

**Аль- Зувайни Хашим Махмуд Хашим**

**Система пассивного охлаждения с помощью  
интегрированной солнечной вытяжной трубы и грунто-  
воздушного теплообменника**

Направление подготовки:

13.06.01 – Электро и теплотехника (Промышленная теплоэнергетика)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Научный руководитель:

К.т.н., доцент

Калютик Александр Антонович

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе атомной и тепловой энергетики Института энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ

Калютик Александр Антонович,  
к.т.н., доцент ИЭ СПбПУ

Научный руководитель:

Калютик Александр Антонович,  
к.т.н., доцент ИЭ СПбПУ

Научный консультант:

Скулкин Сергей Валерьевич  
к.т.н., доцент

Рецензент:

Белоусов Владимир Николаевич  
к.т.н., доцент

## **Введение**

**Актуальность темы.** Во многих районах Республики Ирак энергоснабжение потребителей традиционными энергоресурсами затруднено из-за политических, экономических и экологических причин. Дефициту энергоресурсов сопутствуют жаркие климатические условия и низкая надежность региональных электроэнергетических систем. В то же время, в регионе доступны в достаточном количестве альтернативные энергоресурсы – солнечная и ветровая энергия. Применение данных ресурсов возможно даже без промежуточного получения электроэнергии, например, при устройстве пассивных систем кондиционирования. Они состоят из грунто-воздушного теплообменника (ГВТ) и солнечной вытяжной трубы (СВТ).

Предлагаемые до настоящего времени численные модели систем пассивного охлаждения с помощью интегрированной СВТ и ГВТ имеют малую разработанность в связи со слабой привязкой к конкретной местности применения. Поскольку массив грунта в субтропическом и тропическом климате имеет весьма высокую среднегодовую температуру, необходимо исследовать потенциал его применения в качестве аккумулятора теплоты (холода), в том числе, с изменением глубины и внедрением методов снижения подповерхностной температуры (затенение, орошение и т.д.).

Поэтому моделирование системы пассивного охлаждения с помощью интегрированной солнечной вытяжной трубы и грунто-воздушного теплообменника в условиях Республики Ирак (г. Басра) является актуальным.

**Степень научной разработанности проблемы.** Различным аспектам моделирования СВТ и ГВТ, проведению физических экспериментов для оценки потенциала данной технологии в климатических условиях некоторых

стран мира, посвящены работы Maerefat M, Haghghi A.P, Pfafferott J., Lee E, AL-Ajmi F. F., Loveday D.L., Hanby V.I., Shiv Lal, Kaushik S.C., Bhargav P.K., Karima E, Banks D. и других исследователей. Отмечено, что эффективность работы ГВТ в основном зависит от пяти факторов: разности температур наружного воздуха и глубоких слоев грунта, длины и диаметра труб теплообменника, глубины залегания и расхода воздуха.

На основании анализа литературных источников установлено, что моделированию СВТ и ГВТ, верификации разработанных моделей, уделено недостаточно внимания. В частности, большинство созданных моделей – одно- или двумерные. При этом, в большинстве работ рассмотрена либо математическая модель без проверки достоверности, либо постановка натурного эксперимента без моделирования.

Кроме того, в литературе отсутствуют данные о температуре грунта на различной глубине залегания в окрестностях г. Басра (Ирак), что затрудняет применение перспективной технологии совместной работы СВТ и ГВТ в данной местности. Для решения этой проблемы была составлена расчетная модель грунта для оценки его температуры на заданной глубине в заданное время года. Адекватность модели подтверждена экспериментом. Разработана также численная модель системы СВТ и ГВТ, адекватность которой подтверждена натурными экспериментами.

**Цель:** Разработка и верификация численной модели системы пассивного охлаждения с помощью интегрированной солнечной вытяжной трубы и грунто-воздушного теплообменника в условиях Республики Ирак (г. Басра).

Для достижения поставленной цели исследования были решены задачи:

1. Оценка современного уровня исследований в области систем пассивного охлаждения с помощью интегрированной СВТ и ГВТ;

2. Разработка модели турбулентного течения воздуха и теплообмена в СВТ и трехмерной модели грунта и ГВТ, учитывающих расход воздуха и диаметр труб теплообменника;
3. Проведение экспериментального исследования системы на натурном макете в окрестностях г. Басра (Республика Ирак);
4. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований с целью выработки рекомендаций по проектированию и конструированию системы пассивного охлаждения с помощью интегрированной СВТ и ГВТ в условиях Республики Ирак (г. Басра).

**Объект исследования** – система пассивного охлаждения с помощью интегрированной солнечной вытяжной трубы и грунто-воздушного теплообменника.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

1. Создана расчетная модель зависимости температуры грунта от глубины его залегания и времени суток и сезона (трехмерная модель) и проведена её экспериментальная проверка в течение года;
2. Разработаны трехмерные модели СВТ и ГВТ, проведена их экспериментальная проверка в течение года;
3. Разработана комплексная трехмерная модель системы пассивного охлаждения, включающая взаимосвязанные модели массива грунта, СВТ и ГВТ.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. Моделирование систем выполнялось с помощью программных пакетов ANSYS Fluent, MATLAB и GAMBIT 2.2.30. Натурные эксперименты проводились в г. Аль-Зубаир, расположенном в районе г. Басра (Ирак).

При моделировании грунтового массива и ГВТ использовались метод конечных элементов и алгоритм трехдиагональной матрицы, при моделировании СВТ – приближение Буссинеска, модель турбулентности k-ε и алгоритм SIMPLE.

Для проведения натурных экспериментов использовались физические модели ГВТ и СВТ, созданные в натуральную величину. Для измерения и регистрации температуры использовались термосопротивления типа NTC с термопреобразователями Willhi WH7016C и KI&BNT, для регистрации влажности и скорости движения воздуха - анемометр + психрометр Extech Instruments, model 451181. Обработка результатов измерения производилась с помощью специализированных пакетов программ статистической обработки.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты теоретического и экспериментального исследования системы пассивного охлаждения с помощью интегрированной СВТ и ГВТ;
2. Результаты экспериментального исследования температуры грунта в районе г. Басра (Республика Ирак) на глубине 1, 2, 3 и 4 метра от поверхности земли на протяжении календарного года.

**Достоверность результатов** обеспечивается введением обоснованных допущений при моделировании частей системы пассивного охлаждения, применением фундаментальных законов теплообмена и гидрогазодинамики и удовлетворительным совпадением результатов моделирования с экспериментальными данными.

**Апробация.** Результаты исследований опубликованы в 5 печатных работах в Индии и Российской Федерации. Из них 3 статьи в международных научных журналах, индексируемых в базе Scopus, 3 тезисов докладов.

Материалы работы были доложены на Научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, 2018 г.;

Международной научной конференции «Современные технологии и экономика энергетики», Санкт-Петербург, 2019 г.; Научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», Санкт-Петербург, 2019 г.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на семинарах Mechanic engineering department University of Basrah, Basra, Iraq, и Высшей школы атомной и тепловой энергетики Института энергетики СПбПУ в 2018 – 2021 гг.

Теоретические и практические результаты исследований внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО СПбПУ. Результаты моделирования и практические рекомендации по проектированию систем геотермального кондиционирования используются предприятием WATAN AL-AJDAD Trading Company LLC, Basra, Iraq, что подтверждается актом о внедрении.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1**

#### **1.1. Введение**

Подход, используемый для контроля притока и отвода тепла из здания в жаркое время года для создания комфортного микроклимата при условии минимальных затрат на электроэнергию, называется пассивным охлаждением. В данной работе описывается один из возможных способов осуществления пассивного охлаждения здания – применение грунто-воздушного теплообменника (ГВТ) или в сочетании с солнечной вытяжной трубой (СВТ). Для изучения работы системы вентиляции и охлаждения жилого здания через сопряженную конструкцию ГВТ и СВТ, использование которой позволяет приводить систему вентиляции в действие без подведения электроэнергии, проводился экспериментально-математический анализ. При правильной конструкции данная система может обеспечить комфортную

среду в жилом здании в течение многих часов в условиях жаркого климата. Для достижения необходимых параметров микроклимата в здании проводится расчет числа требуемых ГВТ и СВТ с указанием определенных особенностей данной системы [1]. В течение последних лет спрос на энергию в новых зданиях лет снизился, а интерес к системам отопления и кондиционирования, основанным на возобновляемых источниках энергии, наоборот растет. В качестве одного из возобновляемых источников энергии можно использовать тепло грунта. На определенной глубине температура грунта зимой выше, чем на поверхности почвы, летом – наоборот. Этот эффект объясняется высокой тепловой инерцией верхних слоев грунта. Основываясь на этом, можно использовать наружный воздух, проходящий по заглубленным трубам ГВТ, для отопления здания зимой и его кондиционирования летом [2].

