



«УТВЕРЖДАЮ:»

Генеральный директор

ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

Н.И. Майорова

## ОТЧЁТ

ПО ДОГОВОРУ №2/1-2012 ОТ 11 ЯНВАРЯ 2012 г.

НА

**РАЗРАБОТКУ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ ПРЕДПРОЕКТНЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО  
ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОХЛАДОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ  
АДМИНИСТРАТИВНО-ОФИСНОГО ЗДАНИЯ С ОБЪЕКТАМИ ИНЖЕНЕРИИ И  
БЛАГОУСТРОЙСТВА, РАСПОЛОЖЕННОГО ПО АДРЕСУ: МОСКОВСКАЯ ОБЛ.,  
ОДИНЦОВСКИЙ РАЙОН, МОЖАЙСКОЕ ШОССЕ, ВЛ. 165**

Научный руководитель

ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»,

д-р. техн. наук

Г.П. Васильев

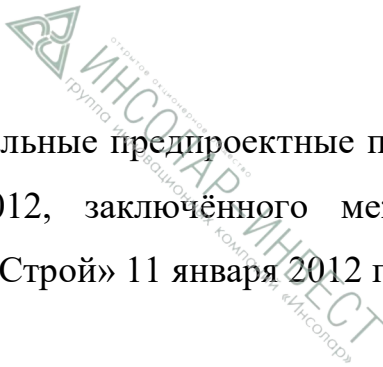
Директор проектного отделения

ОАО "ИНСОЛАР-ИНВЕСТ"

В.Ф. Горнов

Москва 2012

Настоящие концептуальные предпроектные предложения выполнены в рамках договора №2/1-2012, заключённого между ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» и ООО «МонтажСтрой» 11 января 2012 г.



## Оглавление

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	5
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ .....	6
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	10
1.1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АДМИНИСТРАТИВНО-ОФИСНОГО ЗДАНИЯ .....	13
1.1.1 Архитектурно-планировочные решения .....	13
1.1.2 Инженерные системы .....	16
1.1.3 Система сбора низкопотенциального тепла грунта.....	18
1.2 КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА СТРОИТЕЛЬСТВА.....	21
1.2.1 Природные условия .....	21
1.2.2 Климат .....	21
1.2.3 Геологическое строение .....	23
2. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОХЛАДОСНАБЖЕНИЯ .....	26
2.1 ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ СБОРА ТЕПЛА ГРУНТА .....	27
2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ .....	29
2.2.1 Теплоснабжение.....	30
2.2.2 Холодоснабжение .....	33
2.2.3 ССНТГ .....	38
2.2.4 Электроснабжение .....	38
3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ГРУНТА .....	40
3.1 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ.....	40
3.1.1 Общая информация.....	40
3.1.2 Данные по площадке строительства .....	46

3.2	ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМОСКВАЖИН НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ГРУНТА .....	48
3.3	ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ГРУНТА В ПРЕДЕЛАХ ПОЛЯ ТЕРМОСКВАЖИН .....	52
3.4	МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТЕРМОСКВАЖИН И ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ЦЕЛОМ .....	56
3.4.1	Цель проведения численного моделирования.....	56
3.4.2	Ограничения.....	57
3.4.3	Нагрузка на системы охлаждения.....	57
3.4.4	Расчётные нагрузки и результаты расчётов .....	60
3.4.5	Предварительные выводы .....	69
3.5	ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЁТ .....	72
3.5.1	Уточнённые данные по геологическому строению и гидрогеологическим условиям площадки строительства.....	72
3.5.2	Результаты натуральных тепловых испытаний грунтового теплообменника .....	77
3.5.3	Поверочный расчёт .....	78
4.	РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ .....	80
4.1	ЗИМНИЙ РЕЖИМ.....	80
4.2	РЕЖИМ ПЕРЕХОДНОГО ПЕРИОДА .....	81
4.3	ЛЕТНИЙ РЕЖИМ.....	82
5.	СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ НА БАЗЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ СРЕДНЕЙ И ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ .....	87
6.	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	97

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВЭР – вторичные энергетические ресурсы;

ГВС – горячее водоснабжение;

КПД – коэффициент полезного действия;

КПЭ – коэффициент преобразования энергии;

НВИЭ – нетрадиционные возобновляемые источники энергии;

ОВК – отопление, вентиляция и кондиционирование;

ПТН – парокомпрессионный тепловой насос;

ССНТГ – система сбора низкопотенциального тепла грунта;

ТН – тепловой насос;

ТО – теплообменник;

ТСТ – теплонасосная система теплоснабжения;

ХВС – холодное водоснабжение.

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

расчётный период - период времени, рассматриваемый при проведении расчётов.

коэффициент полезного действия (КПД) (coefficient of performance - COP) - отношение вырабатываемой теплонасосной установкой полезной энергии к энергии, затрачиваемой на её привод.

Более правильно оценивать эффективность теплонасосных систем величиной безразмерного коэффициента трансформации (преобразования) энергии, численно равного отношению полезной тепловой энергии, вырабатываемой теплонасосной системой к энергии, затрачиваемой на её привод.

горячее водоснабжение - подогрев воды для системы бытового горячего водоснабжения

эффективная подводимая мощность - установленная электрическая мощность теплонасосного теплового пункта, включающая:

- установленную электрическую мощность компрессора или горелки;
- установленную электрическую мощность системы размораживания;
- установленную электрическую мощность устройств автоматического регулирования и обеспечения безопасности работы узла;
- установленную электрическую мощность устройств переноса теплоты (например, вентиляторы, насосы) и перемещения теплоносителей внутри теплонасосного теплового пункта

тепловой насос с электроприводом - парокompрессионный тепловой насос

затраты энергии на горячее водоснабжение - затраты тепловой энергии на подогрев необходимого количества холодной сетевой воды до требуемой температуры горячей воды без учёта потерь тепловой энергии в тепловых сетях и системе горячего водоснабжения здания

затраты энергии на отопление (теплопотери) или охлаждение - энергия, которую нужно доставлять, или извлекать из кондиционируемого пространства, чтобы поддерживать требуемую температуру внутреннего воздуха на протяжении заданного периода времени (без учёта тепловой эффективности и потерь энергии в инженерных системах здания)

затраты энергии на теплохладоснабжение (энергопотребление системы теплохладоснабжения) - энергия, затрачиваемая на отопление или охлаждение (включая уменьшение влажности) или бытовое горячее водоснабжение

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

теплонасосные системы теплохладоснабжения (ТСТ) - системы инженерного обеспечения зданий и сооружений различного назначения,

базирующиеся на применении теплонасосного оборудования и тепловых насосов. В общем случае теплонасосная система теплоснабжения включает в себя четыре основных элемента:

- потребителя тепловой энергии (систему отопления, горячего водоснабжения и пр.);
- потребителя холода (систему кондиционирования, холодоснабжения и пр.);
- тепловой насос;
- систему сбора низкопотенциального тепла.

Как правило, для покрытия пиковых нагрузок теплонасосная система теплоснабжения оснащается дополнительным традиционным источником тепловой энергии (доводчиком)

рекуперация - возвращение части энергии, расходуемой на теплоснабжение для повторного использования в том же процессе

регенерация энергии - использование остаточной энергии после завершения конкретного процесса в том же самом, или другом процессе

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

обогреваемое пространство - помещение или замкнутое пространство, нагреваемое до заданного значения температуры или заданного диапазона температур

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



внутренняя температура - усреднённая температура внутреннего воздуха в помещении

инженерная система здания - инженерное оборудование систем отопления, охлаждения, вентиляции, бытового горячего водоснабжения, освещения и производства электрической энергии

инженерная подсистема здания - часть технической системы здания, выполняющая специальную функцию (например, генерацию или распределение теплоты)

система (подсистема) сбора низкопотенциальной теплоты (система теплосбора) - совокупность устройств, узлов и аппаратов, обеспечивающая извлечение и использование тепловой энергии низкого потенциала, например низкопотенциальной тепловой энергии грунта поверхностных слоёв Земли

коэффициент трансформации (преобразования) энергии (coefficient of performance - COP) - эффективность теплонасосных систем характеризуется величиной безразмерного коэффициента трансформации (преобразования) энергии численно равного отношению полезной тепловой энергии, вырабатываемой теплонасосной системой к энергии, затрачиваемой на её привод

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

теплонасосный тепловой узел (ТТУ) - помещение с расположенными в нем элементами, узлами и агрегатами подсистемы генерации теплоты

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Сегодня теплонасосные системы теплохладоснабжения (ТСТ), использующие низкопотенциальную тепловую энергию грунта поверхностных слоёв Земли - одно из наиболее динамично развивающихся в мире направлений экономии энергии и использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

В отличие от «прямого» использования высокопотенциального геотермального тепла (гидротермальные ресурсы), использование низкопотенциального геотермального тепла с помощью тепловых насосов возможно практически повсеместно. В англоязычной технической литературе такие системы обозначаются как «GHP» – «geothermal heat pumps», геотермальные тепловые насосы. В отечественной литературе их принято обозначать как «ГТСТ» - геотермальные теплонасосные системы теплохладоснабжения. Существенной особенностью ГТСТ является возможность получения практически на всей территории РФ от 2 до 4 кВт полезного тепла на 1 кВт электрической энергии, затраченной на привод тепловых насосов. Иными словами, подобные системы могут обеспечить 50÷75%-ую экономию энергии. При использовании ГТСТ для теплоснабжения и холодоснабжения в летнее время года на 1 кВт энергии, затрачиваемой на привод ГТСТ возможно получить, кроме 2÷4 кВт полезной тепловой энергии (например, для систем горячего водоснабжения), дополнительно 1÷3 кВт «холода» для систем кондиционирования.

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÷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 °С на каждые 100 м). Величина потока радиогенного тепла, поступающего из земных недр, для разных местностей различается. Как правило эта величина составляет 0,05÷0,12 Вт/м<sup>2</sup>.

За последнее десятилетие количество установленных в мире ГТСТ значительно увеличилось. Эти системы уже зарекомендовали себя как эффективные и надёжные, срок службы которых никак не меньше, а иногда и больше, чем у традиционных систем теплоснабжения. Страны, ориентирующиеся на требования сохранения окружающей среды, уже всерьёз рассматривают их в качестве следующего шага на пути развития теплоснабжения.

Предлагаемые технические решения, разработанные в рамках подготовки концептуальных предпроектных предложений, имеют своей целью повышение экологической и энергетической эффективности

административно-офисного здания с объектами инженерии и благоустройства, расположенного по адресу: Московская обл., Одинцовский район, Можайское шоссе, вл. 165 за счёт разработанных ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» новых энергоэффективных технологий теплохладоснабжения, использующих нетрадиционные источники энергии.



## **1.1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АДМИНИСТРАТИВНО-ОФИСНОГО ЗДАНИЯ**

Проектируемое здание расположено на участке по адресу: Московская область, Одинцовский район, р/п Новоивановское, Можайское шоссе, вл 165.

Границами участка служат: с севера - территория ООО «Бизнес-Приват+», с востока – территория «Интурреклама», с юга и запада – территория ООО «Гема Транс».

Участок строительства характеризует плотная хаотичная застройка, рельеф имеет незначительный уклон в юго-восточном направлении.

### **1.1.1 Архитектурно-планировочные решения**

Административное здание восьмиэтажное, Г-образной формы в плане, состоит из подземной части – подвала и наземной части – с 1-ого по 7-ой этаж и технического этажа. Размеры здания в осях 54,3 x 59,1 м. Максимальная высотная отметка здания +33,91, соответствует отметке верха парапетов выходов на кровлю.

За относительную отметку 0.000 принята отметка чистого пола первого этажа. Относительная отметка 0.000 соответствует абсолютной отметке 173,8.

Высота подвала от чистого пола до чистого пола 1 этажа – 3,9 м.

Высота 1 этажа от чистого пола до чистого пола 2 этажа – 4,64 м.

Высота этажей со 2 по 7 от чистого пола до чистого пола – 3,64 м.

Высота 8 технического этажа от чистого пола до низа плиты покрытия – 3,40 м.

Площадь типового этажа составляет 2599 м<sup>2</sup>.

В подвале располагаются тренажерные залы, складские помещения, технические помещения и венткамера.

На первом этаже находятся столовая и кухня с горячим и холодным цехами, а также офисные помещения и вестибюль.

Со 2-ого этажа до седьмого включительно размещаются офисные помещения. Офисные помещения спланированы по принципу «свободной планировки».

На техническом этаже расположены приточные и вытяжные венткамеры, а также вспомогательные помещения технического назначения.

Количество работающих – 1640 человек. На 1этаже – 163 чел. На 2 этаже – 247 чел., с 3 по 7 этажи –  $246 \times 5 = 1230$  чел.

В таблице 1 приведены основные технико-экономические показатели здания, а на рисунке 1 – его общий вид.

Таблица 1.

№.№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
1	Площадь участка	м	4721
2	Площадь застройки	м <sup>2</sup>	2600
3	Общая площадь здания	м <sup>2</sup>	26342
	Общая площадь подвала	м <sup>2</sup>	2504,4
4	Этажность	эт.	8 надземных + подвал
5	Строительный объем в том числе:	м <sup>3</sup>	96737,576
	-ниже отм. 0.000	м <sup>3</sup>	14300
	-выше отм. 0.000	м <sup>3</sup>	82437,576



Рисунок 1. Общий вид проектируемого здания.

## 1.1.2 Инженерные системы

**Теплоснабжение.** Предусмотрено независимое теплоснабжение здания. Источником теплоснабжения является геотермальная теплонасосная система теплохладоснабжения (ГТСТ), оборудование которой размещается в помещении индивидуального теплового пункта, расположенного в подвале.

**Отопление.** В здании спроектирована центральная система отопления на основе обогреваемых поверхностей.

**Вентиляция.** В здании спроектированы центральные системы приточно-вытяжной вентиляции воздуха с механическим побуждением. Предусмотрена установка роторного регенератора с эффективностью 60%. В установках приточной вентиляции предусматриваются секции охлаждения.

**Холодоснабжение.** В здании запроектирована система центрального кондиционирования. Система охлаждения в здании многоступенчатая. Основным потребителем являются охлаждаемые поверхности. Кроме того, предусмотрен дополнительный потребитель холодоснабжения – система вентиляторных доводчиков.

**Электроснабжение** – централизованное, от сетей МКС филиала ОАО «МОЭСК».

В таблице 2 приведены основные энергетические нагрузки здания.

Таблица 2 (начало).

№№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
<b>Система отопления</b>			
	<u>Обогреваемые поверхности</u>		
1	Мощность	кВт	375
2	Температура подачи теплоносителя	°С	35
3	Температура возврата теплоносителя	°С	30
4	<b>Суммарная нагрузка</b>	<b>кВт</b>	<b>375</b>



Таблица 2 (продолжение).

№№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
<b>Система вентиляции</b>			
	<u>Приточные установки</u>		
5	Мощность (с учётом рекуперации)	кВт	980
6	Температура подачи теплоносителя	°С	55
7	Температура возврата теплоносителя	°С	40
	<u>Воздушно-тепловые завесы</u>		
8	Мощность	кВт	80
9	Температура подачи теплоносителя	°С	55
10	Температура возврата теплоносителя	°С	40
11	<b>Суммарная нагрузка</b>	<b>кВт</b>	<b>1060</b>
<b>Система горячего водоснабжения</b>			
12	Мощность (по среднечасовому за сутки расходу)	кВт	100
13	<b>Итого по теплу</b>	<b>кВт</b>	<b>1535</b>
<b>Система кондиционирования</b>			
	<u>Охлаждаемые поверхности</u>		
14	Мощность	кВт	800
15	Температура подачи теплоносителя	°С	17
16	Температура возврата теплоносителя	°С	20
	<u>Вентиляторные доводчики</u>		
17	Мощность	кВт	1130
18	Температура подачи теплоносителя	°С	7
19	Температура возврата теплоносителя	°С	12
	<u>Охлаждение приточного воздуха</u>		
20	Мощность	кВт	240
21	Температура подачи теплоносителя	°С	7
22	Температура возврата теплоносителя	°С	12
23	<b>Итого по холоду</b>	<b>кВт</b>	<b>2170</b>

### 1.1.3 Система сбора низкопотенциального тепла грунта

Система сбора низкопотенциального тепла грунта (ССНТГ) состоит из 450 грунтовых теплообменников, расположенных частично под проектируемым зданием, частично – под соседними зданиями многоэтажной открытой парковки и многофункционального здания, и частично – на прилегающей к указанным трём зданиям территории. Грунтовые теплообменники размещены частично в шахматном, частично в ортогональном порядке с шагом 6 м.

Генеральный план размещения скважин грунтовых теплообменников на площадке строительства представлен на рисунке 2, план размещения скважин грунтовых теплообменников под и вблизи проектируемого здания – на рисунке 3.

На момент начала выполнения работ по подготовке концептуальных предпроектных предложений основная часть грунтовых теплообменников уже была изготовлена, два здания из трёх, находящихся на рассматриваемом земельном участке, уже находились в стадии возведения надземной части, по третьему зданию велись работы по заливке фундаментной плиты.

Конструктивно грунтовые теплообменники выполнены двойными U-образными из труб  $\varnothing 32$  мм при толщине стенки 3 мм. Материал труб – полиэтилен низкого давления. Глубина бурения - 100 м. Обратное заполнение скважин выполнялось буровым раствором.

Поскольку значительная часть из общего их количества расположена под зданиями и фактически имеет эффективную длину на 1÷6 м меньше глубины первоначального бурения, а оставшаяся часть так же не доходит до поверхности земли и вводится в здания подземной прокладкой, эффективная длина грунтовых теплообменников для проведения последующих расчётов принимается равной 95 м.

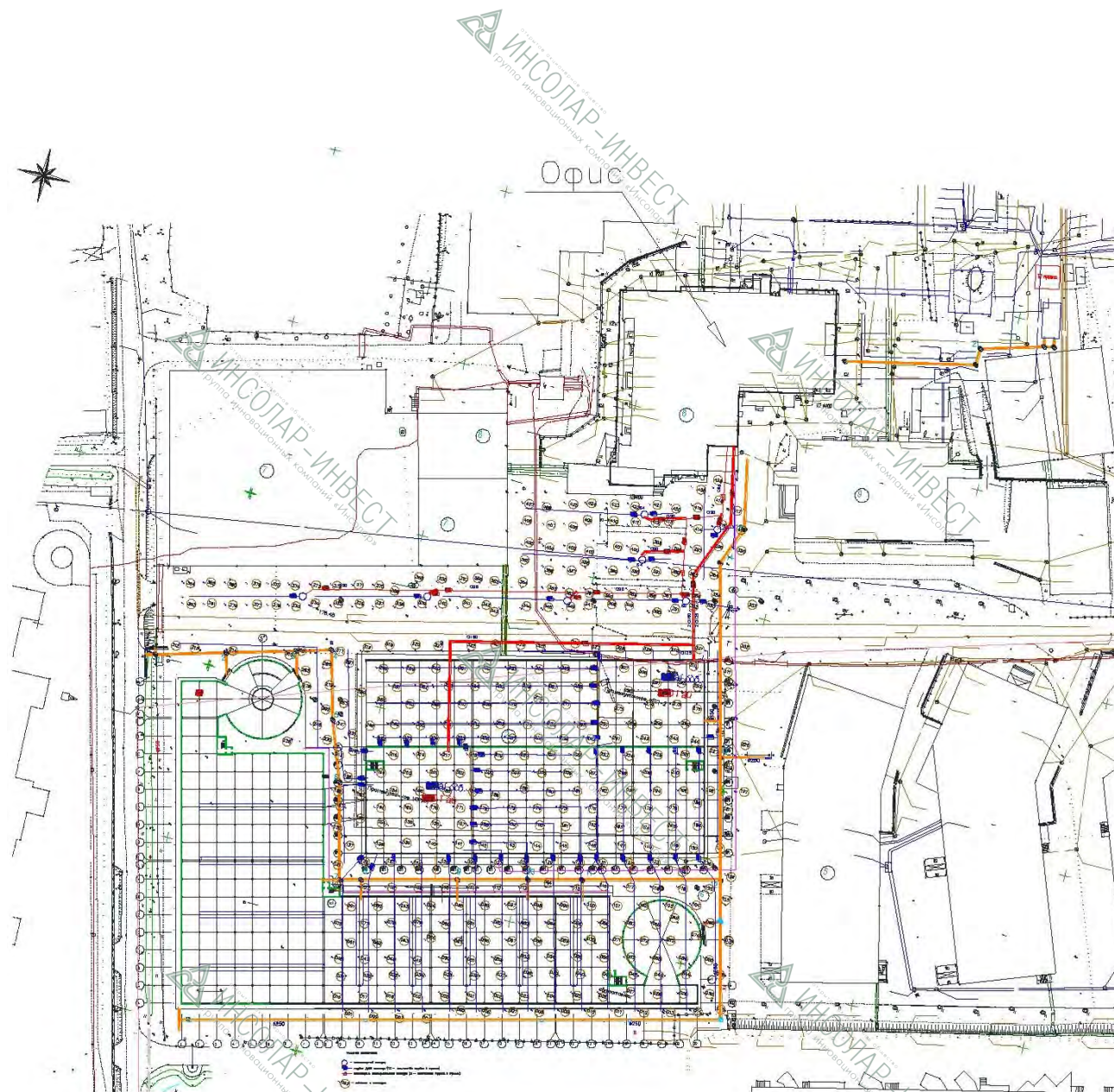


Рисунок 2. План размещения грунтовых теплообменников на площадке строительства.

