояниями между скважинами. Результаты расчетов для г. Омска со среднетеплоемкими грунтами приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Рекомендуемые расстояния между грунтовыми зондами для г. Омска

Виды грунтов	$C\rho \cdot 10^3$, кДж/(м ³ ·К)	$q_{\text{скв}}$, Вт/м						
		40	50	60	70	80	90	100
Среднетеплоёмкие	3,1 - 3,4	6 (м)	7 (м)	7 (м)	8 (м)	8 (м)	9 (м)	10 (м)
	3,5 - 3,8	6 (м)	7 (м)	7 (м)	8 (м)	8 (м)	9 (м)	9 (м)
	3,9 - 4,2	6 (м)	6 (м)	7 (м)	7 (м)	8 (м)	8 (м)	9 (м)

Для увеличения эффективности работы грунтового зонда теплотрансформатора разработана новая конструкция (рисунок 9), на которую получен патент на полезную модель (№ 198052 «Симметричная проставка для U-образного грунтового зонда»).

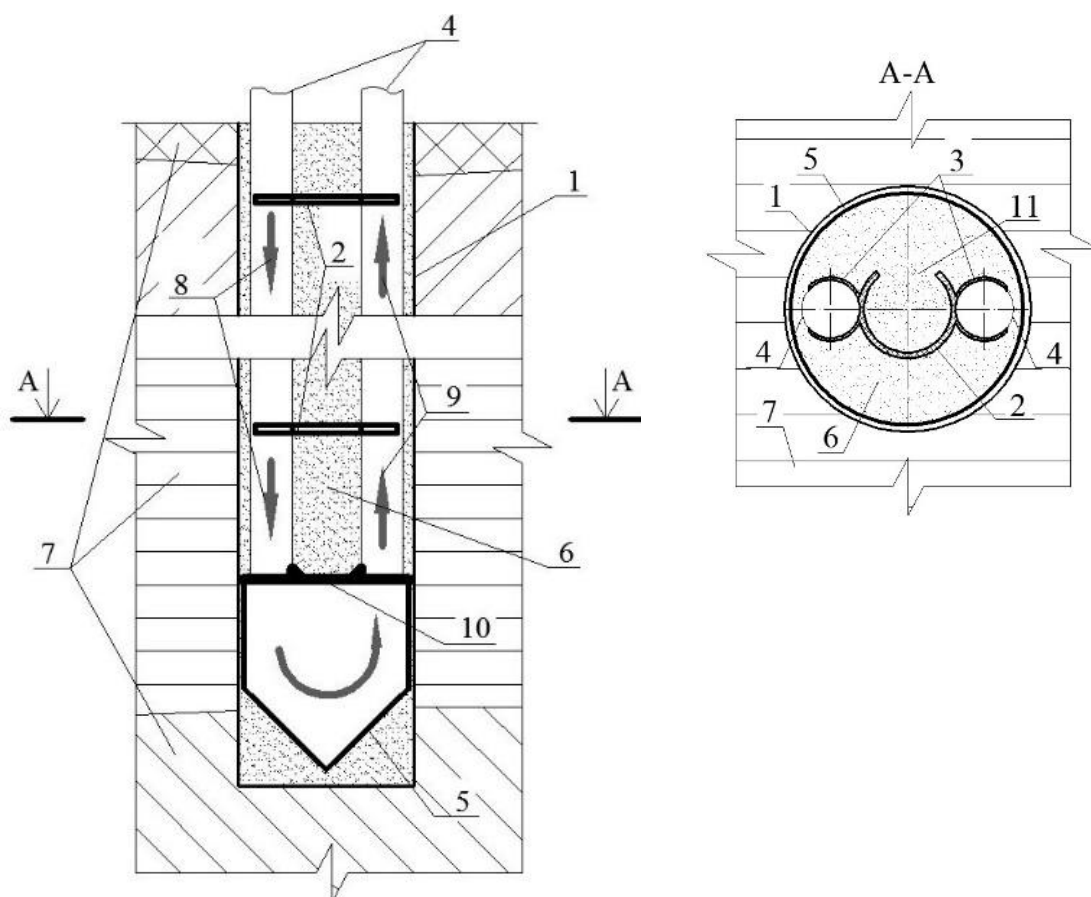


Рисунок 9 – Схема U-образного грунтового зонда: 1 – буровая скважина, 2 – симметричная проставка, 3 – фиксатор; 4 – монтируемые трубы; 5 – геотермальный наконечник; 6 – няша; 7 – грунтовый массив; 8 – нагреваемый источник (хладагент); 9 – нагретый источник (хладагент); 10 – площадку упора; 11 – распорное кольцо с боковым разъемом.

