



**«УТВЕРЖДАЮ:»**

**Генеральный директор**

**ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»**

**Н.И. Майорова**



## **ОТЧЁТ**

**ПО ДОГОВОРУ №31-2012 ОТ 25 СЕНТЯБРЯ 2012 г.**

**НА**

**РАЗРАБОТКУ ПРЕДПРОЕКТНЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ УСТАНОВОК ИСКУССТВЕННОГО РОСТА КРИСТАЛЛОВ**

Научный руководитель

ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»,

д-р техн. наук

**Г.П. Васильев**

Директор проектного отделения

ОАО "ИНСОЛАР-ИНВЕСТ"

**В.Ф. Горнов**



Москва 2012

Настоящие предпроектные предложения выполнены в рамках договора №31-2012, заключённого между ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» и ООО «Кама Кристалл Технолоджи» 25 сентября 2012 г.



## Оглавление

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	5
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	6
1.1 ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	8
1.2 КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА СТРОИТЕЛЬСТВА.....	10
1.2.1 Природные условия .....	10
1.2.2 Климат .....	10
1.2.3 Геологическое строение .....	11
2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ.....	14
3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ГРУНТА .....	18
3.1 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ.....	18
3.1.1 Общая информация.....	18
3.1.2 Данные по площадке строительства .....	24
3.2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМОСКВАЖИН НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СБРОСА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ГРУНТ .....	26
3.3 ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В ПРЕДЕЛАХ ПОЛЯ ТЕРМОСКВАЖИН.....	33
3.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ТЕРМОСКВАЖИН .	42
3.4.1 Ограничения.....	42
3.4.2 Расчётные нагрузки и результаты расчётов .....	42
4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА.....	53
4.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ПЛОЩАДИ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА ..	53
4.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ .....	54
4.2.1 Геотермальная система.....	54
4.2.2 Система на базе чиллеров.....	55
4.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ .	57
4.3.1 Геотермальная система.....	57

4.3.2 Система на базе чиллеров.....	58
4.4 ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЁТА.....	59
5. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	61
6. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	65



## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

расчётный период - период времени, рассматриваемый при проведении расчётов.

горячее водоснабжение - подогрев воды для системы бытового горячего водоснабжения

тепловой насос (ТН) - устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с более высокой температурой. Термодинамически тепловой насос представляет собой обращённую холодильную машину. Если в холодильной машине основной целью является производство холода путём отбора теплоты из какого-либо объёма испарителем, а конденсатор осуществляет сброс теплоты в окружающую среду, то в тепловом насосе картина обратная. Конденсатор является теплообменным аппаратом, выделяющим теплоту для потребителя, а испаритель - теплообменным аппаратом, утилизирующим низкопотенциальную теплоту: вторичные энергетические ресурсы и (или) нетрадиционные возобновляемые источники энергии

теплоноситель - любая среда (вода, воздух и т.д.), используемая для передачи теплоты без изменения своего состояния

теплопроизводительность (тепловая мощность) - теплота, отдаваемая установкой в среду передачи теплоты за единицу времени

сезон отопления или охлаждения - период года, в течение которого требуется энергия для отопления или охлаждения

термоскважина - герметичный грунтовый теплообменник, встроенный в вертикальную или наклонную скважину, обеспечивающий извлечение тепловой энергии из грунта или сброс тепловой энергии в грунт.

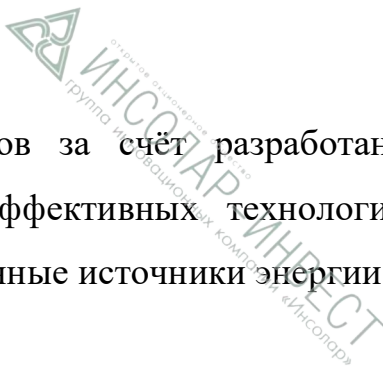
# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Грунт поверхностных слоёв Земли фактически является тепловым аккумулятором неограниченной ёмкости. Тепловой режим грунта формируется под действием двух основных факторов – падающей на поверхность солнечной радиации и потоком радиогенного тепла из земных недр. Сезонные и суточные изменения интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха вызывают колебания температуры верхних слоёв грунта. Глубина проникновения суточных колебаний температуры наружного воздуха и интенсивности падающей солнечной радиации в зависимости от конкретных почвенно-климатических условий колеблется в пределах от нескольких десятков сантиметров до полутора метров. Глубина проникновения сезонных колебаний температуры наружного воздуха и интенсивности падающей солнечной радиации не превышает, как правило,  $15\div 20$  м.

Тепловой режим слоёв грунта, расположенных ниже этой глубины («нейтральной зоны»), формируется под воздействием тепловой энергии, поступающей из недр Земли, и практически не зависит от сезонных, а тем более суточных, изменений параметров наружного климата. С увеличением глубины температура грунта также увеличивается в соответствии с геотермическим градиентом (примерно  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  на каждые 100 м). Величина потока радиогенного тепла, поступающего из земных недр, для разных местностей различается. Как правило эта величина составляет  $0,05\div 0,12$  Вт/м<sup>2</sup> [7].

Предлагаемые технические решения, разработанные в рамках подготовки предпроектных предложений, имеют своей целью повышение экологической и энергетической эффективности системы охлаждения установок искусственного роста кристаллов на основе вертикальных

грунтовых теплообменников за счёт разработанных ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» новых энергоэффективных технологий теплохладоснабжения, использующих нетрадиционные источники энергии.



## 1.1 ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Предпроектной проработке подлежит система охлаждения в геотермальном контуре оборотной воды, используемой для охлаждения технологического оборудования промышленного предприятия ООО «Кама Кристалл Технолоджи» в г. Набережные Челны.

Технологический комплекс установок по искусственному росту кристаллов разделён на 4 модуля. Все модули одинаковы. Расчёт производится для одного модуля.

В качестве исходных данных в соответствии с Техническим Задаaniem были приняты следующие:

Место строительства – город Набережные Челны.

Тепловая мощность, подлежащая сбросу - 6400 кВт. Нагрузка постоянна и неизменна как в течение суток, так и в течение года.

Температуры теплоносителя:

Прямая	36 °С.
Обратная	23 °С.

Теплоноситель – дистиллированная вода.

Расчётный расход теплоносителя – 460 м<sup>3</sup>/ч.

Размер участка для размещения поля грунтовых теплообменников - 530x140 м. План размещения участка представлен на рисунке 1.



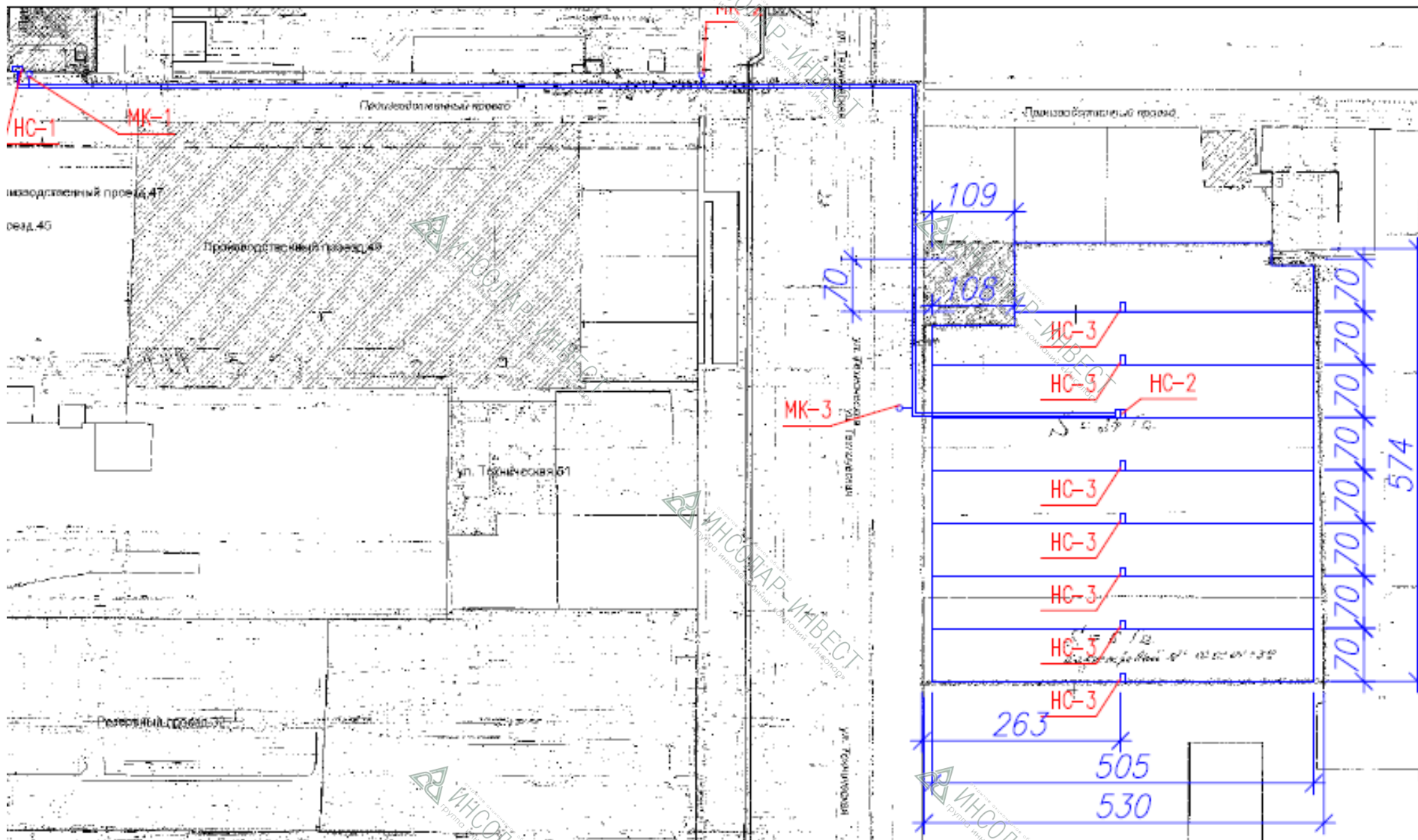


Рисунок 1. План участка для размещения грунтовых теплообменников. На один модуль приходится 2 участка размером 530x70 м.

## 1.2 КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА СТРОИТЕЛЬСТВА

### 1.2.1 Природные условия

Местоположение и ландшафтное зонирование. Рассматриваемая территория расположена в Промкомзоне-А г. Набережные Челны и приурочена к северной части Восточного Закамья, к бассейну нижнего течения р. Кама. В геоморфологическом плане производственная база располагается в средней части левобережного склона долины р.Кама. Абсолютные отметки поверхности земли на территории производственной базы изменяются от 104 до 107 м. Территория имеет слабый уклон на северо-запад к Нижнекамскому водохранилищу (урез воды 62,5 м).

### 1.2.2 Климат

Согласно СНиП 23-01-99 [1] климат территории типичен для умеренного широтного пояса Русской равнины. Характеризуется тёплым летом, умеренно-холодной зимой с устойчивым снежным покровом и хорошо выраженными сезонами. Среднегодовая температура воздуха +3 °С. Холодный период с начала октября до конца марта. Средние месячные и годовая температура воздуха представлены в таблице 1.

Таблица 1.

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
-13,9	-13,2	-6,6	3,8	12,4	17,4	19,5	17,5	11,2	3,2	-4,4	-11,1	3,0

Годовое количество осадков – 527 мм. В году осадки распределены неравномерно, 354 мм выпадает в тёплое время года в виде дождей, остальная часть – 173 мм - в холодный период и принимает участие в формировании снежного покрова.



### 1.2.3 Геологическое строение

Информация о геологических особенностях района строительства взята из [2] и представлена на рисунке 2, а условные обозначения – на рисунке 3.

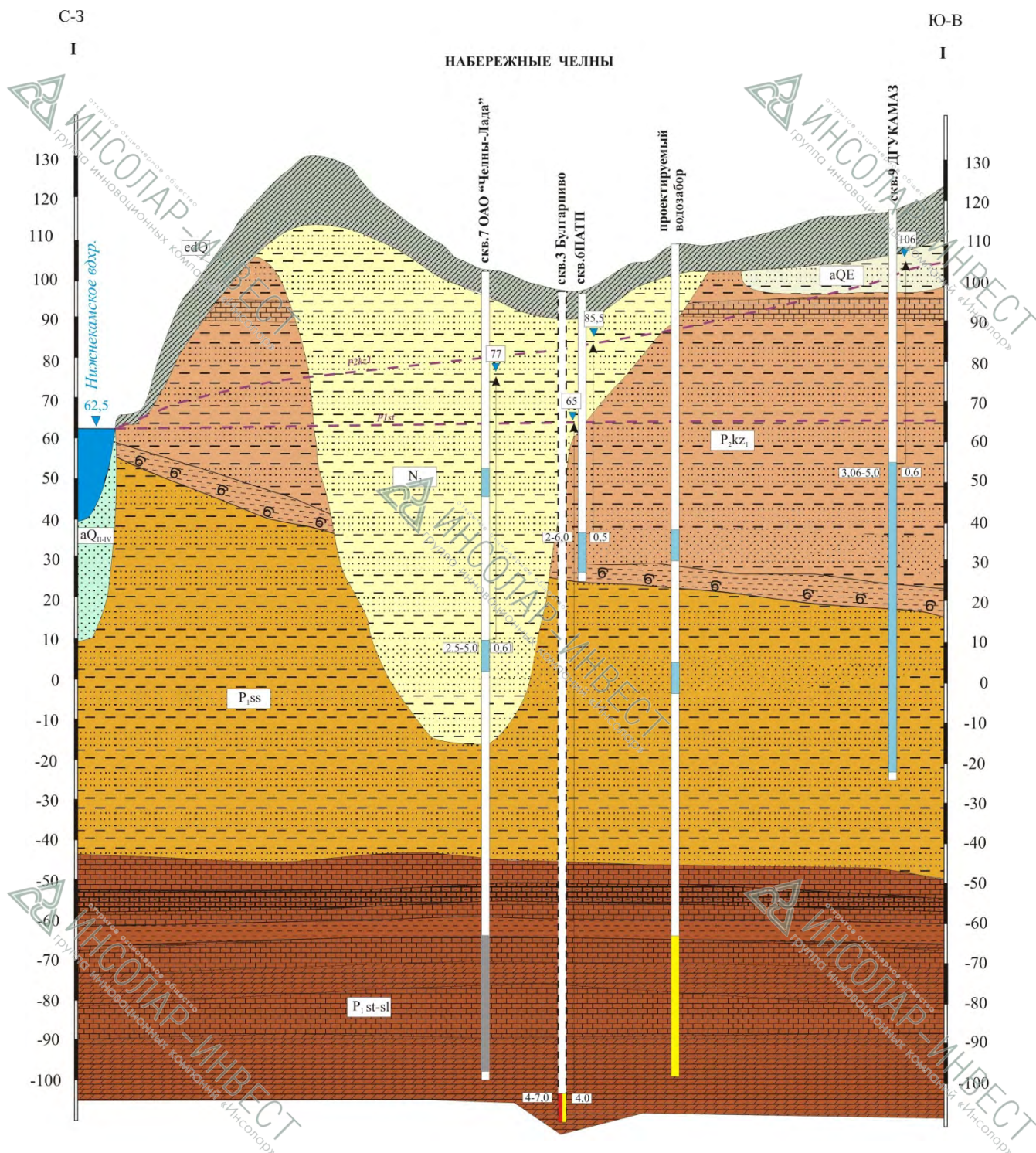
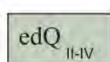
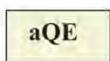
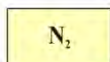



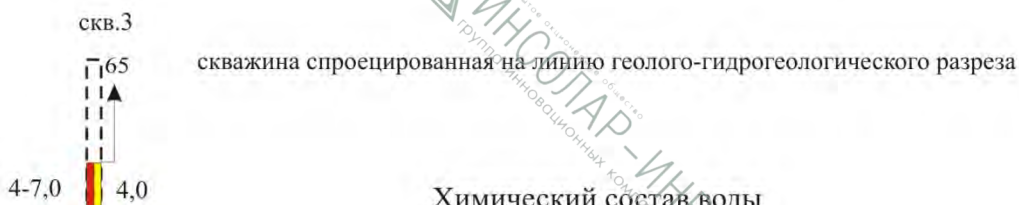
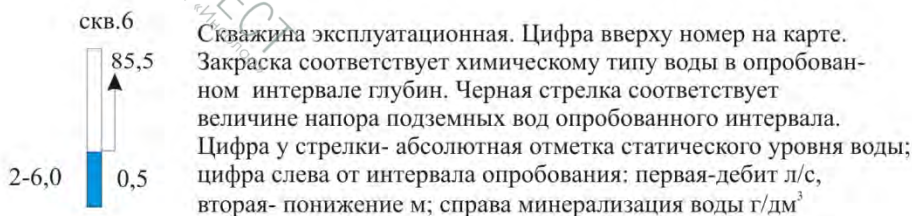





Рисунок 2. Геолого-гидрологический разрез.

### Условные обозначения:

-  слабопроницаемый локально-слабоводосный среднечетвертично-современный элювиально делювиальный комплекс;
-  проницаемый не водоснабжающий эоплейстоценовый комплекс;
-  водоупорный локально водоснабжающий плиоценовый комплекс;
-  водоснабжающий нижнеказанский карбонатно-терригенный комплекс4
-  водоснабжающий шешминский терригенный комплекс;
-  водоснабжающий стерлитамакско-соликамский сульфатно-карбонатный комплекс.



### Химический состав воды

-  вода с преобладанием гидрокарбонатного иона
-  вода с преобладанием сульфатного иона
-  вода с преобладанием хлоридного иона

### Литологический состав пород:









-  Суглинок
-  Песчаник
-  Мергели
-  Глина
-  Известняк
-  Доломиты
-  включения брахиопод (лингул)
-  уровень подземных вод. Вверху индекс гидрогеологического подразделения.

Рисунок 3. Условные обозначения к рисунку 2.



Данные по геологическому строению участка, выделенного для размещения поля грунтовых теплообменников, представлены в таблице 2 (по данным [2]).

Таблица 2.

Номер слоя от поверхности грунта	Глубина залегания, м	Тип и характеристика грунта
1	0-8	Суглинок маловлажный
2	8-20	Песчаник с прослойками глины, маловлажный
3	20-82	Песчаник с прослойками глины, влажный до водонасыщенного
4	82-87	Глина с включениями брахиопод
5	87-155	Песчаник с прослойками глины, влажный до водонасыщенного
6	155-161	Известняк
7	161-166	Мергель
8	166-170	Известняк
9	170-174	Глина
10	174-180	Известняк
11	180-188	Доломит
12	188-199	Известняк
13	199-220	Доломит

Факторами, могущими повлиять на гидрогеологические условия, является освоение подземного пространства и устройство грунтовых теплообменников.

## 2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Одной из основных проблем, требующих решения для обеспечения надёжной и бесперебойной работы основного технологического оборудования рассматриваемого производства - установок по искусственному росту кристаллов, является поддержание требуемых температурных параметров охлаждающей воды. От корректного функционирования системы охлаждения в значительной мере зависит качество выпускаемой продукции.

Определяющим параметром для выбора типа системы охлаждения является уровень температур теплоносителя, до которого его следует охладить. В рассматриваемом случае теплоноситель подлежит охлаждению до температуры 23 °С, что значительно ниже температуры воздуха, характерного для региона Набережных Челнов в летний период года. Так, температура воздуха обеспеченностью 0,95 для тёплого периода года составляет 29,9 °С, что делает невозможным использование как сухих охладителей, так и мокрых градирен для круглогодичного обеспечения требуемых температурных параметров теплоносителя.

Использование водоохладителей (чиллеров) как парокомпрессионного, так и абсорбционного типа может решить проблему. Однако установка холодильного оборудования требует подведения значительной электрической мощности (для парокомпрессионных машин) и больших финансовых затрат, связанных как с расходами на приобретение самого оборудования, так и с потреблением электроэнергии (в случае абсорбционных машин – газа, пара или горячей воды). Также нужно помнить и о необходимости отведения специальных технических помещений для указанного оборудования вплоть до строительства отдельного здания

холодильного центра, а также об обеспечении квалифицированного обслуживания силами привлекаемых специализированных организаций.

Альтернативой рассмотренным выше вариантам является использование грунтового массива для отвода избыточного тепла. Для организации теплообмена между грунтовым массивом и теплоносителем наиболее часто используются вертикальные грунтовые теплообменники двух

типов:

- Коаксиальные (металлические или пластиковые);
- U-образные петли из полиэтиленовых труб.

Оба эти типа теплообменников помещаются в глухие вертикальные скважины, и внутри них циркулирует теплоноситель без массообмена с окружающим грунтовым массивом.

На текущем этапе производится предварительное оценочное определение эксплуатационных характеристик системы сброса тепла в грунт исходя из усреднённых параметров удельного теплосъёма и удельного сброса тепла в грунт. Для оценки удельного теплосъёма с погонного метра длины грунтового теплообменника можно использовать данные, изложенные в [5] и приведённые в таблице 3.

Для оценки удельных показателей эффективности грунтовых теплообменников при их работе в режиме сброса тепла в грунт для предварительных расчётов была принята величина удельного теплосброса равная 60 Вт/м. Эта величина меньше аналогичной величины, которая могла бы быть использована для оценки теплосъёма, по причине того, что процессы извлечения тепла и сброса тепла в грунт имеют различающиеся сопутствующие физические эффекты. Так, в случае сброса тепла в грунт происходит высыхание прилегающего к грунтовому теплообменнику массива грунта с соответствующим снижением его теплопроводности, что и

вызывает резкое падение теплотехнических характеристик грунтовых теплообменников. В дальнейшем эта величина подлежит уточнению в ходе проведения численного моделирования режимов работы грунтовых теплообменников.