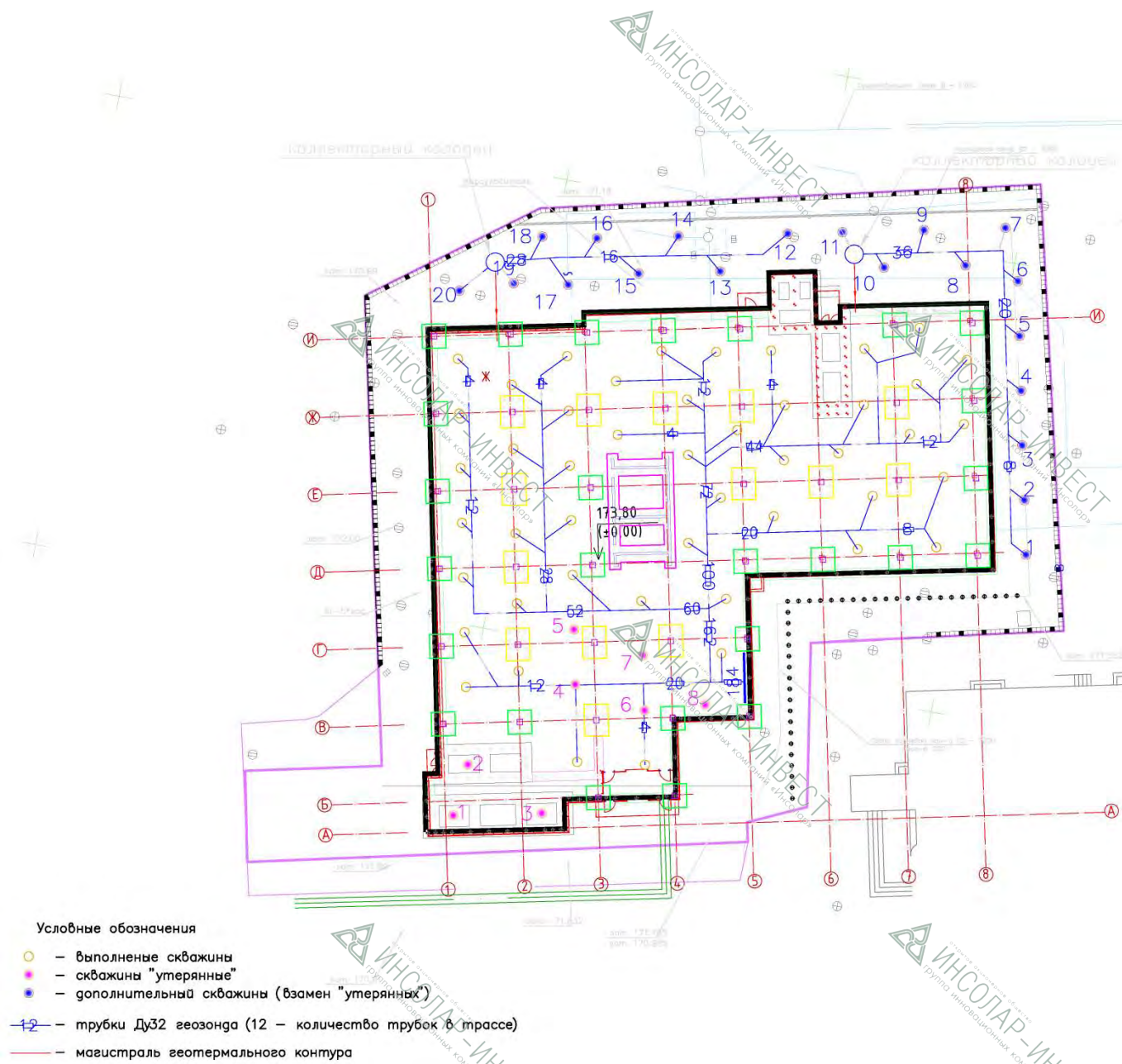


Рисунок 3. План размещения грунтовых теплообменников вблизи проектируемого здания.

## 1.2 КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА СТРОИТЕЛЬСТВА

### 1.2.1 Природные условия

Местоположение и ландшафтное зонирование. В геоморфологическом отношении исследуемый участок расположен на склоне флювиогляциальной равнины, которая прорезана поймой реки Москва. Абсолютные отметки рельефа постепенно снижаются от водораздела к руслу р. Москва и её притоков.

### 1.2.2 Климат

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  $+4,1^{\circ}\text{C}$ . Холодный период с начала ноября до конца марта. Годовое количество осадков – 654 мм. Рассчитанная норма испаряемости с водной поверхности составляет 591 мм. Непосредственно измеренная величина испарения по испарителю в г. Дмитрове составляет 434 мм, что, как видно, существенно меньше рассчитанной.

В году осадки распределены неравномерно, 437 мм выпадает в тёплое время года в виде дождей, остальная часть – 217 мм - в холодный период и принимает участие в формировании снежного покрова, толщина которого в среднем составляет 40-50 см (смотри таблицу 3). При этом запасы воды в снеге составляют 180 мм. Среднее максимальное суточное количество дождевых осадков по многолетним данным составляет 33,2 мм.

Как следует из приведённых данных, измеренные осадки и испарение с водной поверхности за тёплый период практически равны.

Большое значение для оценки поверхностного стока имеют закономерности формирования дождевых осадков тёплого периода.

Общая продолжительность выпадения осадков составляет 528 часов и является средней для г. Москвы. Продолжительность среднего дождя 4,85 часа, при среднем суточном слое осадков 3,96 мм. Средняя продолжительность периода между дождями 1,76 суток.

Как видно из таблицы, основной объём дождевых вод тёплого периода формируется осадками малой интенсивности и частой повторяемости: половина объёма формируется суточными осадками слоем менее 11 мм с повторяемостью менее 13 раз в год, более 90% объёма обеспечивается осадками, повторяющимися раз в год.

Таблица 3.

Месяц	Температура воздуха, °С	Осадки, мм	Дефицит влажности, ГПа	Скорость ветра, м/с	Расчётное испарение с водной поверхности, мм	Испарение по испарителю, мм
1	-10.3	43	0.5	3.3		
2	-9.3	37	0.6	3.2		
3	-3.9	36	1.1	3.2		
4	4.9	40	2.9	3.0	10	15
5	12	59	5.6	2.8	100	81
6	16.1	67	6.7	2.6	126	99
7	17.1	76	6.4	2.4	135	96
8	16.1	75	5.1	2.2	98	75
9	10.5	59	2.9	2.6	66	48
10	4.5	61	1.6	3.3	44	20
11	-1.8	52	0.8	3.3	12	
12	-6.8	51	0.5	3.4		
<b>Год</b>	<b>4.1</b>	<b>654</b>	<b>2.9</b>	<b>2.8</b>		
<b>Тёплый период</b>	<b>11.6</b>	<b>437</b>			<b>591</b>	<b>434</b>

### 1.2.3 Геологическое строение

Информация о геологических особенностях района строительства представлена на рисунке 4.

	Инд.	Геологическая колонка	Описание пород	Глубина	Мощность	Конструкция скважины	Уровень
4	Q		глина	12	12		
6							
12			песок	20	8		
15							
20			суглинок	35	15		
25							
30							
35							
40			глина	45	10		
45							
50			песок	55	10		
55							
60			глина зелёная	60	5		
65							
70							
75							
80							
85							
90							
95							
98	C2		известняк	98	38		

Рисунок 4. Литологическая колонка.

Данные по геологическому строению участка, непосредственно примыкающему к площадке строительства, представлены в таблице 4, а в таблице 5 приводится гидрогеологическая характеристика грунтового массива строительной площадки вблизи проектируемого многофункционального здания.

Таблица 4.

Номер слоя от поверхности грунта	Мощность слоя, м	Тип и характеристика грунта	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	0-2	Современные техногенные отложения: песок влажный с суглинками	
2	2-3	Глина тугопластичная	1920
3	3-10	Пески средней влажности	1810
4	10-20	Суглинки с прослойками песков, влажные	1980
5	20-22	Суглинки полутвёрдые маловлажные	2050
6	22-29	Суглинки полутвёрдые, с линзами песка обводнённого	2080
7	29-35	Супеси пластичные средней влажности	1860
8	35-36	Глины полутвёрдые	1880
9	36-42	Супеси с прослойками суглинков, средней водонасыщенности	1860
10	42-56	Супеси пластичные, средней водонасыщенности	1830
11	56-58	Супесь пластичная	1790
12	58-65	Глина полутвёрдая	1830

Таблица 5.

Наличие грунтовых вод	Глубина залегания, м	Напор, м
Водоносный слой 1	6-10	Безнапорный
Водоносный слой 2	14,2-24,5	Напор 0-10,9м
Водоносный слой 3	34,7-40,7	Напор до 22,2 м



В соответствии проектными решениями здание будет иметь подземные этажи с заглублением на 3,9 м. Таким образом не исключается, что подземный контур здания может перекрывать верховодку.

Факторами, могущими повлиять на гидрогеологические условия, является освоение подземного пространства и устройство термоскважин системы сбора тепла грунта.



## 2. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОХЛАДОСНАБЖЕНИЯ

Теплонасосная система теплохладоснабжения (ТСТ) на базе компрессионных машин предусматривает использование тепловых насосов для покрытия тепловой и холодильной нагрузок с целью снижения энергопотребления здания. Тепловые насосы централизованно в теплонасосном тепловом узле (в помещении ИТП) и используют в качестве источника низкопотенциальной энергии вертикальные грунтовые теплообменники – термоскважины (нетрадиционные возобновляемые источники энергии - НВИЭ).

Поскольку в системе вентиляции здания уже предусмотрено использование высокоэффективных утилизаторов тепла вытяжного воздуха, а именно роторных регенераторов, использование такого источника низкопотенциальной теплоты для работы тепловых насосов, как тепло вентвыбросов (вторичный энергетический ресурс – ВЭР), в данном случае не представляется целесообразным.

Основными составляющими теплонасосной системы являются сами тепловые насосы и система сбора низкопотенциальной теплоты грунта.

Центральный элемент системы - тепловой насос, который при работе с грунтом позволяет получить порядка 2,5÷4,2 кВт тепла (в зависимости от режима) на каждый затраченный киловатт электроэнергии, одновременно с этим вырабатывая холод.

Для сбора теплоты грунта используются грунтовые теплообменники, представляющие собой помещённые в глухие вертикальные скважины Ø151 мм две U-образные петли из полиэтиленовых труб наружным диаметром 32 мм, внутри которых циркулирует теплоноситель (40%-ный водный раствор пропиленгликоля) без массообмена с окружающим грунтовым массивом.

Применение антифриза обусловлено возможностью работы ССНТГ в отрицательном диапазоне температур теплоносителя. Использование пропиленгликоля обусловлено его большей по сравнению с этиленгликолем безопасностью для человека и окружающей среды, что является важным фактором, учитывая глубину бурения скважин для грунтовых теплообменников и близость водоносных горизонтов питьевого качества, к обеспечению защиты которых от загрязнения в соответствии с природоохранным законодательством предъявляются повышенные требования.

Таким образом, теплоноситель, повысивший свою температуру в грунтовых теплообменниках, направляется в испаритель теплового насоса, где отдаёт тепло, после чего циркуляционным насосом подаётся обратно в грунт.

## **2.1 ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ СБОРА ТЕПЛА ГРУНТА**

На текущем этапе производится предварительное оценочное определение эксплуатационных характеристик системы сбора низкопотенциального тепла грунта исходя из усреднённых параметров удельного теплосъёма и удельного сброса тепла в грунт. Для оценки удельного теплосъёма с погонного метра длины грунтового теплообменника использовались данные, изложенные в [5] и приведённые в таблице 6. На основании указанных данных для предварительных расчётов была принята величина удельного теплосъёма равная 40 Вт/м. В дальнейшем эта величина подлежит уточнению в ходе проведения численного моделирования режимов работы грунтовых теплообменников.

Таблица 6 [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.		

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 20 Вт/м. Эта величина меньше аналогичной величины для 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 принятая величина удельного теплосброса также подлежит проверке и уточнению.

Результаты оценочных расчётов ССНТГ приведены в таблице 7.

Таблица 7.

№.№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
1	Количество скважин	шт.	450
2	Глубина скважин	м	95
3	Удельный теплосъём с погонного метра (зимний режим)	Вт/м	40
4	Мощность ССНТГ (зимний режим)	кВт	1710
5	Удельная нагрузка для режима свободного охлаждения	Вт/м	20
6	Мощность «пассивного» охлаждения	кВт	855

## 2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ТЕПЛОАСОСНОЙ СИСТЕМЫ

В соответствии с принятыми в проекте внутренних инженерных систем здания решениями потребители тепла, как и потребители холода, делятся на группы в зависимости от температур теплоносителей. Так, в системе теплоснабжения предусмотрено использование теплоносителя на двух температурных уровнях:

- с температурами 35-30 °С для системы отопления (обогреваемые поверхности);
- с температурами 55-40 °С для систем вентиляции (теплоснабжение приточных установок и воздушно-тепловых завес) и горячего водоснабжения.

Таким же образом система холодоснабжения предусматривает подачу холода для двух групп потребителей:

- с температурами 17-20 °С для системы кондиционирования (охлаждаемые поверхности);

- с температурами 7-12 °С для систем вентиляции (охлаждение приточного воздуха) и холодоснабжения вентиляторных доводчиков.

### 2.2.1 Теплоснабжение

Очевидно, что получение тепла на двух температурных уровнях возможно двумя путями:

- Нагревом теплоносителя до максимальной требуемой температуры подачи, то есть до температуры подачи высокотемпературным потребителям. При этом получение необходимой температуры для низкотемпературных систем обеспечивается за счёт снижения температуры теплоносителя либо в специально устанавливаемых теплообменных аппаратах, либо в узлах смешения высокотемпературного теплоносителя с обратным потоком теплоносителя.
- Приготовлением теплоносителя сразу необходимой температуры, то есть сразу получая теплоносители, нагретые до двух необходимых уровней температуры.

Очевидно, что первый вариант требует применения специальных устройств и решений для обеспечения потребностей низкотемпературных потребителей, причём некоторые из них связаны с непроизводительными потерями, в то время как вариант второй позволяет избежать указанных неудобств. Принимая же во внимание, что коэффициент преобразования энергии в теплонасосном цикле тем выше, чем меньше разница температур испарения и конденсации, то есть температур источника и потребителя тепла соответственно, наиболее эффективно с точки зрения экономии энергии было бы иметь обособленную группу оборудования, работающую с повышенным коэффициентом преобразования и снабжающую тепловой энергией низкотемпературные системы. Таким образом, предлагается выделить в

составе теплонасосной системы две группы оборудования, работающие на две группы потребителей в соответствии с требуемыми температурными режимами. Исходя из указанных соображений в дальнейшем расчёт производится отдельно для группы тепловых насосов, работающих на температурном уровне 35-30 °С (низкотемпературные тепловые насосы), и для тепловых насосов, работающих с температурами 55-40 °С (высокотемпературные тепловые насосы).

Основные расчётные параметры теплонасосного оборудования приведены в таблице 8.

Таблица 8.

№.№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
<b>Тепловые насосы низкотемпературные (30-35 °С)</b>			
1	Требуемая мощность	кВт	375
2	Коэффициент преобразования (зимний режим)	-	4,09
3	Холодопроизводительность	кВт	283
4	Электрическая мощность	кВт	92
<b>Тепловые насосы высокотемпературные (40-55 °С)</b>			
5	Требуемая мощность	кВт	1 160
6	Коэффициент преобразования (зимний режим)	-	2,61
7	Холодопроизводительность	кВт	715
8	Электрическая мощность	кВт	445

При проведении расчёта использовались данные по основным техническим характеристикам спирального герметичного компрессора фирмы Copeland на требуемом режиме, рассчитанные по программе Copeland selection software версии 7.40.

Таким образом, низкотемпературные тепловые насосы обеспечивают теплом систему отопления (обогреваемые поверхности), а высокотемпературные - систему вентиляции (теплоснабжение приточных установок и воздушно-тепловых завес) и систему горячего водоснабжения.

Здесь следует отметить, что в соответствии с требованиями к температурному режиму системы ГВС, изложенным в [6], для обеспечения санитарных норм систему ГВС необходимо дополнительно оснастить теплогенерирующим оборудованием, обеспечивающим подогрев теплоносителя до температуры не ниже 61-63 °С. Поскольку в основу проекта заложена идеология отказа от сжигания органического топлива, в качестве такого оборудования могут быть использованы электрические нагреватели. Определим их мощность.

Как ясно из предоставленных исходных данных, в системе ГВС предусматривается суточное аккумулирование, однако для расчёта мощности электронагревателей целесообразно использовать значение не среднечасового за сутки, а максимального часового расхода горячей воды. В отсутствие таких данных примем коэффициент суточной неравномерности потребления горячей воды равным 3. Тогда необходимая мощность электронагревателей при условии нагрева горячей воды до указанных выше температур составит 78 кВт.

В качестве альтернативного решения может быть рассмотрен вариант использования для приготовления горячей воды каскадных тепловых насосов. Данный тип оборудования позволяет производить нагрев воды до температуры 65 °С. При этом каскадный тепловой насос имеет возможность работать в одноступенчатом режиме (переключается в каскад только при необходимости получения 65 °С на выходе) и обеспечивать резервирование в составе группы высокотемпературных тепловых насосов.



## 2.2.2 Холодоснабжение

Аналогично с ситуацией по теплу, потребители холода также разделены на две группы. В этой связи предлагается холодоснабжение этих двух групп потребителей обеспечить за счёт разных источников холода.

Холодоснабжение высокотемпературных (17-20 °С) систем кондиционирования - охлаждаемых поверхностей - возможно осуществить путём применения так называемого «пассивного» охлаждения. Это означает, что для холодоснабжения будут использоваться естественные источники холода в отличие от «активного» охлаждения, где источником холода являются холодильные машины того или иного типа. В рассматриваемом случае в качестве источника «пассивного» холода может выступать грунт, причём такое его использование будет одновременно иметь два положительных эффекта.

Во-первых, таким образом обеспечивается охлаждение за счёт возобновляемого источника энергии, что даёт существенную экономию эксплуатационных затрат и в значительной степени может сказаться на создании позитивного имиджа проекта.

Во-вторых, использование грунта в качестве источника холода позволяет повысить коэффициент трансформации тепловых насосов в зимнем режиме. Поскольку зимой мы извлекаем из грунта тепло, направляя его на теплоснабжение помещений, мы вместе с тем производим аккумуляцию в грунте холода, который и можем использовать в летний период для нужд кондиционирования. При этом в летнем режиме мы организуем извлечение из грунта холода и закачку в него излишков тепла, отводимых из здания системой кондиционирования. Таким образом мы восстанавливаем температурный потенциал грунта с тем, чтобы к началу следующего отопительного периода мы бы могли вновь иметь грунт с достаточно высокой температурой, что положительно скажется на

коэффициенте преобразования тепловых насосов и, как следствие, позволит сократить затраты энергии на теплоснабжение.