Указанный элемент – проставка для U-образного грунтового зонда - содержит два фиксатора для труб теплообменного элемента, расположенные симметрично и соединенные с помощью соединителя, при этом каждый из фиксаторов имеет полу цилиндрическую конфигурацию с выполненным в нем вырезом, а внутренний диаметр соответствует внешнему диаметру труб теплообменного элемента, отличающийся тем, что упомянутый соединитель выполнен в виде распорного кольца с боковым разъемом.

Результаты применения нового технического решения:

1. Уменьшение интенсивности теплообмена между параллельно идущими трубами в геотермальном зонде буровой скважины;
2. Фиксирование максимального расстояния между трубами в геотермальном зонде буровой скважины;
3. Возможность механизированного монтажа буровыми штангами за счет выполнения работ через центральное отверстие с боковым разъемом, а также способность устройства трубопровода подачи воды для увлажнения грунта.

В связи с необходимостью формирования базы данных теплового режима земли и вечномерзлых грунтов разработана программа для ЭВМ, позволяющая выполнить годовой (двухгодовой) мониторинг температуры грунта разведочной скважины в режиме реального времени, а также автоматическую запись (каждые 360 мин) зарегистрированных фактических показаний термальных датчиков на карту памяти. Результаты данных записываются на носитель информации, в текстовый документ расширением txt с указанием даты, месяца, года, часа, минут, секунд и температуры каждого датчика. Показания данных температуры грунта (онлайн) отображаются на дисплей LCD в цифровом и текстовом виде. Программа позволяет регистрировать несколько точек (задаваемой производителем работ единицей длины) температуры грунта термометрической скважины. По итогам работы с федеральной службой по интеллектуальной собственности получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№ 2020611929 «Геотермальный регистратор»).

По причине наличия изобретений (патент № 2529850 «Геотермальное устройство» и др.), технический результат которых выражается в повышении теплопроизводительности грунтового зонда за счет принудительного увлажнения наполнителя насосным оборудованием в центральной части геотермальной скважины, разработана новая конструкция (патент № 2739298 «Геотермальное устройство для водоупорных грунтов»), увлажняющая наполнитель геотермального зонда, грунтовыми и осадочными водами, без применения дополнительного оборудования, представленная на рисунке 10.

Результаты достижения технического решения:

- Повышение теплопроводности и эффективности отбора теплоты у низкопотенциального источника земли за счет увлажнения наполнителя геотермальной скважины грунтовыми и осадочными водами;
- Исключение принудительного увлажнения грунтовой скважины насосным оборудованием.