Таблица 3 [5].

Underground	Specific heat extraction	
	for 1800 h	for 2400 h
<i>General guideline values:</i>		
Poor underground (dry sediment) ( $\lambda < 1.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ )	25 W/m	20 W/m
Normal rocky underground and water saturated sediment ( $\lambda < 1.5\text{--}3.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ )	60 W/m	50 W/m
Consolidated rock with high thermal conductivity ( $\lambda > 3.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ )	84 W/m	70 W/m
<i>Individual rocks:</i>		
Gravel, sand, dry	< 25 W/m	< 20 W/m
Gravel, sand, saturated water	65–80 W/m	55–65 W/m
For strong groundwater flow in gravel and sand, for individual systems	80–100 W/m	80–100 W/m
Clay, loam, damp	35–50 W/m	30–40 W/m
Limestone (massif)	55–70 W/m	45–60 W/m
Sandstone	65–80 W/m	55–65 W/m
Siliceous magmatite (e.g. granite)	65–85 W/m	55–70 W/m
Basic magmatite (e.g. basalt)	40–65 W/m	35–55 W/m
Gneiss	70–85 W/m	60–70 W/m
The values can vary significantly due to rock fabric such as crevices, foliation, weathering, etc.		

Результаты оценочных расчётов грунтовой системы приведены в таблице 4.

Таблица 4.

№№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
1	Мощность сброса тепла	кВт	6400
2	Удельная нагрузка сброса тепла	Вт/м	60
3	Количество скважин	шт.	712
4	Глубина скважин	м	150



Глубина грунтовых теплообменников при проведении расчёта была ограничена значением 150 м по причине того, что стандартные выпускаемые промышленностью полиэтиленовые трубы способны выдерживать избыточное давление не более 16 атмосфер, а при глубине в 150 м гидростатическое давление, создаваемое столбом теплоносителя, будет примерно равно 15 атмосферам. Кроме того, для обеспечения циркуляции теплоносителя необходимо создание некоторого дополнительного избыточного давления. Несомненно, применяемые для геотермальных теплообменников трубы по мере увеличения внутреннего давления при рассмотрении все более низких слоёв практически зеркально испытывают увеличение внешнего давления от почвы, что значительно снижает удерживаемый перепад давлений, однако для количественного определения этого эффекта требуется проведение специальных прочностных расчётов, поэтому на настоящем этапе при вычислениях будет использоваться именно эта указанная глубина.

### 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ГРУНТА

#### 3.1 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

##### 3.1.1 Общая информация

В термодинамическом плане грунт, как в мёрзлом, так и в талом состоянии представляет собой многофазную и многокомпонентную систему. К основным компонентам относятся: органо-минеральный скелет, поровый раствор и поровый газ. Вода может находиться в жидкой, твёрдой и газообразной фазах. Поскольку теплоёмкость есть величина аддитивная, то теплоёмкость породы складывается из теплоёмкостей её составляющих. Таким образом, теплоёмкость породы (грунта) есть сумма теплоёмкостей минералов (твёрдых частиц), из которых сложен скелет грунта, теплоёмкости органической составляющей, воды (для влажных грунтов) или водного раствора соли (для засоленных грунтов), теплоёмкости льда (для мёрзлых) и теплоёмкости газовой составляющей грунта.

Теплопроводность грунтов определяется соотношением твёрдой, жидкой и газообразной составляющих, их химико-минеральным составом, структурными и текстурными особенностями (дисперсностью, пористостью, слоистостью и др.), влажностью, агрегатным состоянием воды и температурой.

Многочисленные экспериментальные исследования, выполненные на дисперсных грунтах нарушенного и естественного сложения, показали уменьшение теплопроводности пород с увеличением их дисперсности в следующей последовательности: крупнообломочные, песчаные, суперпесчаные, лёссовые, суглинистые, глинистые. Возрастание

дисперсности сопровождается ростом гидрофильности и ультрапористости, определяющих фазовый состав мёрзлых пород, причём процентное содержание незамёрзшей воды увеличивается в последовательности, аналогичной приведённому ряду по дисперсности.

Минеральный состав дисперсных пород в целом оказывает влияние на их теплопроводность, хотя и проявляется это опосредованно через факторы строения породы.

Существенное влияние на теплопроводные свойства пород оказывает их плотность, а также любое нарушение сплошности. Коэффициент теплопроводности выше у более плотных, менее пористых пород, так как уплотнение породы сопровождается увеличением доли более теплопроводного скелета, а также улучшением качества контактов между частицами. Эта закономерность подтверждена экспериментальными данными для дисперсных пород различного состава, причём она справедлива в широком диапазоне температур, включая и область интенсивных фазовых переходов.

Теплопроводность резко возрастает по мере увеличения влажности грунтов поскольку теплопроводность воздуха, вытесняемого водой из пор породы, значительно ниже теплопроводности воды.

Большой части осадочных и метаморфических пород присуща анизотропия по теплопроводности.

Величина теплопроводности зависит от температуры. Особенно сильно зависит от температуры теплопроводность мёрзлых грунтов. Для влажных дисперсных пород влияние температуры определяется не только температурными зависимостями теплопроводности отдельных компонентов, но и их количественным соотношением, связанным с изменением фазового состава влаги в породах, а также условиями передачи тепла на контактах компонентов породы. Образование льдо-цементационных связей при

фазовых переходах в значительной степени увеличивает величину коэффициента теплопроводности пород. Как правило, теплопроводность мёрзлых пород выше, чем талых. В таблице 5 приведены данные о теплофизических свойствах грунтов, взятые из СНиП 2.02.04-88 [3].

Таблица 5 (начало).

Плотность сухого грунта $\rho_{дх}, \rho_{ф}$	Суммарная влажность грунта $W_{\Sigma}$ , доли единицы	Теплопроводность грунта, Вт/(м°С), [ккал/(м ч °С)]								Объёмная теплоёмкость грунта, Дж ( $\text{м}^3 \cdot \text{°С} \cdot 10^{-6}$ ) ккал ( $\text{м}^3 \cdot \text{°С}$ )	
		Пески разной крупности и гравелистые		Супеси пылеватые		Суглинки и глины		Заторфо- ванные грунты и торфы		$C_{дх}$	$C_{ф}$
		$\lambda_{дх}$	$\lambda_{ф}$	$\lambda_{дх}$	$\lambda_{ф}$	$\lambda_{дх}$	$\lambda_{ф}$	$\lambda_{дх}$	$\lambda_{ф}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,1	9,00							0,81 (0,70)	1,34 (1,15)	4,00 (950)	2,31 (550)
0,1	6,00	-	-	-	-	-	-	0,40 (0,35)	0,70 (0,60)	2,73 (650)	1,68 (400)
0,1	4,00	-	-	-	-	-	-	0,23 (0,20)	0,41 (0,35)	1,88 (450)	1,26 (300)
0,1	2,00	-	-	-	-	-	-	0,12 (0,10)	0,23 (0,20)	1,05 (250)	0,64 (200)
0,2	4,00	-	-	-	-	-	-	0,81 (0,70)	1,33 (1,15)	3,78 (900)	2,40 (570)
0,2	2,00	-	-	-	-	-	-	0,23 (0,20)	0,52 (0,45)	2,10 (500)	1,47 (350)
0,3	3,00	-	-	-	-	-	-	0,93 (0,80)	1,39 (1,20)	4,15 (990)	2,40 (570)
0,3	2,00	-	-	-	-	-	-	0,41 (0,35)	0,70 (0,60)	3,32 (750)	2,10 (500)
0,4	2,00	-	-	-	2,10 (1,80)	-	2,10 (1,80)	0,93 (0,80)	1,39 (1,20)	3,78 (900)	2,73 (650)
0,7	1,00	-	-	-	2,10 (1,80)	-	2,00 (1,75)	-	-	3,60 (855)	2,10 (500)
1,0	0,60	-	-	-	2,00 (1,75)	-	1,90 (1,65)	-	-	3,44 (820)	2,18 (520)
1,2	0,40	-	-	-	1,90 (1,65)	1,57 (1,35)	1,80 (1,55)	-	-	3,11 (740)	2,12 (505)
1,4	0,35	-	-	1,80 (1,55)	1,86 (1,60)	1,57 (1,35)	1,66 (1,45)	-	-	3,35 (800)	2,35 (560)

Таблица 5 (окончание).

Плотность сухого грунта $\rho_{дх}, \rho_{гг}$	Суммарная влажность грунта $W_{\Sigma}$ , доли единицы	Теплопроводность грунта, Вт/(м <sup>3</sup> С), [ккал/(м <sup>3</sup> ч <sup>3</sup> С)]								Объёмная теплоёмкость грунта, $\frac{Дж}{(м^3 \cdot ^\circ C \cdot 10^{-6})}$ $\frac{ккал}{(м^3 \cdot ^\circ C)}$	
		Пески разной крупности и гравелистые		Супеси пылеватые		Суглинки и глины		Заторфо- ванные грунты и торфы			
		$\lambda_{гн}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_{г}$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_{г}$		
1,4	0,30	-	-	1,74 (1,50)	1,80 (1,55)	1,45 (1,25)	1,57 (1,35)	-	-	3,02 (720)	2,18 (520)
1,4	0,25	1,91 (1,65)	2,14 (1,85)	1,57 (1,35)	1,68 (1,45)	1,33 (1,45)	1,51 (1,30)	-	-	2,78 (660)	2,06 (490)
1,4	0,20	1,57 (1,35)	1,86 (1,60)	1,33 (1,15)	1,51 (1,30)	1,10 (0,95)	1,22 (1,05)	-	-	2,48 (590)	1,89 (450)
1,4	0,15	1,39 (1,20)	1,62 (1,40)	1,10 (0,95)	1,27 (1,10)	0,87 (0,75)	0,99 (0,85)	-	-	2,18 (520)	1,76 (420)
1,4	0,10	1,10 (0,95)	1,27 (1,10)	0,93 (0,80)	1,05 (0,90)	0,70 (0,60)	0,75 (0,65)	-	-	1,89 (450)	1,74 (415)
1,4	0,05	0,75 (0,65)	0,81 (0,70)	0,64 (0,55)	0,70 (0,60)	0,46 (0,40)	0,52 (0,45)	-	-	1,60 (380)	1,47 (350)
1,6	0,30	-	-	1,86 (1,60)	1,97 (1,70)	1,68 (1,45)	1,86 (1,55)	-	-	1,84 (835)	2,48 (590)
1,6	0,25	2,50 (2,15)	2,73 (2,35)	1,80 (1,55)	1,91 (1,65)	1,51 (1,30)	1,68 (1,45)	-	-	3,15 (750)	2,35 (560)
1,6	0,20	2,15 (1,85)	2,37 (2,05)	1,62 (1,40)	1,74 (1,50)	1,33 (1,15)	1,51 (1,30)	-	-	2,31 (670)	2,14 (510)
1,6	0,15	1,80 (1,55)	2,00 (1,75)	1,45 (1,25)	1,57 (1,35)	1,10 (0,95)	1,22 (1,05)	-	-	2,48 (590)	2,02 (480)
1,6	0,10	1,45 (1,25)	1,62 (1,40)	1,62 (1,00)	1,28 (1,10)	0,87 (0,75)	0,93 (0,80)	-	-	2,16 (515)	1,80 (430)
1,6	0,05	1,05 (0,90)	1,10 (0,95)	0,81 (0,70)	0,87 (0,75)	0,58 (0,50)	0,64 (0,55)	-	-	1,83 (435)	1,68 (400)
1,8	0,20	2,67 (2,30)	2,84 (2,45)	1,86 (1,60)	1,97 (1,70)	1,57 (1,35)	1,80 (1,55)	-	-	3,17 (755)	2,41 (575)
1,8	0,15	2,26 (1,95)	2,62 (2,25)	1,68 (1,45)	1,80 (1,55)	1,39 (1,20)	1,57 (1,35)	-	-	2,78 (600)	2,26 (540)
1,8	0,10	1,97 (1,70)	2,20 (1,90)	1,45 (1,25)	1,57 (1,35)	1,05 (0,90)	1,22 (1,05)	-	-	2,42 (575)	2,04 (485)
1,8	0,05	1,45 (1,25)	1,51 (1,30)	0,99 (0,85)	0,99 (0,85)	0,70 (0,60)	0,75 (0,65)	-	-	2,04 (485)	1,89 (450)
2,0	0,10	2,73 (2,35)	2,90 (2,50)	1,74 (1,50)	1,86 (1,60)	1,28 (1,10)	1,39 (1,20)	-	-	2,68 (640)	2,26 (540)
2,0	0,05	2,10 (1,80)	2,14 (1,85)					-	-	2,26 (540)	2,10 (500)

Обозначения, принятые в таблице 5:

$\lambda_{th}, \lambda_{f}$  - теплопроводность соответственно талого и мёрзлого грунта;

$C_{th}, C_f$  - объёмная теплоёмкость соответственно талого и мёрзлого грунта;

$\rho_{th}, \rho_f$  - плотность соответственно талого и мёрзлого грунта в сухом состоянии.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  [Вт/(м\*°С)] характеризует способность материала (породы) проводить тепло, а объёмная  $C_p$  [Дж/(м<sup>3</sup>\*°С)] или удельная (весовая) теплоёмкость  $C$  [Дж/кг\*°С] и коэффициент температуропроводности  $a$  [м<sup>2</sup>/с] - тепловую инерцию и инерцию изменения температурного поля соответственно.

Фактически грунт является аккумулятором тепловой энергии значительной ёмкости. При использовании тепла Земли в процессе теплообмена участвуют её верхние слои, простирающиеся, как правило, на глубину до 100÷150 метров от поверхности. С точки зрения теплообмена эти слои находятся под воздействием лучистой энергии Солнца, радиогенного тепла глубинных слоёв Земли, конвективного теплообмена с атмосферным воздухом и теплопереноса за счёт различных массообменных процессов (дождь, таяние снега, грунтовая вода и т.д.)

В зарубежной литературе существует несколько различных классификаций грунтов. Нас в большей степени интересует классификация грунтов по их теплопроводности. В нижеприведённой таблице 6 используются данные известного американского справочника ASHRAE [4].

При сравнении данных таблиц 5 и 6 видно, что данные американских и российских справочников довольно адекватны. Для точного определения теплопроводности грунтов необходимо проводить экспериментальные исследования теплопроводности в месте предполагаемого строительства.



Таблица 6.

Класс грунта	$\lambda$ , Вт/(м·°С)	Тип грунта
Очень низкая теплопроводность	<1	Лёгкая глина (15% влажность)
Низкая теплопроводность	<1,5	Тяжёлая глина (5% влажность)
Нормальная теплопроводность	<2	Тяжёлая глина (15% влажность) Лёгкий песок (15% влажность)
Высокая теплопроводность	<2,5	Тяжёлый песок (5% влажность)
Очень высокая теплопроводность	>2.5	Тяжёлый песок (15% влажность)

О температуре грунта на различной глубине есть данные из зарубежных источников (смотри рисунок 4). Анализируя эти данные можно сделать вывод, что на глубине более 8 метров температура практически постоянна в течение года (изменения составляют только 1/20 изменений на поверхности).

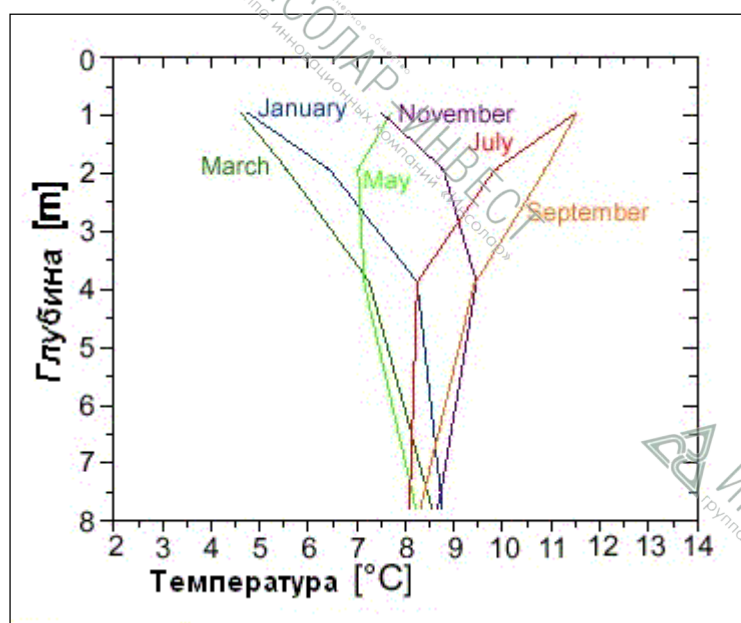


Рисунок 4. Распределение температур грунта по глубине

Справочник ASHRAE [4] предлагает определять температуру грунта по температуре грунтовых вод в данной местности. Если исходить из

температуры грунтовых вод, то для Средней полосы России она колеблется в пределах  $6 \div 8$  °С.

Значение количества радиогенной теплоты составляет (для зоны Центральной Европы) 0,05-0,12 Вт/м<sup>2</sup>. Если оно неизвестно, то обычно принимается 0,1 Вт/м<sup>2</sup>.

### **3.1.2 Данные по площадке строительства**

В настоящем расчёте мы руководствуемся данными по геологическому строению участка, представленными в таблице 2.

В таблице 7 приведены данные по теплопроводности и объёмной теплоёмкости слоёв грунта, составляющих грунтовый массив системы теплосбора, а в таблице 8 - использованные в дальнейших расчётах значения этих параметров (плотности, теплопроводности и теплоёмкости грунта), полученные осреднением (с учётом удельного веса мощности слоя в общей длине термоскважины) данных таблицы 7. Грунтовые воды в расчёте не учитывались, что обеспечивает некоторый запас по реальным характеристикам грунтовой системы по сравнению с расчётными.



Таблица 7.

Номер слоя от поверхности грунта	Мощность слоя, м	Тип и характеристика грунта	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность грунта, Вт/( м*°С)	Удельная теплоёмкость грунта, Дж / (кг*°С)
1	8	Суглинок маловлажный	1400	0,7	1914
2	12	Песчаник с прослойками глины, маловлажный	2100	1,8	1276
3	62	Песчаник с прослойками глины, влажный до водонасыщенного	1950	1,7	1374
4	5	Глина с включениями брахиопод	2000	1,6	1340
5	68	Песчаник с прослойками глины, влажный до водонасыщенного	2200	1,9	1218
6	6	Известняк	2720	2,3	1200
7	5	Мергель	2400	1,55	1117
8	4	Известняк	2730	1,67	1340
9	4	Глина	2260	1,63	1186
10	6	Известняк	2780	2,2	1380
11	8	Доломит	2840	3,1	1520
12	11	Известняк	2780	2,1	1370
13	21	Доломит	2840	3,1	1590

Здесь данные по плотности, теплопроводности и удельной теплоёмкости грунтов взяты из [8].

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность грунта, Вт/(м*°С)	Удельная теплоёмкость грунта, Дж / (кг*°С)
2249	1,958	1351

### 3.2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМОСКВАЖИН НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СБРОСА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ГРУНТ

При оценке влияния конструктивных особенностей термоскважин на интенсивность сброса тепловой энергии в грунт исследовались четыре конструкции одиночной термоскважины, представленные на рисунке 5. Для оценки влияния конструкции грунтовых теплообменников на их эффективность, а также и для оценки теплового взаимодействия грунтовых теплообменников в процессе эксплуатации рассматривается вертикальное их размещение.

Вариант 1. Коаксиальная конструкция, полиэтиленовая наружная труба.

Вариант 2. Коаксиальная конструкция, стальная наружная труба.

Вариант 3. Одинарная U-образная. Труба - полиэтилен низкого давления. 151 - диаметр бурения. Обратное заполнение - буровым раствором (тем же грунтом). 109 - предположительный размер.

Вариант 4. Двойная U-образная. Труба - полиэтилен низкого давления. 151 - диаметр бурения. Обратное заполнение - буровым раствором (тем же грунтом). 109 - предположительный размер.

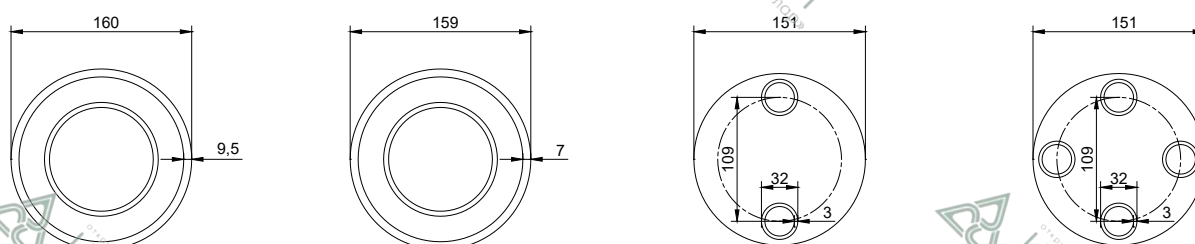


Рисунок 5. Исследуемые конструкции термоскважин

Численные эксперименты по оценке влияния конструктивных особенностей термоскважин на интенсивность извлечения тепловой энергии из грунта проводились на моделях и программном обеспечении, разработанном и принадлежащем ГК «ИНСОЛАР».