Для холодоснабжения высокотемпературных систем кондиционирования требуется 800 кВт холода, а по предварительным расчётам, представленным выше в таблице 5, получено, что за счёт ССНТГ мы можем обеспечить покрытие нагрузки 855 кВт. Как видно из представленных цифр, здесь наблюдается очень хорошее согласование значений, причём мы даже имеем некоторый запас по мощности охлаждения, из чего можно сделать вывод, что предложение обеспечить «пассивное» охлаждение здания за счёт холодоресурса грунта является вполне обоснованным.

Вторая группа потребителей холода, в которую входят система вентиляции (охлаждение приточного воздуха) и система холодоснабжения вентиляторных доводчиков, требуют подачи теплоносителя с традиционными для систем холодоснабжения температурами 7-12 °С. Для обеспечения их холодом предлагается использовать теплонасосное оборудование.

При работе тепловых насосов в режиме холодоснабжения им, как и иным холодильным машинам, требуется организовать отвод тепла от конденсаторов. В рассматриваемом случае часть вырабатываемого тепла (100 кВт) направляется на подогрев горячей воды, остальные следует сбрасывать в окружающую среду. Для сброса существуют две возможности: сбрасывать тепло в грунт и сбрасывать его в атмосферу. Сброс в грунт в данном варианте противоречит принятому решению по использованию холодоресурса грунта для обеспечения работы высокотемпературных систем кондиционирования – охлаждаемых поверхностей. Таким образом, единственным вариантом решения оказывается сброс тепла в атмосферу. Поскольку в качестве теплоносителя внутренних инженерных систем принят

пропиленгликоль, использование открытых градирен испарительного типа исключается, для дальнейшего рассмотрения принимаем сухие охладители.

Расчётные параметры тепловых насосов при работе в летнем режиме представлены в таблице 9. В расчёте принято, что низкотемпературные тепловые насосы переводятся на более высокий температурный режим по контуру конденсаторов для обеспечения гарантированного сброса тепла в атмосферу, поскольку температура окружающего воздуха может достигать 36 °С. Изменение режимов работы высокотемпературных тепловых насосов не требуется, поскольку уровень температур контура конденсатора таков, что позволяет сбрасывать тепло в атмосферу через сухие охладители даже при высоких температурах наружного воздуха. Снижение температуры возможно, при этом повысится эффективность работы оборудования в режиме охлаждения, но это решение сопряжено с дополнительными сложностями. С переводом этого оборудования в режим 40-45 °С потребуется использование другого насосного оборудования, увеличатся габариты сухих охладителей, а главное, часть высокотемпературных тепловых насосов используется для приготовления горячей воды, и поэтому перевод их в режим пониженных температур не представляется целесообразным.

При проведении расчёта использовались данные по основным техническим характеристикам спирального герметичного компрессора фирмы Copeland на требуемом режиме, рассчитанные по программе Copeland selection software версии 7.40.

Таблица 9.

№№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
Тепловые насосы низкотемпературные (40-45 °С)			
1	Холодопроизводительность в летнем режиме (12-7 °С)	кВт	379
2	Холодильный коэффициент	-	3,32
3	Теплопроизводительность	кВт	494
4	Электрическая мощность	кВт	114
Тепловые насосы высокотемпературные (40-55 °С)			
5	Холодопроизводительность в летнем режиме (12-7 °С)	кВт	1 021
6	Холодильный коэффициент	-	2,35
7	Теплопроизводительность	кВт	1 455
8	Электрическая мощность	кВт	434
9	<b>Суммарная холодопроизводительность</b>	<b>кВт</b>	<b>1400</b>
10	Необходимая мощность холодоснабжения (12-7 °С)	кВт	1370

Параметры сухих охладителей представлены в таблице 10.

Таблица 10.

№.№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
Сухие градирни (45-40 °С)			
1	Тепловая мощность	кВт	494
2	Электрическая мощность	кВт	14
Сухие градирни (55-40 °С)			
3	Тепловая мощность	кВт	1 355
4	Электрическая мощность	кВт	36

Как видно из таблицы 9, тепловые насосы полностью обеспечивают необходимую нагрузку холодоснабжения и установка дополнительного холодильного оборудования не требуется.

В результате проведённых расчётов можно сделать вывод по общей идеологии системы холодоснабжения, на основе которой в дальнейшем можно будет определять конфигурацию теплонасосной системы для её работы в летнем режиме.

В течение года предпочтительно максимально использовать холодоресурс грунта и обеспечивать таким образом «пассивное» холодоснабжение здания с минимальными затратами энергии.

Дополнительным постоянным источником холода являются высокотемпературные тепловые насосы, обеспечивающие нагрузку ГВС. Вырабатываемый ими холод является как бы побочным продуктом в процессе подогрева воды, поэтому может рассматриваться как условно бесплатный как с точки зрения затрат энергии, так и с точки зрения финансовой.

Следующим по энергетической эффективности мероприятием холодоснабжения является использование низкотемпературных тепловых насосов.

Наименее эффективным будет использование для производства холода высокотемпературных тепловых насосов, не участвующих в приготовлении горячей воды. Это оборудование следует стараться использовать в последнюю очередь.

### 2.2.3 ССНТГ

Суммарная нагрузка на ССНТГ в зимнем режиме в соответствии с данными таблицы 8 составляет  $283+715=998$  кВт при располагаемой мощности в 1710 кВт (смотри таблицу 7). Запас мощности ССНТГ в зимнем режиме составляет 712 кВт, что составляет 41,6% от располагаемой величины.

В летнем режиме для пассивного охлаждения требуется 800 кВт холода, тогда как по данным таблицы 7 ССНТГ может обеспечить покрытие нагрузки 855 кВт.

### 2.2.4 Электроснабжение

Предварительные электрические нагрузки теплонасосной системы приведены в таблице 11.

Таблица 11.

№.№	НАИМЕНОВАНИЕ	ЕД. ИЗМ.	ВЕЛИЧИНА
Зимний режим			
1	Тепловые насосы низкотемпературные (30-35 °С)	кВт	92
2	Тепловые насосы высокотемпературные (40-55 °С)	кВт	445
3	Мощность электродоводчика ГВС	кВт	78
4	Вспомогательное оборудование	кВт	97
5	<b>Итого</b>	<b>кВт</b>	<b>712</b>
Летний режим			
6	Тепловые насосы низкотемпературные (30-35 °С)	кВт	114
7	Тепловые насосы высокотемпературные (40-55 °С)	кВт	434
8	Вспомогательное оборудование		104
9	Мощность электродоводчика ГВС	кВт	78
10	Сухие градирни (45-40 °С)	кВт	14
11	Сухие градирни (55-40 °С)	кВт	36
12	<b>Итого</b>	<b>кВт</b>	<b>780</b>

### 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 12 приведены данные о теплофизических свойствах грунтов, взятые из СНиП 2.02.04-88.

Таблица 12 (начало).

Плотность сухого грунта $\rho_{дх}, \rho_{г}$	Суммарная влажность грунта $W_{гг}$ , доли единицы	Теплопроводность грунта, Вт/(м°С), [ккал/(м ч °С)]								Объёмная теплоёмкость грунта, Дж (м <sup>3</sup> ·°С·10 <sup>-6</sup> ) ккал (м <sup>3</sup> ·°С)	
		Пески разной крупности и гравелистые		Супеси пылеватые		Суглинки и глины		Заторфо- ванные грунты и торфы		$C_{гн}$	$C_{гг}$
		$\lambda_{гн}$	$\lambda_{гг}$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_{гг}$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_{гг}$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_{гг}$		
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 12 (окончание).

Плотность сухого грунта $\rho_{дх}, \rho_{г}$	Суммарная влажность грунта $W_{\Sigma}$ , доли единицы	Теплопроводность грунта, Вт/(м·°С), [ккал/(м·ч·°С)]								Объёмная теплоёмкость грунта, $\frac{Дж}{(м^3 \cdot ^\circ С \cdot 10^{-6})}$ $\frac{ккал}{(м^3 \cdot ^\circ С)}$	
		Пески разной крупности и гравелистые		Супеси пылеватые		Суглинки и глины		Заторфо- ванные грунты и торфы			
		$\lambda_{гн}$	$\lambda_f$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_f$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_f$	$\lambda_{гн}$	$\lambda_f$	$C_{гн}$	$C_f$
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 12:

$\lambda_{th}, \lambda_{f}$  - 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 неиссякаемым источником тепловой энергии. При отборе тепла Земли в процессе теплообмена участвуют её верхние слои, простирающиеся на глубину до 100 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 13 используются данные известного американского справочника ASHRAE [13].

При сравнении данных таблиц 12 и 13 видно, что данные американских и российских справочников довольно адекватны. Для точного определения теплопроводности грунтов необходимо проводить экспериментальные исследования теплопроводности в месте предполагаемого строительства.

Таблица 13.

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 5). 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).

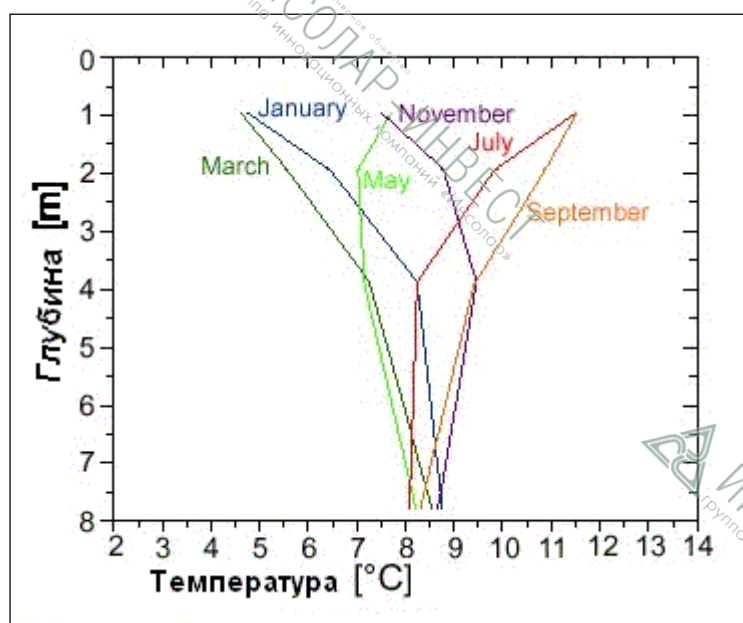


Рисунок 5. Распределение температур грунта по глубине

Справочник ASHRAE [13] 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, непосредственно примыкающему к площадке строительства, представленными в таблице 4.

В таблице 14 приведены данные по теплопроводности и объёмной теплоёмкости в талом и мёрзлом состоянии слоёв грунта, составляющих грунтовый массив системы теплосбора, а в таблице 15 - использованные в дальнейших расчётах значения этих параметров (теплопроводности и теплоёмкости грунта), полученные осреднением (с учётом удельного веса мощности слоя в общей длине термоскважины) данных таблицы 14. Грунтовые воды в расчёте не учитывались, что обеспечивает некоторый запас по реальным характеристикам ССНТП по сравнению с расчётными.

Расчётные значения теплопроводности и объёмной теплоёмкости грунтового массива системы теплосбора в талом и мёрзлом состоянии, приведённые в таблице 15, получены осреднением.

Таблица 14.

Номер слоя от поверхности грунта	Мощность слоя, м	Тип и характеристика грунта	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность грунта, Вт/( м*°С)		Объёмная теплоёмкость грунта, кДж / (м <sup>3</sup> *°С)	
				$\lambda_{гв}$	$\lambda_{гг}$	$C_{гв}$	$C_{гг}$
1	0-2	Современные техногенные отложения: песок влажный с суглинками		2,67	2,84	3170	2410
2	2-3	Глина тугопластичная	1920	1,28	1,39	2680	2260
3	3-10	Пески средней влажности	1810	2,26	2,62	2780	2260
4	10-20	Суглинки с прослойками песков, влажные	1980	1,28	1,39	2680	2260
5	20-22	Суглинки полутвёрдые маловлажные	2050	1,28	1,39	2680	2260
6	22-29	Суглинки полутвёрдые, с линзами песка обводнённого	2080	1,28	1,39	2680	2260
7	29-35	Супеси пластичные средней влажности	1860	1,86	1,97	3170	2410
8	35-36	Глины полутвёрдые	1880	1,39	1,57	2780	2260
9	36-42	Супеси с прослойками суглинков, средней водонасыщенности	1860	1,74	1,86	2680	2260
10	42-56	Супеси пластичные, средней водонасыщенности	1830	1,74	1,86	2680	2260
11	56-58	Супесь пластичная	1790	1,74	1,86	2680	2260
12	58-65	Глина полутвёрдая	1830	1,28	1,39	2680	2260

Теплопроводность грунта, Вт/( м*°С)		Объёмная теплоёмкость грунта, кДж / ( м <sup>3</sup> *°С)	
$\lambda_{гн}$	$\lambda_{гг}$	$C_{гн}$	$C_{гг}$
1,64	1,8	2753	2279

### 3.2 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕРМОСКВАЖИН НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ГРУНТА

При оценке влияния конструктивных особенностей термоскважин на интенсивность извлечения тепловой энергии из грунта исследовались три конструкции одиночной термоскважины, представленные на рисунке 6. Здесь вариант 3 – конструкция грунтовых теплообменников, используемая на объекте.



Рисунок 6. 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 ГИК «ИНСОЛАР».



Результаты расчётов представлены на рисунках 7÷10. Расчёты проводились для температуры грунта  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температуры теплоносителя минус  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

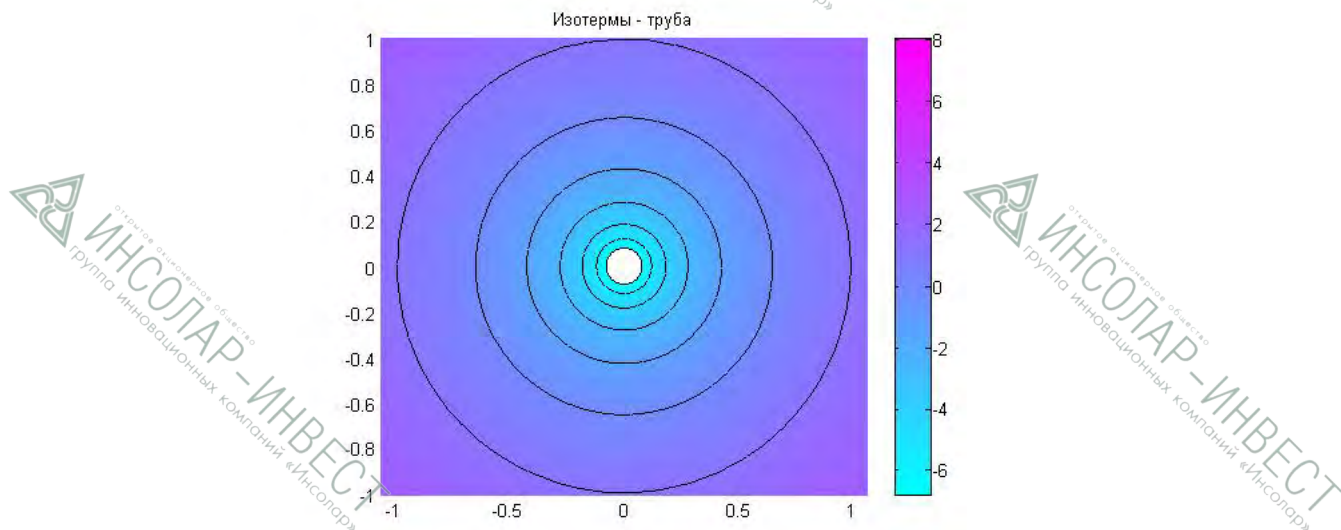


Рисунок 7. Температурное поле в грунте при эксплуатации коаксиальной термоскважины

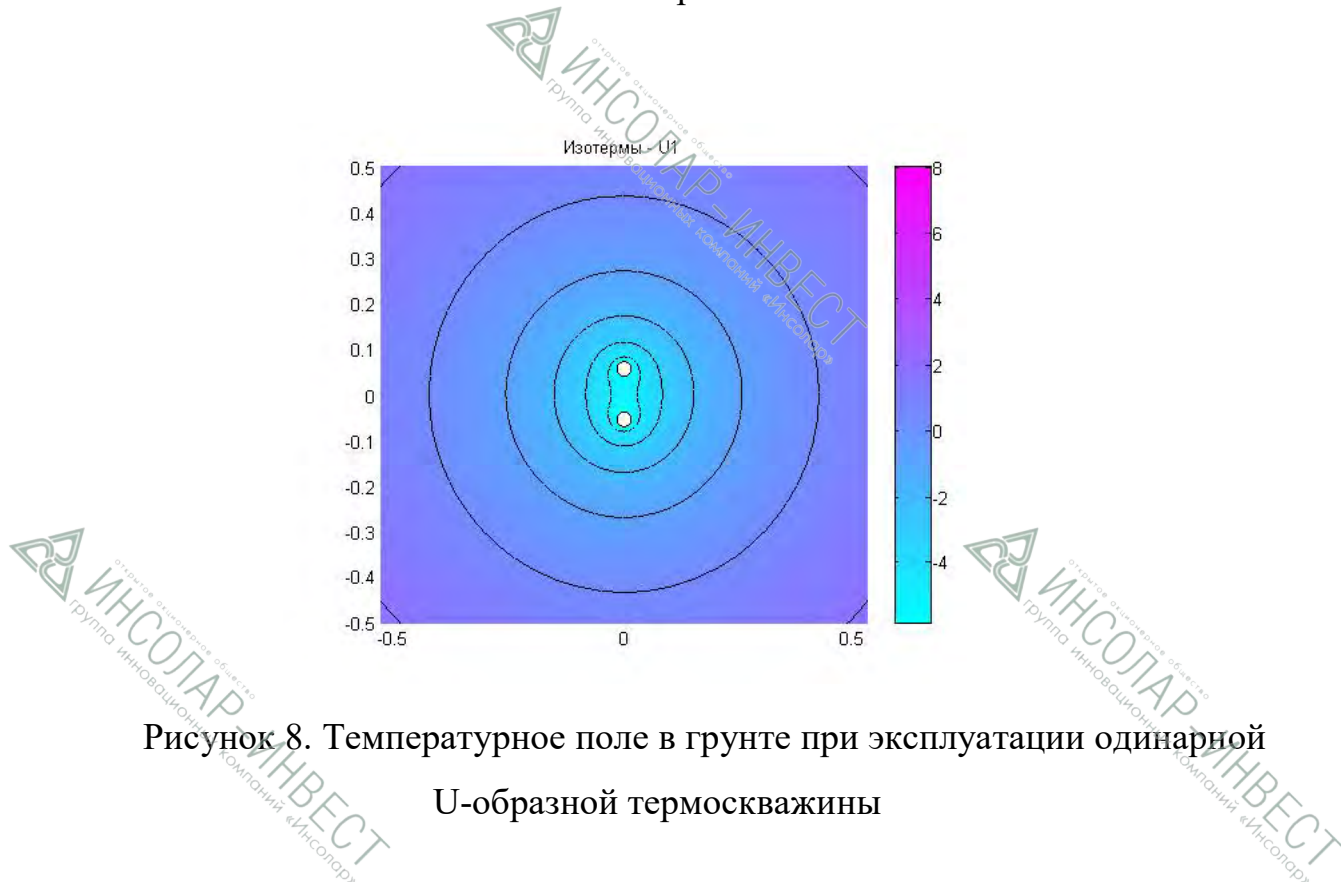


Рисунок 8. Температурное поле в грунте при эксплуатации одинарной U-образной термоскважины

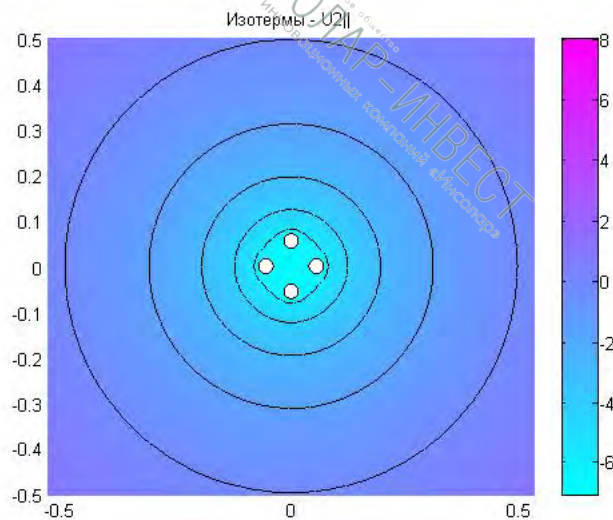


Рисунок 9. Температурное поле в грунте при эксплуатации двойной U-образной термоскважины