ГВТ может обеспечивать как отопление дома в зимний период, так и его кондиционирование в летний период. Основными преимуществами системы являются ее простота, высокая возможность охлаждения и нагрева, низкие эксплуатационные расходы, экономия ископаемого топлива и снижение вредных выбросов. Благодаря рекуперации снижается потребность в отоплении здания в зимний период. В летний период, при условии эффективной теплоизоляции ограждающих поверхностей здания, система ГВТ и СВТ обеспечивает кондиционирование воздуха в помещении и позволяет снизить расход электроэнергии. Исходя из этого можно отметить, что ГВТ – оптимальный вариант для отопления и кондиционирования зданий в условиях жаркого климата. Производительность ГВТ характеризуется теплопроводностью грунта с учетом влажности, теплопередачей между наружным воздухом и грунтом в зависимости от изменения температуры воздуха.

Эти зависимости привели к изучению свойств грунта, влиянию влаги на теплообмен между воздухом и грунтом, влиянию работы нескольких пар труб ГВТ с различными методами изоляции. Результаты всех этих исследований показали, что задача является нетривиальной, так как существует большое количество факторов, влияющих на работу ГВТ, что усложняет составление математической модели и получение решения. Структура почвы неоднородна, ее проводимость меняется в зависимости от температуры, влажности и типа грунта. На поверхность почвы, в свою очередь, оказывают влияние не только суточные и сезонные колебания температуры, но покрывающие материалы – бетон, трава, также учитывается влияние дождя и снега. По мере прохождения трубного пространства температура воздуха также меняется. Построение геометрии ГВТ усложняется при размещении нескольких труб в одном трубном канале. Учитывая данную геометрию, можно рассмотреть несколько схемных решений размещения ГВТ.

Составление математической модели ГВТ является важной задачей для оценки его работы и дальнейшего проектирования и монтажа конструкции. При численном моделировании можно оценить возможные потери тепла [3].

## **1.2 Система пассивного охлаждения**

Грунт обладает достаточно высокой теплопроводностью, а также аккумулирующей способностью, что делает его выгодным источником тепла для отопления здания, а также его кондиционирования. Суточные колебания почвы, имеющие место на поверхности земли, достаточно медленно распространяются вглубь, соответственно, температура в глубоких слоях почвы изменяется с большим отставанием. Постоянная температура почвы обычно приблизительно равна среднегодовой температуре воздуха. Зимой

температура почвы повышается с увеличением глубины до определенной глубины и, следовательно, делает возможным использование грунта в качестве источника тепла. Летом температура почвы снижается с увеличением глубины, что позволяет использовать тепло грунта для кондиционирования здания [12].

В своей работе Сануси и Замри [9] показали, что теплоемкость грунта может быть полезно использована для отопления или охлаждения здания. Талиб и Раджа [10] провели аналитическое исследование факторов, влияющих на разницу температур почвы относительно глубины и времени. Для исследования изменения годовой температуры почвы была использована одномерная математическая модель. Далее в решение, полученное с помощью математической модели, были внесены поправки с учетом реальных измерений температуры почвы в районе г. Кербелы (Ирак). Полученная модель с поправками в дальнейшем использовалась для составления характеристик почвы (ее температуры относительно глубины залегания и времени) в г. Кербела. Результаты показывают, что на глубине 6 м температура почвы была постоянной. Было показано, что данные энергоемкие системы будут общедоступными особенно после нефтяного кризиса 1973 года [10]. В работе Госвами и Бисели [11] рассматриваются теплообменники типа земля-воздух открытого и закрытого контура. При использовании теплообменника закрытого контура осуществляется рециркуляция воздуха, что позволяет уменьшить длину трубы теплообменника. Также была изучена работа теплообменника открытого контура, так как применение данной системы ново в Малайзии. В систему такого теплообменника открытого контура также включен тепловой насос, позволяющий увеличить общую холодопроизводительность и КПД системы.

### 1.3 Принцип работы ГВТ

ГВТ представляет собой змеевик, проложенный на определенной глубине. Через заборный коллектор в змеевик поступает наружный воздух, который проходит через систему труб, постепенно нагреваясь, и далее через выходной коллектор поступает в здание. Низкотемпературное тепло грунта передается воздуху, проходящему по системе труб путем конвективного теплообмена между воздухом, находящимся в трубке теплообменника, и внутренней ее поверхностью; и кондуктивного теплообмена между внутренней поверхностью трубки и грунтом.

При составлении численной модели грунто-воздушного теплообменника принимались следующие допущения:

1. Изотропная теплопроводность для всего слоя грунта вокруг трубы.
2. Тепловое сопротивление стенки трубы незначительно, им можно пренебречь;
3. Температуру на поверхности почвы принимают равной температуре наружного воздуха;
4. Труба теплообменника имеет постоянную площадь поперечного сечения круглого профиля;
5. Слой грунта на расстоянии 'r' от наружной поверхности трубы оказывает незначительное тепловое воздействие [4].

ГВТ может работать в режиме отопления, когда температура окружающего воздуха меньше температуры почвы. Использование ГВТ не исключает включение дополнительных резервных источников тепла. Несмотря на широкое распространение механических систем вентиляции и кондиционирования воздуха в зданиях, наблюдается рост использования

пассивных систем кондиционирования, так как их применение возможно в широком температурном диапазоне, с достаточно сильными перепадами температур в дневное и ночное время суток в летний и зимний периоды. В работе приводится не только принцип действия данного теплообменника, но и его устройство, характеристики и особенности работы. Производительность ГВТ зависит от условий его эксплуатации и конструкции. На данный момент ГВТ в основном установлены в зданиях с уже имеющейся механической системой вентиляции и кондиционирования воздуха, требуемый поток воздуха в ГВТ нагнетается воздуходувным вентилятором. В основном, ГВТ представляют из себя змеевик или систему параллельно включенных труб радиусом порядка 5 см, изготовленными из поливинилхлорида, бетона или сборной металлической конструкции. Расстояние между трубами – 1м. Размер ГВТ зависит от требуемой кратности воздухообмена и площади кондиционируемого помещения. Скорость воздуха для небольших помещений с малой кратностью воздухообмена обычно составляет 2 м/с, а для больших помещений она может быть увеличена до 5 м/с.

#### **1.4 Солнечная вытяжная труба**

Солнечный дымоход представляет собой вертикально расположенную шахту, использующую солнечную энергию для осуществления естественной вентиляции зданий и помещений. Данная технология не влечет за собой значительных затрат по эксплуатации, и может быть использована как при строительстве новых зданий, так и при реконструкции старых. Устанавливается СВТ на уровне крыши здания либо вплотную прилегает к стене. Теплопередача в СВТ осуществляется конвективным путем. СВТ обычно изготавливается стеклянной, состоящей из двух слоев, один из

которых может быть выкрашен в черный цвет для улучшения поглощения солнечной энергии. Также имеется входное отверстие, через которое всасывается воздух. За счет использования СВТ может осуществляться как вентиляция помещения, так и его кондиционирование. Схожее с СВТ устройство – стена Тромба, представляет собой каменную конструкцию, установленную на южной стороне здания и скрытая остеклением, также может быть выкрашена в черный цвет. Схема данной конструкции представлена на рис. 2. СВТ имеет ряд преимуществ: отсутствие вредных выбросов, практически не требуется техническое обслуживание, не требуется подвод электроэнергии на привод, может быть использована как для кондиционирования, так и для отопления помещений. В качестве недостатков можно отметить затраты на монтаж и возведение конструкции [5].

Солнечная вытяжная труба – это система пассивного солнечного отопления и охлаждения зданий, которая может работать без привода электроэнергии и за счет создания абсорбции солнечной энергии и создания всасывающего эффекта создает естественную циркуляцию воздуха в помещении [6].