Результаты расчётов представлены на рисунках 6÷13. Расчёты проводились для температуры грунта 8 °С и средней температуры теплоносителя, принятой равной 30 °С. Расчёт выполнялся с прогнозным периодом в 180 дней. К этому времени удельное значение теплового потока от грунтового теплообменника к грунту достигает некоего, отличного от стартового, значения, которое впоследствии меняется незначительно.

Знак «минус» на рисунках 10÷13 говорит о сбросе тепла в грунт.

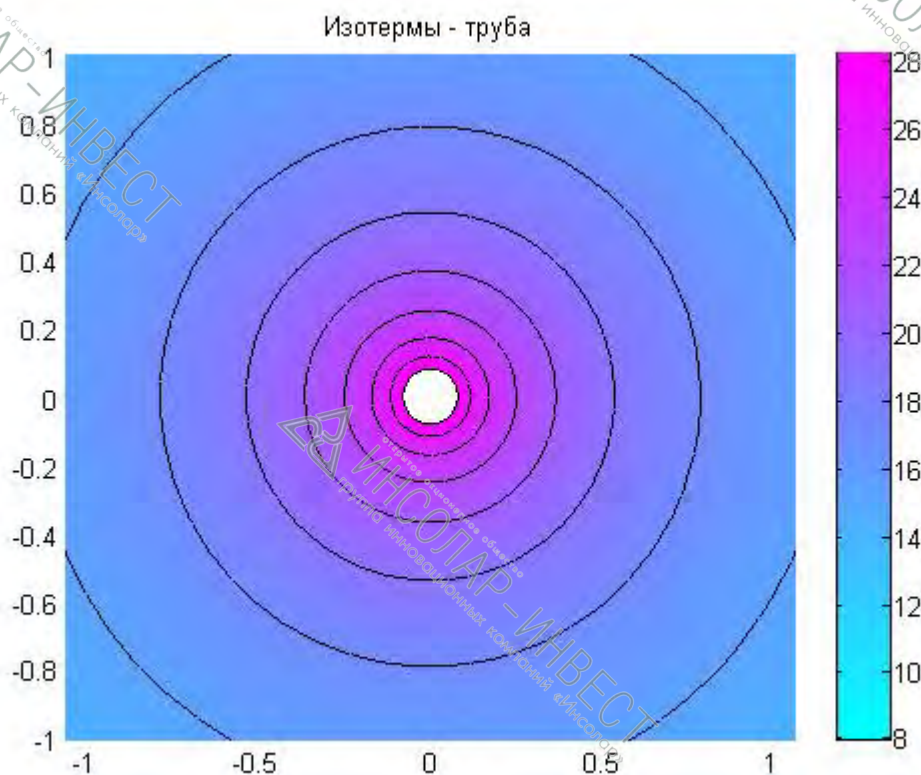


Рисунок 6. Температурное поле в грунте при эксплуатации коаксиальной полиэтиленовой термоскважины

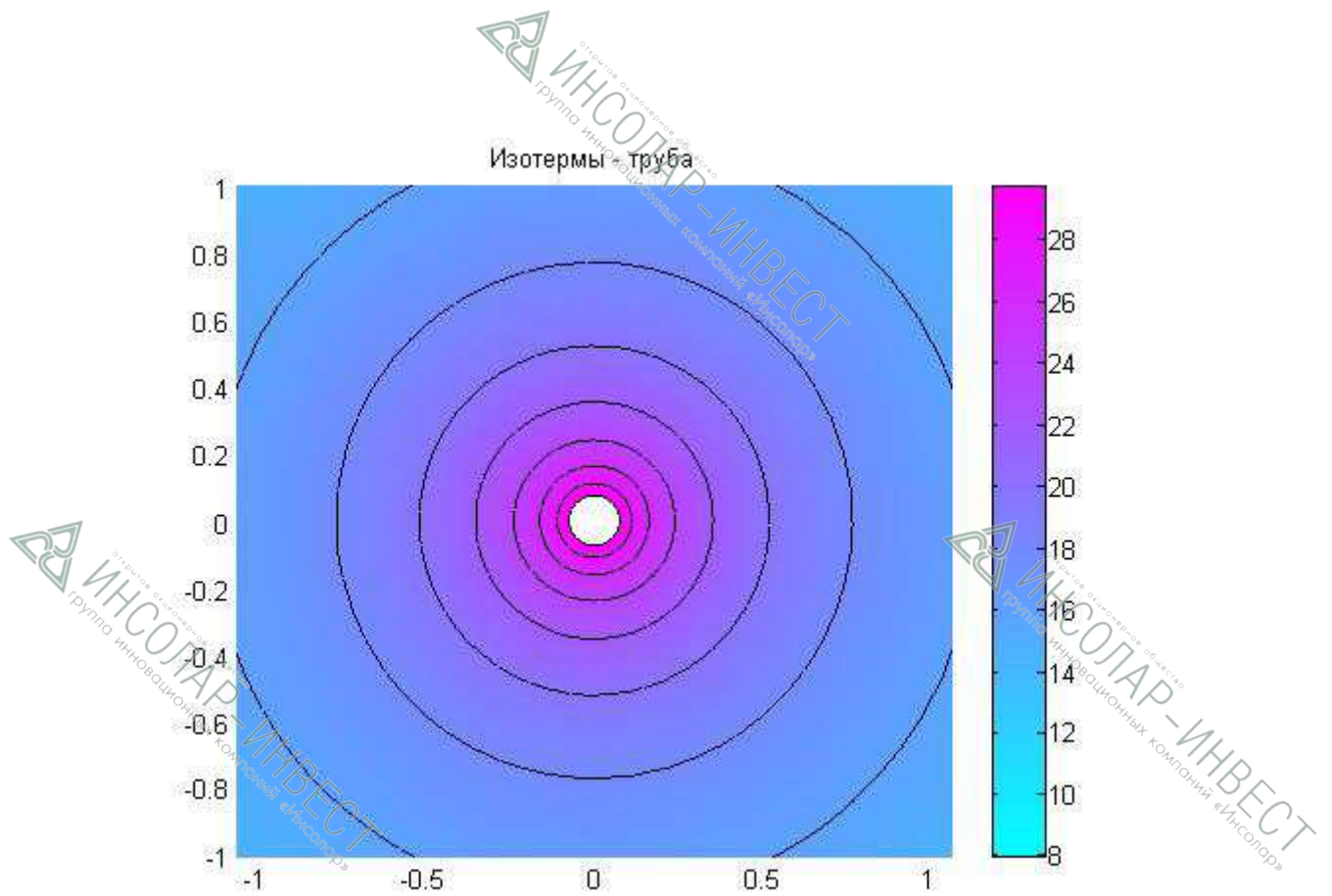


Рисунок 7. Температурное поле в грунте при эксплуатации коаксиальной стальной термоскважины

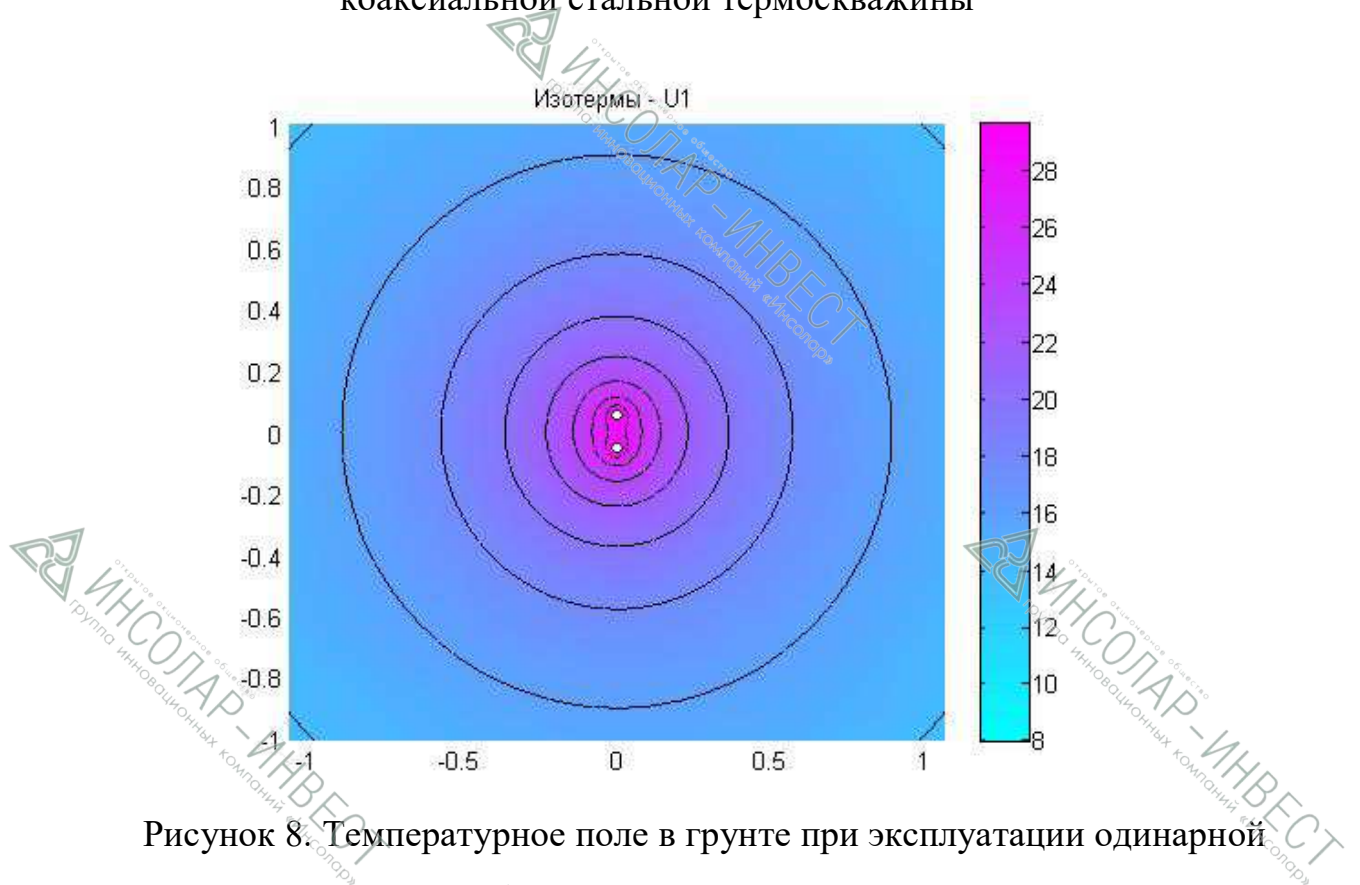


Рисунок 8. Температурное поле в грунте при эксплуатации одинарной U-образной термоскважины



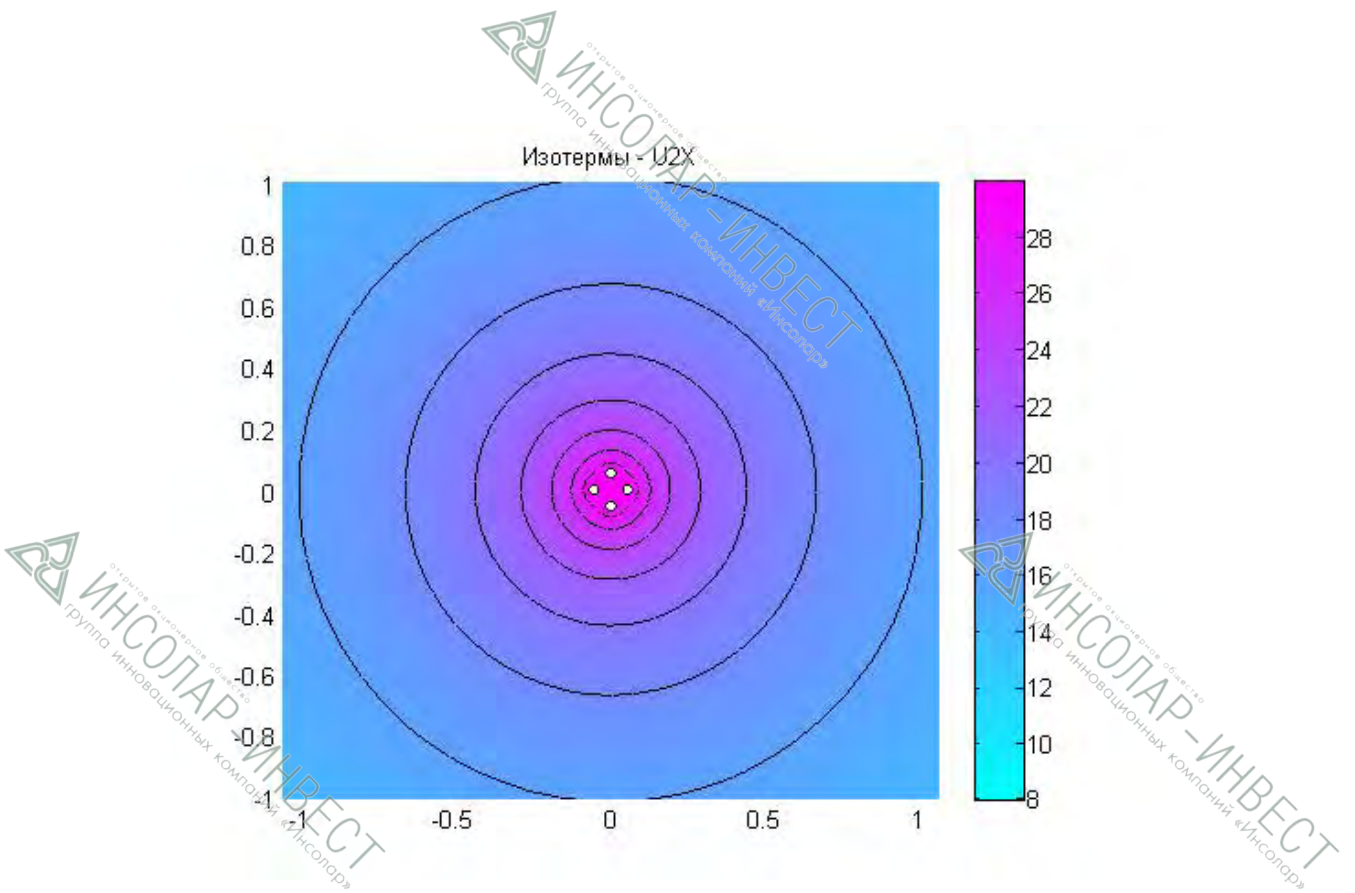


Рисунок 9. Температурное поле в грунте при эксплуатации двойной U-образной термоскважины

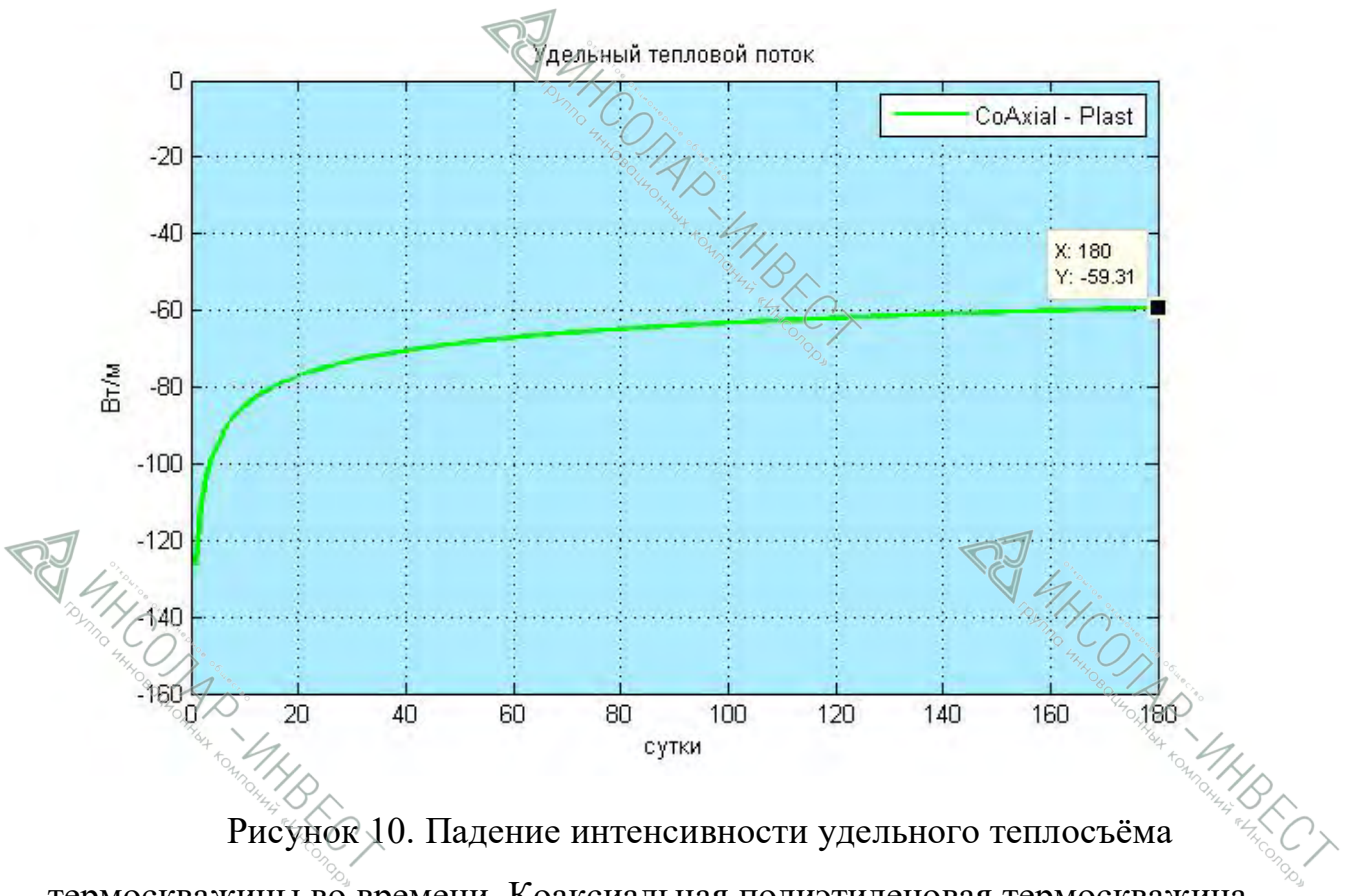


Рисунок 10. Падение интенсивности удельного теплосъема

термоскважины во времени. Коаксиальная полиэтиленовая термоскважина.

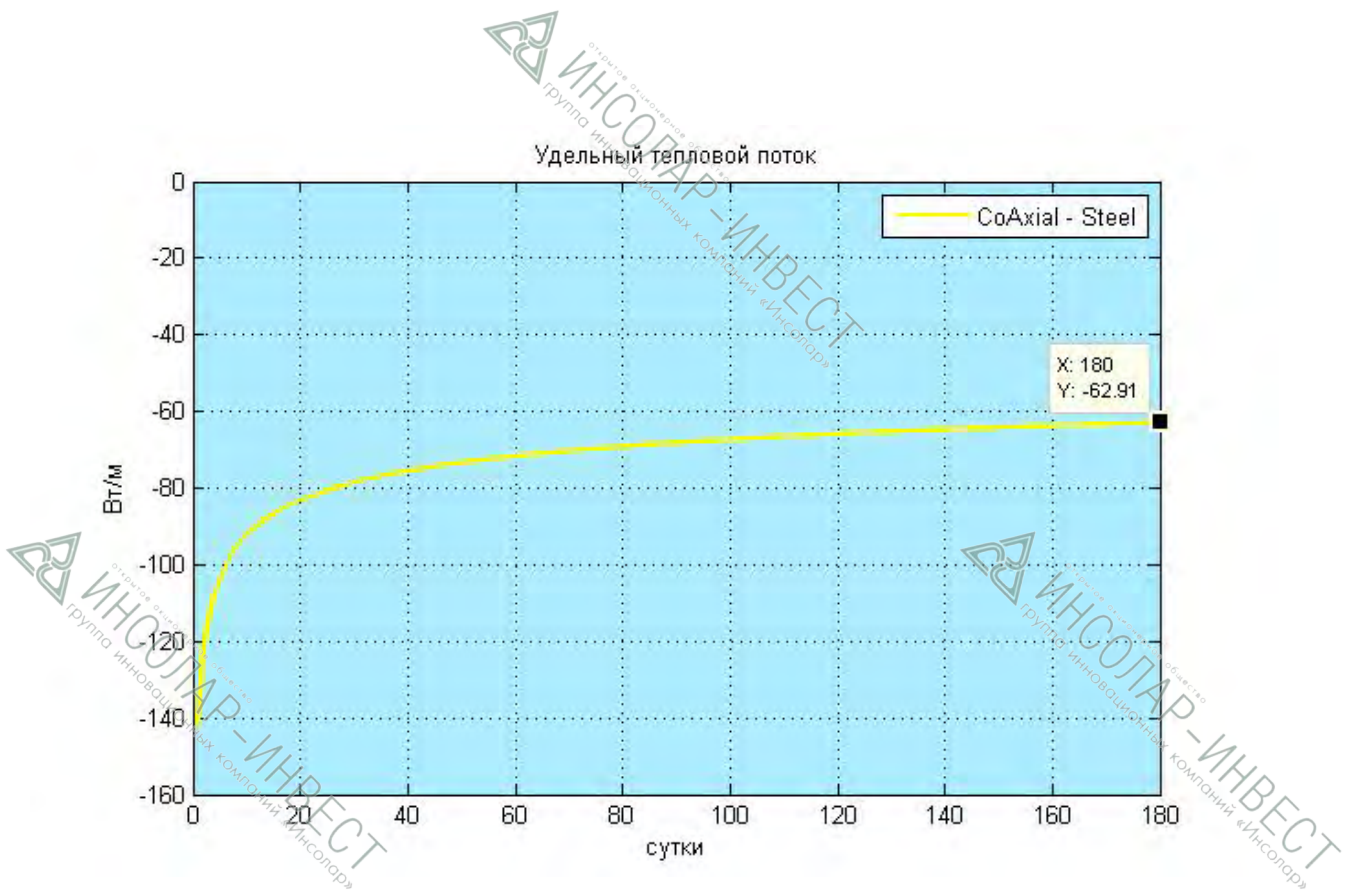


Рисунок 11. Падение интенсивности удельного теплосъёма термоскважины во времени. Коаксиальная стальная термоскважина.