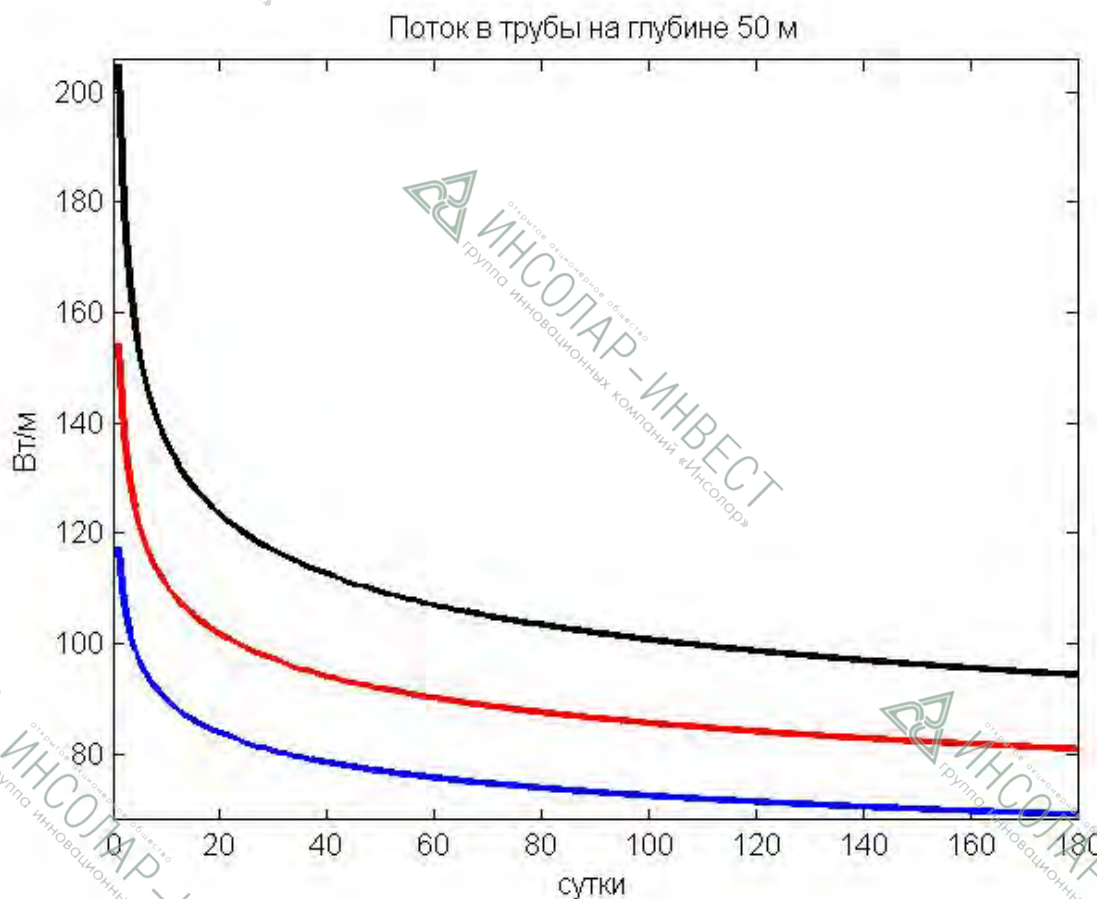


Рисунок 10. Падение интенсивности удельного теплосъёма термоскважин во времени. Чёрная линия – вариант 1, синяя – вариант 2, красная – вариант 3.

Результаты расчётов, представленные на рисунке 10, показывают, что к 15 марта (примерно на 135÷140 сутки отопительного сезона), когда тепловая нагрузка на систему теплосбора начинает снижаться, интенсивность удельного теплосъёма для термоскважины, выполненной по варианту 2, в 1,45 раза, а термоскважины, выполненной по варианту 3, в 1,2 раза ниже, чем у термоскважины, выполненной по варианту 1. Таким образом, применение металлических коаксиальных термоскважин позволит как минимум на 20% уменьшить требуемое количество грунтовых теплообменников.

Стоит отметить, что применение стальных коаксиальных конструкций термоскважин является наиболее оправданным в случае работы грунта при отрицательных температурах. При этом значительно экономится площадь земельного участка, отводимого под размещение ССНТГ, однако и снижается коэффициент преобразования тепловых насосов. В нашем же случае мы ограничены положительными значениями температур грунта, поскольку в ином случае возможно возникновение проблем с прочностью фундаментов, вызываемых морозным пучением грунта. 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. Учитывая также, что для коаксиальных термоскважин требуется больший объём теплоносителя, применение такой конструкции на рассматриваемом объекте признаётся нецелесообразным.

### 3.3 ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ СИСТЕМЫ СБОРА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ГРУНТА В ПРЕДЕЛАХ ПОЛЯ ТЕРМОСКВАЖИН

При оценке совместной работы термоскважин, расположенных в поле системы теплосбора, рассматривалось поле термоскважин 10 на 20 термоскважин, выполненных по варианту 3 (смотри рисунок 6) с шагом между термоскважинами, равным 6 м.

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

Результаты расчётов представлены на рисунках 11÷15.

На рисунке 11 представлена картина распределения температур в поле термоскважин на конец отопительного сезона.

На рисунках 12 и 13 чёрная пунктирная линия – одиночная термоскважина такой же конструкции (эталон).

На рисунке 14 параметр  $k$  – показатель эффективности термоскважины, равный отношению величин удельных теплосъёмов 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;

Разными цветами обозначены разные ряды термоскважин.

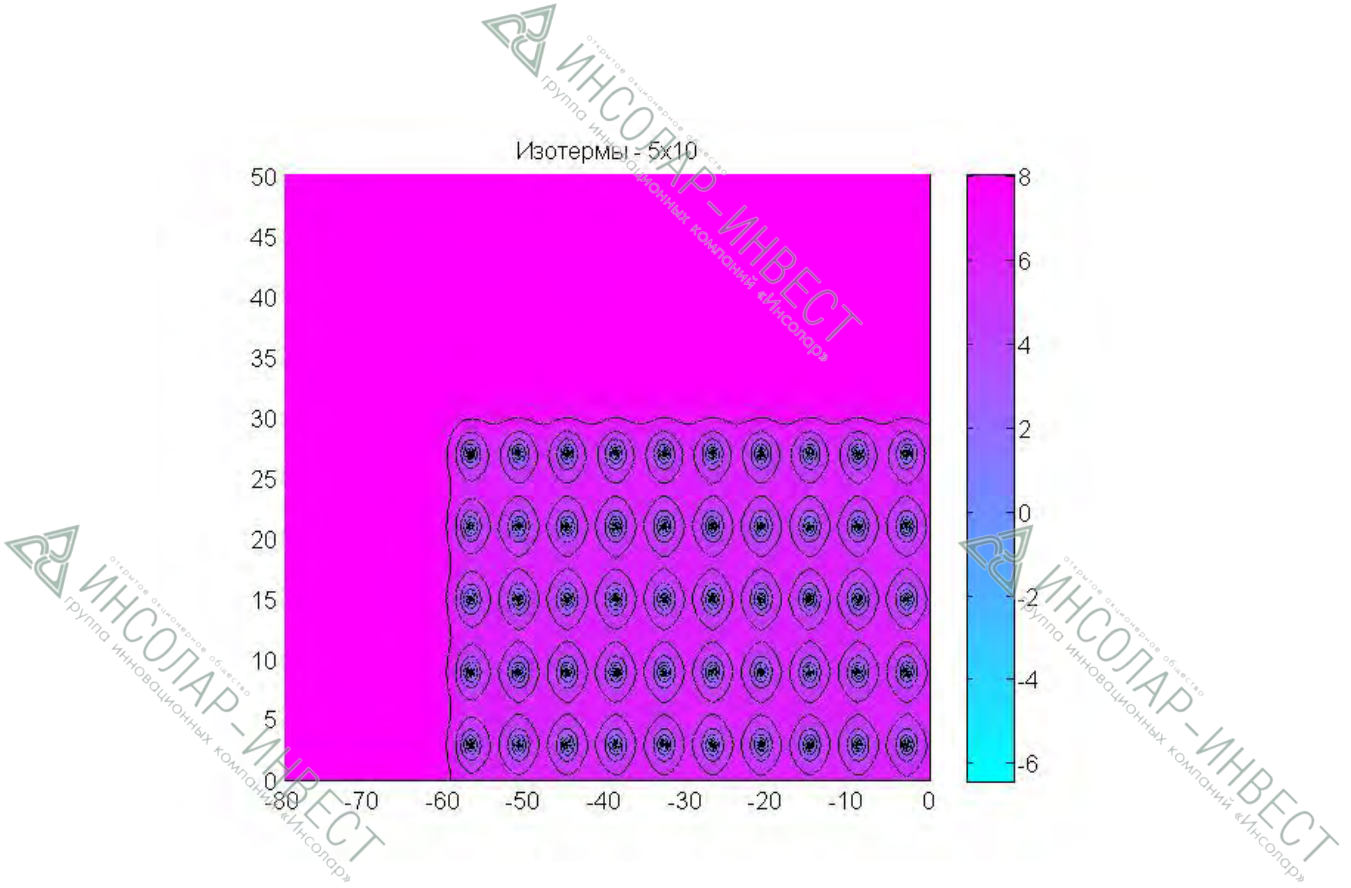


Рисунок 11. Температурное поле в грунте при эксплуатации термоскважин.

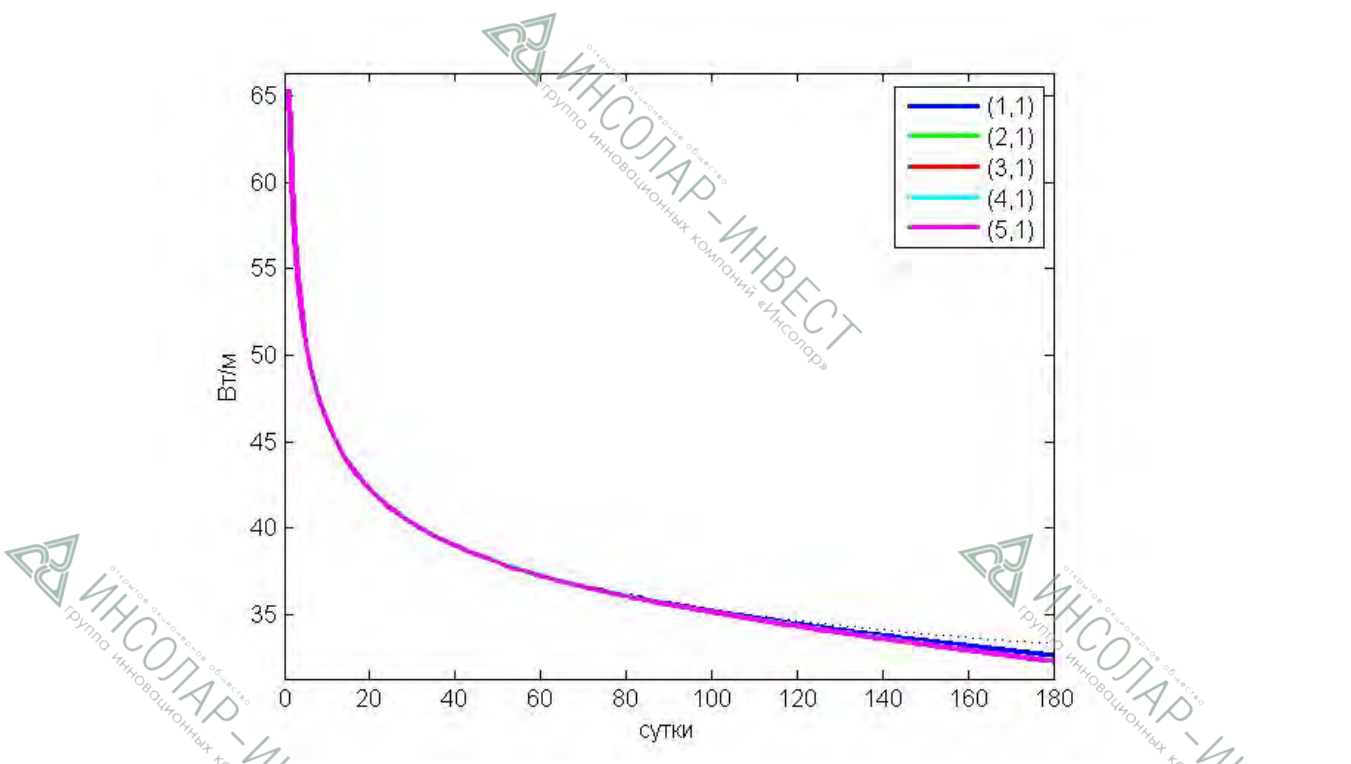


Рисунок 12. Падение интенсивности удельного теплосъёма термоскважин во времени (первый номер - номер в «строке», второй - в «столбце»).

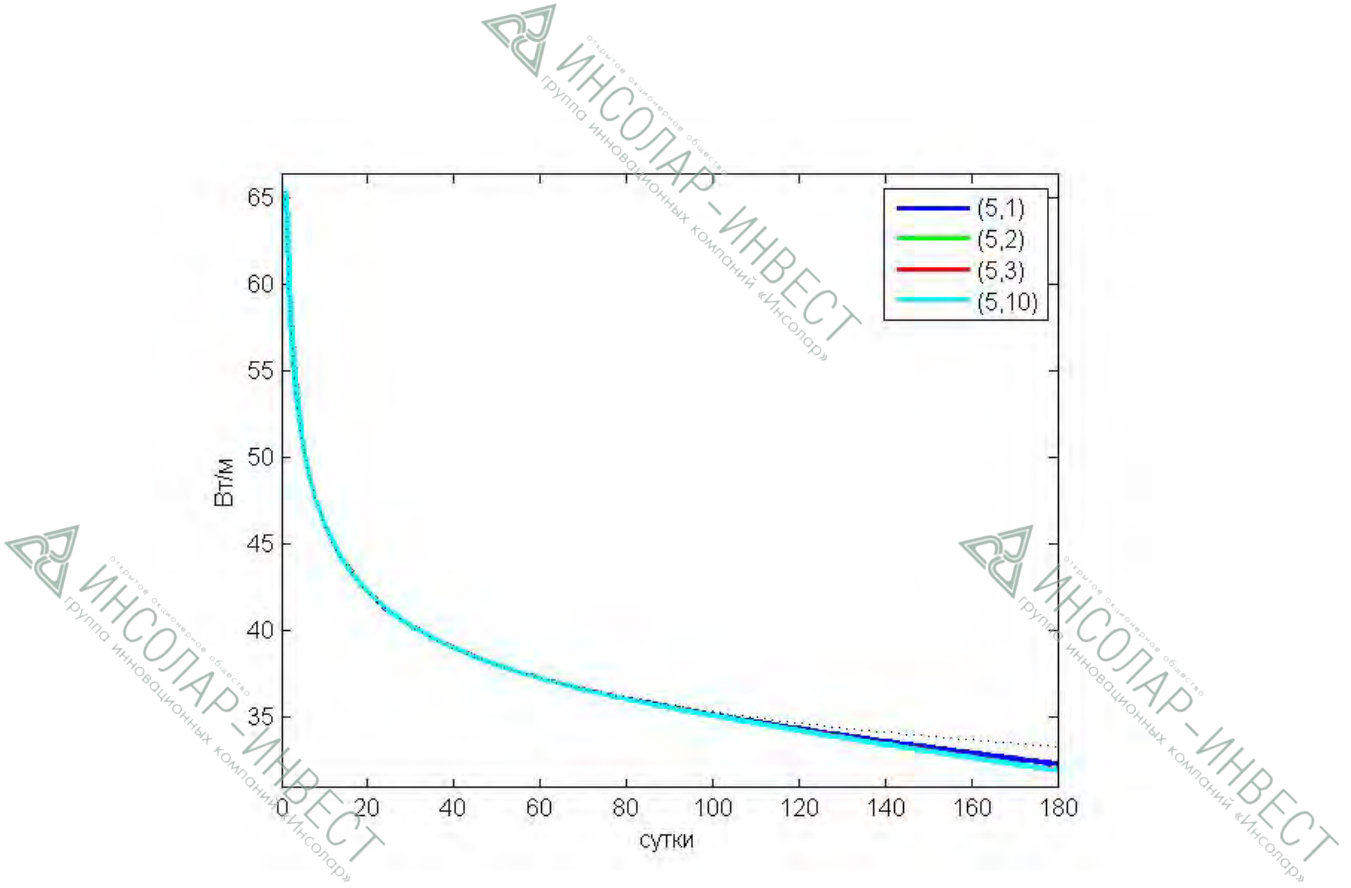


Рисунок 13. Падение интенсивности удельного теплосъёма термоскважин во времени (первый номер - номер в «строке», второй - в «столбце»).

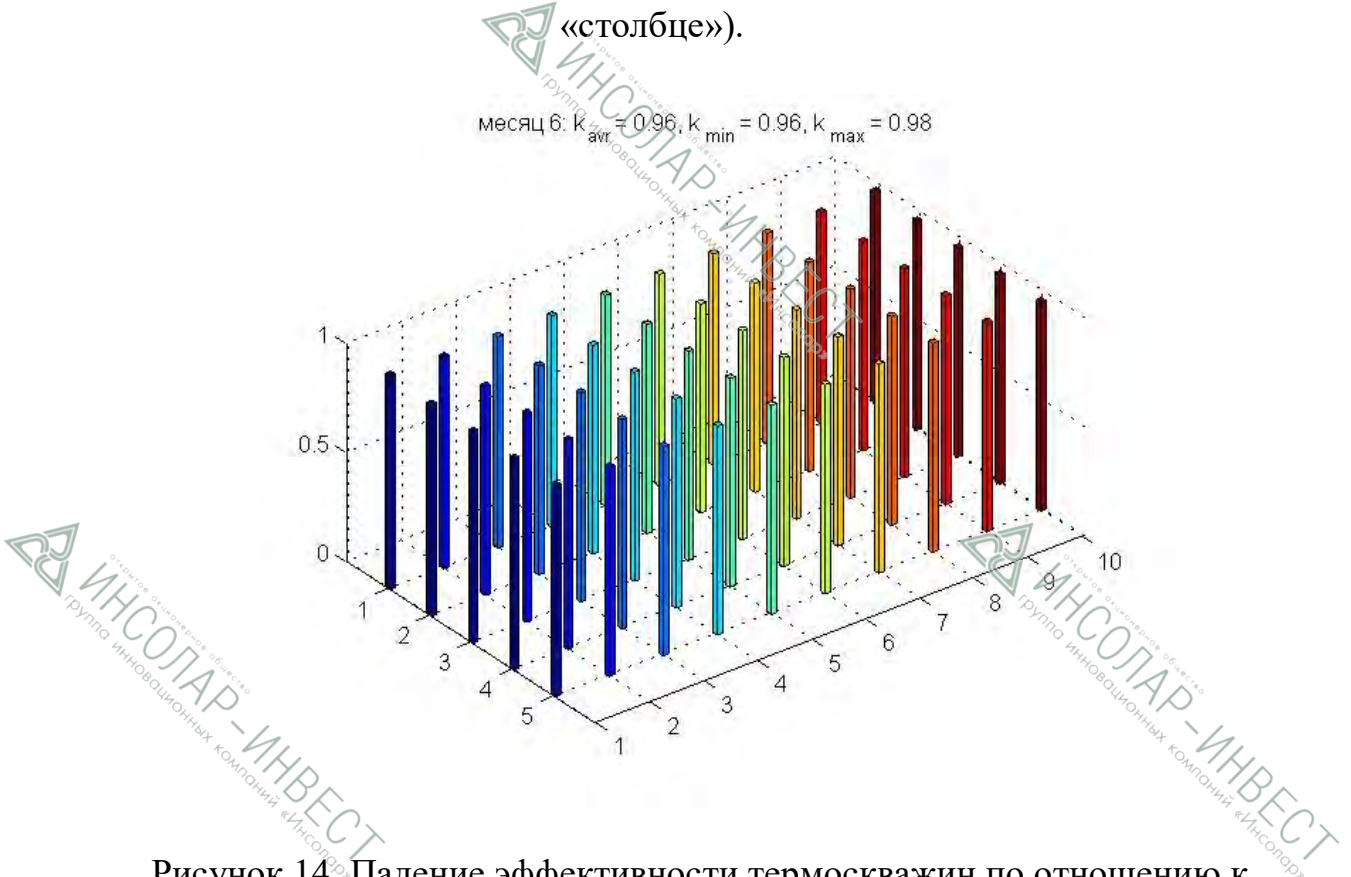


Рисунок 14. Падение эффективности термоскважин по отношению к одиночной термоскважине за 6 месяцев эксплуатации.