## **Глава 2**

### **2.1. Введение**

В данной работе представлена модель грунтового воздушного теплообменника (ГВТ) и солнечной вытяжной трубы (СВТ). Важным условием для обеспечения комфортного микроклимата внутри здания является определение скорости воздушного потока, которая может быть обработана в условиях моделирования при определенных конструктивных и

эксплуатационных условиях. Система теплообмена «воздух-грунт», рассматриваемая в этой статье, сочетает в себе два процесса теплообмена, а именно: конвективный теплообмен между воздухом, находящимся в трубке теплообменника, и внутренней ее поверхностью; и кондуктивный теплообмен между внутренней поверхностью трубки и грунтом.

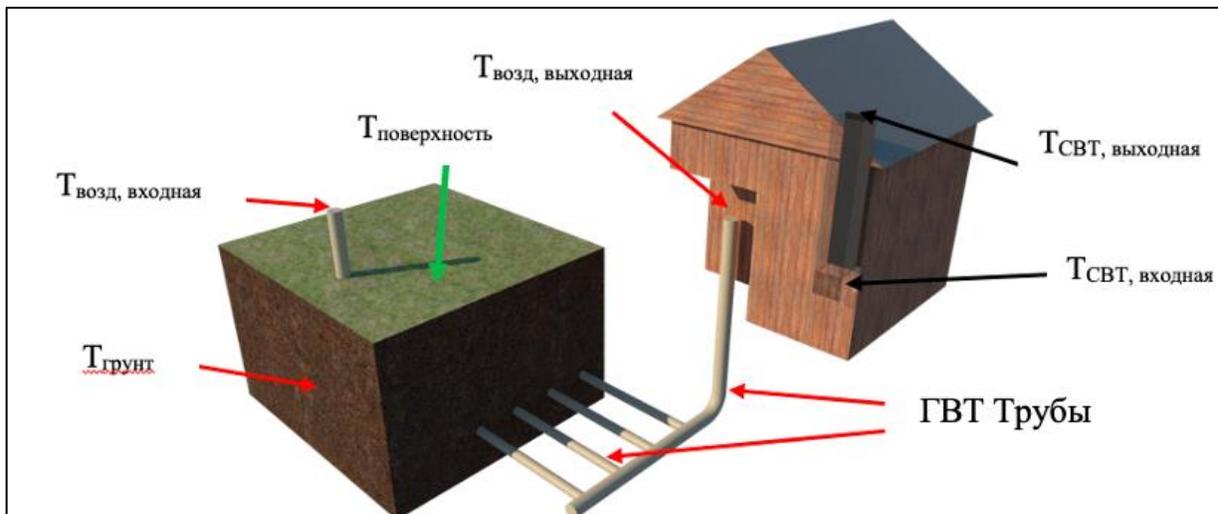


Рис. 1. Трехмерная Модель СВТ и ГВТ

## 2.2 Моделирование ГВТ осуществляется путем реализации двух отдельных моделей:

- тепловая модель слоя почвы;
- модель ГВТ, рассчитывающая температуру воздуха на выходе из теплообменника в зависимости от температуры воздуха на входе в теплообменник и температуры слоя почвы, где пролегают трубы ГВТ.

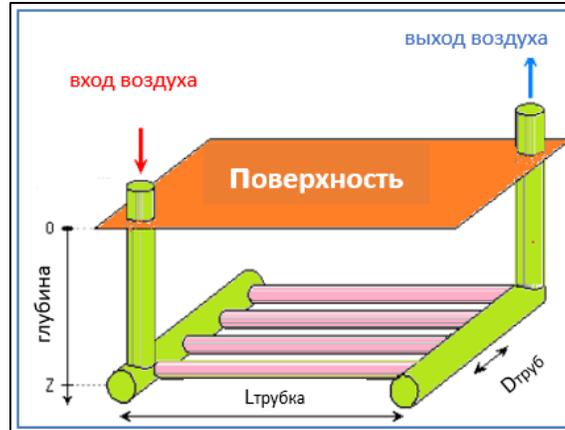


Рис. 2. Модель грунто-воздушного теплообменника

Задача построения математической модели грунта состоит в том, чтобы получать температуру грунта на определенной глубине без учета влияния ГВТ на температуру почвы. Тепловая модель учитывает три не зависимых явления:

- Влияние атмосферных условий;
- Теплопроводность поток от здания, расположенного вблизи участка;
- Теплопроводность поток от подвала здания.

Учитывая все эти условия, можно составить уравнение теплопроводности без учета тепловыделения:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + s \quad (1)$$

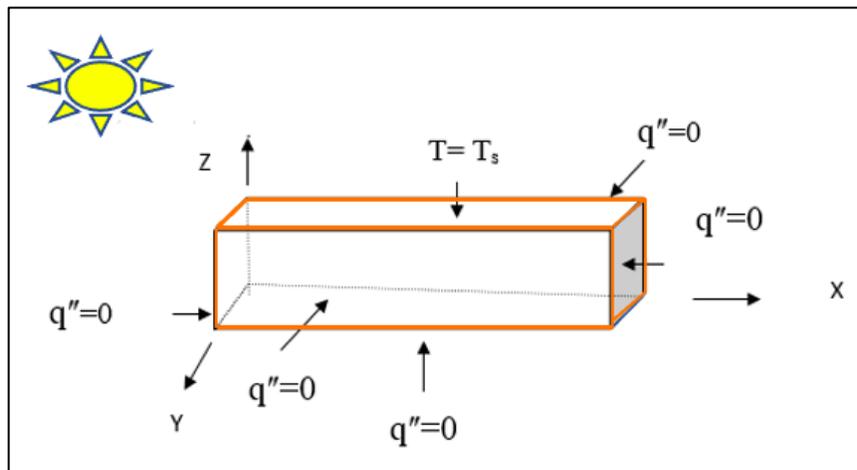


Рис. 3. Произвольный трехмерный прямоугольный объем

Граничные условия Граничные условия можно разделить на 3 группы:

- Граничные условия, накладываемые поверхностью почвы;  $T=T_s$
- Граничные условия, краевых слоев расс матриваемого объема почвы;  $q''=0$
- Граничные условия глубоких слоев почвы  $T= T(z, t)$ .

Процесс дискретизации общего уравнения диффузии представлен в следующем виде (рис.3).

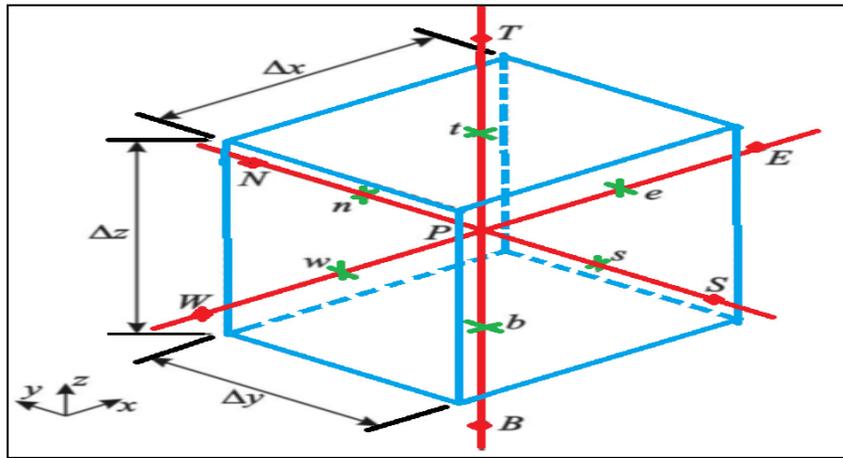


Рис. 4. Схема произвольного конечного трехмерного элемента

Уравнение тепловой диффузии выполняется по всему пространству управляющего объема, определяемому схемой хранения неизвестных в вершинах контрольного объёма, а также по приращению времени. В

комплексной форме уравнение имеет вид:  $\int_t^{t+\Delta t} \left( \int_{cv} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} dV \right) dt =$

$$\int_t^{t+\Delta t} \left( \int_{cv} \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} dV \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_{cv} \lambda \frac{d^2 T}{dy^2} dV \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_{cv} \lambda \frac{d^2 T}{dz^2} dV \right) dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{cv} s dV dt \quad (2)$$