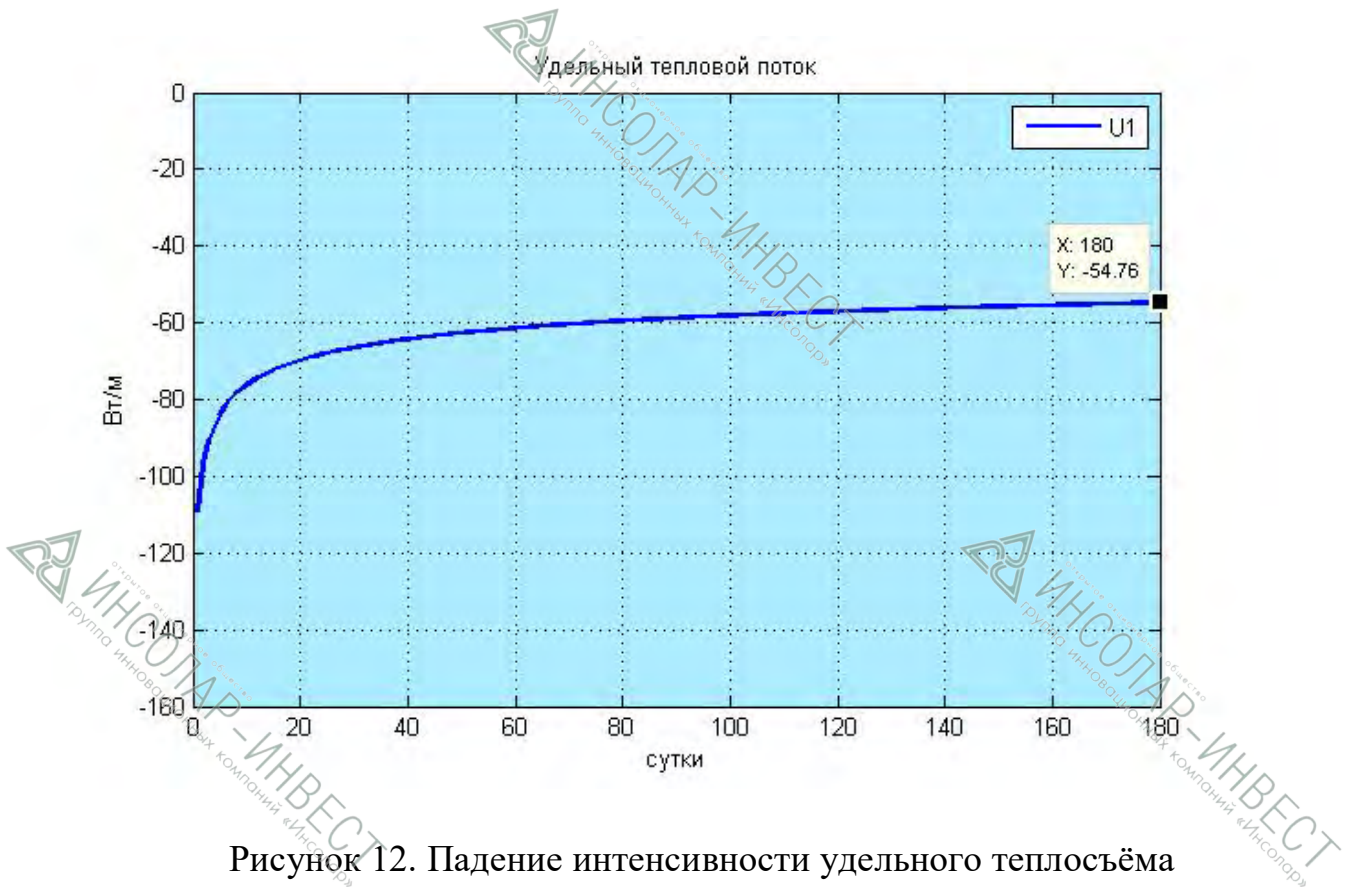


Рисунок 12. Падение интенсивности удельного теплосъёма термоскважины во времени. Одинарная U-образная термоскважина.

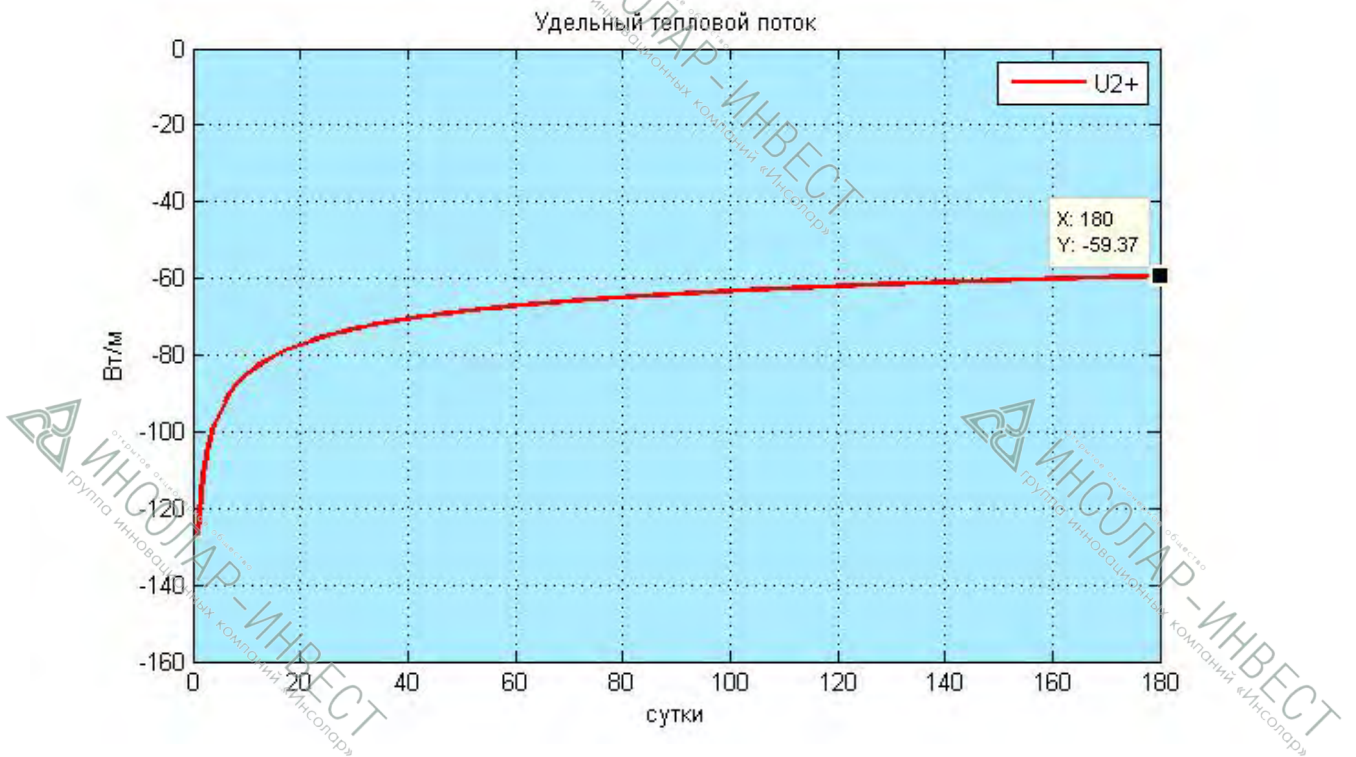


Рисунок 13. Падение интенсивности удельного теплосъёма термоскважины во времени. Двойная U-образная термоскважина.

Результаты расчётов, представленные на графиках, показывают, что на 180 сутки интенсивность удельного теплосъёма распределяется следующим образом:

1. Коаксиальная стальная термоскважина (62,91 Вт/м);
2. Двойная U-образная (59,37 Вт/м);
3. Коаксиальная полиэтиленовая термоскважина (59,31 Вт/м);
4. Одинарная U-образная термоскважина (54,76 Вт/м).

Стоит отметить, что применение стальных коаксиальных конструкций термоскважин является наиболее оправданным в случае работы грунта на извлечение тепла в условиях отрицательных температур. В нашем же случае мы работаем на сброс тепла в грунт, и поэтому грунтовый массив будет иметь всегда положительный уровень температур. Кроме того, стоимость



материалов для коаксиальной стальной термоскважины оказывается почти в 10 раз выше, чем для двойной U-образной при сопоставимых стоимостях проведения буровых работ. Также следует принять во внимание, что коаксиальные варианты в силу своих конструктивных особенностей имеют значительное количество соединений, поскольку изготавливаются, как правило, из отрезков труб длиной не более 6 м (особенно это применимо к стальным коаксиальным грунтовым теплообменникам), в то время как U-образные конструкции изготавливаются из цельных труб и имеют соединения только у оконечника. Это делает конструкцию U-образных грунтовых теплообменников более надёжной. Учитывая также, что для коаксиальных термоскважин требуется больший объём теплоносителя, применение такой конструкции на рассматриваемом объекте признаётся нецелесообразным. К дальнейшему рассмотрению рекомендуются грунтовые теплообменники U-образной конструкции.

Сравнивая конструкции U-образных грунтовых теплообменников с точки зрения их эффективности, можно сделать вывод, что при использовании конструкций двойного типа количество термоскважин может быть уменьшено на 8%, что приведёт к пропорциональному уменьшению затрат на бурение и на сокращению площади земельного участка, отводимого под размещение поля термоскважин, но при этом стоимость материалов грунтовых теплообменников будет почти в два раза выше.

Предварительные оценки стоимости показывают, что разница в затратах на организацию поля грунтовых теплообменников двух рассматриваемых типов составит менее 2%, что представляется незначительным. Напротив, задача сокращения площади землеотвода является весьма актуальной, поэтому для дальнейшего рассмотрения принимаются грунтовые теплообменники двойной U-образной конструкции.



как наиболее эффективные и требующие меньшего по площади земельного участка.

### 3.3 ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В ПРЕДЕЛАХ ПОЛЯ ТЕРМОСКВАЖИН

При оценке совместной работы грунтовых теплообменников, рассматривалось поле 20 на 20 термоскважин, выполненных по варианту 4 (смотри рисунок 5) с шагом между термоскважинами, равным 8 м.

Численные эксперименты по оценке совместной работы термоскважин в поле системы теплосбора многофункционального здания проводились на моделях и программном обеспечении, разработанном и принадлежащем ГК «ИНСОЛАР».

Произведём расчёт изменения удельного теплового потока в грунт в течение 5 лет эксплуатации грунтовой системы в режиме постоянного сброса тепла. Поскольку задача симметричная по обеим осям, расчёт проводился для четверти поля грунтовой системы. Результаты расчёта представлены на рисунках 14 и 15.

На рисунке 14 представлена картина распределения температур в поле термоскважин на конец рассматриваемого сезона.

На рисунке 15 параметр  $k$  – показатель эффективности термоскважины, равный отношению величин удельных тепловых потоков рассматриваемой термоскважины к одиночной термоскважине такой же конструкции;

$k_{avr}$ ,  $k_{min}$ ,  $k_{max}$  - соответственно осреднённый, минимальный и максимальный показатель эффективности термоскважин по полю термоскважин.

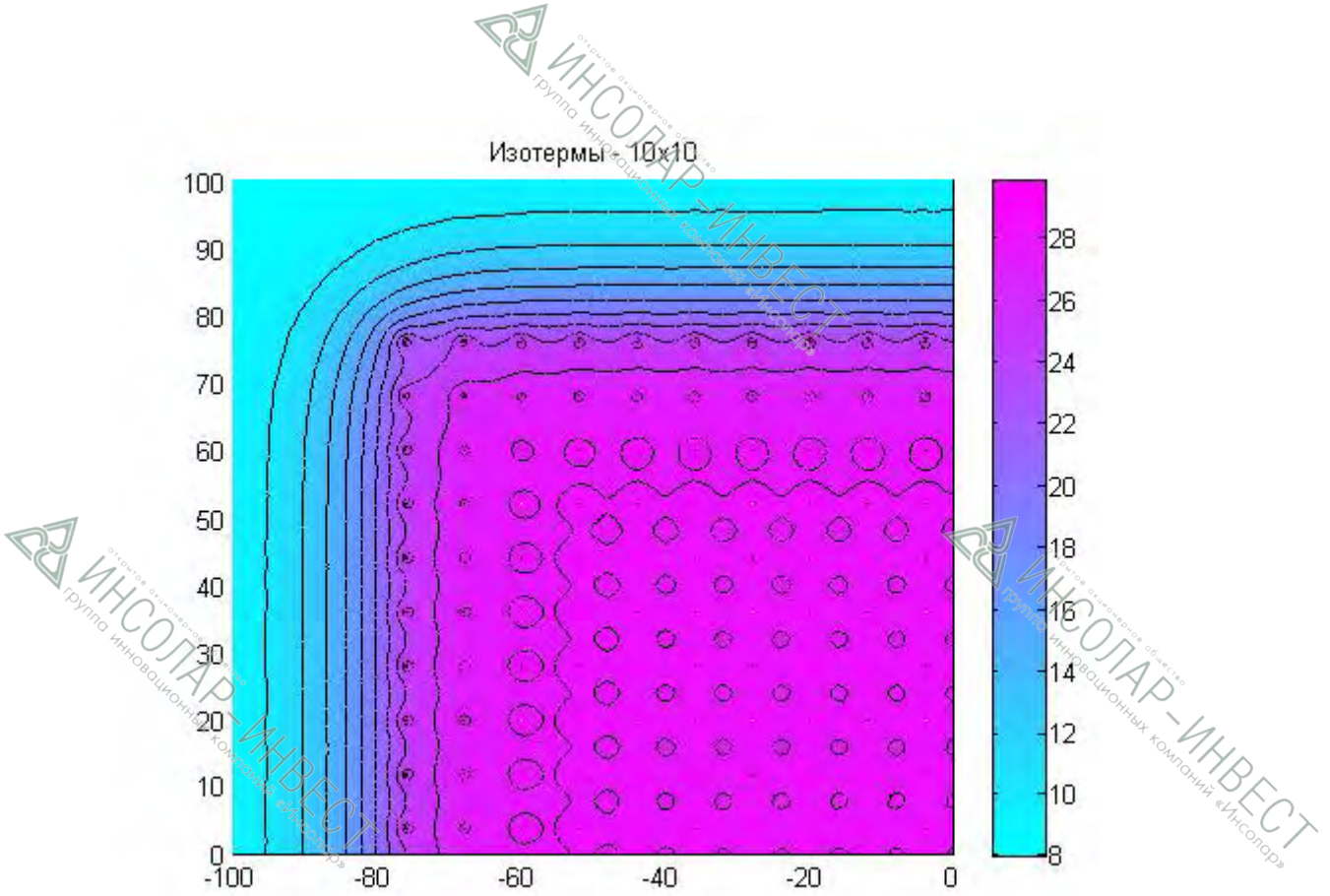


Рисунок 14. Температурное поле в грунте при эксплуатации термоскважин в течение 5 лет.

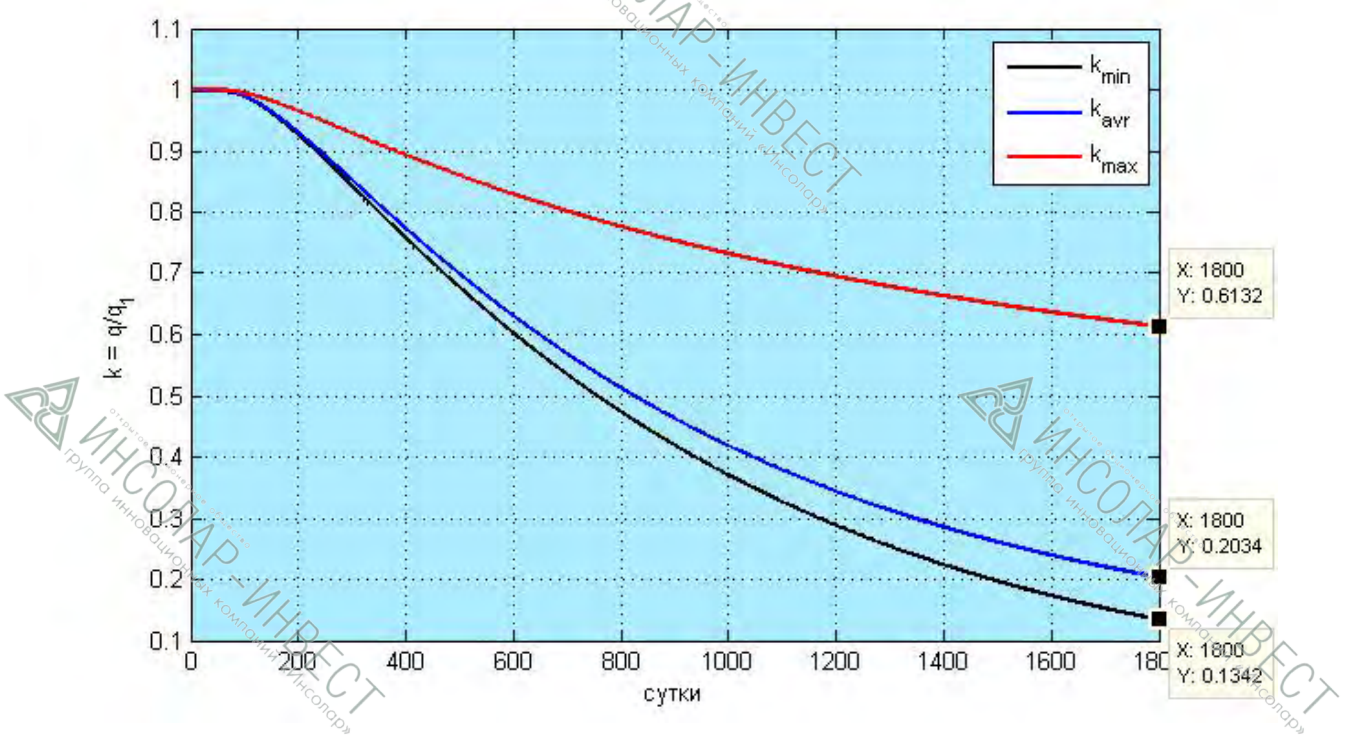


Рисунок 15. Изменение показателя эффективности k во времени.

Из графика хорошо видно, что при непрерывном сбросе тепла к концу 5-го года способность грунта ассимилировать тепло снижается в среднем по полю скважин в 5 раз ( $k_{avr}=0,2034$ ) по сравнению с показателями начала периода эксплуатации. При большем размере поля показатель  $k_{avr}$  будет стремиться к значению  $k_{min}$ , то есть эффективность будет снижаться ещё значительнее. Дело в том, что при постоянном сбросе энергии в грунт при отсутствии его последующего извлечения (да ещё и в условиях жёстко ограниченного размера земельного участка, а значит и объёма используемого грунтового массива) со временем происходит прогрев грунта и грунтовых вод до температур, близких к температурам теплоносителя, подлежащего охлаждению, и дальнейший сброс тепла становится просто невозможным. Этот факт хорошо иллюстрирует рисунок 14, показывающий поле температур в грунте по прошествии 5 лет работы системы. На рисунке хорошо видно, что грунт в пределах поля термоскважин имеет температуру, близкую к  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в то время как начальная его температура была равна  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом очевидно, что решение, предусматривающее только сброс тепла в грунт в течение всего года без последующего его извлечения, не обеспечивает решения поставленной задачи по охлаждению технологического оборудования в длительной перспективе.

Поскольку на рассматриваемом производстве и вблизи площадки размещения поля грунтовых теплообменников отсутствуют потребители тепла значительной мощности, а к таковым могли бы быть отнесены собственные технологические нужды производственных объектов, расположенных поблизости, отопительные нагрузки и разного рода зданий и сооружений (при помощи тепловых насосов), подогрев дорог с целью удаления снега и борьбы с обледенением, обогрев теплиц и т.д., существует единственная доступная и надёжная возможность сбрасывать тепло сбрасывать его в окружающий воздух. Действительно, требуемый уровень температур теплоносителя таков, что, учитывая климатические



характеристики региона, окружающий воздух не сможет охладить его до требуемых 23 °С только в летний период, в то время как большую часть времени воздушное охлаждение вполне способно обеспечивать технологические требования.

Таким образом, система вполне может быть организована следующим образом: при температурах наружного воздуха ниже определённого значения, скажем, 0 °С, система обеспечивает сброс тепла в окружающий воздух, а при более высоких температурах сброс производится в скважины. При этом продолжительность периода сброса тепла в грунт не превысит полугода. Исходя из этого, произведём расчёт степени взаимовлияния грунтовых теплообменников в пределах поля термоскважин за указанный период времени. Расчёт произведём для разных вариантов шага размещения термоскважин: 6, 8, 10 м.

На рисунках 16÷18 показаны картины распределения температур в поле термоскважин на конец отопительного сезона для всех трёх вариантов расстояния между термоскважинами, равным 6, 8 и 10 м.