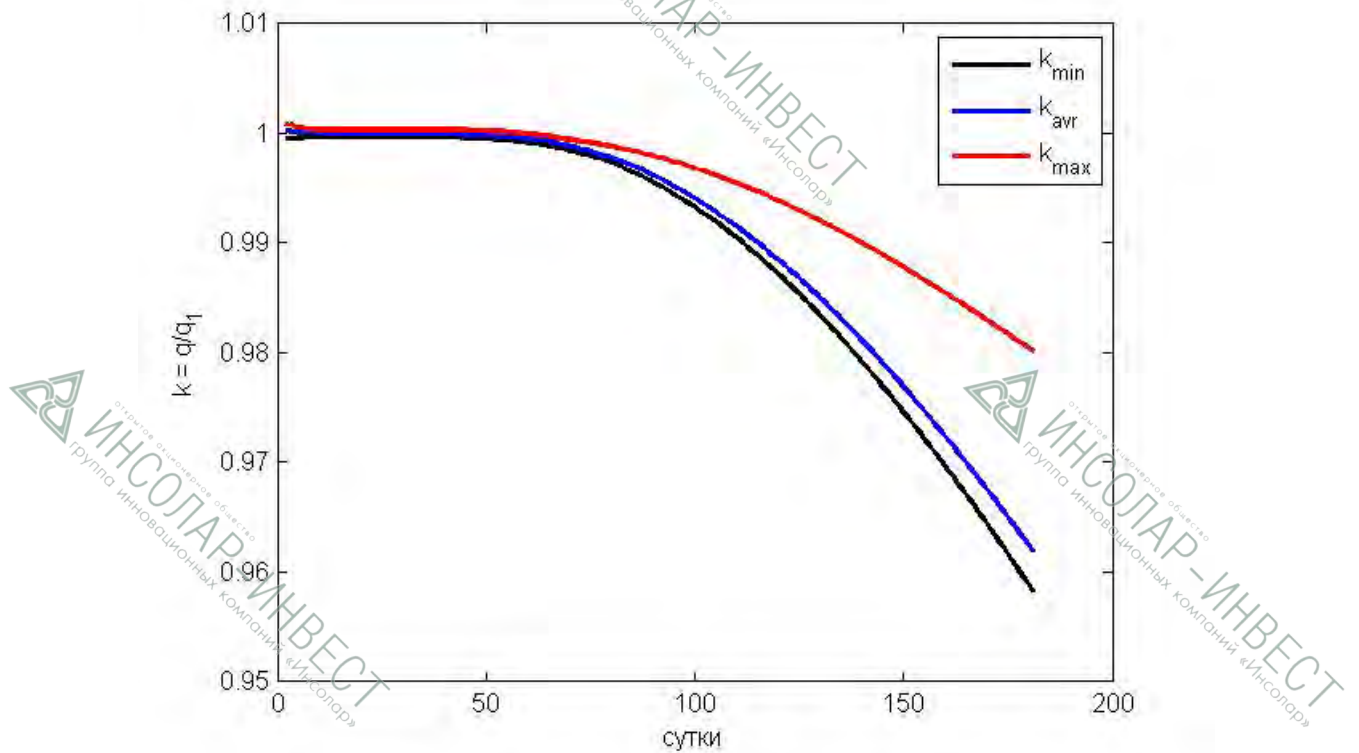


Рисунок 15. Изменение показателя эффективности  $k$  во времени (обозначения те же, что и на рисунке 14).

Результаты расчётов, представленные на графиках, достаточно наглядно показывают, что при совместной работе термоскважин в поле системы теплосбора многофункционального здания термоскважины, находящиеся в центре поля, могут иметь теплосъём на 4% ниже, чем у единичной термоскважины в тех же условиях. Для проведения дальнейших расчётов коэффициент взаимного теплового влияния термоскважин принят равным 1,1. Важной особенностью полученных результатов является тот факт, что взаимное тепловое влияние термоскважин начинает сказываться только после 60 суток. Этот факт полезен для разработки алгоритма включения термоскважин в работу (на основе принадлежащего ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» патента).

### **3.4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТЕРМОСКВАЖИН И ТЕПЛОНАСОСНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ЦЕЛОМ**

При моделировании теплового режима термоскважин расчёты проводились для одной термоскважины, к которой, соответственно, были приведены все нагрузки, в том числе были учтены понижающие коэффициенты, определённые в предыдущих параграфах. Расчёты велись для поля из 300 термоскважин рабочей длиной 95 метров и конструктивным решением по варианту 3 (смотри рисунок 6).

Моделирование осуществлялось с помощью разработанного в ГИК «ИНСОЛАР» программного комплекса «HEATPUMP».

#### **3.4.1 Цель проведения численного моделирования**

Целью проведения численного моделирования является расчётное определение необходимого количества термоскважин для работы системы в режимах:

- извлечение тепла из грунта;
- сброс в грунт тепла с конденсаторов тепловых насосов;
- «пассивное» охлаждение.

Расчёты проводились для двух вариантов:

- Теплоснабжение и пассивное охлаждение за счёт ССНТГ. Мощность пассивного охлаждения 800 кВт, температурный режим  $17 \div 20$  °С, теплоноситель – водный раствор пропиленгликоля;
- Теплоснабжение и сброс тепла с конденсаторов тепловых насосов. Мощность сброса тепла составляет 2573 кВт на режиме  $35 \div 25$  °С, теплоноситель – водный раствор пропиленгликоля.



Для обоих вариантов расчётная тепловая нагрузка составляет 1535 кВт, из них 100 кВт – нагрузка ГВС.

Нагрузка холодоснабжения охлаждаемых поверхностей 800 кВт на режиме  $17 \div 20$  °С, нагрузка охлаждения приточного воздуха и вентиляторных доводчиков 1370 кВт на режиме  $7 \div 12$  °С.

### 3.4.2 Ограничения

При проведении расчётов были приняты следующие температурные ограничения:

- а) в зимнем режиме расчёт проводить из условия недопущения замораживания грунта, при этом допускается снижение температуры теплоносителя ниже нуля (в ориентировочных пределах минус  $1 \div$  минус  $3$  °С);
- б) в летнем режиме не допускается подача в грунт теплоносителя с температурой выше  $35$  °С (при сбросе тепла с конденсаторов холодильного оборудования);
- в) в режиме «пассивного» охлаждения грунтовый массив не должен прогреваться выше  $15$  °С. Температуры теплоносителя - водного раствора пропиленгликоля -  $20 \div 17$  °С.

### 3.4.3 Нагрузка на системы охлаждения

Поскольку здание имеет значительную степень остекления в помещениях, расположенных на южном и западном фасадах, уже с марта может возникать потребность в охлаждении. Так как в переходные периоды (март-май и сентябрь-октябрь) в здании одновременно присутствует и нагрузка холодоснабжения, и нагрузка теплоснабжения, то предполагается, что холодоснабжение тех помещений, в которых оно в указанный период необходимо, будет осуществляться системой вентиляторных доводчиков за

счёт холода, вырабатываемого тепловыми насосами в процессе теплоснабжения. В наиболее жаркий период года, а именно летом и частично в мае и сентябре, базовой системой подачи холода будут охлаждаемые поверхности, возможно, работающие круглосуточно, а остальные системы будут включаться только в период присутствия людей и работать по потребности.

Нагрузки систем холодоснабжения, принятые для расчёта, приведены в таблице 16.

Таблица 16 (начало).

Месяц		III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
<b>Вариант 1</b>									
Нагрузка на охлаждаемые поверхности, %	День	0	0	50	100	100	100	40	0
	Ночь	0	0	50	100	100	100	40	0
Нагрузка на охлаждаемые поверхности, кВт	День	0	0	400	800	800	800	320	0
	Ночь	0	0	400	800	800	800	320	0
Среднемесячная нагрузка по холоду, кВт		0	0	400	800	800	800	320	0
<b>Среднемесячный сброс тепла, кВт</b>		<b>0</b>	<b>0</b>	<b>400</b>	<b>800</b>	<b>800</b>	<b>800</b>	<b>320</b>	<b>0</b>

Таблица 16 (окончание).

Месяц		III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
<b>Вариант 2</b>									
Нагрузка на системы охлаждения приточного воздуха и вентиляторных доводчиков, %	День	10	20	40	60	90	80	30	10
	Ночь	0	0	0	0	0	0	0	0
Нагрузка на системы охлаждения приточного воздуха и вентиляторных доводчиков, кВт	День	137	274	548	822	1233	1096	411	137
	Ночь	0	0	0	0	0	0	0	0
Среднемесячная нагрузка на системы охлаждения приточного воздуха и вентиляторных доводчиков, кВт		68,5	137	274	411	616,5	548	205,5	68,5
Среднемесячный сброс тепла от систем охлаждения приточного воздуха и вентиляторных доводчиков, кВт		82,6	165,2	330,5	495,7	743,5	660,9	247,8	82,6
Среднемесячный сброс тепла от системы охлаждаемых поверхностей, кВт		0,0	0,0	460,4	920,7	920,7	920,7	368,3	0,0
<b>Суммарный среднемесячный сброс тепла, кВт</b>		<b>82,6</b>	<b>165,2</b>	<b>790,8</b>	<b>1416,4</b>	<b>1664,3</b>	<b>1581,6</b>	<b>616,1</b>	<b>82,6</b>

### 3.4.4 Расчётные нагрузки и результаты расчётов

#### **Вариант 1**

Теплоснабжение - 1435 кВт переменной нагрузки в зависимости от климатических данных, 100 кВт постоянной нагрузки ГВС. 300 двойных U-образных термоскважин из полиэтилена (ПНД) диаметром 32 мм, глубиной 95 м. Холодоснабжение – только для систем пассивного охлаждения.

Нагрузки сброса тепла в скважины по месяцам представлены в таблице 17.

Таблица 17.

Месяц	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
<b>Вариант 1</b>								
Среднемесячный сброс тепла, кВт	0	0	400	800	800	800	320	0

Параметры грунта приняты в соответствии с таблицей 15.

На рисунках 16 и 17 представлены результаты расчётов графиков температур теплоносителя и грунта соответственно. Каждый из параметров вычислен для 1-го и 5-го сезонов эксплуатации системы.

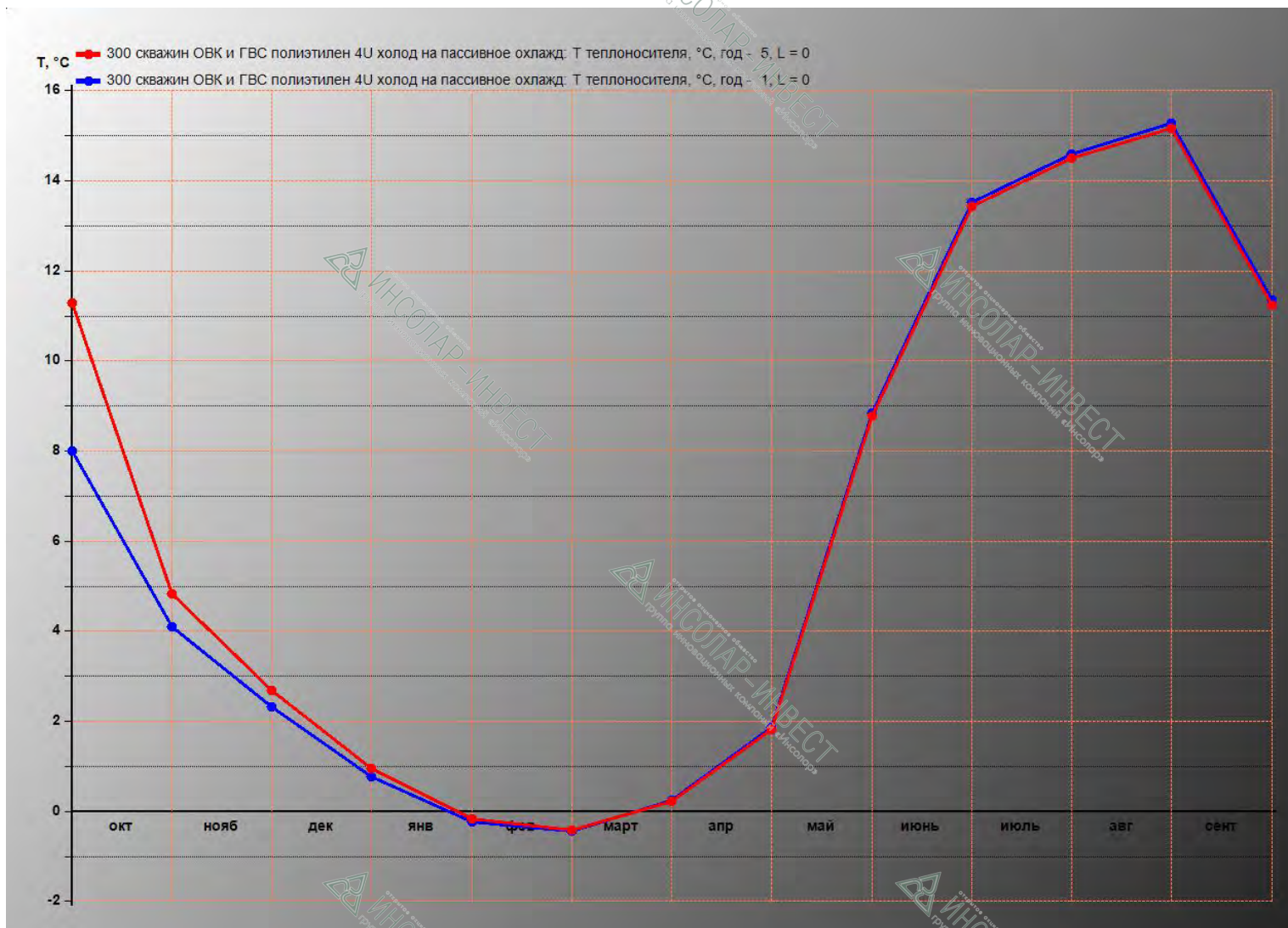


Рисунок 16. Годовое изменение температуры теплоносителя в системе теплосбора. Нагрузка ОВК и ГВС: 1-ый и 5-ый годы эксплуатации.

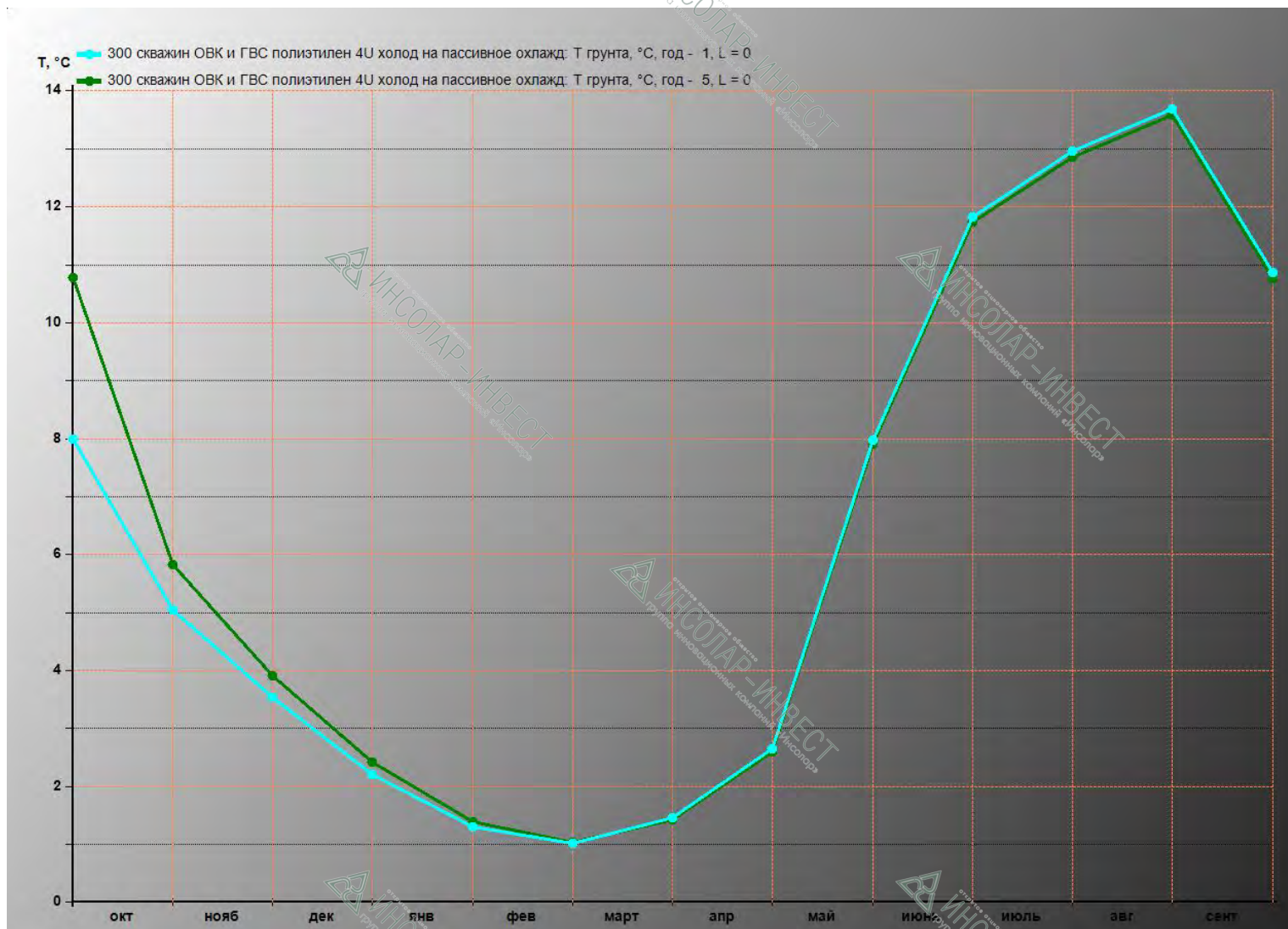


Рисунок 17. Годовое изменение температуры грунта на контакте с термоскважинами. Нагрузка ОВК и ГВС: 1-ый и 5-ый годы эксплуатации.

Как видно из приведённых графиков, температура грунта при рассматриваемом режиме работы теплонасосной системы не опускается ниже нуля, что гарантирует отсутствие дополнительной нагрузки на фундаменты зданий, связанной с морозным пучением грунта при его замораживании. Одновременно с этим температурный режим грунта в летний период таков, что обеспечивает функционирование системы в режиме «пассивного» охлаждения.

### **Вариант 2**

Теплоснабжение - 1435 кВт переменной нагрузки в зависимости от климатических данных, 100 кВт постоянной нагрузки ГВС. 300 двойных U-образных термоскважин из полиэтилена (ПНД) диаметром 32 мм, глубиной 95 м. Холодоснабжение – сброс тепла с конденсаторов холодильного оборудования.

Нагрузки сброса тепла в скважины по месяцам представлены в таблице 18.

Таблица 18.

Месяц	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
<b>Вариант 2</b>								
Суммарный среднемесячный сброс тепла, кВт	82,6	165,2	790,8	1416,4	1664,3	1581,6	616,1	82,6

Максимальная нагрузка сброса тепла 2573 кВт.

Параметры грунта приняты в соответствии с таблицей 15.

На рисунках 18 и 19 представлены результаты расчётов графиков температур теплоносителя и грунта соответственно. Каждый из параметров вычислен для 1-го и 5-го сезонов эксплуатации системы.