Градиент T на управляющие поверхности аппроксимируется при помощи дифференцирования относительно центра. Включим дискретизированные нестационарные и диффузионные члены в общее интегральное уравнение теплопроводности конечного объема:  $\rho C (T_p - T_p^0) \Delta V = \lambda S_{yz} \Delta t \left[ \left( \frac{T_E - T_P}{\Delta x_{PE}} \right) - \left( \frac{T_P - T_W}{\Delta x_{WP}} \right) \right] +$

$$\lambda S_{xz} \Delta t \left[ \left( \frac{T_N - T_P}{\Delta y_{PN}} \right) - \left( \frac{T_P - T_S}{\Delta y_{SP}} \right) \right] + \lambda S_{xy} \Delta t \left[ \left( \frac{T_T - T_P}{\Delta z_{PT}} \right) - \left( \frac{T_P - T_B}{\Delta z_{BP}} \right) \right] + \bar{s} \Delta V \quad (3)$$

Перепишем уравнение в стандартной форме:

$$T_p = \alpha_W T_W + \alpha_E T_E + \alpha_S T_S + \alpha_N T_N + \alpha_B T_B + \alpha_T T_T + \alpha_P^0 T_P^0 + b \quad (4)$$

Для решения уравнений теплопроводности используется алгоритм трехдиагональной матрицы.

Данная модель теплообменника – это результат компромисса между упрощенной моделью с вероятностью получения неточных результатов, и более детальной моделью, требующей большого количества приближений и расчетов. Тепловые связи между рядом горизонтально расположенных трубок, воздухозаборной и воздуховыпускной трубой (коллектором) в тепловой модели не рассматривались. В дополнение к геометрическим допущениям, сделанным выше, при проектировании предполагается оптимизировать характеристики ГВТ таким образом, чтобы для каждой трубы:

1. Потери давления в коллекторах не учитываются
2. Грунт обладает изотропными свойствами.
3. Соединение труб с коллекторами идентично.

Для моделирования теплообменного аппарата был использован метод конечных разностей.

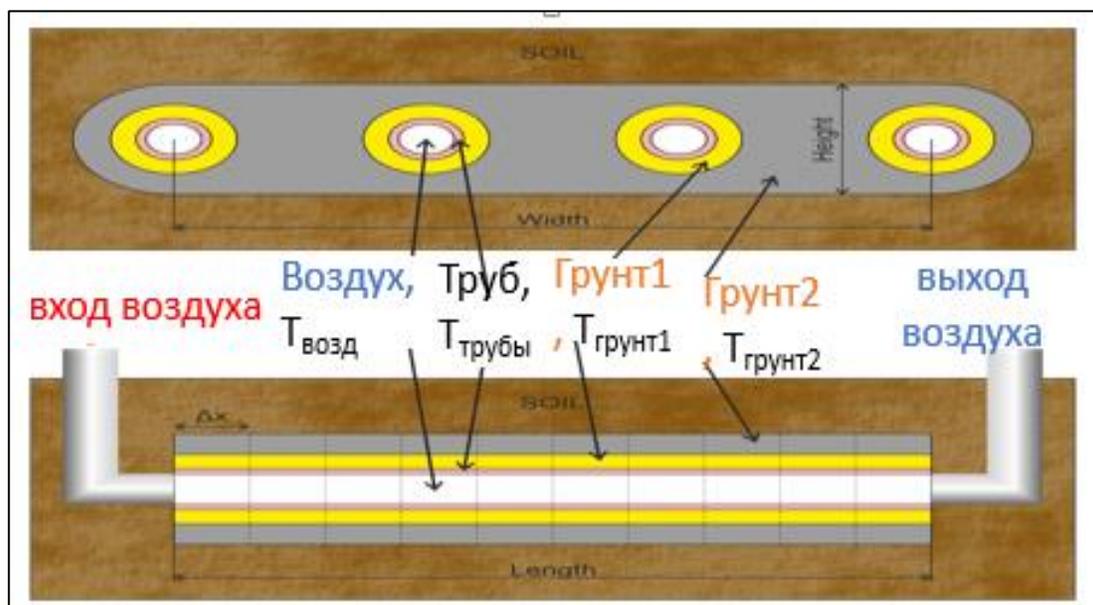


Рис. 5. Схематическое изображение предлагаемого вида сетки спереди (верх) и сбоку (низ)

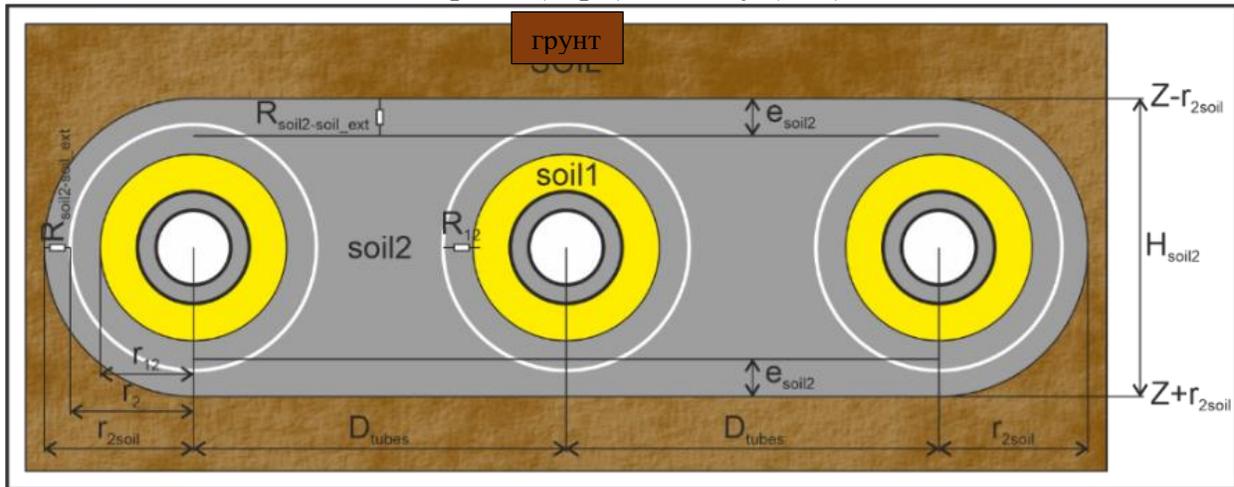


Рис. 6. Структура ячейки «грунт2» для трех трубок теплообменника

В этом методе система или установка разбивается на множество объемов (ячеек).

- Ячейки с круглым поперечным сечением, расположенные в центральной части трубки, по этому пространству циркулирует воздух (ячейка «воздух»).
- Ячейка, представляющая кольцевое пространство трубки (ячейка «трубка»).
- Первая ячейка кольцевого сечения грунта (ячейка «грунт1»)
- Вторая ячейка прямоугольного сечения грунта (ячейка «грунт2»).

Скрытая теплота, выделяемая в процессе испарения или конденсации воды при контакте трубы с воздухом, не моделируется. Объем конденсата невелик и влияние его на тепловые характеристики в этом случае считается незначительным.

Четыре неизвестных  $T_{\text{возд}}$ ,  $T_{\text{трубы}}$ ,  $T_{\text{грунт1}}$  и  $T_{\text{грунт2}}$  соответствуют четырем дифференциальным уравнениям. Их вид основан на составлении тепловых

балансов в каждой клетке. Эти балансы здесь представлены двумя типами: баланс "закрытой" и "открытой" ячейки.

Уравнение баланса энергии для ячейки «воздух»

$$C_{\text{возд}} \dot{m}_{\text{возд}} \Delta T_{\text{возд}} = KS_{\text{возд-труба}} (\bar{T}_{\text{труба}} - \bar{T}_{\text{возд}}) \quad (5)$$

Где  $\Delta T_{\text{возд}}$  представляет собой разность между температурой воздуха на входе и выходе в разрезе воздушной ячейки и средней температурой воздуха в рассматриваемом разрезе.