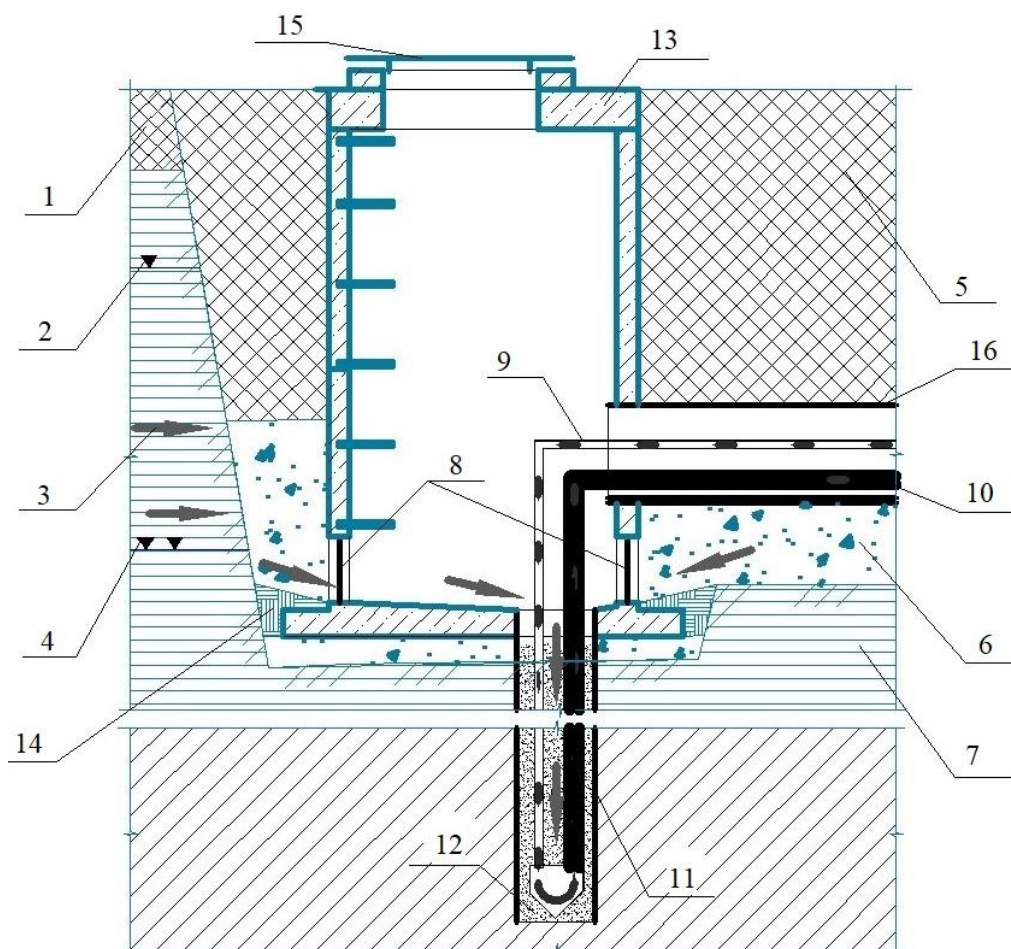


Рисунок 10 – Схема геотермального устройства для водоупорных грунтов: 1 – грунт; 2 – отметка сезонного уровня поверхностных вод; 3 – грунтовые и осадочные воды; 4 – отметка установившегося уровня поверхностных вод; 5 – насыпной грунт; 6 – щебень фракции 5-40 мм; 7 – водоупорный грунт; 8 – фильтр грубой очистки; 9 – подающая труба; 10 – обратная труба; 11 – буровая скважина в обсадной трубе; 12 – заполнителя зонда; 13 – железобетонная камера; 14 – водоупорный грунт; 15 – крышка камеры; 16 – железобетонный лоток.

В пятом разделе представлены разработанные практические рекомендации для проектирования систем теплоснабжения зданий и сооружений на базе теплотрансформаторов в сочетании с грунтовыми U-образными зондами, методика подбора теплотрансформатора, выполнен технико-экономический анализ применения теплотрансформатора с усовершенствованными U-образными грунтовыми зондами. В качестве совершенствования грунтового зонда (теплового оборудования 1) применен аналог новой конструкции – «Симметричная проставка для U - образного грунтового зонда» (полезная модель № 198052).

При эксплуатации теплотрансформаторов и мониторинге показаний их температурного режима установлено следующее:

В случае понижения температуры наружного воздуха ниже -25°C показания температуры рабочей жидкости на выходе с неусовершенствованных грунтовых зондов теплового оборудования, установившиеся на начало отопительного сезона $+6^{\circ}\text{C}$, понижались до $0,5 - 1^{\circ}\text{C}$, ниже $-30 - \text{до } 0^{\circ}\text{C}$. Тепловой режим рабочей жидкости на тепловом оборудовании с усовершенствованными

грунтовыми зондами изменялся не более чем на 1,5 ° С. Повышение эффективности работы теплового оборудования с усовершенствованными грунтовыми зондами подтверждает востребованность применения разработанной симметричной проставки, позволяющей уменьшить теплообмен за счет фиксации и установлении максимального расстояния параллельно идущих труб в геотермальном зонде буровой скважины, способствующей увеличению энергосбережения, улучшению эксплуатационных и технико-экономических характеристик теплотрансформатора.