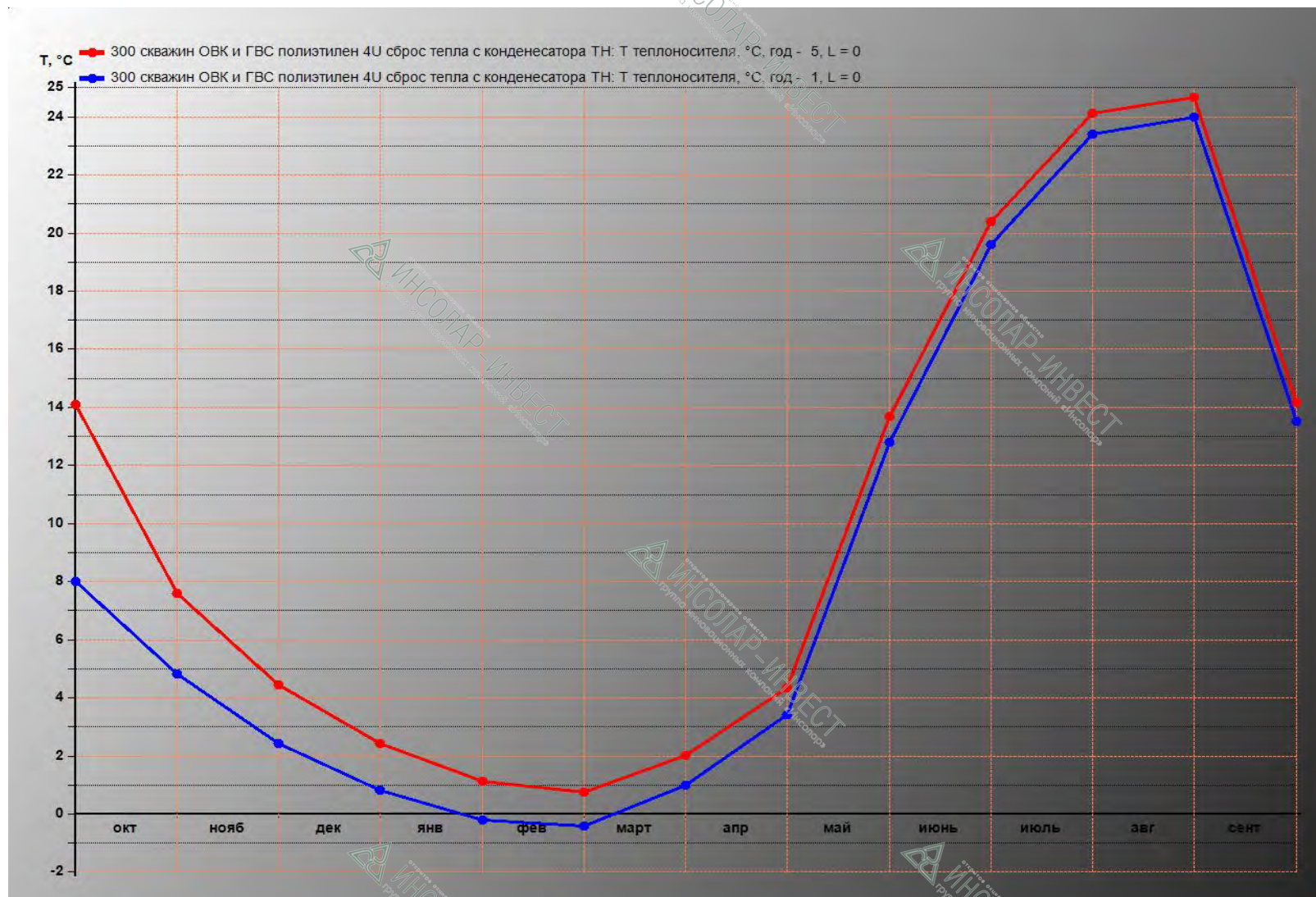


Рисунок 18. Годовое изменение температуры теплоносителя в системе теплосбора. Нагрузка ОВК и ГВС - сброс тепла с конденсатора ТН: 1-ый и 5-ый годы эксплуатации.



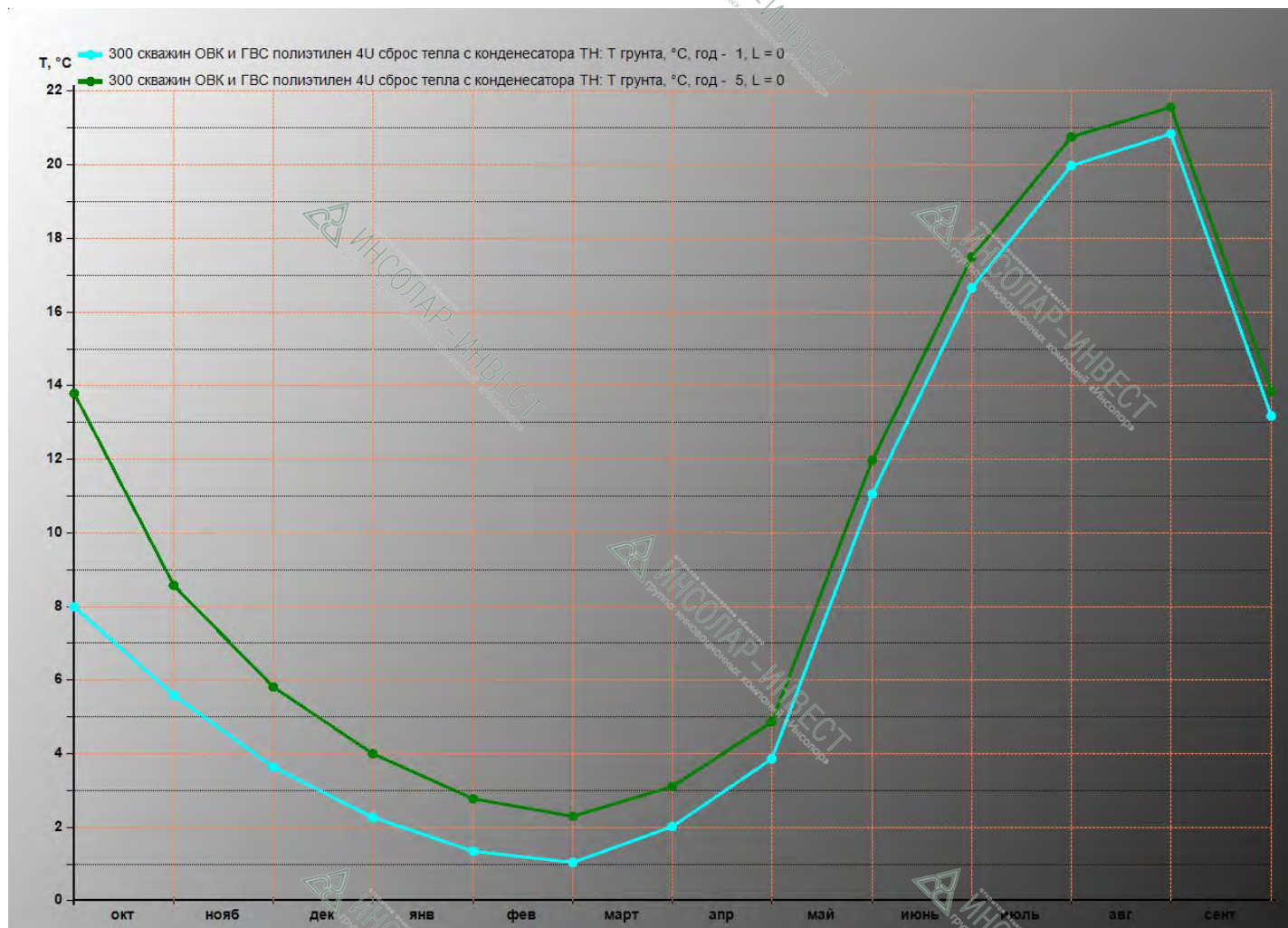


Рисунок 19. Годовое изменение температуры грунта на контакте с термоскважинами. Нагрузка ОВК и ГВС - сброс тепла с конденсатора ТН: 1-ый и 5-ый годы эксплуатации.

Приведённые выше графики показывают, что, как и в предыдущем варианте, температура грунта при таком режиме работы теплонасосной системы остаётся положительной, что гарантирует отсутствие дополнительной нагрузки на фундаменты зданий, связанной с морозным пучением грунта при его замораживании. Одновременно с этим температурный режим грунта в летний период таков, что сброс тепла с конденсаторов тепловых насосов представляется возможным (с точностью до изменения влажностного состояния прилегающих к грунтовым теплообменникам слоёв грунта).

### **Проверочный расчёт**

В этом расчёте рассматривается наихудший с точки зрения гарантированного обеспечения теплоснабжения режим работы ССНТГ. В этом режиме отсутствует сброс тепла в грунт в летний период, то есть восстановление температурного режима грунта возможно только за счёт естественного притока тепла из окружающего массива грунта, радиогенного тепла из нижних слоёв и тепла, поступающего от солнечного излучения.

Теплоснабжение - 1435 кВт переменной нагрузки в зависимости от климатических данных, 100 кВт постоянной нагрузки ГВС. 300 двойных U-образных термоскважин из полиэтилена (ПНД) диаметром 32 мм, глубиной 95 м.

Параметры грунта приняты в соответствии с таблицей 15.

На рисунках 20 и 21 представлены результаты расчётов графиков температур теплоносителя и грунта соответственно. Каждый из параметров вычислен для 1-го и 5-го сезонов эксплуатации системы.

На рисунке 22 показаны ожидаемые на 5-й год эксплуатации величины коэффициента преобразования энергии в теплонасосном цикле.

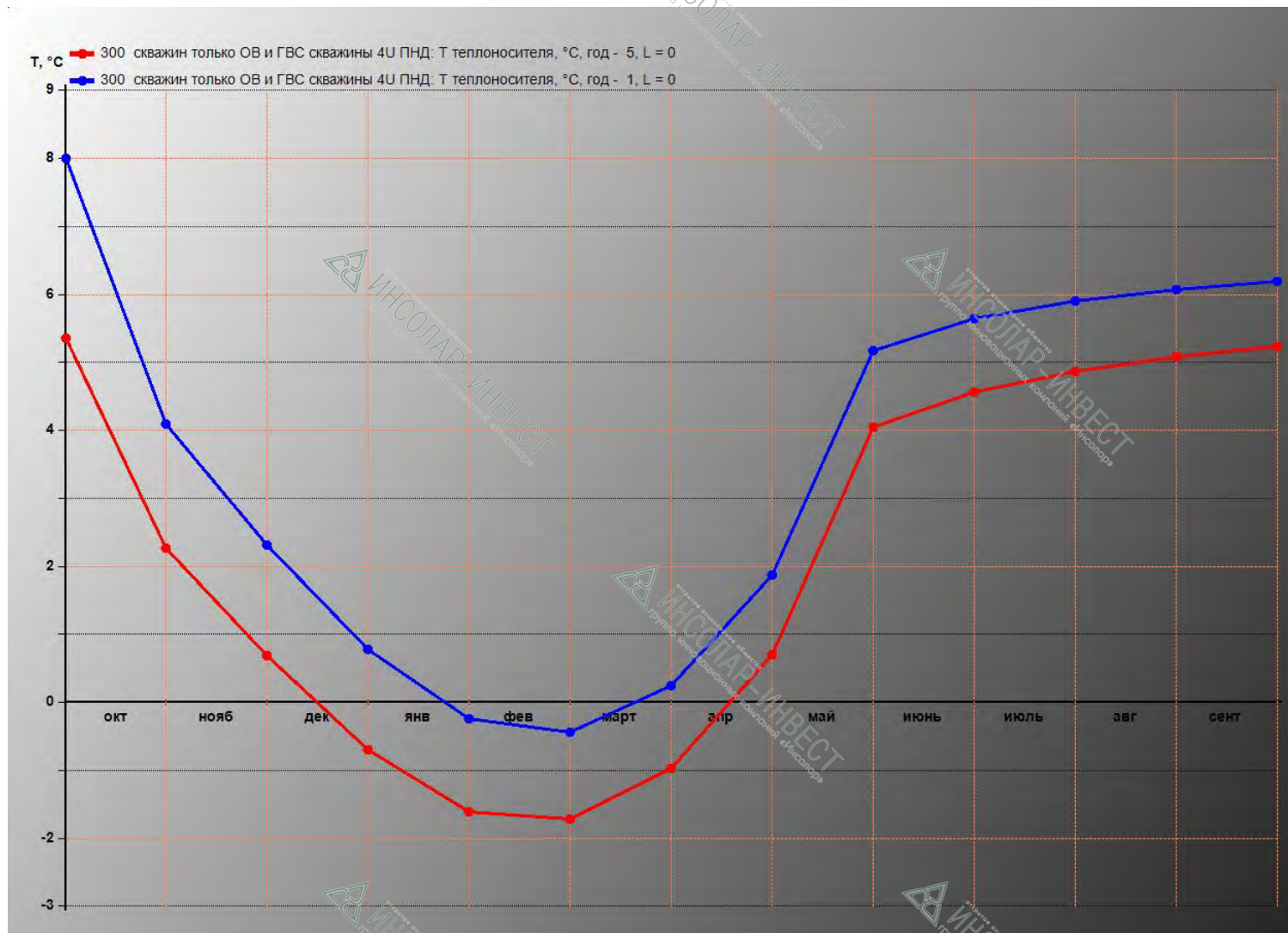


Рисунок 20. Годовое изменение температуры теплоносителя в системе теплосбора. Нагрузка только ОВ и ГВС: 1-ый и 5-ый годы эксплуатации.

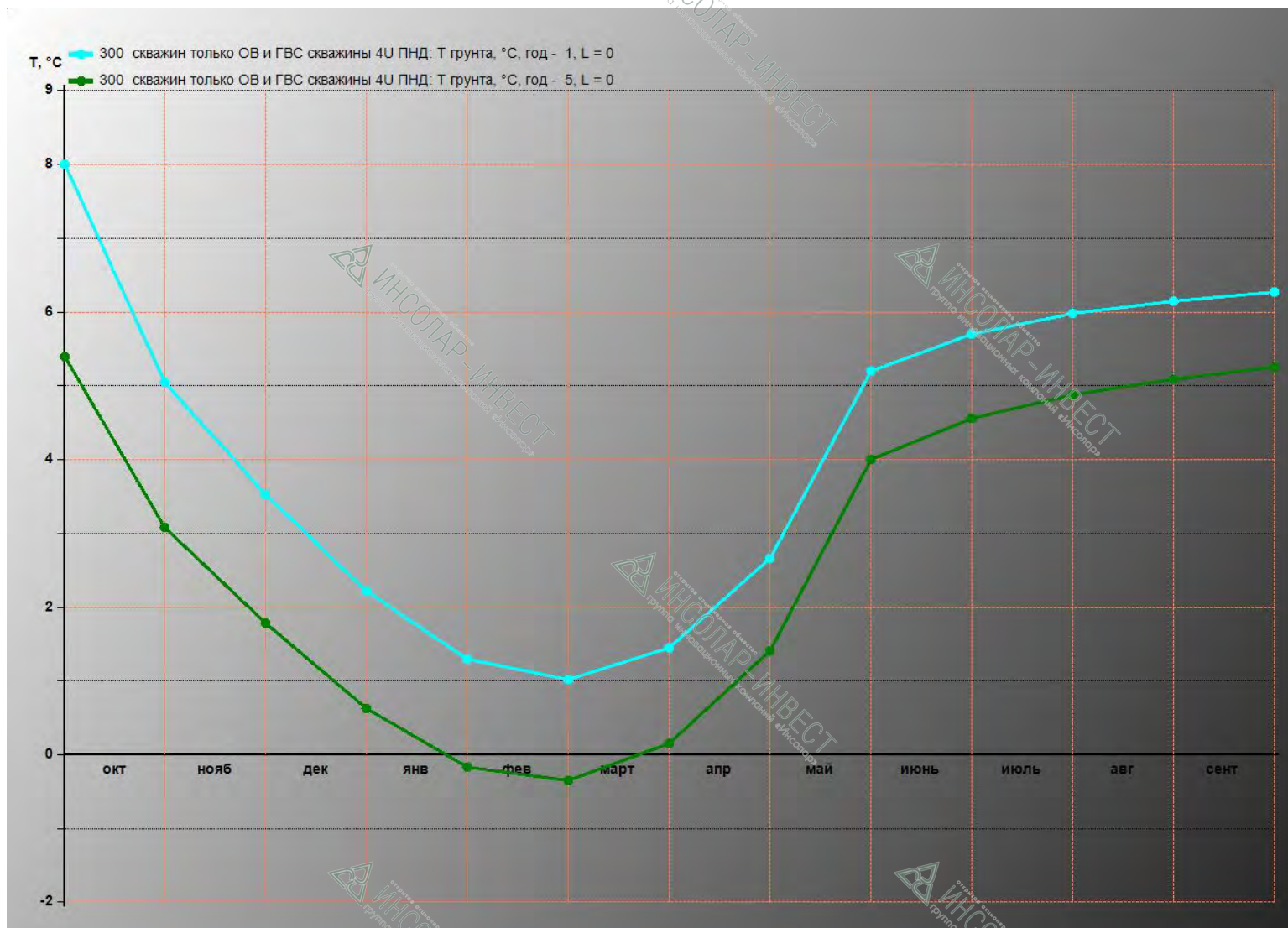


Рисунок 21. Годовое изменение температуры грунта на контакте с термоскважинами. Нагрузка только ОВ и ГВС: 1-ый и 5-ый годы эксплуатации.



Рисунок 22. Годовое изменение коэффициента преобразования энергии. Нагрузка только ОВ и ГВС: 5-ый год эксплуатации.

Таким образом видно, что температура грунта в наиболее неблагоприятном режиме работы теплонасосной системы остаётся положительной даже при длительной эксплуатации системы в таких условиях.

### 3.4.5 Предварительные выводы

Расчёты, основанные на данных геологических изысканий (до глубины 65 м при глубине грунтовых теплообменников 100 м) по смежному с рассматриваемой площадкой строительства участку показывают, что 300 скважин двойной U-образной конструкции способны обеспечить корректное функционирование теплонасосной системы в обоих рассматриваемых вариантах её работы:

- В варианте теплоснабжения и пассивного охлаждения от ССНТГ, при котором избыточное тепло с конденсаторов тепловых насосов сбрасывается в окружающий воздух;
- В варианте теплоснабжения и сброса избытков тепла с конденсаторов ТН в грунт.

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.

В варианте 2, предусматривающем сброс тепла с конденсаторов ТН в грунт, этот эффект будет проявляться более значительно как по причине внушительных мощностей сброса, так и по причине более длительного периода действия такого режима, а главное – по причине более высоких температур теплоносителя. Поэтому в варианте 2 высока вероятность «запирания» грунтовых теплообменников, то есть наступления ситуации, когда способность грунта поглощать тепло окажется недостаточной для целей обеспечения корректной работы оборудования в режиме холодоснабжения. С этой точки зрения вариант 1, предусматривающий «пассивное» охлаждение, оказывается предпочтительным, хотя и для него следует ожидать проявления эффекта высыхания, пусть и в значительно меньшей степени.

С точки зрения экономии энергии вариант 1 также оказывается более выигрышным, поскольку «пассивное» охлаждение предполагает использование естественного (а в нашем случае и искусственно

накопленного за зимний период) холодоресурса грунта без затрат энергии на привод холодильного оборудования.

Таким образом, на основе сравнительного анализа достоинств и недостатков обоих рассматриваемых вариантов, следует сделать **выбор в пользу варианта 1.**

В результате моделирования режимов эксплуатации ССНТГ получено, что 300 скважин двойной U-образной конструкции обеспечивают работоспособность теплонасосной системы с выполнением условия незамораживания грунта во всех рассмотренных режимах, однако при этом грунт находится на грани замораживания. Аналогично, в режиме «пассивного» охлаждения ССНТГ также находится на пределе своих возможностей по отводу тепла. Принимая также во внимание неопределённость по реальному количеству работоспособных термоскважин и их фактической глубине, **рекомендуется предусмотреть увеличение количества грунтовых теплообменников против расчётных 300 единиц, по крайней мере, до 350 единиц.**

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 100 м, а также по результатам натурных испытаний грунтовых теплообменников.

### 3.5 ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЁТ

Поверочный расчёт проводится по уточнённой информации о геологическом строении площадки строительства и результатам натурных испытаний грунтового теплообменника.

#### 3.5.1 Уточнённые данные по геологическому строению и гидрогеологическим условиям площадки строительства

Информация по геологическому строению и гидрогеологическим условиям площадки строительства взята из отчёта ООО «Буровики» по результатам инженерно-геологических испытаний, проведённых на рассматриваемой площадке в феврале 2012 г [14]. Литологическая колонка представлена на рисунке 23. Данные по геологическому строению участка представлены в таблице 18, а в таблице 19 приводится гидрогеологическая характеристика грунтового массива строительной площадки строительства проектируемого многофункционального здания.