Уравнение баланса энергии для ячейки «трубка»

$$C_{\text{труба}} \frac{d\bar{T}_{\text{возд}}}{dt} = KS_{\text{возд-труба}} (\bar{T}_{\text{возд}} - \bar{T}_{\text{труба}}) + KS_{\text{труба-грунт1}} (\bar{T}_{\text{грунт1}} - \bar{T}_{\text{труба}}) \quad (6)$$

Уравнение баланса энергии для ячейки «грунт1»

$$C_{\text{грунт1}} \frac{d\bar{T}_{\text{грунт1}}}{dt} = KS_{\text{труба-грунт1}} (\bar{T}_{\text{труба}} - \bar{T}_{\text{грунт1}}) + KS_{\text{грунт1-грунт2}} (\bar{T}_{\text{грунт2}} - \bar{T}_{\text{грунт1}}) \quad (7)$$

Уравнение баланса энергии для ячейки «грунт2»

$$C_{\text{грунт2}} \frac{d\bar{T}_{\text{грунт2}}}{dt} = KS_{\text{грунт1-грунт2}} (\bar{T}_{\text{грунт1}} - \bar{T}_{\text{грунт2}}) + KS_{\text{грунт2-грунт}} (\bar{T}_{\text{грунт1}} - \bar{T}_{\text{грунт2}}) \quad (8)$$

$$\bar{T}_{\text{грунт}} = \frac{T_{\text{грунт}a} + T_{\text{грунт}b}}{2} \quad (9)$$

$$T_{\text{грунт}a} = T_{\text{грунт}} (Z - r_{2\text{грунт}}), T_{\text{грунт}b} = T_{\text{грунт}} (Z + r_{2\text{грунт}}).$$

Общая форма коэффициентов  $KS_{i-j}$  выражается как обратная величина эквивалентного теплового сопротивления между ячейками  $i$  и  $j$ :

$$KS_{\text{возд-труба}} = \frac{1}{R_{\text{возд-труба}}} \quad (10)$$

$$KS_{\text{труба-грунт1}} = \frac{1}{R_{\text{труба-грунт1}}} \quad (11)$$

$$KS_{\text{грунт1-грунт2}} = \frac{1}{R_{\text{грунт1-грунт2}}} \quad (12)$$

$$\text{коэффициент конвективной теплопередачи: } \alpha = 0.0214 (Re^{0.8} - 100) Pr^n \frac{\lambda_{\text{возд}}}{2T_{\text{внутр}}} \quad (13)$$

**2.2.1 Составление системы уравнений:** Для данного отрезка система решений состоит из трех уравнений (6), (7), (8). Она сводится к единому матричному уравнению формы

$$C\dot{T} = AT + EW \quad (14)$$

где  $C$ ,  $T$ ,  $A$ ,  $E$  и  $W$  являются векторами или матрицами.

**2.2.2 Порядок расчета:** Рассчитать  $T_{\text{возд}}|_i$  в зависимости от температур соседних ячеек  $T_{\text{возд}}|_{i-1}$  и  $T_{\text{трубы}}|_{i-1}$  путем решения уравнения (5):

$$C_{\text{возд}} \dot{m}_{\text{трубы}} (T_{\text{возд}}|_i - T_{\text{возд}}|_{i-1}) = KS_{\text{возд-труба}} (T_{\text{трубы}}|_{i-1} - \bar{T}_{\text{возд}}|_i) \quad (15)$$

Где:  $T_{\text{возд}}|_i$  в уравнении определяется среднее арифметическое между входной и выходной температурой ячеек,  $\bar{T}_{\text{возд}}|_i = \frac{T_{\text{возд}}|_i + T_{\text{возд}}|_{i-1}}{2}$ ,

$$T_{\text{возд}}|_{i-1} = \frac{2F_0 T_{\text{трубы}}|_{i-1} + (2 - F_0) T_{\text{возд}}|_{i-1}}{2 + F_0},$$

$$\text{Где: } F_0 = \frac{KS_{\text{возд-труба}}}{C_{\text{возд}} \dot{m}_{\text{возд}}}$$

### 2.3. Моделирование солнечной вытяжной трубы (СВТ):

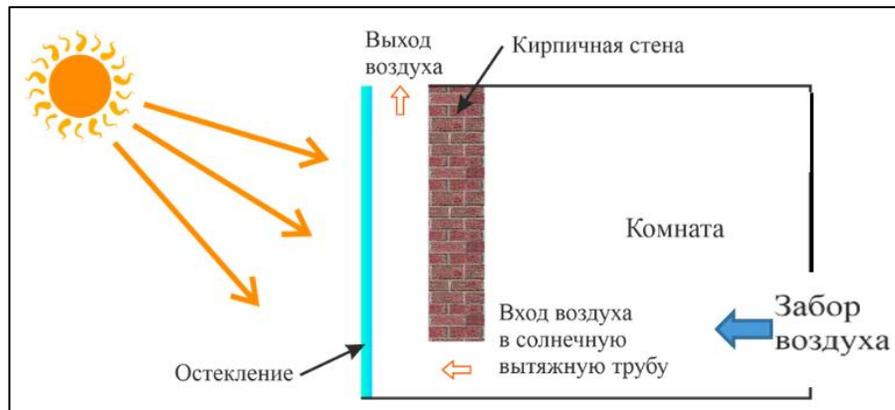


Рис. 7. СВТ для создания естественной циркуляции воздуха

Аналитическая модель движения потока жидкости, создаваемого за счет естественной конвекции, и передачи тепла в СВТ показана на рис. 7.

Следующие гипотезы использованы для построения системы уравнений:

- Воздушный поток в СВТ является трехмерным и несжимаемым;
- Теплообменом между стекленной поверхностью трубы и стенкой поглотителя пренебрегаем;
- Отсутствует теплообмен при излучении;
- Рабочая жидкость обладает постоянными физическими свойствами;
- Плотность воздуха зависит от температуры;
- Пренебрегаем свойством рассеивания тепла.

Пренебрегаем свойством рассеивания тепла. Естественную конвекцию в СВТ можно описать через дифференциальные уравнения, записанные в декартовых координатах трехмерными уравнениями Навье-Стокса в сочетании с уравнением сохранения энергии для области.

В приближении Буссинеска применяемое уравнение непрерывности, уравнения импульса и энергии принимают следующий вид:

$$\text{Уравнение неразрывности: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (16)$$

$$\text{Уравнение импульса в направлении } x: \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \rho g(T - T_\infty) \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \quad (17)$$

$$\text{Уравнение импульса в направлении } y: \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \rho g(T - T_\infty) \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} \quad (18)$$

$$\text{Уравнение импульса в направлении } z: \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho g_z(T - T_\infty) \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} \quad (19)$$

$$\text{Уравнение баланса энергии: } \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vT)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (20)$$

В турбулентной области и  $\Gamma$  и  $\mu$  были заменены их эффективными значениями,  $\Gamma_{eff}$  и  $\mu_{eff}$  соответственно. Эти значения определены как:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \dots (28), \Gamma_{eff} = \frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \quad (21)$$

Стандартная модель  $k$ - $\varepsilon$  основана на двух значениях: скорости рассеяния ( $\varepsilon$ ) и турбулентной кинетической энергии ( $k$ ). Распределения кинетической энергии ( $k$ ) и скорости рассеяния ( $\varepsilon$ ) получены из следующих дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \quad (23)$$

– Начальные условия:  $T = T_r; P = P_r; u = v = w = 0 (x, y, z, t = 0)$ .