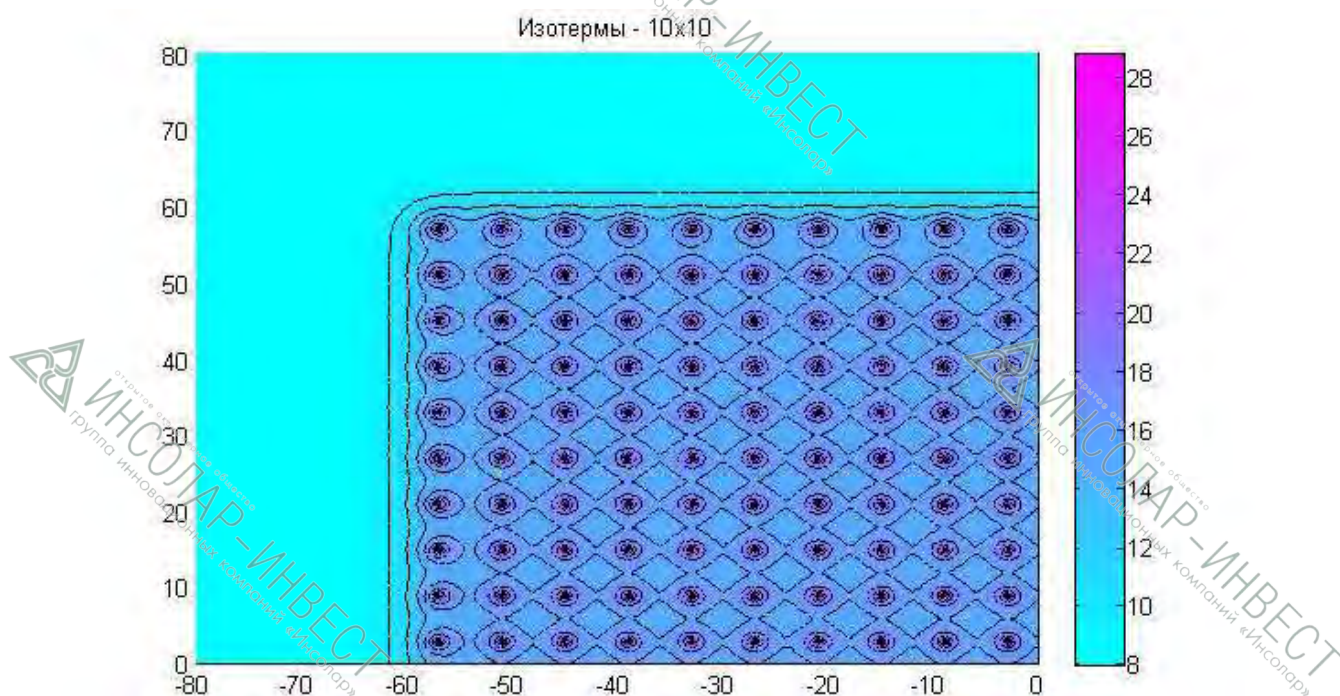


Рисунок 16. Распределение температур в поле термоскважин. Шаг 6 м.

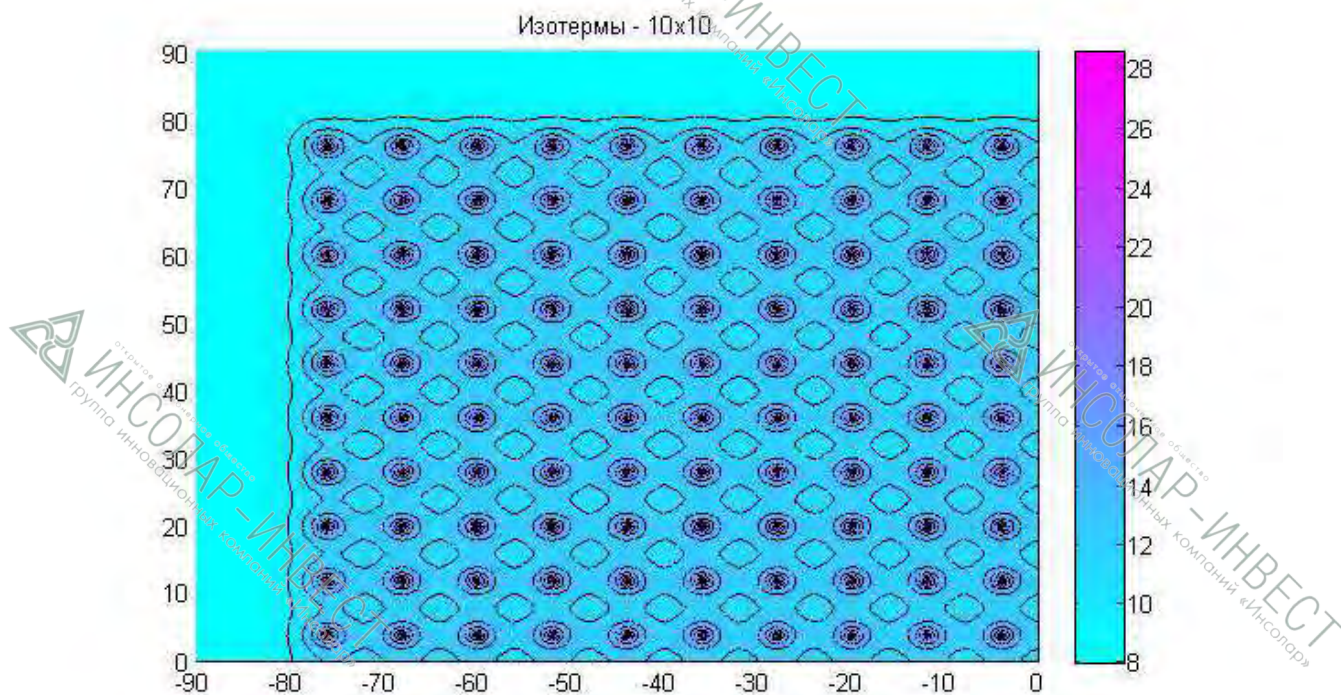


Рисунок 17. Распределение температур в поле термоскважин. Шаг 8 м.

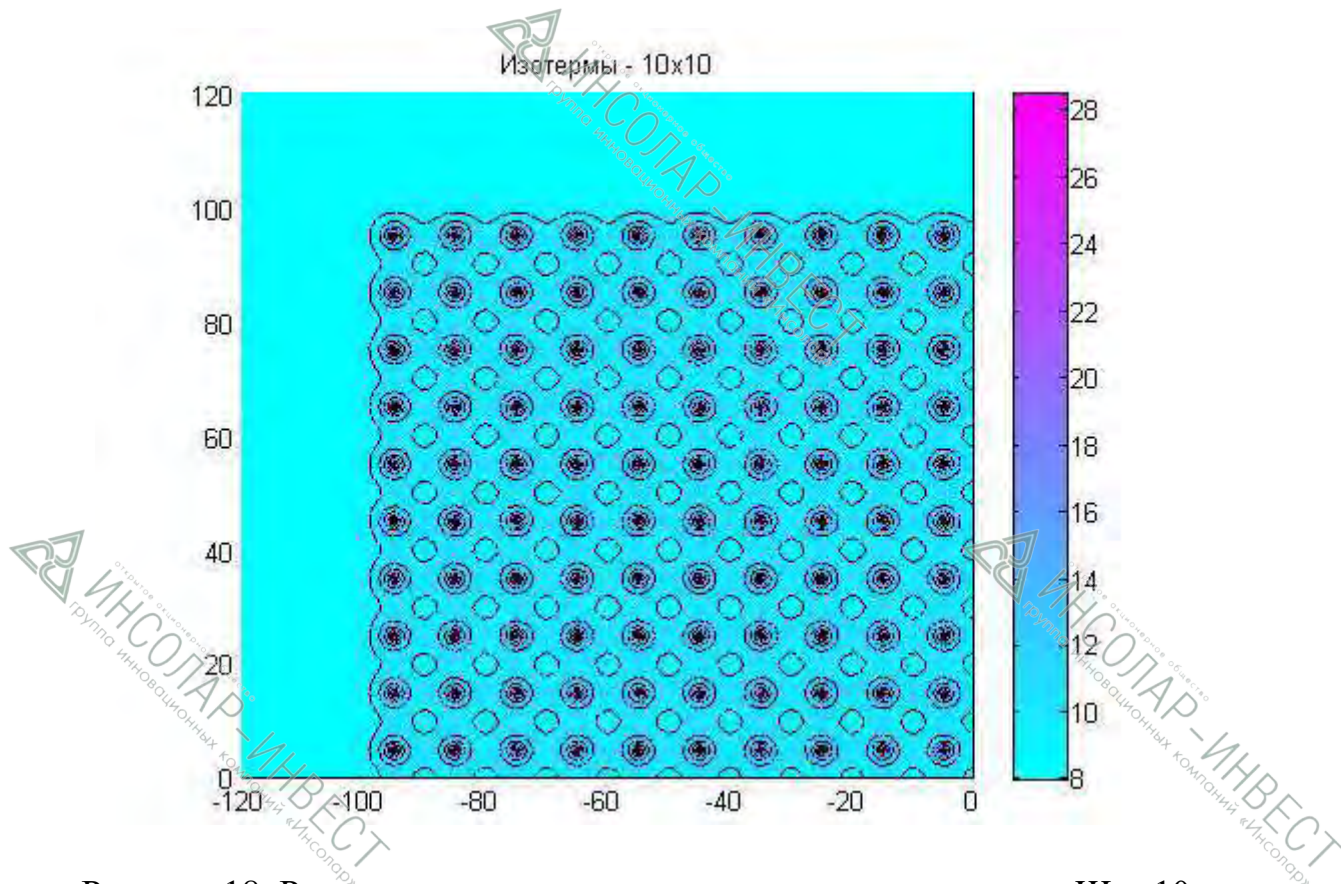


Рисунок 18. Распределение температур в поле термоскважин. Шаг 10 м.



На рисунках 19÷21 представлены графики изменения удельного теплосъёма с погонного метра грунтового теплообменника для трёх указанных вариантов шага.

Здесь чёрной линией показан график, относящийся к одиночной термоскважине (эталону), а цветными линиями – термоскважины в составе поля, причём первый номер в комментарии к графику соответствует месту термоскважины в горизонтальном ряду, а второй - в вертикальном столбце. Так, скважина с номером (1,1) расположена в углу поля, а скважина с номером (10,10) – в центре поля.

На всех приведённых ниже графиках (рисунки 19÷21) кривые, соответствующие координатам скважин (3,3), (5,5), (7,7), (10,10) совпали.

Знак «минус» означает сброс тепла в грунт.

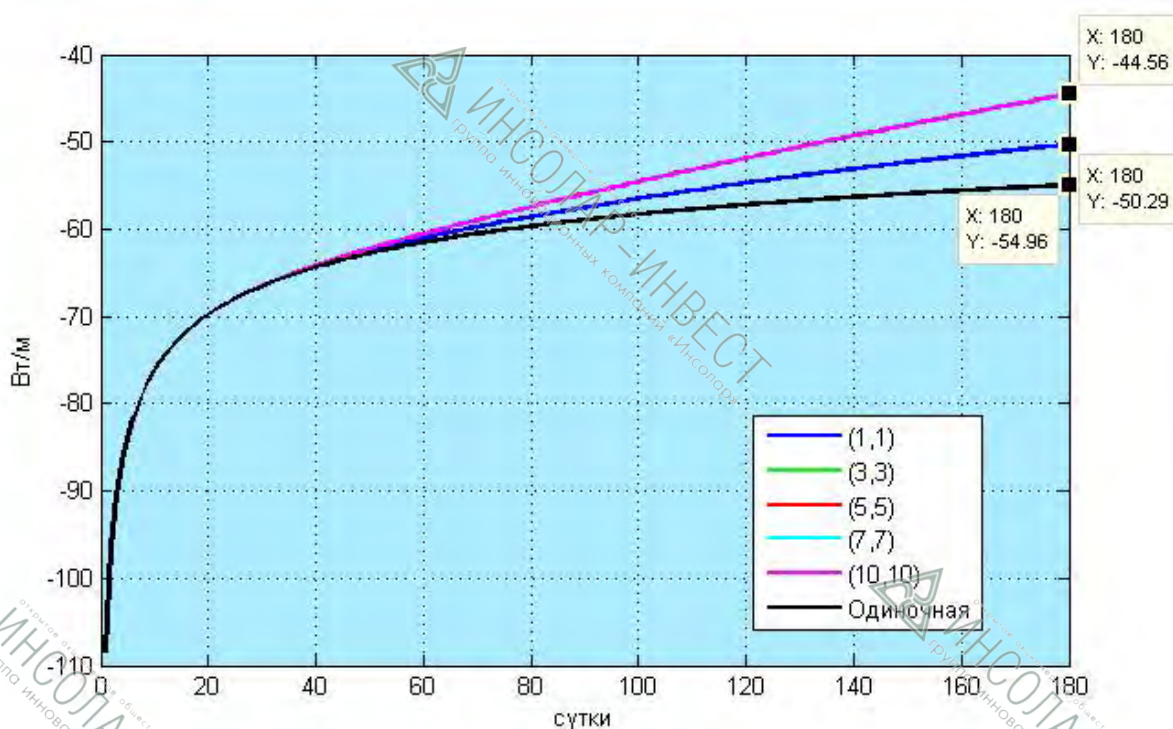


Рисунок 19. Изменение удельного теплосъёма во времени. Шаг 6 м.

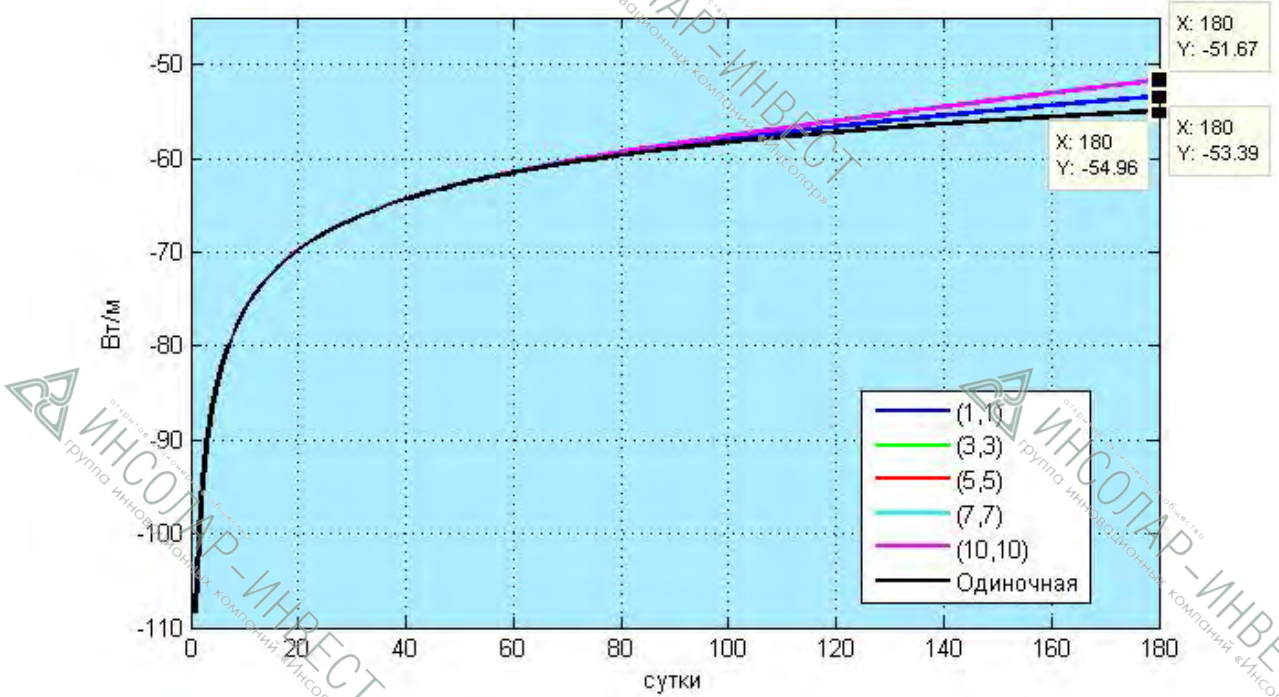


Рисунок 20. Изменение удельного теплосъёма во времени. Шаг 8 м.

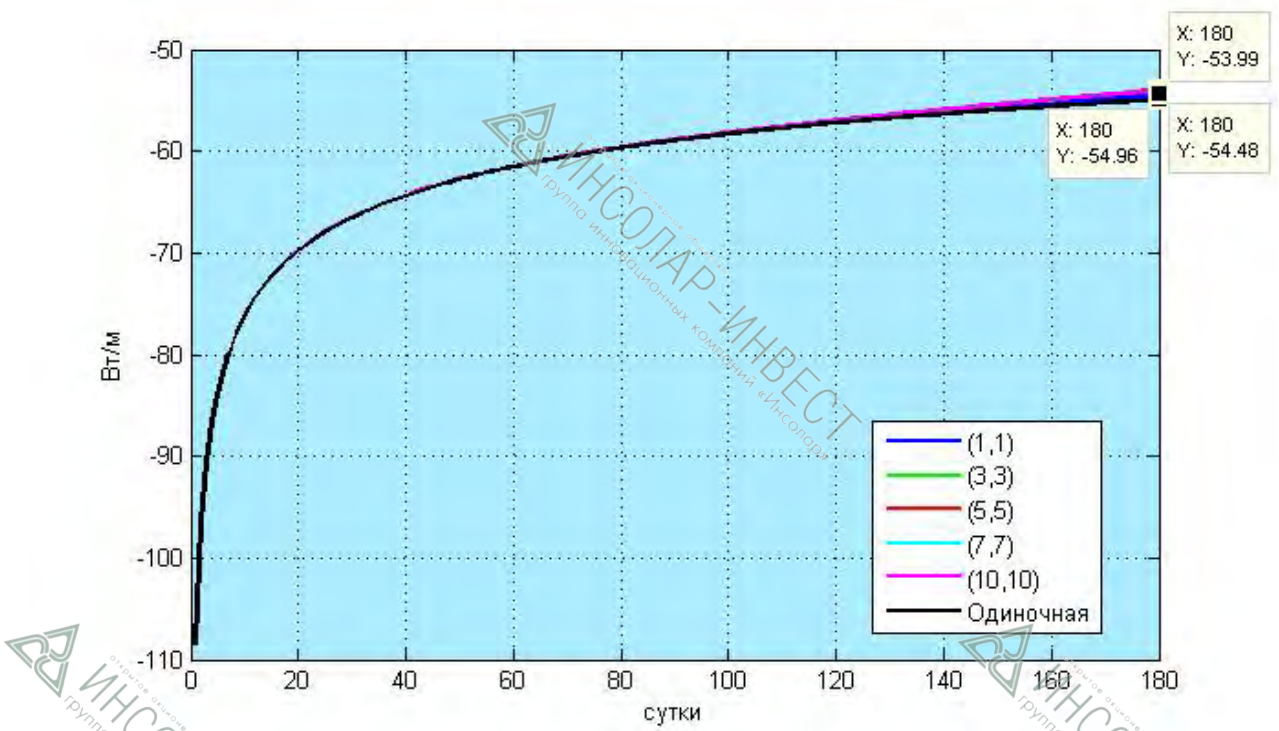


Рисунок 21. Изменение удельного теплосъёма во времени. Шаг 10 м.

На рисунках 22÷24 параметр  $k$  – показатель эффективности термоскважины, описанный выше.

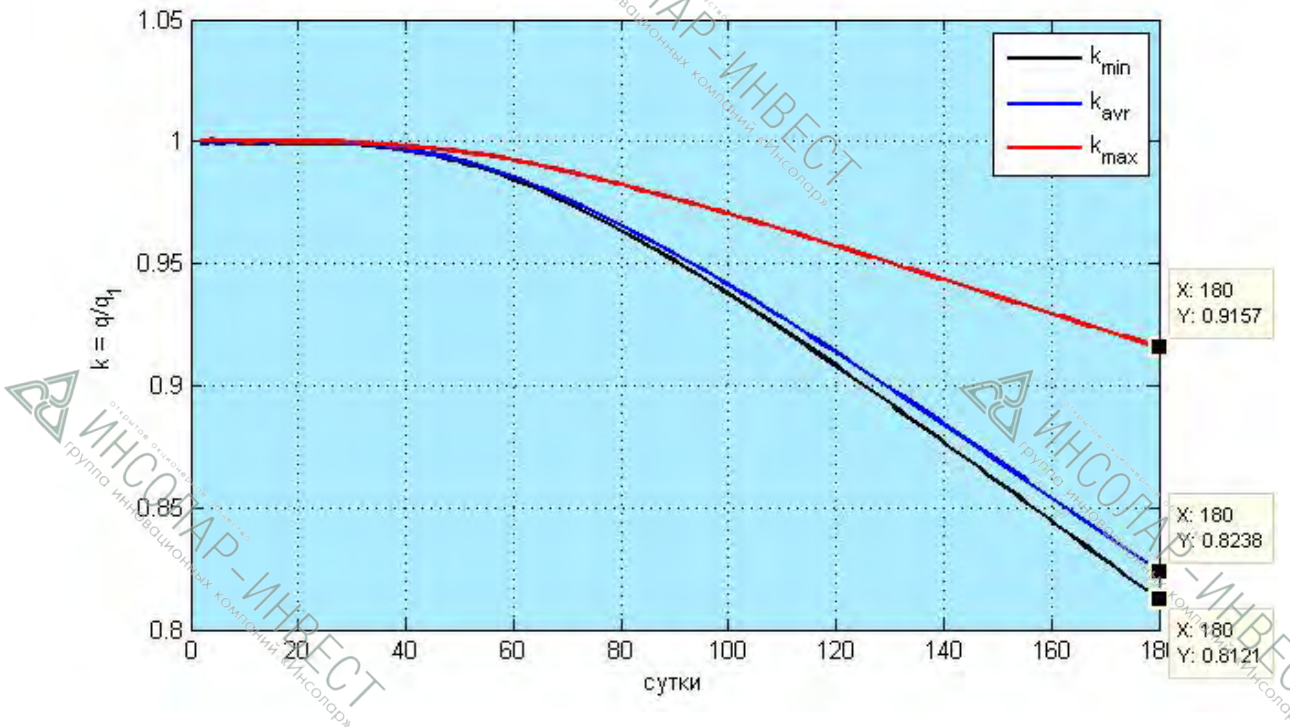


Рисунок 22. Относительное снижение величины удельного теплосъёма во времени. Шаг 6 м.