Рисунок 23. Литологическая колонка

Таблица 18.

Номер слоя от поверхности грунта	Мощность слоя, м	Тип и характеристика грунта	Плотность природная, кг/м <sup>3</sup>
1	2,7	Суглинки желтовато-коричневые, тяжёлые, пылеватые, тугопластичные	1980
2	3,5	Суглинки лёгкие, песчанистые полутвёрдые	2030
3	16,8	Суглинки лёгкие, песчанистые, полутвёрдые	2130
4	4,1	Пески мелкие, насыщенные водой	1810
5	33,2	Пески мелкие, насыщенные водой	1830
6	12,1	Глины лёгкие, твёрдые	1870
7	24,9	Глины тяжёлые, твёрдые	1790
8	2,7	Известняки светло-серые, мелкокристаллические средней прочности, кавернозные, трещиноватые, обводнённые	2400

Таблица 19.

Наличие грунтовых вод	Глубина залегания, м	Напор, м
Водоносный слой 1	11,2	Напор 5,2 м
Водоносный слой 2	62,0	Напор 15,6 м
Водоносный слой 3	97,3	Напор до 71,6 м

В период ливневых дождей и интенсивного снеготаяния, а также в случае нарушения поверхностного стока возможен подъем уровня подземных вод выше зафиксированного в ходе проведения исследований уровня на 1,0-1,5м.

В таблице 20 приведены данные по теплопроводности и объёмной теплоёмкости в талом и мёрзлом состоянии слоёв грунта, составляющих грунтовый массив системы теплосбора, а в таблице 21- использованные в дальнейших расчётах значения этих параметров (теплопроводности и теплоёмкости грунта), полученные осреднением (с учётом удельного веса мощности слоя в общей длине термоскважины) данных таблицы 20. Грунтовые воды в расчёте не учитывались, что обеспечивает некоторый запас по реальным характеристикам ССНТГ по сравнению с расчётными.

Таблица 20.

Номер слоя от поверхности грунта	Мощность слоя, м	Тип и характеристика грунта	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность грунта, Вт/(м*°С)		Объёмная теплоёмкость грунта, Дж / (м <sup>3</sup> *°С)	
				$\lambda_{гв}$	$\lambda_{гг}$	$C_{гв}$	$C_{гг}$
1	2,7	Суглинки желтовато-коричневые, тяжёлые, пылеватые, тугопластичные	1980	1,51	1,68	3,15	2,35
2	3,5	Суглинки лёгкие, песчанистые полутвёрдые	2030	1,45	1,66	2,74	2,28
3	16,8	Суглинки лёгкие, песчанистые, полутвёрдые	2130	1,17	1,31	2,55	2,15
4	4,1	Пески мелкие, насыщенные водой	1610	2,50	2,73	3,15	2,35
5	33,2	Пески мелкие, насыщенные водой	1430	1,91	2,14	2,78	2,06
6	12,1	Глины лёгкие, твёрдые	1870	1,22	1,37	2,40	2,02
7	24,9	Глины тяжёлые, твёрдые	1790	1,45	1,66	2,95	2,09
8	2,7	Известняки мелкокристаллические средней прочности, кавернозные, трещиноватые, обводнённые	2400	2,73	2,9	2,68	2,26

Таблица 21.

Теплопроводность грунта, Вт/(м*°С)		Объёмная теплоёмкость грунта, кДж / (м <sup>3</sup> *°С)	
$\lambda_{iH}$	$\lambda_f$	$C_{iH}$	$C_f$
1,61	1,80	2757	2110

Как видно из сравнения данных таблиц 15 и 21, значения усреднённых показателей теплофизических свойств грунтов получились довольно близкими. Так, расхождение значений теплопроводности грунта в талом состоянии (наиболее важного параметра для проведения расчётов) не превышает 2,6%, что находится в пределах точности измерений и вычислений.

### 3.5.2 Результаты натуральных тепловых испытаний грунтового теплообменника

Данные по результатам испытаний грунтового теплообменника на теплопроводность взяты из соответствующего отчёта ОАО «Инсолар-Энерго» [15]. Испытания проводились в период с 02 по 05 апреля 2012 года.

Полученная в результате испытаний величина эффективной теплопроводности составила 2,25 Вт/(м\*°С). Это значение оказалось выше принятого в расчёте по нескольким причинам. Так, при расчёте не учитывалось влияние подземных водоносных горизонтов, в то время как при проведении натуральных испытаний влияния этого фактора избежать невозможно, и он заметно сказывается именно в виде повышения теплопроводной способности грунта. Кроме того, в период проведения испытаний шёл активный процесс снеготаяния, и уровень грунтовых вод был близок к максимальному в годовом цикле. Также свою лепту в увеличении теплоотдачи от труб грунтового теплообменника в окружающую среду

внесли и поверхностные талые воды с низкой температурой, и пропитанные ими приповерхностные слои грунта.

### 3.5.3 Поверочный расчёт

Для подтверждения правильности определения параметров грунтовых теплообменников был проведён поверочный расчёт эффективности термоскважины, равный отношению величин удельных теплосъёмов рассматриваемой термоскважины к удельному теплосъёму одиночной термоскважины такой же конструкции. Результаты этого расчёта в графической форме представлены на рисунке 24. Этот рисунок аналогичен рисунку 15, где  $k_{avr}$ ,  $k_{min}$ ,  $k_{max}$  - соответственно осреднённый, минимальный и максимальный показатель эффективности термоскважин по полю термоскважин.

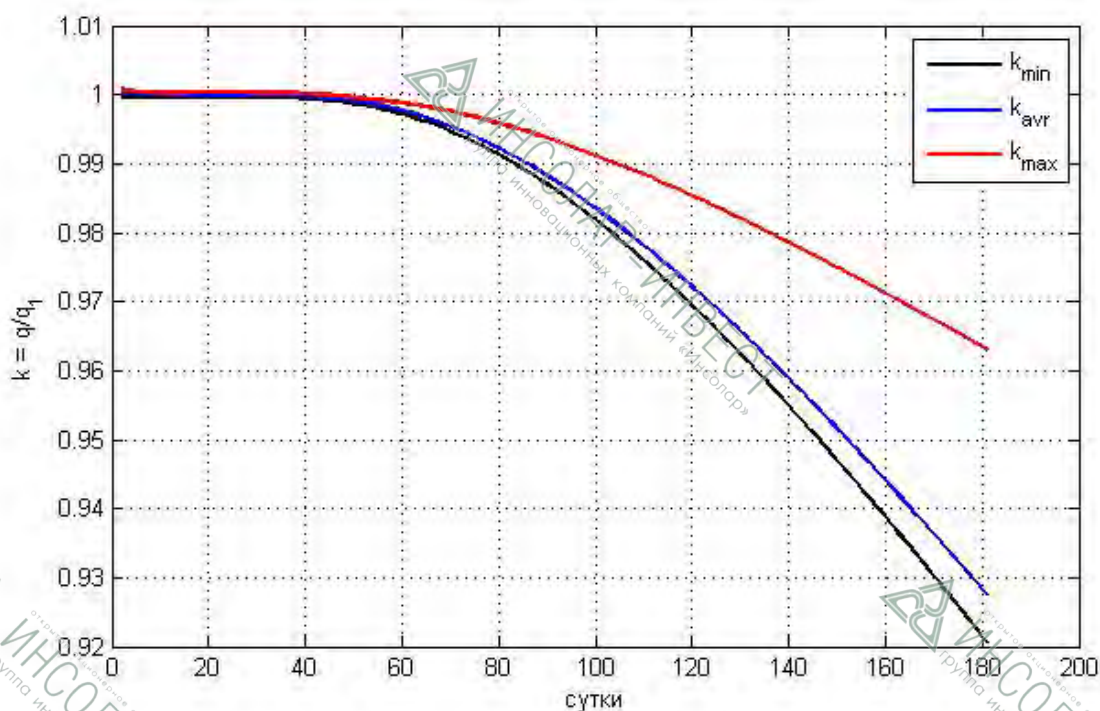


Рисунок 24. Изменение показателя эффективности  $k$  во времени.

Из графика видно, что при совместной работе термоскважин в поле системы теплосбора тепловое взаимодействие грунтовых теплообменников при полученном в процессе натуральных испытаний значении теплопроводности грунта будет выше и окажется на уровне 8%. Поскольку при проведении моделирования теплового режима термоскважин коэффициент взаимного влияния термоскважин был принят равным 1,1, выполнение повторного расчёта не представляется целесообразным.

Так как наиболее критичным эксплуатационным режимом для грунтовой системы является режим сброса тепла в грунт, имеющий место в летний период, когда уровень грунтовых вод традиционно ниже, да к тому же может проявиться эффект высыхания прилегающих к грунтовому теплообменнику слоёв грунта, упомянутый ранее, изменение количества грунтовых теплообменников в сторону уменьшения настоятельно не рекомендуется.

## 4. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ

В соответствии с техническими предложениями, изложенными в разделе 2 настоящего отчёта, можно выделить три режима работы теплонасосной системы в течение года:

- Режим теплоснабжения – зимний режим;
- Режим одновременного тепло- и холодоснабжения – режим переходного периода;
- Режим холодоснабжения – летний режим.

### 4.1 ЗИМНИЙ РЕЖИМ

В зимнем режиме преобладает нагрузка теплоснабжения, поэтому обе группы тепловых насосов работают в режиме теплоснабжения. Тем не менее, для обеспечения потенциально возможных нагрузок кондиционирования (проведение мероприятий с большим числом участников, возникновение локального перегрева в отдельных помещениях) предусматривается постоянное поддержание в готовности и системы кондиционирования путём использования части баков-аккумуляторов (буферных ёмкостей) для создания запаса охлаждённой воды, готовой для подачи в систему холодораспределения и далее на вентиляторные доводчики. Грунт в данном режиме используется только в качестве источника тепла; для поддержания требуемой температуры в холодной части буферных ёмкостей используется отбор холода из контура испарителей тепловых насосов.

Принципиальная схема работы теплонасосной системы в зимнем режиме представлена на рисунке 25.



## 4.2 РЕЖИМ ПЕРЕХОДНОГО ПЕРИОДА

В этом режиме возможно возникновение одновременной потребности как в тепле, так и в холоде в зависимости от переменчивых погодных условий и суточных колебаний температуры, от ориентации помещений по сторонам света – облучённые Солнцем и, соответственно, нагревающиеся помещения на южном фасаде будут требовать охлаждения, в то время как на северном фасаде по-прежнему будет преобладать нагрузка теплоснабжения, и т.д. Возможность осуществления охлаждения помещений днём и нагрева их ночью, равно как и пофасадного регулирования, может быть достигнута путём применения следующего решения.

При работе системы в данном режиме группа тепловых насосов, обеспечивающих подачу теплоносителя к обогреваемым поверхностям, будет работать в том же режиме, в каком работала зимой. Подача холода через теплоёмкие поверхности в данном режиме не предусматривается. Группа же высокотемпературных тепловых насосов будет больше работать на холод, чем это требовалось в зимний период, при этом потребность в тепле (например, на подогрев приточного воздуха системой вентиляции) будет значительно ниже расчётной величины для зимнего периода. Исходя из этих соображений предлагается часть буферных баков, ранее использовавшихся для накопления тепла, перевести в режим накопления холода. Такое решение позволит устранить капитальные вложения в дополнительные баки-аккумуляторы для холодоснабжения и вместе с тем сократить площадь технических помещений, отводимую для размещения оборудования. Вопрос организации переключения баков из режима аккумуляирования тепла в режим аккумуляирования холода подлежит детальному рассмотрению на дальнейших стадиях выполнения работ по проектированию системы.

Система сбора тепла грунта в данном режиме работает только на извлечение тепла и накопление в грунте холода с целью его дальнейшего

использования для пассивного охлаждения в период работы теплонасосной системы в летнем режиме.

Принципиальная схема работы теплонасосной системы в режиме переходного периода представлена на рисунке 26.

#### 4.3 ЛЕТНИЙ РЕЖИМ

В летнем режиме преобладает нагрузка холодоснабжения, тепло требуется только для подогрева ГВС, поэтому в этом режиме обе группы тепловых насосов работают на производство холода. Часть вырабатываемого при этом тепла направляется на подогрев ГВС, остальная же часть сбрасывается в сухих градирнях. Высокотемпературные тепловые насосы в этом режиме работают на тех же температурах конденсации, что и прежде, а вот для низкотемпературных тепловых насосов температуру конденсации придётся увеличивать, чтобы обеспечить гарантированный отвод тепла в атмосферу даже при высоких температурах наружного воздуха. При этом указанное повышение температуры конденсации должно быть по возможности минимизировано для того, чтобы холодопроизводительность низкотемпературных тепловых насосов была максимальной.

Применение сухих градирен обусловлено тем, что грунт в данном режиме используется для пассивного охлаждения теплоёмких поверхностей (смотри раздел 2) и поэтому не может быть использован для сброса тепла с конденсаторов тепловых насосов.

Буферные ёмкости в этом режиме переводятся в режим аккумуляирования холода. Исключение делается только для баков, работающих на систему ГВС.

Для обеспечения гарантированного обеспечения объекта как теплом, так и холодом следует предусмотреть возможность извлечения тепла из грунта в период, когда разбор холода отсутствует, а тепло на ГВС требуется. Кроме того, рекомендуется предусмотреть установку тепловых насосов и вентиляторных доводчиков с некоторым запасом по холодопроизводительности на тот случай, если саккумулированного в грунте за зимний период холода окажется недостаточно для обеспечения холодоснабжения теплоёмких поверхностей. Особенно это может быть актуально в конце летнего сезона. Тут могут сказаться разные факторы: от невозможности учесть полностью все нюансы поведения грунта и множественные неопределённости по его строению и характеристикам при составлении математических моделей и проведении расчётов, до неблагоприятных природных условий – например, жаркое лето после тёплой зимы, когда холода в грунте запасено недостаточно, а потребность в нём будет повышенная.

Принципиальная схема работы теплонасосной системы в летнем режиме представлена на рисунке 27.

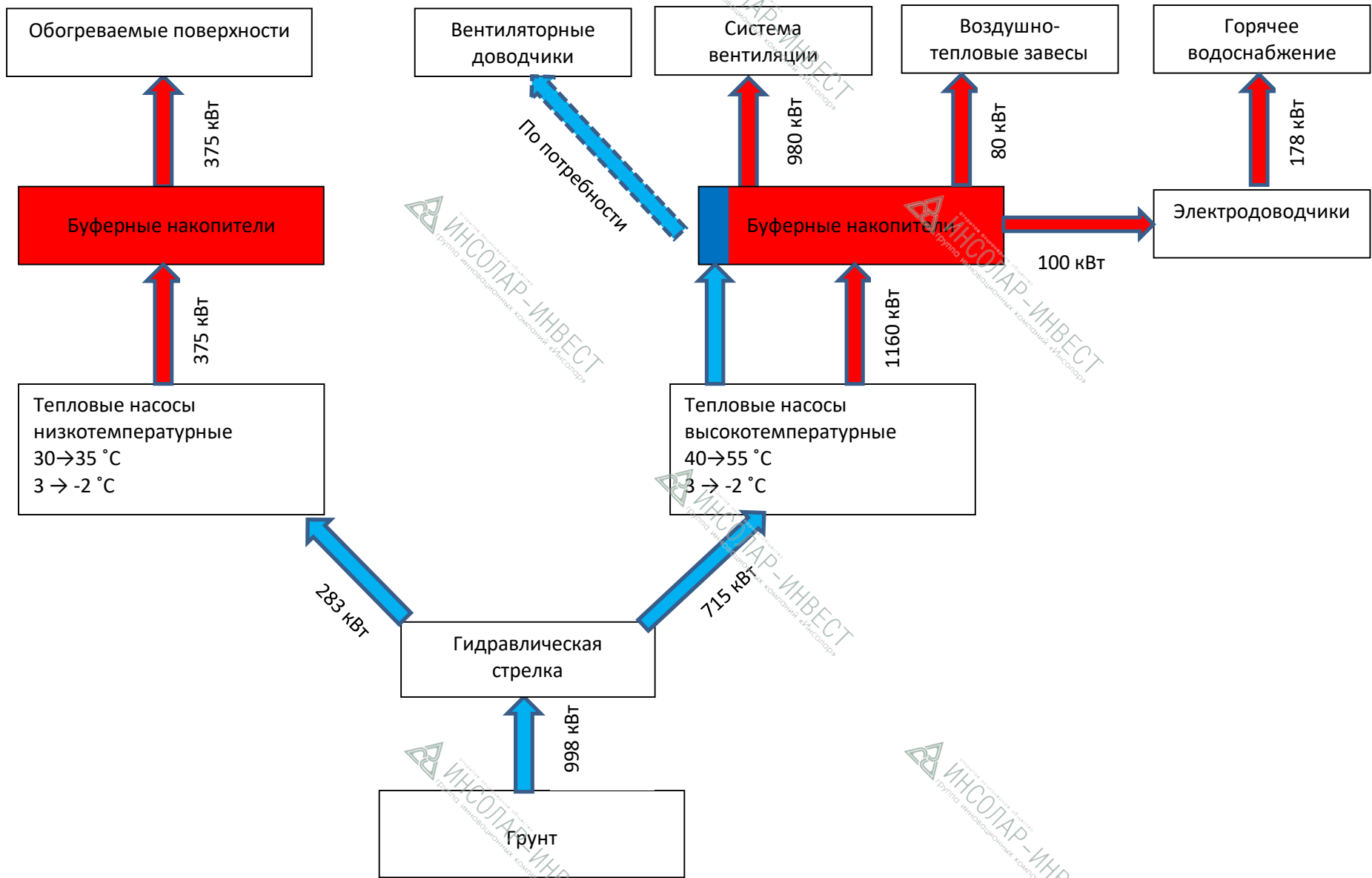


Рисунок 25. Принципиальная схема работы теплонасосной системы в зимнем режиме

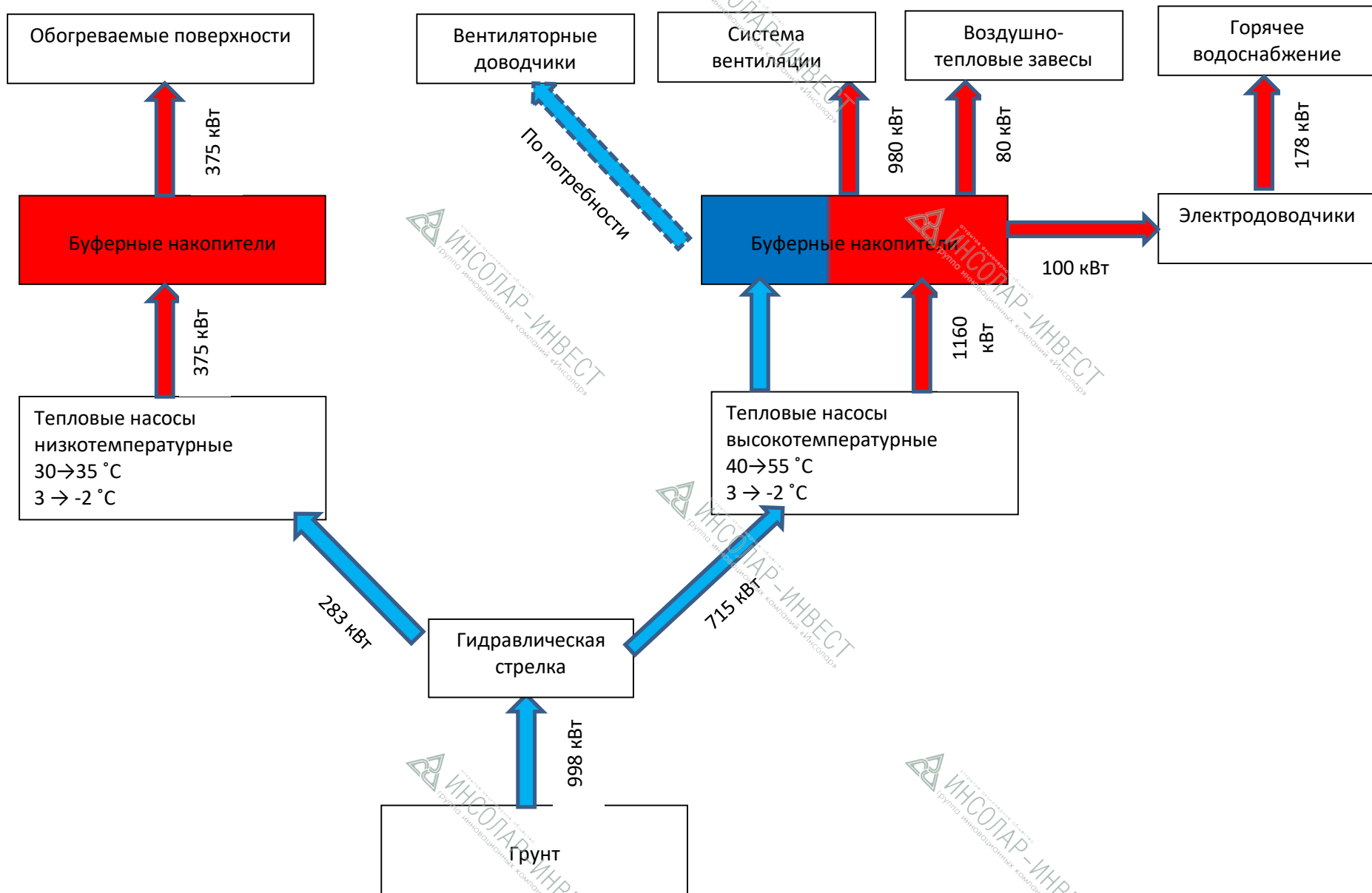


Рисунок 26. Принципиальная схема работы теплонасосной системы в режиме переходного периода