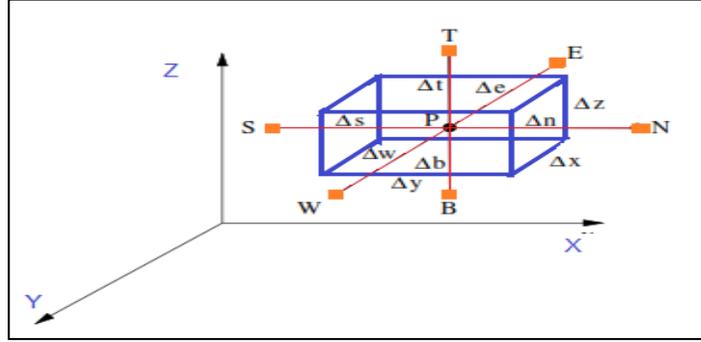


Рис. 8. Геометрия контрольного объема рассматриваемой области

Таким образом, полученное интегральное уравнение диффузии и конвекции выражается в алгебраической форме как:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_e^w \int_b^t \int_s^n \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + s_\phi \right] dx dy dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_e^w \int_b^t \int_s^n \left[ \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) \right] dx dy dz \quad (24)$$

Система уравнений температур решается с помощью скорректированных скоростей. Посредством проведения итераций устанавливается связь между всеми переменными  $\vec{V}$ , P и T.

$$a_{P,u} u_P + \sum_{NGB} a_{NGB,u} u_{NGB} = b_{P,u} \quad (25)$$

$$a_{P,v} v_P + \sum_{NGB} a_{NGB,v} v_{NGB} = b_{P,v} \quad (26)$$

$$a_{P,w} w_P + \sum_{NGB} a_{NGB,w} w_{NGB} = b_{P,w} \quad (27)$$

$$a_{P,T} T_P + \sum_{NGB} a_{NGB,T} T_{NGB} = b_{P,T} \quad (28)$$

$$a_{P,P'} P'_P + \sum_{NGB} a_{NGB,P'} P'_{NGB} = b_{P'} \quad (29)$$

### Глава 3

Приводится описание натуральных экспериментов по монтажу и монтированию ГВТ и СВТ. В ходе работ было проведено измерение температур почвы, окружающего воздуха, а также воздуха, нагретого либо охлажденного при помощи пассивной системы отопления и

кондиционирования. Все испытания проводились в окрестности г. Басра (Республика Ирак).

1. Измерения температуры почвы в зимний период (январь).
2. Измерения температуры почвы в летний период (июль).
3. Измерения температуры почвы и окружающего воздуха в течение года.

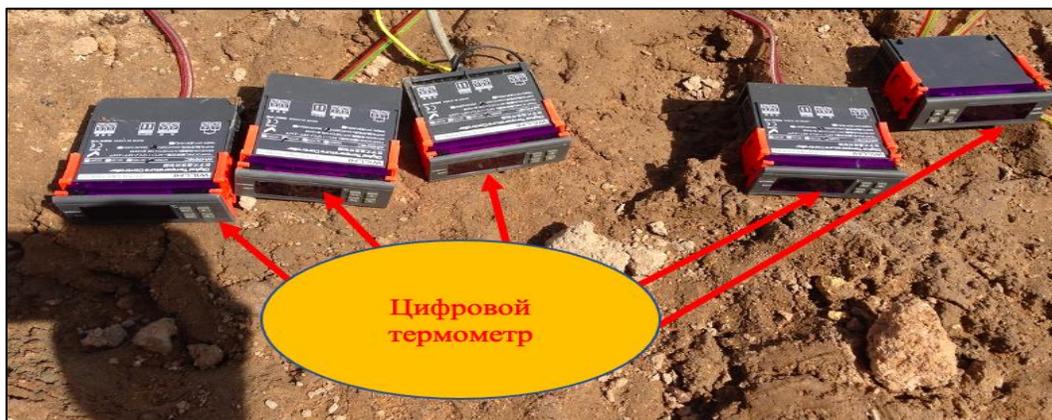


Рис. 9. Применяемые термопреобразователи



Рис.10. Поливинилхлоридные трубы ГВТ, проложенные на глубине 4м.

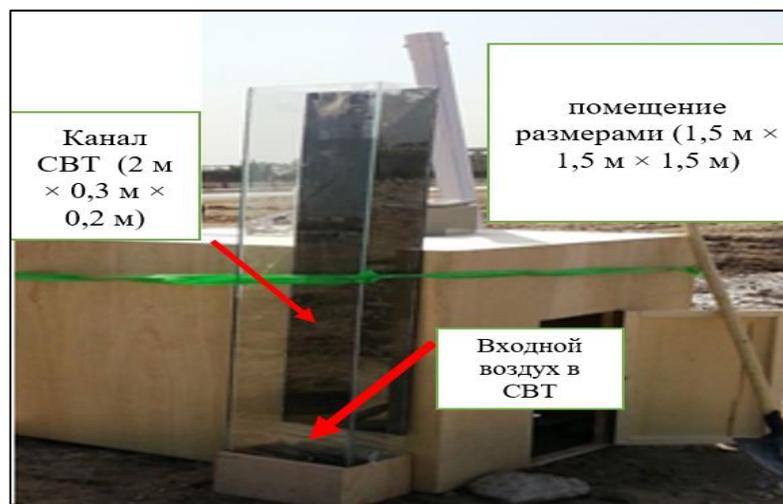


Рис.11. СВТ и воздушный зазор

Экспериментальная установка СВТ представлена. Канал СВТ подключается к помещению размерами (1,5 м × 1,5 м × 1,5 м). Труба (2 м × 0,3 м × 0,2 м) проходит по восточной части помещения. На рис.10.изображена фотография СВТ. Испытательная установка оснащена прибором для измерения температуры и скорости воздуха через трубу и помещение с помощью анемометра + психрометра модели 45118. Он имеет возможность подключения к компьютеру и/или принтеру для доступа к данным и их распечатки.

## Глава 4

### Анализ результатов

#### 4.1.Результаты, полученные в ходе натуральных испытаний:

##### 4.1.1.Температура почвы

Таблица 2 - Температура окружающего воздуха и почвы на различной глубине в январе 2018 года (зимний период).

Измеряемые величины	Температурный	Температурный	Средняя температура	Амплитуда колебаний
---------------------	---------------	---------------	---------------------	---------------------

	максимум (°C)	минимум (°C)	(°C)	(°C)
Температура окружающего воздуха	22	4	13	9
Температура почвы на глубине 1м	26.5	25.7	26.1	0.6
Температура почвы на глубине 2м	26.5	25.5	26	0.5
Температура почвы на глубине 3м	26.5	26.1	26.3	0.2
Температура почвы на глубине 4м	26.5	26.3	26.4	0.1

Наибольшая амплитуда колебаний температуры почвы наблюдается на глубине 1м. На глубине 3-4м амплитуда колебаний практически отсутствует (см. табл. 2) В течение года проведения исследований температура окружающего воздуха находилась в диапазоне от 4°C до 22°C.

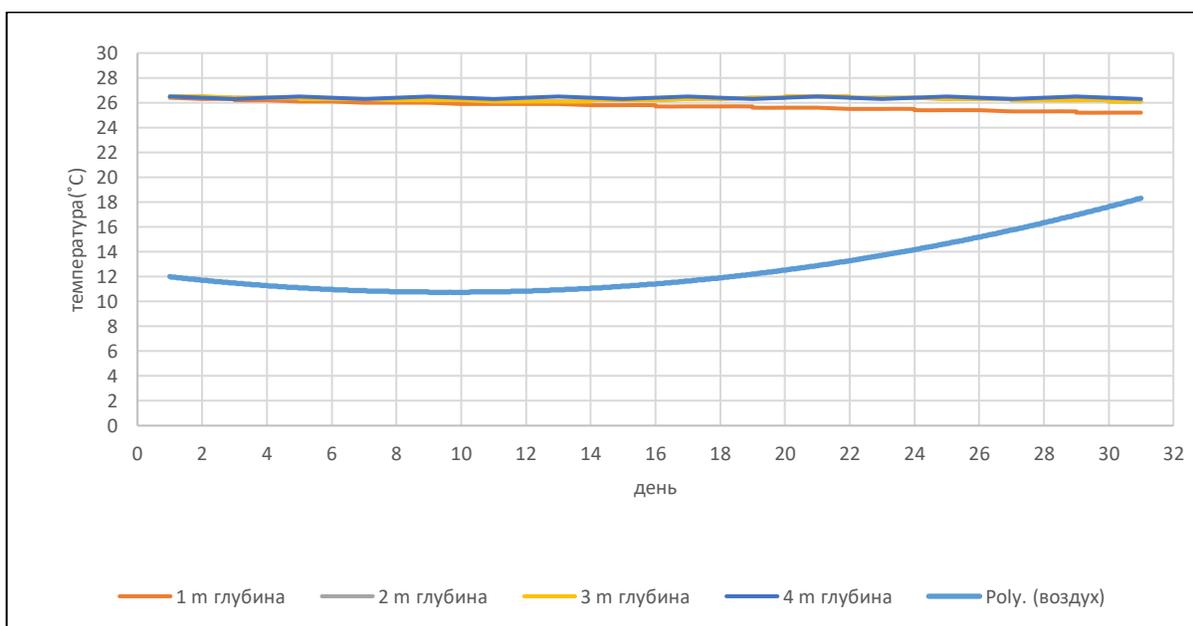


Рис. 12. Колебания температуры воздуха и почвы в течение **января** 2018г

Таблица 3 - Температура окружающего воздуха и почвы на различной глубине в июле 2018 года (**летний период**).