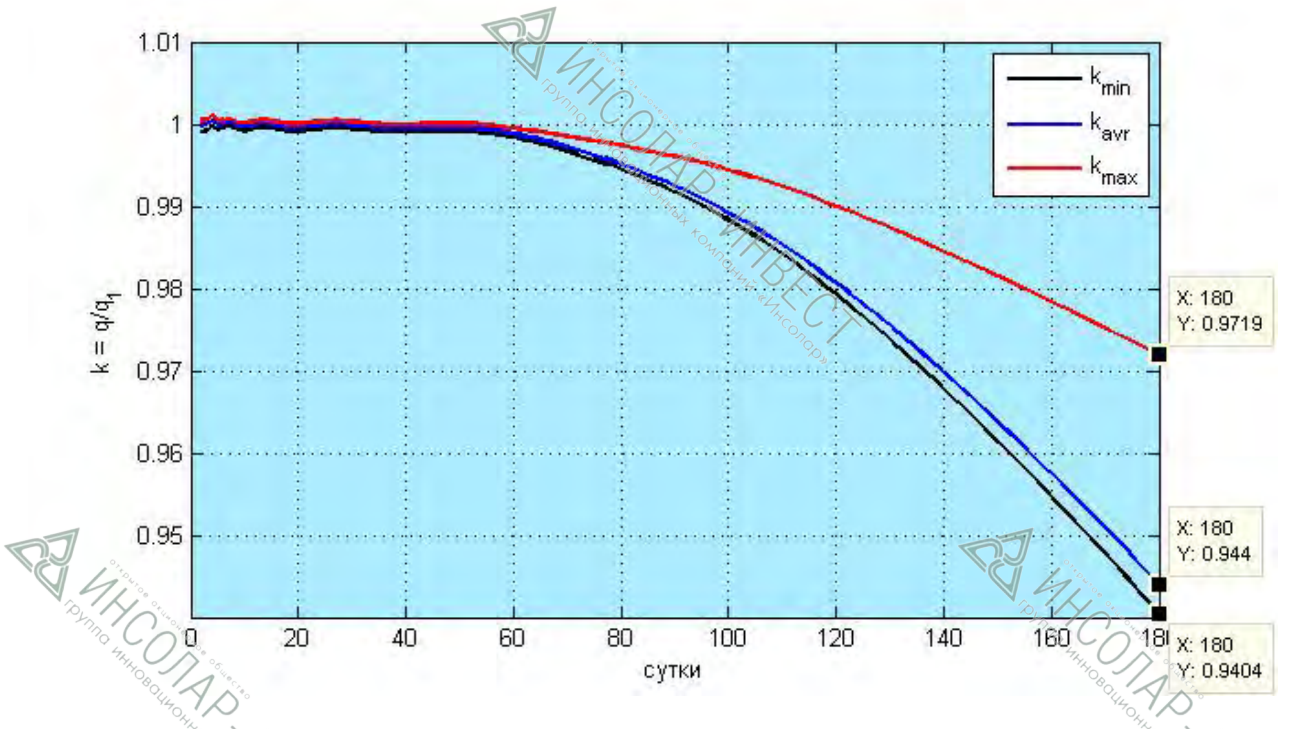


Рисунок 23. Относительное снижение величины удельного теплосъёма во времени. Шаг 8 м.



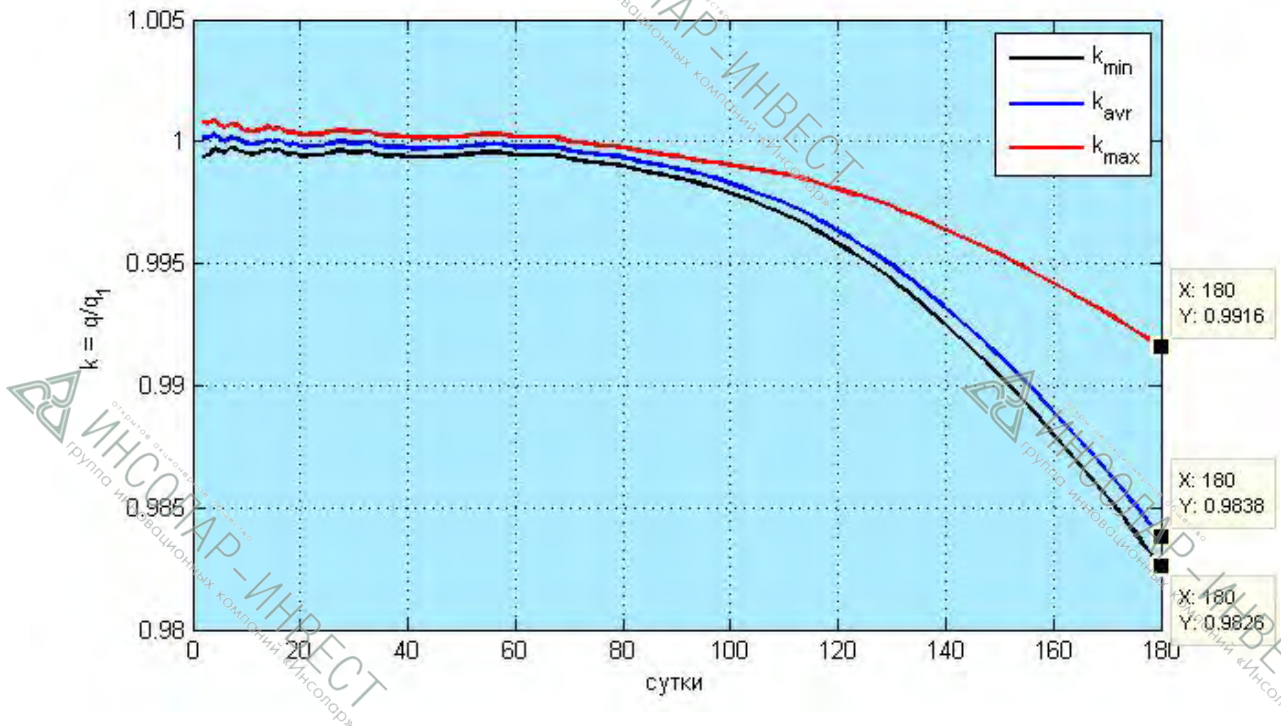


Рисунок 24. Относительное снижение величины удельного теплосъёма во времени. Шаг 10 м.

Численно степень снижения эффективности для рассмотренных вариантов размещения грунтовых теплообменников оказалась следующей (для центральных грунтовых теплообменников):

шаг 6 м: 18,8%;

шаг 8 м: 6,0%;

шаг 10 м: 1,7%.

Таким образом видно, что за период в 6 месяцев степень снижения эффективности для разных вариантов размещения грунтовых теплообменников меняется от несущественных 1,7% при шаге 10 м и до весьма заметных 18,8% при шаге 6 м. Очевидно, что работоспособность системы сохраняется даже при худшем варианте, то есть при самом плотном размещении термоскважин, однако при расчёте параметров грунтовых теплообменников, входящих в группу, следует использовать поправочный

коэффициент, учитывающий взаимное тепловое влияние грунтовых теплообменников в пределах группы. Для расположения грунтовых теплообменников с шагом 8 м этот коэффициент следует принимать не ниже, чем 1,06, а при шаге в 6 м – не ниже, чем 1,2.

### **3.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТЕРМОСКВАЖИН**

Для уточнения требуемого количества термоскважин проведём повторный расчёт данных, представленных в таблице 4, но уже с использованием определённых в предыдущем параграфе поправочных коэффициентов для вариантов размещения грунтовых теплообменников с шагом 6, 8 и 10 м.

Вычисления проводились для периода протяжённостью в 7 лет при неизменных величинах нагрузок на грунтовую систему.

Моделирование осуществляется с помощью разработанного в ГК «ИНСОЛАР» программного комплекса «HEATPUMP».

#### **3.4.1 Ограничения**

При проведении расчётов были приняты следующие ограничения:

- Температура подаваемой в грунт воды 36 °С;
- Температура возвращаемой из грунта воды не выше 23 °С;
- Расход теплоносителя (воды) 460 м<sup>3</sup>/ч.

#### **3.4.2 Расчётные нагрузки и результаты расчётов**

При моделировании теплового режима термоскважин расчёты проводятся для одной термоскважины, к которой, соответственно, приводятся все нагрузки.

Воздушное охлаждение рассчитывается на температуру наружного

воздуха 0 °С. При этом в периоды с более низкой температурой наружного воздуха будут образовываться избытки холодильной мощности, которые можно направлять на регенерацию холодоресурса грунта.

Нагрузки на одну термоскважину, пересчитанные с учётом климатических данных и поправочных коэффициентов, для вариантов размещения грунтовых теплообменников с шагом 6, 8 и 10 м представлены в таблицах 9, 10 и 11 соответственно. Здесь, как и выше, знак «минус» соответствует сбросу тепла в грунт.

Таблица 9.

<b>Нагрузка на одну термоскважину по месяцам (при шаге 6 м), кВт</b>											
<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>	<b>IX</b>	<b>X</b>	<b>XI</b>	<b>XII</b>
5,11	4,85	2,43	-6,51	-13,02	-13,02	-13,02	-13,02	-13,02	-6,51	1,62	4,08

Таблица 10.

<b>Нагрузка на одну термоскважину по месяцам (при шаге 8 м), кВт</b>											
<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>	<b>IX</b>	<b>X</b>	<b>XI</b>	<b>XII</b>
5,86	5,56	2,78	-6,59	-13,17	-13,17	-13,17	-13,17	-13,17	-6,59	1,85	4,68

Таблица 11.

<b>Нагрузка на одну термоскважину по месяцам (при шаге 10 м), кВт</b>											
<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>VI</b>	<b>VII</b>	<b>VIII</b>	<b>IX</b>	<b>X</b>	<b>XI</b>	<b>XII</b>
6,09	5,79	2,89	-6,59	-13,19	-13,19	-13,19	-13,19	-13,19	-6,59	1,93	4,86

Результаты расчётов в графическом виде представлены на рисунках 25÷39.



Рисунок 25. Нагрузки на термоскважину по месяцам. Шаг 6 м.

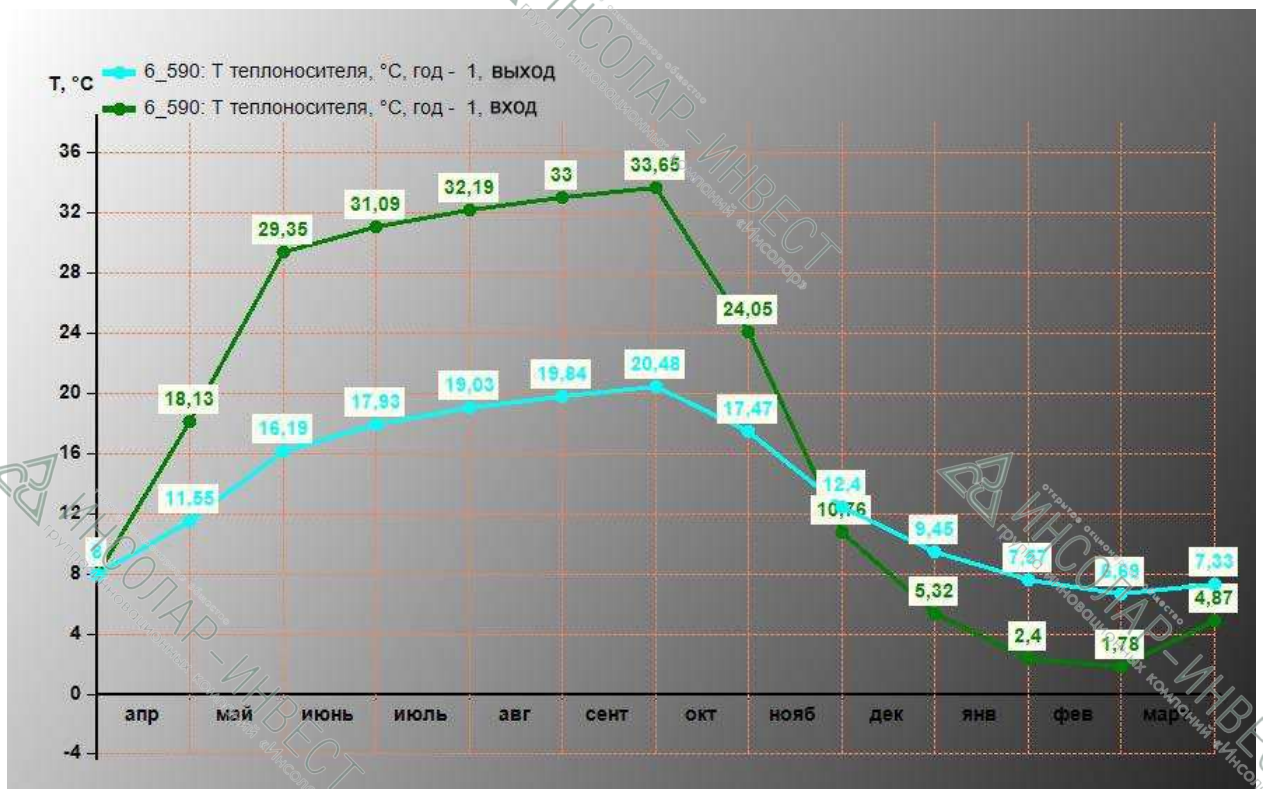


Рисунок 26. Температура теплоносителя. 1 год эксплуатации. Шаг 6 м.



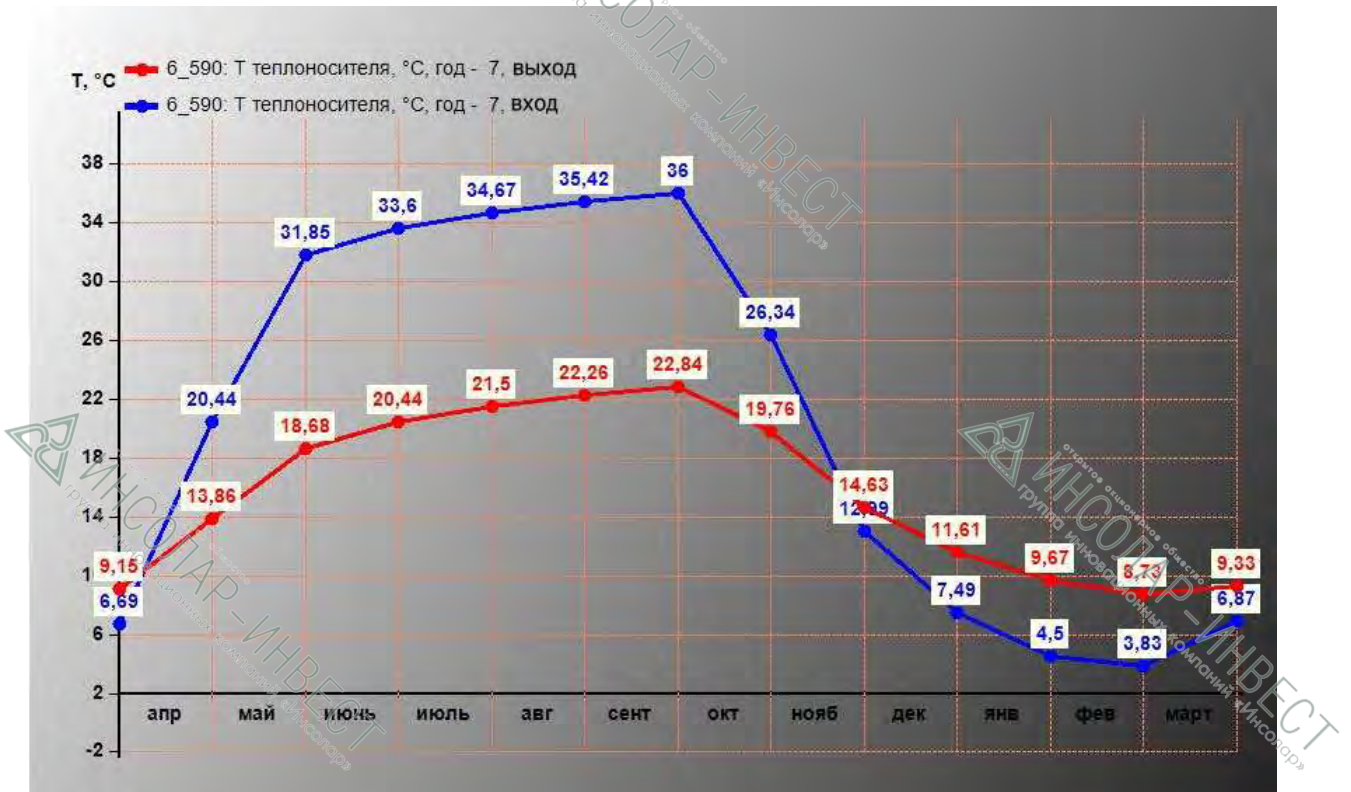


Рисунок 27. Температура теплоносителя. 7 год эксплуатации. Шаг 6 м.

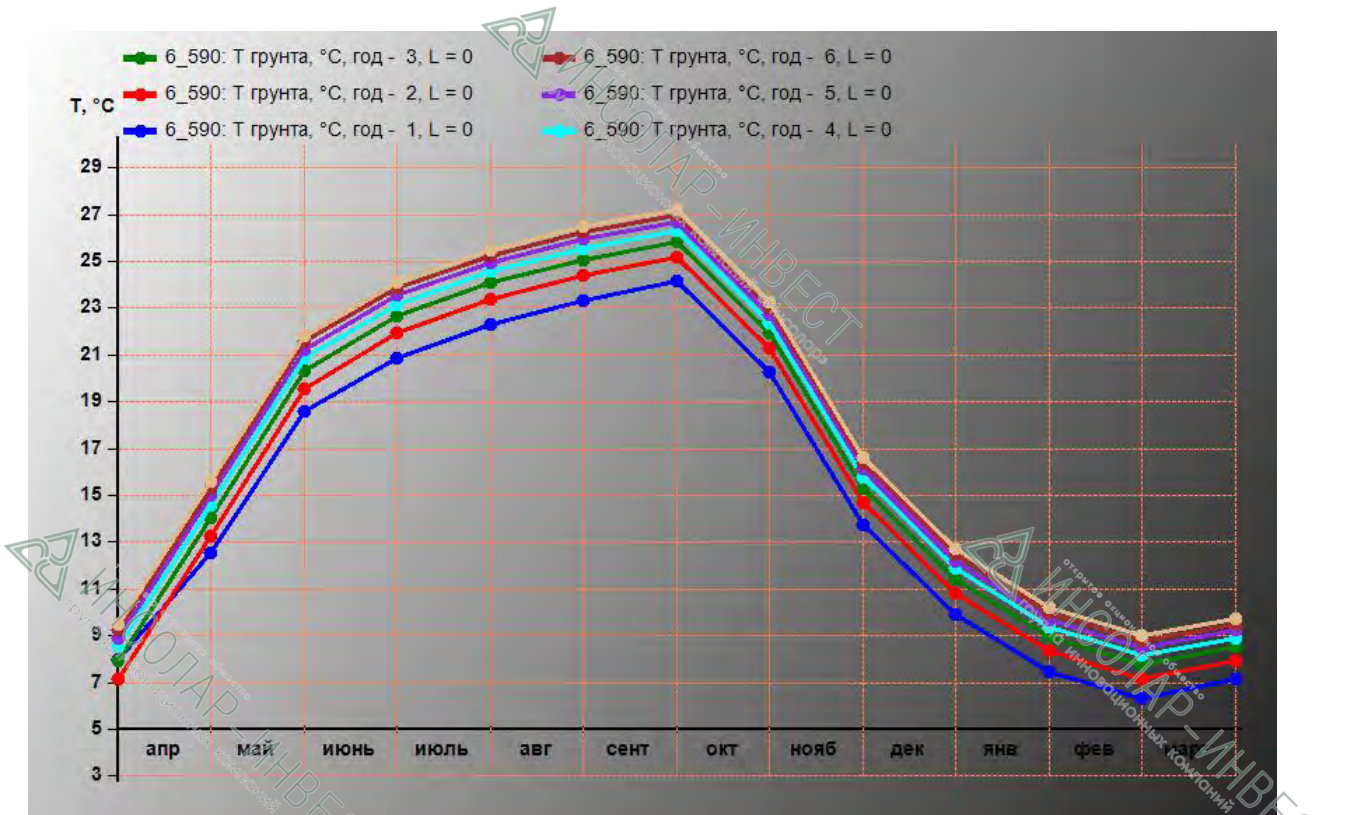


Рисунок 28. Температура грунта у поверхности по годам. Шаг 6 м.