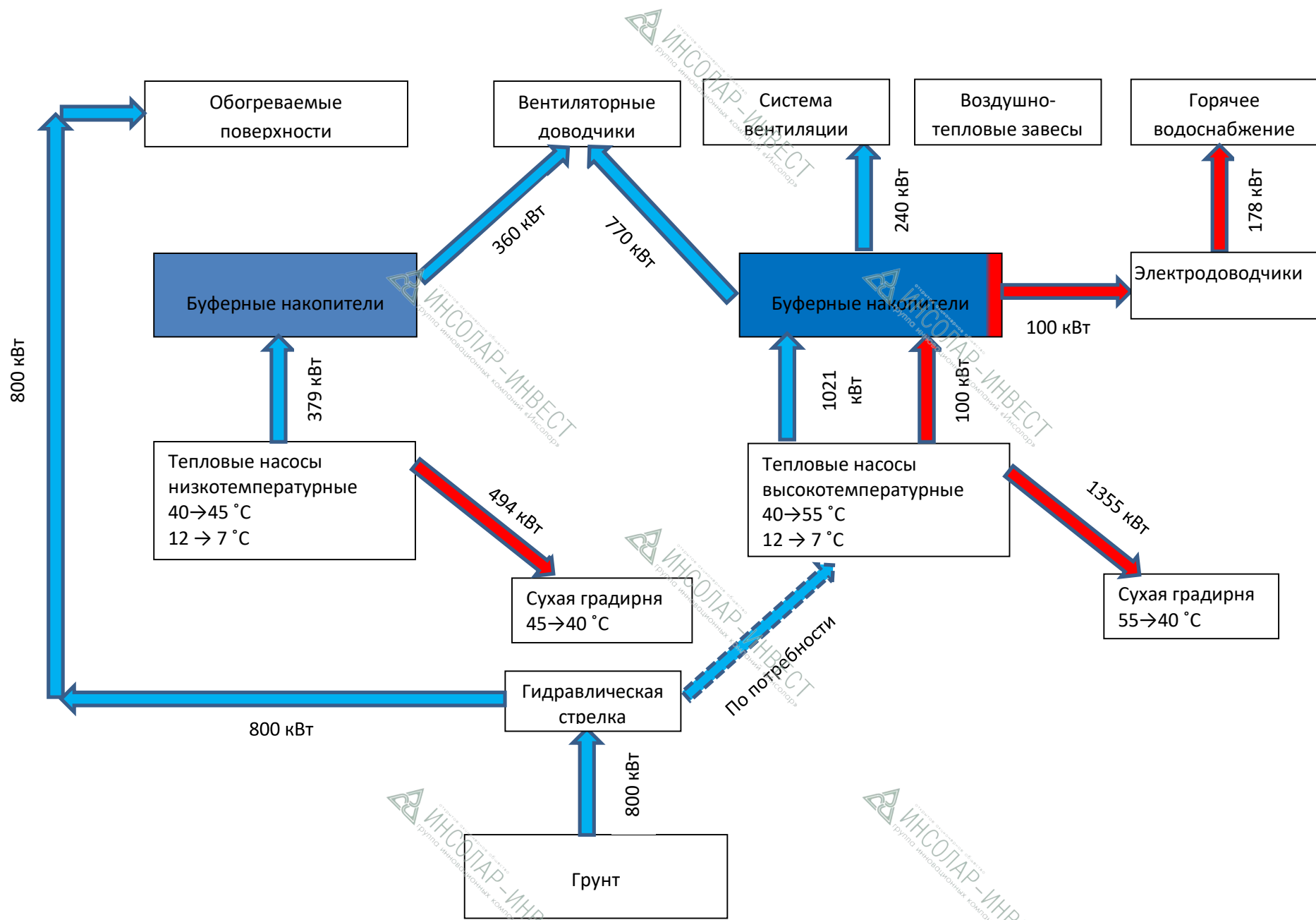


Рисунок 27. Принципиальная схема работы теплонасосной системы в летнем режиме

## 5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ НА БАЗЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ СРЕДНЕЙ И ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ

В основу работы парокомпрессионного теплового насоса положены два физических явления:

- поглощение и выделение теплоты веществом при изменении агрегатного состояния - испарении и конденсации соответственно;
- изменение температуры перехода из одного агрегатного состояния в другое (испарение или конденсация) при изменении давления рабочего тела (хладона).

Соответственно, основные элементы парокомпрессионного контура - теплообменник-испаритель, теплообменник-конденсатор, компрессор и дроссельное устройство. В испарителе рабочее тело, обычно хладон, находится под низким давлением и кипит при низкой температуре, поглощая теплоту низкопотенциального источника. Затем рабочее тело сжимается в компрессоре, приводимом в действие электрическим двигателем, и поступает в конденсатор, где при высоком давлении конденсируется при более высокой температуре, отдавая теплоту испарения с добавлением теплоты сжатия в компрессоре, более тёплому приёмнику тепла. Из конденсатора рабочее тело через дроссельное устройство, где его давление снижается, вновь поступает в испаритель и процесс переноса теплоты продолжается.

Регулирование работы теплового насоса в большинстве случаев производится автоматическим включением и выключением компрессоров по сигналам датчика температуры, установленного в приёмнике (при нагреве)

или источнике (при охлаждении) теплоты. Настройка режимов теплового насоса обычно производится изменением сечения дроссельного устройства (терморегулирующего вентиля).

В данном случае производится сравнение двух возможных вариантов применения тепловых насосов типа “вода-вода” на рассматриваемом объекте. Первый вариант – это вариант применения большого количества серийно выпускаемых тепловых насосов средней мощности, в то время как второй вариант предполагает использование нескольких крупных теплонасосных установок, изготавливаемых по индивидуальному заказу. Источником низкопотенциального тепла в обоих вариантах является грунтовый массив.

Рассмотрим первый вариант, т.е. систему с машинами средней мощности.

Эта схема подразумевает установку значительного количества (от 20 до 30 единиц) тепловых насосов, подключённых по параллельной схеме. Тепловая мощность каждого агрегата в этом случае не превышает 80 кВт. При нехватке тепловой мощности агрегаты включаются в работу один за другим по сигналу с контроллера.

Существенным плюсом в данном случае является использование стандартного оборудования, производимого серийно и достаточно отработанного технологически, что обеспечивает высокую надёжность тепловых насосов. При этом вышедший из строя агрегат может быть легко заменён на аналогичный. Правда, большинство иностранных производителей не имеют складского запаса подобного рода оборудования, по крайней мере в России, поэтому приобретение нового устройства взамен вышедшего из строя может занять значительное время.

Сердцем любого теплового насоса является компрессор. В ТН средней мощности чаще всего используют спиральные компрессоры. Основными



преимуществами этого типа компрессоров с точки зрения эксплуатационных требований можно назвать низкие пусковые токи, высокую надёжность и низкий уровень шума при работе. Минусом этих компрессоров можно назвать относительно невысокую производительность. Сравнительная характеристика спиральных компрессоров по отношению к компрессорам других типов представлена в таблице 22.



Таблица 22.

Спиральные компрессоры	Другие типы компрессоров
Высокий коэффициент подачи и холодильный коэффициент в оптимальной для данного модельного ряда области давлений (температур) кипения в сочетании с обычными давлениями (температурами) конденсации => при одинаковой производительности потребляемая мощность ниже	Большинство поршневых герметичных и полугерметичных, ротационных, винтовых и центробежных компрессоров имеют худшие показатели ввиду одного или нескольких нижеприведённых факторов: «мёртвый» объем, потери в клапанах, большие внутренние тепловые потери, высокий КПД только в относительно узкой области степеней сжатия и т.п. => при одинаковой производительности потребляемая мощность выше
Возможность применения одной модели в широком диапазоне температур кипения => для различных прикладных задач требуется только один тип модели	Большинство других типов компрессоров имеют чёткое деление на низко- и средне- и высокотемпературные модели
Нет необходимости защищать двигатель компрессора при работе при высоких давлениях (температурах) кипения => быстрый выход на безопасный режим работы	В связи с относительно низкой мощностью привода низкотемпературных поршневых компрессоров требуется искусственное ограничение максимального давления (температуры) кипения => установка выходит на заданный режим очень медленно
Пусковой ток практически не отличается от рабочего (компрессор пускается полностью внутренне механически разгруженным) => пусковая нагрузка на электросеть минимальна => контакторы компрессора могут иметь меньшую мощность, а защитный автомат должен быть менее мощным	Другие типы компрессоров имеют повышенный либо очень высокий пусковой ток даже при применении устройств механической разгрузки => высокая пусковая нагрузка на электросеть => неблагоприятное влияние на соседних электропотребителей; требуется более мощная электроустановочная аппаратура
Спиральный компрессор имеет один из лучших показателей по степени уноса масла в систему – одно из самых низких значений => во многих прикладных случаях применение маслоотделителя и других сложных компонентов системы смазки не требуется	Унос масла в большинстве поршневых компрессоров выше, а у винтовых в несколько раз выше => дополнительно обязательно требуются дорогостоящие компоненты системы масловозврата (а иногда и охлаждения), система управления установкой усложняется, а её надёжность снижается
Высокий коэффициент подачи на протяжении всего срока службы вследствие свободного, самоподстраивающегося уплотнения между спиралями – радиальное согласование => неизменная производительность в течение всего срока службы	У большинства типов компрессоров коэффициент подачи снижается по мере эксплуатации компрессора по причине износа сопрягаемых деталей в полостях сжатия => пониженная производительность в конце нормативного срока эксплуатации
Повышенная устойчивость к «влажному ходу» благодаря радиальному согласованию	Низкая устойчивость к «влажному ходу» у всех типов компрессоров
Высокая устойчивость к механическим загрязнениям	Попадание механических частиц в зону сжатия практически всегда приводит к выходу из строя любых типов компрессоров

Одним из основных показателей, которым руководствуются при подборе теплонасосного оборудования, является коэффициент преобразования энергии в ТН (COP). Он получается при делении номинальной тепловой мощности установки в заданном режиме на потребляемую в этом режиме электрическую мощность. Практически данный коэффициент показывает, сколько киловатт тепловой энергии вырабатывает ТНУ на один киловатт потреблённой электроэнергии. В рассматриваемых машинах этот коэффициент, в зависимости от условий и тепловых режимов, может варьироваться от 2 до 5.

Главным плюсом рассматриваемой схемы является надёжность. Выход из строя одной или даже двух машин не приведёт к значительному снижению производительности системы в целом.

Одной из трудностей при организации системы теплоснабжения с помощью каскада тепловых насосов средней мощности является разработка и создание довольно сложной системы автоматики и управления. Стандартная система управления массивом ТН обеспечивает слаженную работу определённого количества машин. Максимальная суммарная мощность такой системы, как правило, не превышает 500 кВт. Каскад, в зависимости от производителя, включает в себя от четырёх до десяти агрегатов. Подключение дополнительной автоматики приведёт к усложнению (а значит снижению надёжности) и удорожанию системы, а также к дополнительным трудностям при сервисном обслуживании и эксплуатации. Кроме того, это может сказаться на стабильности работы системы в целом.

По части гидравлики такой вариант компоновки также не может считаться оптимальным, так как относительно большое количество агрегатов приведёт к усложнению и удорожанию гидравлической обвязки. Этот вариант потребует значительно большей разветвлённости трубопроводов (и

отчуждения дополнительных площадей технических помещений), что скажется на количестве арматуры, увеличении количества стыков и соединений, а значит и к повышению вероятности образования неплотностей и утечек теплоносителя, приведёт к увеличению общего количества циркуляционных насосов, а также трудностям при монтаже и эксплуатации. Кроме того, при такой организации системы возникает необходимость выполнения сложной и трудоёмкой гидравлической балансировки. Всё это является основанием для увеличения расходов как на создание такой системы, так на её сервисное обслуживание.

В зависимости от площади теплового пункта, установки, возможно, придётся монтировать “в два этажа”, т. е. один над другим. Это также приведёт к сложностям и неудобствам при сервисном обслуживании.

Второй вариант организации теплонасосной системы на объекте предусматривает установку небольшого количества (от 3 до 8 единиц) более мощных тепловых насосов, также работающих параллельно.

Как правило, повышение единичной мощности тепловых насосов приводит к снижению их удельной стоимости. Однако, в случае изготовления оборудования на заказ, а именно таким образом работает большинство европейских производителей при возникновении потребности в установках большой мощности, снижение стоимости может оказаться не настолько существенным, насколько оно могло бы быть в случае применения серийно выпускаемого оборудования.

Организация системы теплоснабжения на базе крупных машин несколько уступает предыдущему варианту в отношении надёжности. При выходе из строя одного из ТН система сразу же теряет заметную часть мощности, поэтому требуется предусматривать дополнительные мероприятия по обеспечению гарантированного поддержания комфортных

условий в здании. Эта проблема может быть решена с помощью выбора требуемой степени резервирования оборудования или использовании аварийных источников энергии (при выходе из строя ТН высвобождается электрическая мощность, поэтому можно использовать аварийный электронагреватель), что, однако, выльется в дополнительные капитальные затраты. Другим вариантом решения указанной проблемы может быть оптимизация работы систем–потребителей при возникновении аварийных ситуаций. Примером такого рода решения может стать снижение кратности воздухообмена на период проведения восстановительных работ. Стоит отметить, что при должном, своевременном сервисном обслуживании и правильной эксплуатации тепловые насосы являются оборудованием крайне высокой степени надёжности. Если всё же поломка случилась, приобретение нового нестандартного устройства взамен вышедшего из строя может занять значительно больше времени, чем в случае применения серийно выпускаемого оборудования.

Уменьшение количества теплонасосного оборудования приведёт к снижению сложности и трудоёмкости осуществления сервисного обслуживания, а заодно и времени, необходимого на его проведение. Всё это, безусловно, выразится в снижении стоимости проведения указанных работ.

Система будет занимать значительно меньше площади как по причине меньшего количества и большей компактности самого теплонасосного оборудования, так и по причине сокращения сервисных зон и меньшей разветвлённости и сложности трубопроводной обвязки. При этом, однако, следует учитывать, что увеличение массы и размеров единицы оборудования по сравнению с предыдущим вариантом может привести к возникновению дополнительных требований к строительным конструкциям теплового пункта, как то: организация фундаментов или рам под агрегаты, увеличение

дверных проёмов и т.д. Необходимо учитывать и возможные сложности при транспортировке и осуществлении такелажных работ.

В конструкции тепловых насосов большой мощности могут быть использованы как спиральные, так и винтовые компрессоры. В случае использования крупных машин на базе винтовых компрессоров следует ожидать появления повышенных пусковых токов, что связано как с самой конструкцией этого типа компрессоров, так и с их большой единичной мощностью. Дело в том, что в большинстве случаев на оборудование устанавливается не более трёх довольно мощных винтовых компрессоров, тогда как при использовании спиральных компрессоров в машинах большой мощности их число может достигать 6 и более. Поскольку на объекте существуют некоторые сложности с обеспечением электрической энергией и с целью недопущения возникновения больших пусковых токов, а, следовательно, и поддержания стабильности электроснабжения как рассматриваемого объекта, так и других потребителей на площадке, рекомендуется отдавать предпочтение теплонасосным установкам на базе спиральных компрессоров.

Система контроля и управления для системы на базе крупных машин будет значительно проще, чем для первого рассмотренного варианта, что благоприятным образом скажется не только на стабильности системы, но и на её стоимости.

В настоящее время все агрегаты заправляются хладагентами, отвечающими современным требованиям к безопасности человека и окружающей среды. Они полностью пожаробезопасны и в малых концентрациях неспособны причинить вред обслуживающему персоналу. Но следует учитывать, что в случае возникновения аварийной ситуации, связанной с разгерметизацией холодильного контура, количество хладагента, попавшего в воздух в помещении теплового пункта, будет прямо

пропорциональна мощности ТНУ. Таким образом, наиболее безопасным следует признать вариант использования машин небольшой мощности с малым количеством рабочего тела внутри холодильного контура, а наихудшие характеристики в этом отношении будет иметь вариант использования крупных тепловых насосов на базе винтовых компрессоров. При проектировании системы вентиляции теплового пункта следует предусматривать возможность увеличения кратности воздухообмена при аварии.

Для удобства сравнительные характеристики рассматриваемых систем сведены в таблицу 23, приведённую ниже.

По результатам представленного сравнения можно сделать вывод, что система, основанная на использовании тепловых насосов большой мощности, более полно отвечает предъявляемым требованиям как с точки зрения капитальных и эксплуатационных затрат, так и с точки зрения удобства наладки, управления, обслуживания и занимаемой площади, поэтому именно она рекомендуется для дальнейшей разработки.

Таблица 23.

№№	Параметр	ТНУ средней мощности	ТНУ большой мощности
1	Энергоэффективность	Отличие по коэффициенту преобразования не более 5%	
2	Капиталовложения	-	+
3	Удобство сервисного обслуживания	-	+
4	Стоимость сервисного обслуживания	-	-
5	Гидравлическая балансировка, наладка	-	+
6	Удобство эксплуатации	-	+
7	Занимаемая площадь	-	+
8	Надёжность системы	+	-
9	Сроки поставки	+	-
10	Шумовые и виброхарактеристики	+	- (при винтовых компрессорах)
11	Система автоматики и управления	-	+
12	Транспортировка и такелажные работы	+	-
13	Безопасность (утечка хладона)	+	-
14	Пусковые токи	+	- (при винтовых компрессорах)



## 6. СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер.3 Многолетние данные. Часть 1. Вып.8. Москва и Московская область. Л. Гидрометеиздат. 1990. Москва. Геология и город. М. 1997.С. 399.
3. Виссмен У. мл., Харбаф Т.Н., Кнэпп Д.У. Введение в Гидрологию. Л., Гидрометеиздат, 1979, 472 с.
4. СНиП 23-01-99. Строительная климатология.
5. VDI 4640. Thermische Nutzung des Untergrundes.
6. СанПиН 2.1.4.2496-09. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения.
7. СП 41-101-95. Проектирование тепловых пунктов.
8. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
9. СНиП 3.05.01-85. Внутренние санитарно-технические системы.
10. СНиП 2.04.01-85\*. Внутренний водопровод и канализация зданий.
11. EN 14511-1:2008. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling.
12. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.

13. ASHRAE Handbook. 1999 HVAC Application. Chapter 31. Energy resources.

14. Техническое заключение. Инженерно-геологические изыскания на объекте «Теплонасосы» по адресу: г. Москва, ул. Можайское шоссе, вл.165. ООО «Буровики», 2012.

15. Отчёт о проведение натурных тепловых испытаний грунтовых теплообменников теплонасосной системы теплохладоснабжения административно-офисного здания с объектами инженерии и благоустройства, расположенного по адресу: Московская обл., Одинцовский район, Можайское шоссе, вл. 165. ОАО «Инсолар-Энерго», 2012, 32 с.