Измеряемые величины	Температурный максимум (°C)	Температурный минимум (°C)	Средняя температура (°C)	Амплитуда колебаний (°C)
Температура окружающего воздуха	49	26	35	14
Температура почвы на глубине 1м	29.5	27.5	28.2	1.3
Температура почвы на глубине 2м	29	26.9	28	1
Температура почвы на глубине 3м	26.8	26.7	26.7	0.1
Температура почвы на глубине 4м	26.4	26.3	26.35	0.05

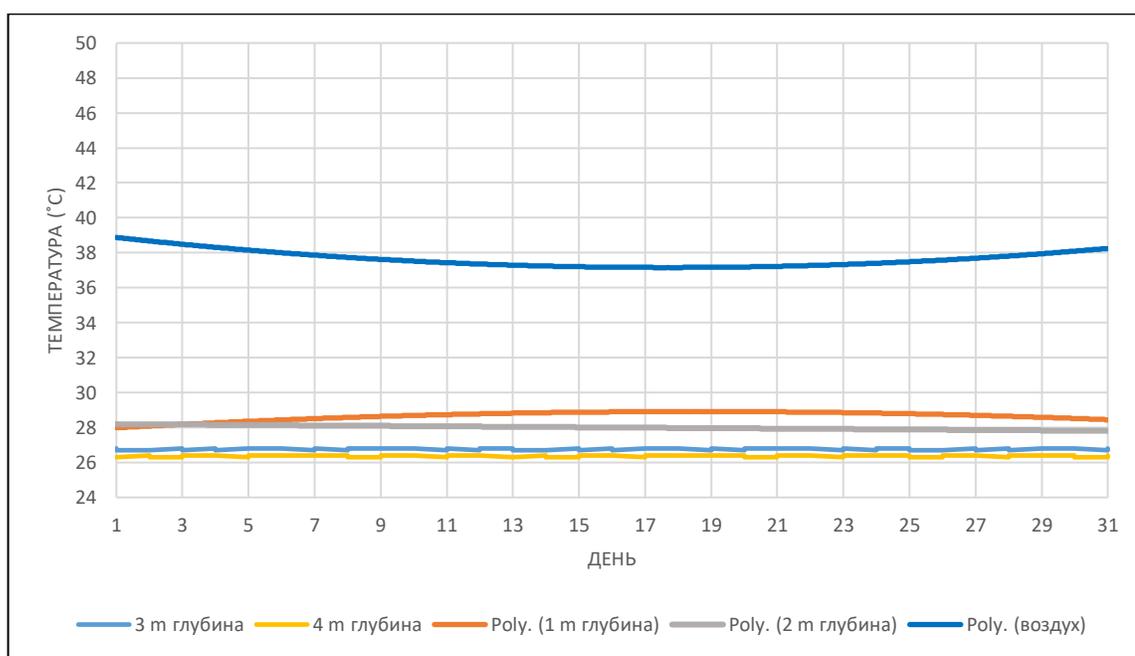


Рис. 13. Колебания температуры воздуха и почвы в течение **июля 2018г.**

При исследовании почвы в июле температура окружающего воздуха колебалась от 49°C до 26°C, а максимальная суточная разница температур за период эксперимента составила 21,2°C, что произошло 16 июля 2018 года, когда максимальная температура окружающего воздуха составила 47,2°C, а минимальная 26°C (рис.13).

**4.2. Анализ работы грунто-воздушного теплообменника:** Трубы ПВХ длиной 50 м на глубине 4 м

**4.2.1.А. В зимний период:** Рис.14. отображает изменение температуры в ноябре. Температура наружного воздуха колеблется от 5 °С до 32 °С. Температура почвы на глубине 4 м - от 26,1 °С до 26,5 °С. Температура на выходе из теплообменника от 24,3 °С до 27,1 °С.

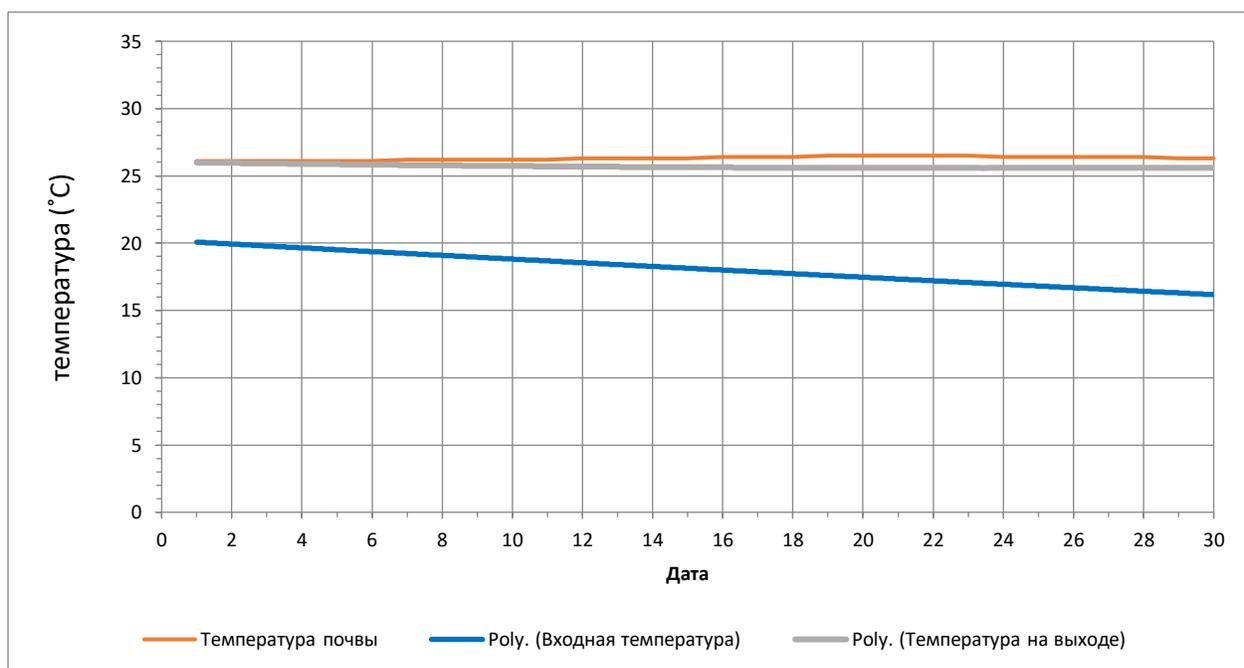


Рис. 14. Изменение температуры в ноябре 2018 года

**4.2.1. В. летний период:** Наружный ДБТ колеблется от 23,0 °С до 48,0 °С. Температура почвы на глубине 4 м под землей в июне колеблется от 26,2 °С до 26,5 °С. Температура на выходе из заглубленной трубы колеблется от 26,1 °С до 28,4 °С (рис.15).