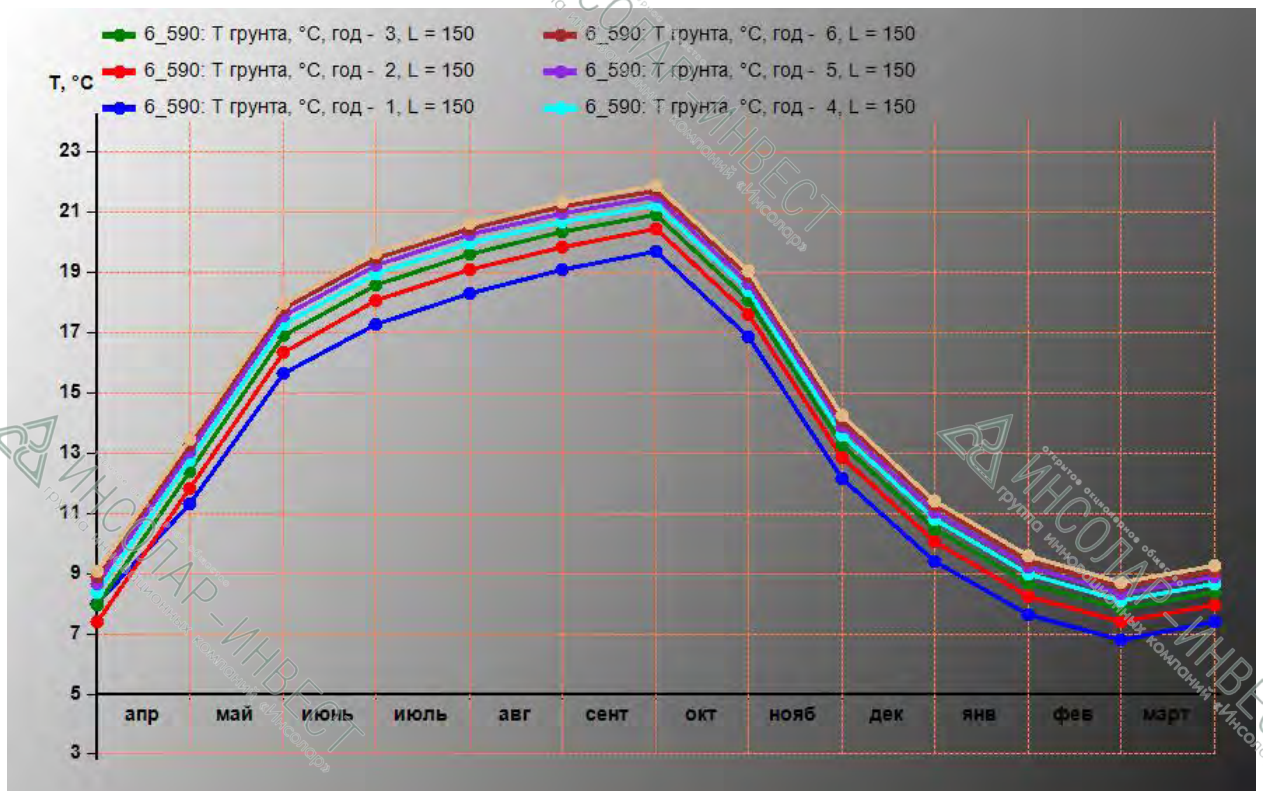


Рисунок 29. Температура грунта на глубине 150 м по годам. Шаг 6 м.



Рисунок 30. Нагрузки на термоскважину по месяцам. Шаг 8 м.

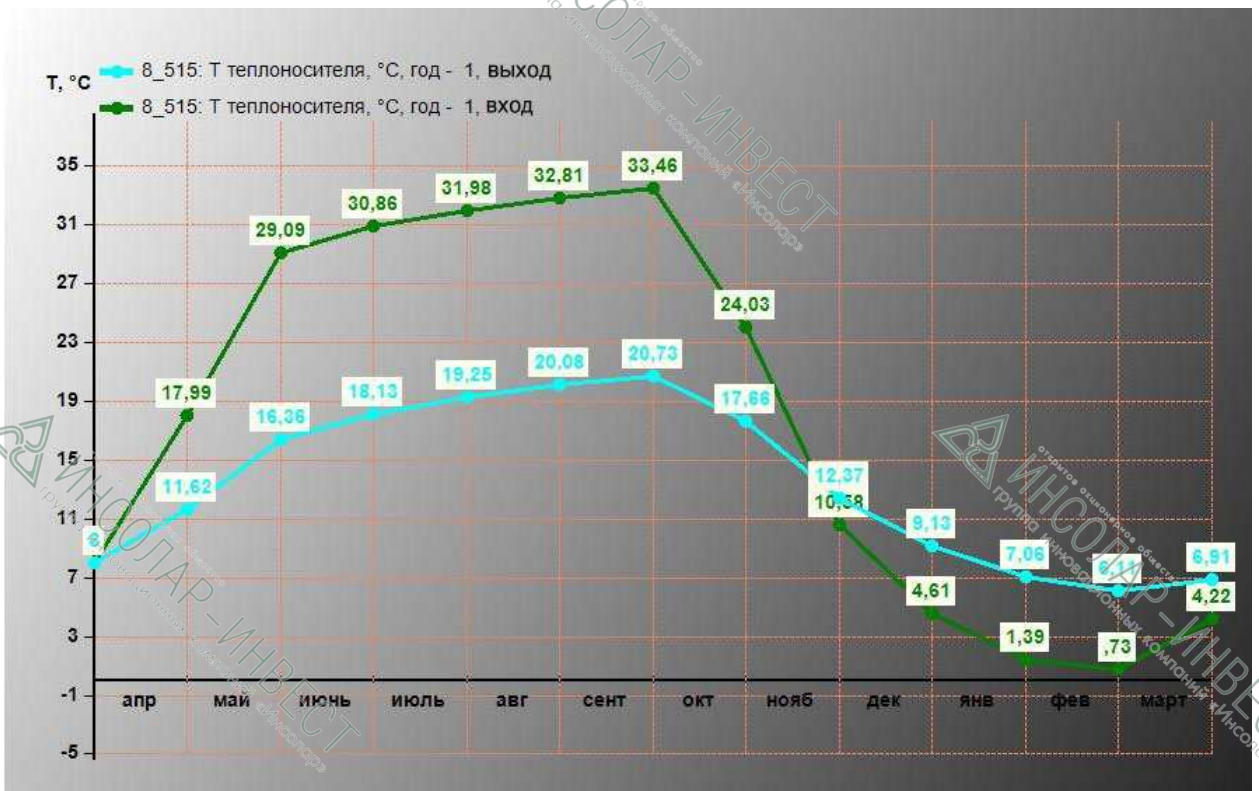


Рисунок 31. Температура теплоносителя. 1 год эксплуатации. Шаг 8 м.

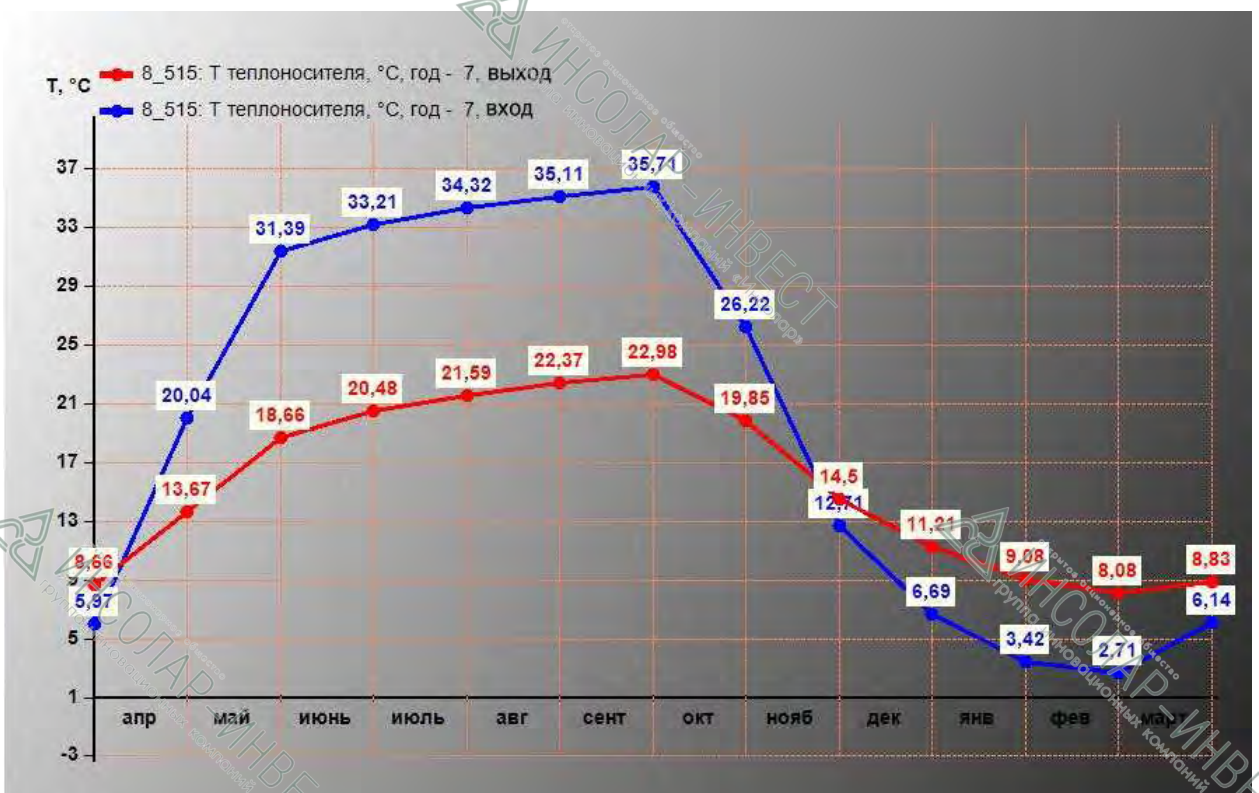


Рисунок 32. Температура теплоносителя. 7 год эксплуатации. Шаг 8 м.



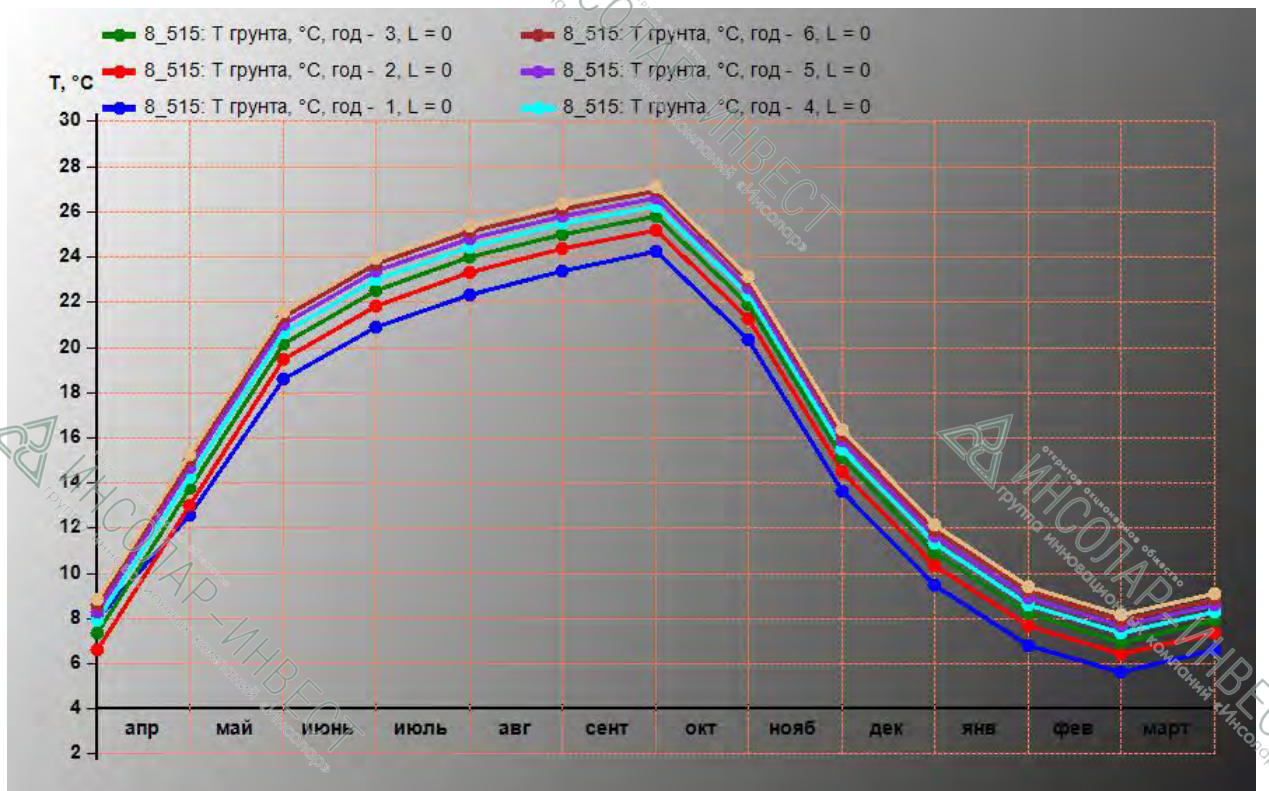


Рисунок 33. Температура грунта у поверхности по годам. Шаг 8 м.

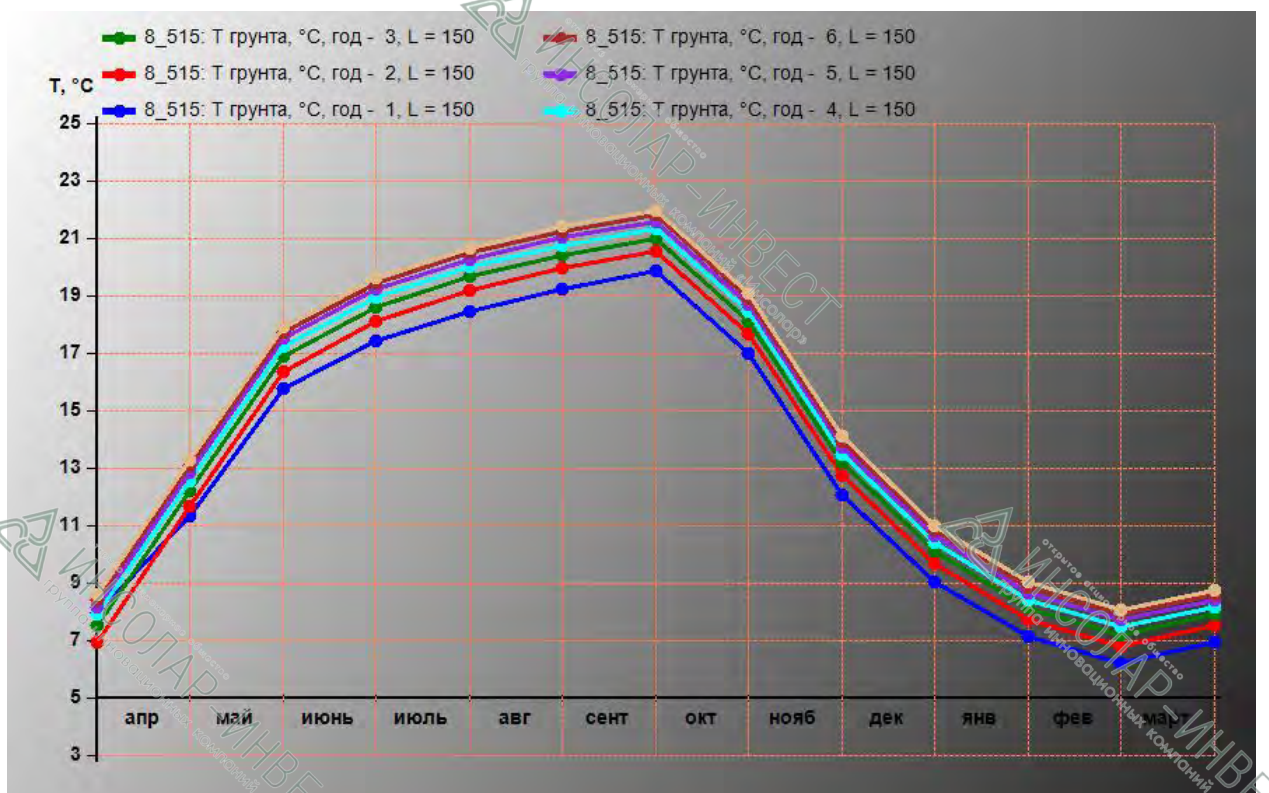


Рисунок 34. Температура грунта на глубине 150 м по годам. Шаг 8 м.



Рисунок 35. Нагрузки на термоскважину по месяцам. Шаг 10 м.

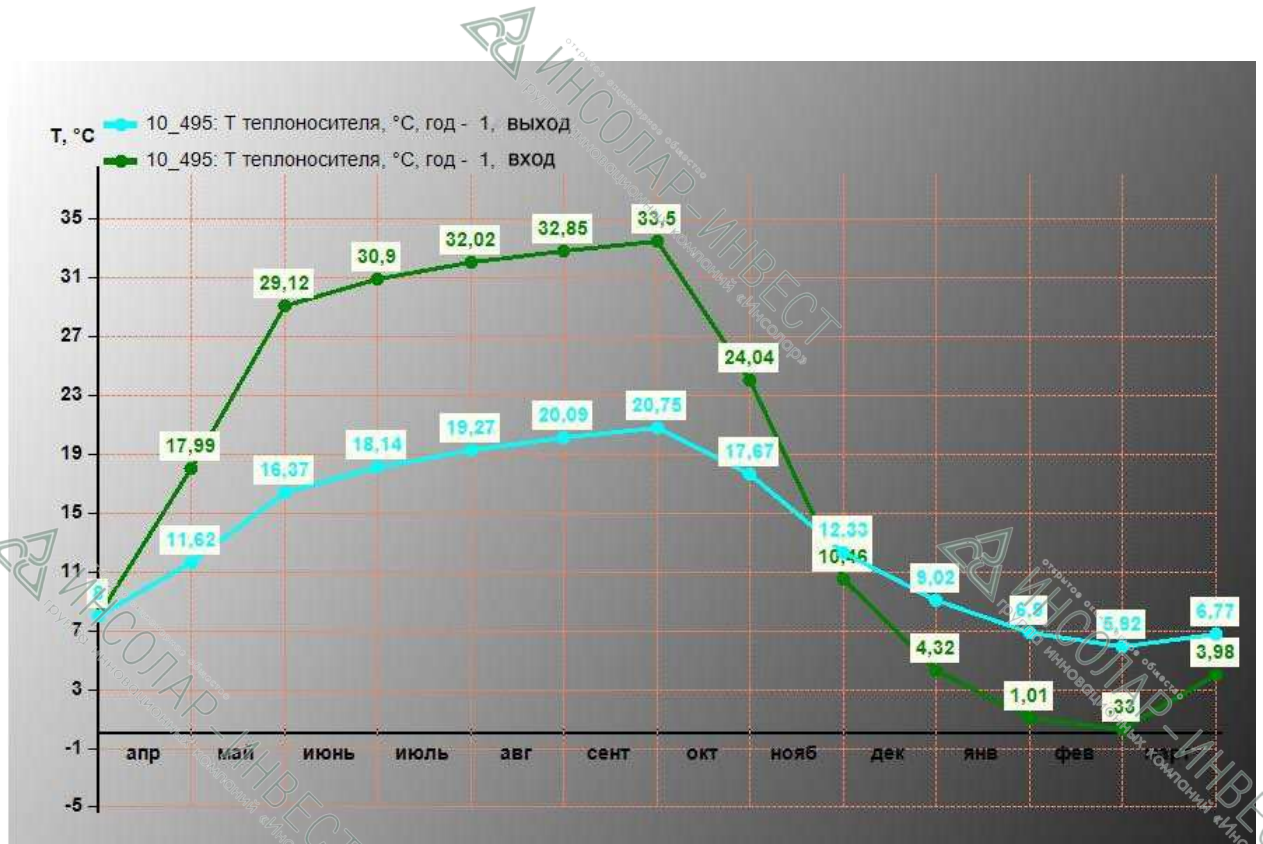


Рисунок 36. Температура теплоносителя. 1 год эксплуатации. Шаг 10 м.





Рисунок 37. Температура теплоносителя. 7 год эксплуатации. Шаг 10 м.