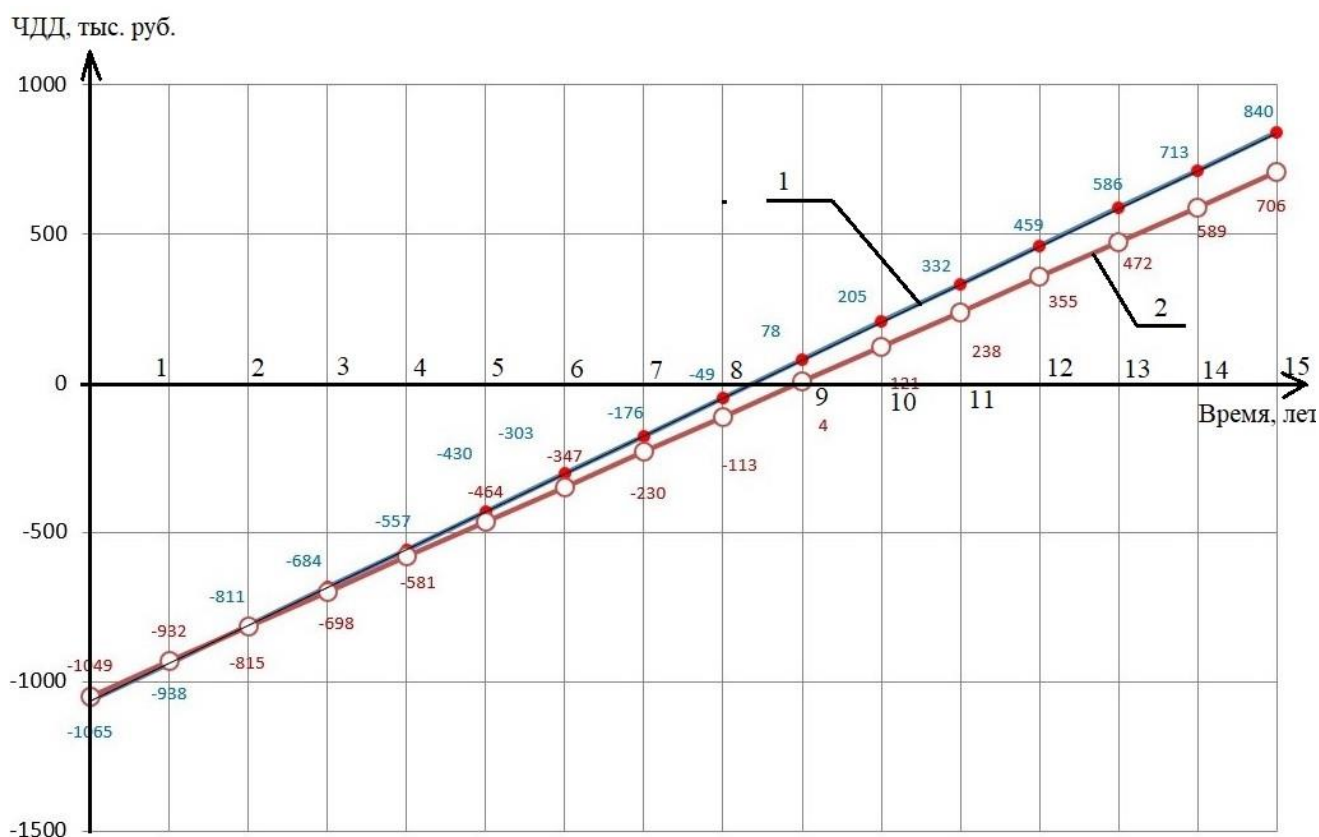


Рисунок 11 – Дисконтированный график окупаемости проекта 1, 2: 1 – теплотрансформатор с усовершенствованным грунтовым зондом; 2 – теплотрансформатор с неусовершенствованным грунтовым зондом

По результатам технико-экономических расчетов двух сопоставительных теплотрансформаторов (с усовершенствованными (неусовершенствованными) U - образными грунтовыми зондами) установлено:

1. Расход электроэнергии за отопительный сезон 2019 - 2020 у теплового оборудования с усовершенствованными грунтовыми зондами, на 31 % меньше по сравнению с аналогичным оборудованием;

2. Срок окупаемости источника теплоснабжения на базе грунтового теплотрансформатора, с усовершенствованными грунтовыми зондами уменьшается на 6,7%.

Дисконтированный график окупаемости теплотрансформатора 1 (2) представлен на рисунке 11.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получены новые научно-обоснованные технические решения, направленные на повышение технико-экономических показателей работы теплотрансформаторов. Применение разработанной методологии и использование новых данных позволяет повысить эффективность работы теплового оборудования, использующего низкопотенциальную тепловую энергию земли.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования грунтового массива, зафиксирована нейтральная зона грунта на территории г. Омска, позволяющие использовать, ранее отсутствующие данные, для проектирования геотермальных зондов. Средняя температура грунтового массива для г. Омска составила $+8,6^{\circ}\text{C} \pm 0,23^{\circ}\text{C}$, максимальная глубина влияния солнечной радиации на грунтовой массив установлена на отметке $-8,7$ м от уровня земли.

2. Обоснована математическая модель, выражающая расчетный метод эффективной глубины односкважинного коаксиального геотермального коллектора, при которой уже не происходит увеличения температуры пропиленгликоля, соответственно дальнейшее увеличение глубины зонда экономически неэффективно.

3. Улучшена методика определения количества скважин и расстояния между ними. Усовершенствована номограмма расстояния между геотермальными зондами с учетом полученных экспериментальных данных.