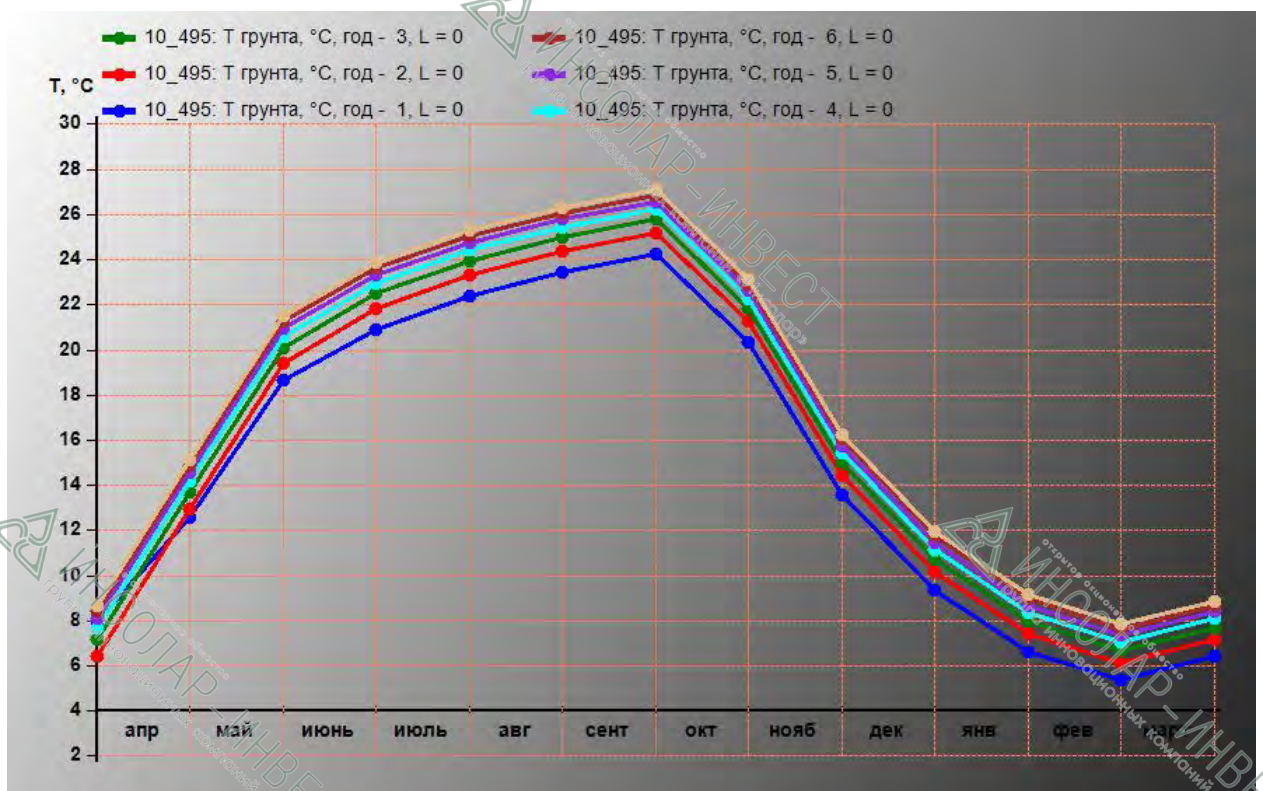


Рисунок 38. Температура грунта у поверхности по годам. Шаг 10 м.



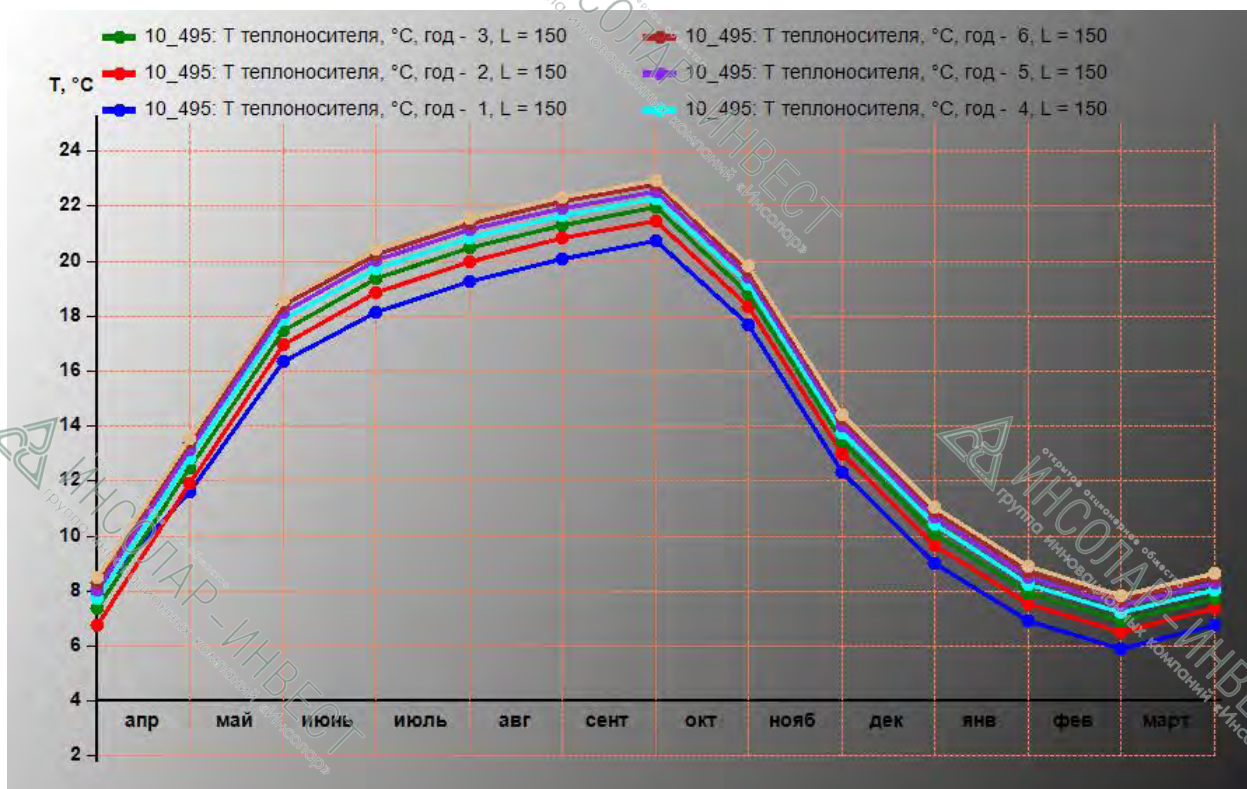


Рисунок 39. Температура грунта на глубине 150 м по годам. Шаг 10 м.

Таким образом, в результате расчётов было определено, что для обеспечения требуемых параметров работы грунтовой системы необходимо предусмотреть восстановление температурного режима грунта в зимний период. При выполнении этого условия требуемое количество грунтовых теплообменников глубиной 150 м составит:

Для шага 6 м – 590 единиц;

Для шага 8 м - 515 единиц;

Для шага 10 м - 495 единиц.

Однако стоит отметить, что при проведении расчётов не осуществлялся учёт высыхания прилегающих к грунтовым теплообменникам слоёв грунта, поскольку этот эффект в поровом пространстве грунтового массива чрезвычайно сложно поддаётся математическому моделированию и в

настоящее время, насколько нам известно, программы, позволяющие с достаточной степенью достоверности прогнозировать указанный эффект, отсутствуют.

Как показано расчётом, при указанном количестве грунтовых теплообменников грунтовая система находится на пределе своих возможностей по отводу тепла. Принимая также во внимание неопределённость, связанную с изменчивостью климата и, как следствие, с невозможностью учесть реальные параметры подачи в грунт «холода» для восстановления температурного режима, **рекомендуется предусмотреть увеличение количества грунтовых теплообменников против расчётного, по крайней мере, на 15%.**

Результаты расчётов, представленные в настоящей главе, должны быть скорректированы в дальнейшем на основании уточнённых данных геологических исследований, которые должны быть проведены именно на рассматриваемой площадке и до глубины не менее 155 м, а также по результатам натурных испытаний грунтовых теплообменников.

## 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

### 4.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ПЛОЩАДИ ЗЕМЛЕОТВОДА

Определим площадь земельного участка, необходимую для размещения грунтовых теплообменников в количестве, определённом в предыдущем разделе, для рассмотренных вариантов шага. При этом количество грунтовых теплообменников возьмём увеличенным на 15 %. Полученные данные сведём в таблицу 12.

Таблица 12.

№№	Шаг размещения термоскважин, м	Количество скважин, шт.	Необходимая площадь земельного участка, м <sup>2</sup>
1	6	679	24 444
2	8	593	37 952
3	10	570	57 000

Видно, что для варианта размещения с шагом 6 м площадь участка оказалась наименьшей из всех. Так, несмотря на значительно меньшее количество термоскважин в варианте с шагом 10 м площадь участка для их размещения будет в 2,33 раза больше. Исходя из этого, варианты с шагом 8 и 10 м из дальнейшего рассмотрения исключаем как неудовлетворяющие требованию сокращения отводимого под поле термоскважин земельного участка.

Исходя из того, что первоначальный размер участка составлял 530 на 140 м, сокращение площади составит практически 2/3 от первоначальной величины – 49 756 м<sup>2</sup>.

## 4.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ

### 4.2.1 Геотермальная система

Грунтовый теплообменник двойной U-образной конструкции, как уже упоминалось ранее, представляет собой четыре трубы, объединённые в две гидравлические петли при помощи оконечника и помещённые в скважину. Основную стоимость материалов составляет сама труба. Для трубы диаметром 32 мм рассчитанной на давление 16 атм. розничная цена составляет 40 руб. за метр. Учитывая объём закупок справедливо ожидать снижения цены по крайней мере на 20%. В таком случае стоимость трубы составит 32 руб. за метр.

Диаметр бурения скважины для размещения грунтового теплообменника составляет порядка 150 мм. При столь значительных объёмах стоимость буровых работ можно ожидать на уровне 700 рублей за погонный метр. Тогда затраты на организацию поля термоскважин составят:

$$679 * 150 * (700 + 4 * 32) = 84\,331\,800 \text{ руб.} \approx 84,33 \text{ млн. руб.}$$

Стоимость организации обвязки и прокладки магистральных трубопроводов определим как 10% от стоимости поля скважин. При этом их стоимость составит 8,44 млн. руб.

Затраты на циркуляционные насосы составят 0,75 млн. руб.

Сухие воздушные охладители на указанную мощность будут стоить 4,01 млн. руб.

Работы по проектированию системы и монтажу насосов и сухих охладителей оцениваются в 5,83 млн. руб.

Суммарные капитальные затраты на создание системы на базе грунтовых теплообменников, дополнительно оснащённой сухими охладителями, составят 103,36 млн. руб.

Таблица 13.

№№	Наименование затрат	Величина затрат, млн. руб.
1	Грунтовые теплообменники	84,33
2	Обвязка скважин и магистральные трубопроводы	8,44
3	Циркуляционные насосы	0,75
4	Сухие охладители	4,01
5	Работы	5,83
<b>6</b>	<b>Всего</b>	<b>103,36</b>

#### 4.2.2 Система на базе чиллеров

Для сравнения рассмотрим систему на базе чиллеров с воздушным охлаждением конденсатора и функцией свободного охлаждения, позволяющей при низких температурах наружного воздуха обеспечивать необходимое охлаждение только за счёт непосредственного сброса в атмосферу без включения компрессоров. Этот вариант является более близким к рассматриваемому варианту с использованием грунта и наружного воздуха, поскольку также предполагает наличие энергосберегающего режима с низким потреблением энергии.

Стоимость чиллера с воздушным охлаждением конденсатора и функцией свободного охлаждения мощностью 1076 кВт составляет порядка 15 млн. руб. (по данным поставщиков оборудования). Поскольку таких чиллеров требуется 6 единиц, общая стоимость составит 90 млн. руб.



Стоимость циркуляционных насосов будет примерно такой же, что и для первого рассмотренного варианта, то есть 0,75 млн. руб.

Поскольку чиллеры являются весьма массивным оборудованием (так, масса одного чиллера на указанную выше мощность по данным производителя составляет 12, 53 тонны), для них требуется обустройство соответствующего фундамента. Поскольку данное оборудование предназначено для работы с окружающим воздухом вариант строительства отдельного здания для размещения холодильного центра в настоящем расчёте рассматриваться не будет. Примем стоимость строительства фундаментов равной 9 млн. руб.

Организация гидравлической обвязки оборудования, включая необходимую запорную и регулирующую арматуру, потребует затрат в размере 4,5 млн. руб.

Работы по проектированию системы и монтажу основного оборудования оцениваются в 13,48 млн. руб.

Общая стоимость создания системы охлаждения на базе чиллеров составит 117,73 млн. руб.

Таблица 14.

№№	Наименование затрат	Величина затрат, млн. руб.
1	Чиллеры	90,00
2	Циркуляционные насосы	0,75
3	Фундаменты	9,00
4	Обвязка скважин и магистральные трубопроводы	4,50
5	Работы	13,48
<b>6</b>	<b>Всего</b>	<b>117,73</b>

#### 4.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ

Оценку величины эксплуатационных затрат произведём на основании потребления электрической энергии рассматриваемыми вариантами систем.

##### 4.3.1 Геотермальная система

Потребителями электроэнергии в данном случае являются циркуляционные насосы гидравлического контура и вентиляторы сухих охладителей.

Мощность насосов оценивается в 80 кВт (определено по программе подбора оборудования Grundfos).

Электрическая мощность сухих охладителей будет также близка к 80 кВт (определено по программе подбора оборудования Güntner).

Поскольку циркуляционные насосы работают круглогодично, а сухие охладители только в течение полугода, общее потребление электрической энергии системой составит:

$$80 \cdot 365 \cdot 24 + 80 \cdot 180 \cdot 24 = 1\,042\,944 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год} \approx 1,04 \text{ млн. кВт} \cdot \text{ч/год}$$

При тарифе на электрическую энергию, равном 3 руб. за кВт\*ч, стоимость потреблённого энергетического ресурса составит **3,12 млн. руб./год.**

#### 4.3.2 Система на базе чиллеров

Потребителями электроэнергии в данном случае являются чиллеры, которым электричество требуется для работы компрессоров и вентиляторов обдува конденсаторов и теплообменников свободного охлаждения, а также циркуляционные насосы гидравлического контура.

Суммарная установленная электрическая мощность чиллеров составит 2022 кВт в обычном режиме и работы 302,4 кВт в режиме свободного охлаждения, когда включены только вентиляторы, а компрессоры не задействуются (определено по техническим данным производителя).

Мощность насосов будет мало отличаться от варианта грунтовой системы, поэтому она также оценивается в 80 кВт.

Примем, что чиллеры работают в режиме активного охлаждения в течение жаркого и части переходного периода года, то есть на протяжении полугода, а в течение второй половины года работают в режиме свободного охлаждения. Циркуляционные насосы работают постоянно. Тогда общее потребление электрической энергии системой составит:

$$2022*(365-180)*24+302,4*180*24+80*365*24=10\,984\,848 \text{ кВт*ч/год} \approx$$

$$\approx 10,98 \text{ млн. кВт*ч/год}$$

При тарифе на электрическую энергию, равном 3 руб. за кВт\*ч, стоимость потреблённого энергетического ресурса составит **32,94 млн. руб./год.**

#### 4.4 ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЁТА

В результате проведённых оценочных расчётов определено, что капитальные затраты на создание системы охлаждения на базе грунтовой системы, дополненной сухими охладителями, составит 103,36 млн. руб. против 117,73 млн. руб., требуемых для организации системы охлаждения на базе холодильных машин с воздушным охлаждением конденсатора и функцией свободного охлаждения. При этом не учитывались затраты, связанные с необходимостью подведения дополнительной электрической мощности в варианте с использованием холодильных машин и связанной с этим необходимостью организации специального электрического хозяйства.

Эксплуатационные затраты на электроэнергию при работе системы на базе чиллеров будут в 10,56 раз выше, чем при эксплуатации геотермальной системы. При этом не принимались в расчёт затраты на сервисное обслуживание самих холодильных машин силами специализированных организаций. Грунтовая система при этом практически не требует сервисного обслуживания.

Также из технических данных холодильных машин, указанных производителем, можно сделать вывод, что при их работе будут возникать значительные пусковые электрические токи (987 А из расчёта на одну машину), что налагает дополнительные требования на систему подачи и распределения электроэнергии.

Кроме того, для размещения холодильных машин с учётом рекомендуемых производителем величин сервисных зон потребуется площадка в 435 м<sup>2</sup>, а с учётом трубопроводной обвязки эта площадь может быть ещё большей.

Уровень звукового давления при работе холодильного оборудования составит 76 дБА на расстоянии 10 м от чиллера (для одной установки)



мощностью 1076 кВт), в то время как для сухих охладителей, используемых в варианте грунтовой системы, этот показатель не превысит 65 дБА, а может быть и значительно ниже. Кроме того, при работе холодильных машин возникают значительные вибрационные нагрузки, отсутствующие в случае использования грунтовой системы.

Исходя из перечисленного выше можно сделать вывод о том, что система охлаждения установок искусственного роста кристаллов геотермальной системе на основе вертикальных грунтовых теплообменников имеет несомненные преимущества перед системой на базе холодильных машин.

## 5. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В результате проведённых сравнительных расчётов четырёх конструкций грунтовых теплообменников выбрана конструкция, наиболее полно отвечающая требованиям эффективности и надёжности. В качестве окончательного варианта принят грунтовый теплообменник двойной U-образной конструкции глубиной 150 м из полиэтилена низкого давления. Диаметр труб грунтового теплообменника 32 мм при рабочем давлении 16 атм.

2. Для определения степени взаимного теплового влияния грунтовых теплообменников в пределах поля термоскважин были проведены соответствующие расчёты с учётом реального геологического строения площадки. По результатам расчётов были сделаны следующие основные выводы:

➤ При постоянном сбросе энергии в грунт при отсутствии его последующего извлечения (да ещё и в условиях жёстко ограниченного размера земельного участка, а значит - и объёма используемого грунтового массива) со временем происходит прогрев грунта и грунтовых вод до температур, близких к температурам теплоносителя, подлежащего охлаждению, и дальнейший сброс тепла становится просто невозможным;

➤ Система вполне может быть организована следующим образом: при температурах наружного воздуха ниже определённого значения ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) система обеспечивает сброс тепла в окружающий воздух при помощи сухих воздухоохладителей, а при более высоких температурах атмосферного воздуха сброс производится в скважины. При этом в периоды с более низкой температурой наружного воздуха (ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) будут образовываться избытки

холодильной мощности, которые следует направлять на регенерацию холодоресурса грунта.

3. Требуемое количество термоскважин составило 679 единиц при шаге 6 м. При этом исходя из того, что первоначальный размер участка составлял 530 на 140 м, сокращение площади составит практически 2/3 от первоначальной величины – 24 444 м<sup>2</sup> против 49 756 м<sup>2</sup>.

4. Для окончательного определения расчётных параметров и количества грунтовых теплообменников настоятельно рекомендуется проведение натуральных испытаний грунтовых теплообменников с определением их реальных возможностей по сбросу тепловой энергии в грунт в условиях конкретной площадки строительства. В процессе выполнения буровых работ, необходимых для устройства грунтового теплообменника, желательно получить более детальные данные по гидрогеологическому строению площадки, нежели представлены на разрезе в отчёте [2].

5. В случае сброса тепла в грунт происходит высыхание прилегающего к грунтовому теплообменнику массива грунта с соответствующим снижением его теплопроводности, что вызывает резкое падение теплотехнических характеристик грунтовых теплообменников. Для устранения этого негативного эффекта и обеспечения гарантированной работоспособности грунтовой системы рекомендуется оснастить грунтовые теплообменники системой увлажнения, обеспечивающей подачу в грунт воды по всей длине грунтового теплообменника. Для этого грунтовой теплообменник снабжается трубкой-спутником, по которой и осуществляется подача воды. Данное решение запатентовано, правообладатель – ОАО «Инсолар-Инвест».

6. В результате проведенной технико-экономической оценки эффективности применения системы охлаждения технологического оборудования на базе грунтовой системы, дополненной сухими охладителями, показано, что она имеет преимущества перед системой на базе холодильных машин, такие как:

- Не только сопоставимые, но даже и более низкие капитальные затраты на создание системы (103,36 млн. руб. против 117,73 млн. руб. при устройстве системы на базе холодильных машин);
- Более чем в 10 раз сокращается потребление электрической энергии, и, соответственно, величина эксплуатационных затрат, связанная с платой за энергоресурсы (1,04 млн. кВт\*ч/год против 10,98 млн. кВт\*ч/год);
- Более чем в 13 раз снижается установленная электрическая мощность системы (0,16 МВт против 2,1 МВт). При оценке капитальных вложений в систему на базе чиллеров затраты на получение дополнительной мощности не учитывались, но если принять их равными 30 000 руб. за киловатт установленной электрической мощности сумма этих затрат составит 58,3 млн. руб.;
- Не требуется привлечение подготовленных специалистов либо специализированных организаций для сервисного обслуживания холодильного оборудования, в результате чего снижаются эксплуатационные затраты;
- Не возникают дополнительные требования к системе подачи и распределения электроэнергии, связанные с наличием высоких пусковых токов;



- Не требуется организация площадки с мощными фундаментами или строительства отдельного здания холодильного центра для размещения холодильного оборудования;
- Значительно более низкие шумовые и вибрационные нагрузки.

Вместе с тем необходимо отметить, что количество скважин и, соответственно, размер отводимого под их размещение земельного участка могут быть ещё уменьшены за счёт перераспределения нагрузок между собственно грунтовой системой и сухими охладителями в сторону увеличения мощности последних. При этом несколько возрастёт потребление электроэнергии вентиляторами сухих охладителей, но снизятся капитальные затраты на организацию поля термоскважин.

## 6. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.
2. «Гидрогеологическое заключение о возможности технического водоснабжения производственной базы ООО «КАМА КРИСТАЛЛ ТЕХНОЛОДЖИ» в г. Набережные Челны за счёт подземных вод», ГУП НПО «Геоцентр РТ», 2011, 12 с.
3. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
4. ASHRAE Handbook. 1999 HVAC Application. Chapter 31. Energy resources.
5. VDI 4640. Thermische Nutzung des Untergrundes.
6. Виссмен У. мл., Харбаф Т.Н., Кнэпп Д.У. Введение в Гидрологию. Л., Гидрометеиздат, 1979, 472 с.
7. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоёв Земли (Монография). Издательский дом «Граница». М., «Красная звезда» – 2006. – 220 С.
8. Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.