В качестве рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации рекомендуется выполнить исследования грунтов в весенне-летний период для получения отсутствующих данных о возможности использования грунтового массива для кондиционирования зданий и сооружений, учесть в перспективных планах выполнение теплофизических исследований в районах, где отсутствует газификация и использование низкопотенциальной энергии грунтов является наиболее актуальным.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ:

а) научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России:

1. Кадцын, И.И. Методика определения оптимальной глубины односкважинного коаксиального геотермального коллектора / И.И. Кадцын, О.В. Хороших, В.Ф. Кузнецов. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – №2 (38). – С. 127–135.

2. Кадцын, И.И. Исследования возможности улучшения технико-экономических показателей теплообеспечения индивидуальных потребителей / И.И. Кадцын, О.В. Хороших, А.П. Стариков. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. 2019. – № 4 (40). – С. 86–95.

3. Кадцын, И.И. Исследование теплофизических характеристик грунтов

города Омска для проектирования геотермальных зондов / И.И. Кадцын, А.П. Стариков, В.Р. Ведрученко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 3 (43). – С. 128–139.

б) научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus:

4. Kadtcyn I.I. Study of the temperature regime of soils in the city of Omsk for the use of heat transformers / I.I. Kadtcyn, A.P. Starikov, V.R. Vedruchenko, M.J. Agilbayeva. – Текст: непосредственный // VIII International Scientific Conference Transport of Siberia. – Novosibirsk, 2020. – P. 1–9.

в) патенты на изобретения и полезные модели:

5. Патент № 198052 Российская Федерация, МПК F16L 3/22 (2006.01). Симметричная проставка для U-образного грунтового зонда : № 2019124075 ; заявлено 23.07.2019 : опубликовано 16.06.2020 / Кадцын И.И., Стариков А.П. – Бюл. № 17. – Текст : непосредственный.

6. Патент на изобретение № 2739298 Российская Федерация, МПК F24T 10/15 (2018.01), F24T 10/30 (2018.01). Геотермальное устройство для водоупорных грунтов : № 2019143011: заявлено 18.12.2019: опубликовано 22.12.2020 / Кадцын И.И., Стариков А.П. – Бюл. № 36. – Текст : непосредственный.

7. Программа для ЭВМ № 2020611929 Российская Федерация. Геотермальный регистратор : № 2020610813: заявлено 31.01.2020 : опубликовано 12.02.2020 / Кадцын И.И., Стариков А.П., Резанов Е. М. – Бюл. № 2. – Текст : непосредственный.

г) научные работы, опубликованные в прочих изданиях:

8. Кадцын, И.И. Применение геотермального отопления при реконструкции (строительстве) зданий и сооружений в условиях плотной застройки / И.И. Кадцын, А.П. Стариков, В.Р. Ведрученко. – Текст : непосредственный // Архитектура и строительство: информационно-аналитический журнал. Омск. – 2019. № 4 (154). – С. 62–63.

9. Кадцын, И.И. Экономический анализ использования существующих вариаций теплообеспечения автономных объектов в Сибирском федеральном округе / И.И. Кадцын, А.П. Стариков. – Текст: непосредственный // Архитектура и строительство. – Омск. – 2020. № 4 (158). – С. 38–41.

10. Kadtcyn, I.I. Modern methods of geothermal heating application in large industrial-urbanized city areas / I.I. Kadtcyn, A.P. Starikov. – Текст : непосредственный // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration. – Beijing. – 2019. – vol. 112. – P. 90–96.

11. Кадцын, И.И. Применение геотермального отопления для зданий и сооружений / И.И. Кадцын. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы энергетики : материалы науч.- практ. конф. с междунар. участием. – Омск. Омский гос. ун-т путей сообщения. – С. 34–39.

12. Кадцын, И.И. Инновационные способы применения геотермального отопления в несущих строительных конструкциях / И.И. Кадцын, А.П. Стариков. – Текст : непосредственный // Повышение энергоэффективности объектов и систем теплоснабжения: материалы всерос. науч.-техн. конф. – Омск. Омский гос. ун-т путей сообщения. – С. 138–145.

13. Кадцын, И.И. Экономический анализ использования теплотрансформаторов на объектах ОАО «РЖД» в Сибирском федеральном округе/ И.И. Кадцын,

А.П. Стариков. – Текст: непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы науч. конф. – Омск. Омский гос. ун-т путей сообщения. – С. 151–160.

14. Кадцын, И.И. Снижение потребления электроэнергии в геотермальных теплотрансформаторах / И.И. Кадцын, А.П. Стариков. – Текст : непосредственный // Научно-исследовательские решения современной России в условиях кризиса: материалы всерос. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону. – С. 141–144.