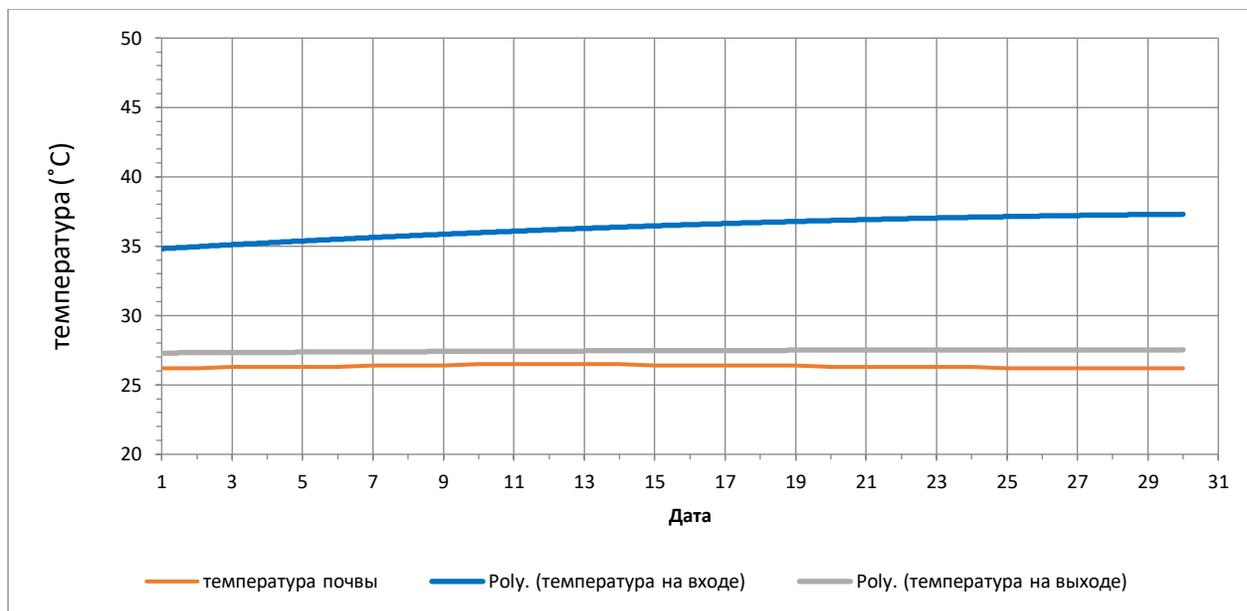


Рис.15. Изменение температуры в июне 2018 года

**4.2.2 Анализ работы грунто-воздушного теплообменника; Труб ПВХ длиной 30м на глубине 2 м**

**4.2.2.А. в зимний период, ноябрь:** На рис.16. представлены данные, собранные в ходе натуральных испытаний змеевика из ПВХ-труб. Температура на входе и выходе из трубы ПВХ длиной 30м колеблется от  $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $32,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  на входе и от  $23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $26,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  на выходе. Температура почвы - от  $25,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , наиболее высокая температура достигает  $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

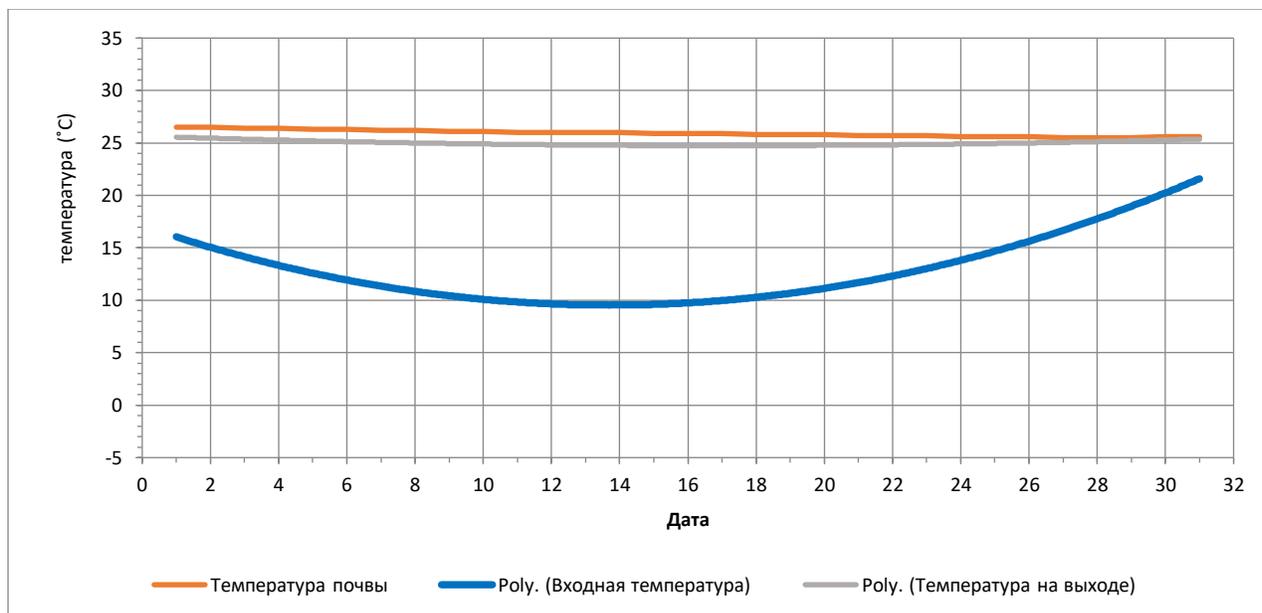


Рис. 16. Изменение температур воздуха в зимний период 2019 года

**4.2.2.В. в летний период, июнь:** На рис.17. представлена температура воздуха подземной теплообменной системы длиной 30м и расположенной на глубине 2м в июне. Относительная температура почвы колеблется от 26,8 °С до 27,5 °С. Температура на входе в трубу от 26 °С до 50 °С. Температура на выходе - от 26,9 °С до 29,6 °С.

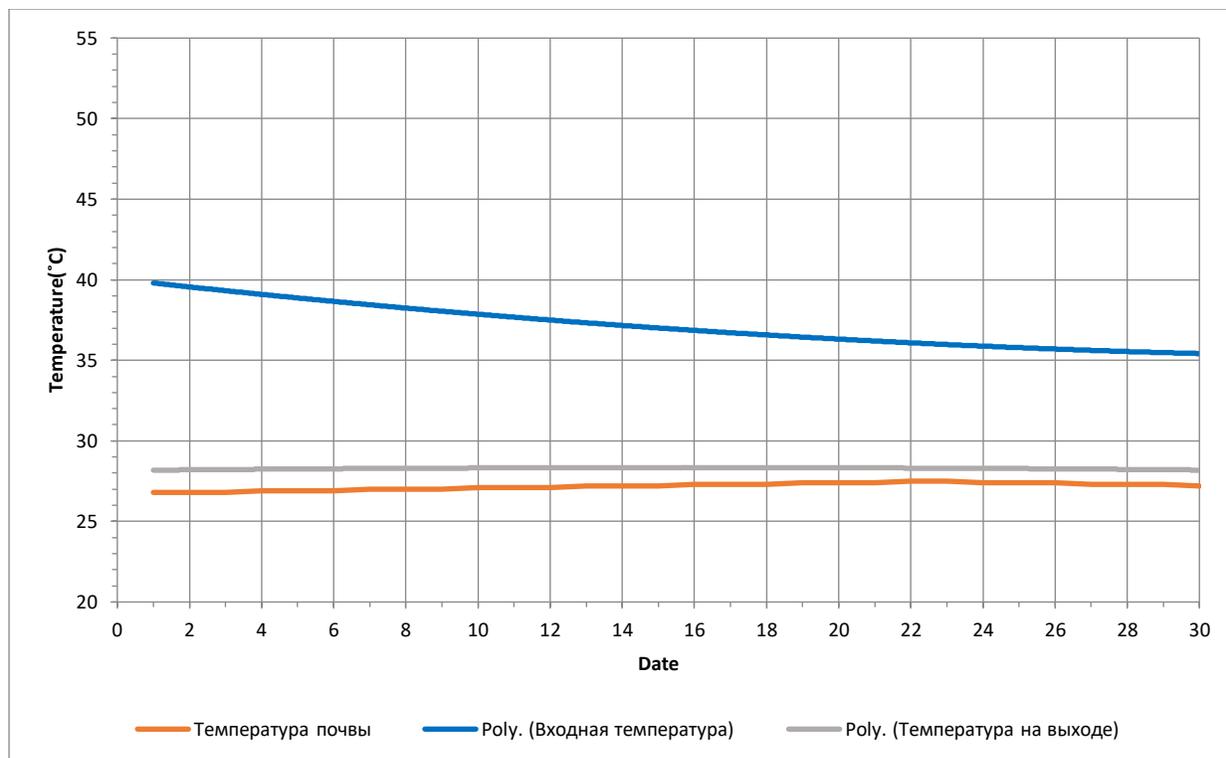


Рис. 17. Изменение температур воздуха в летний период 2019 года

#### 4.4. Анализ работы в климатических условиях г. Басры

Далее подробно будут рассмотрены результаты полученных экспериментальных исследований. А именно распределение скорости и температуры по СВТ на разных отметках, расход воздуха по высоте трубы и через входное отверстие. Экспериментальные результаты были получены 30 июня 2019 года, когда средняя температура окружающей среды составляла около 38,2 °С. На рис. 18. видно, что температура воздуха увеличивается по высоте СВТ.

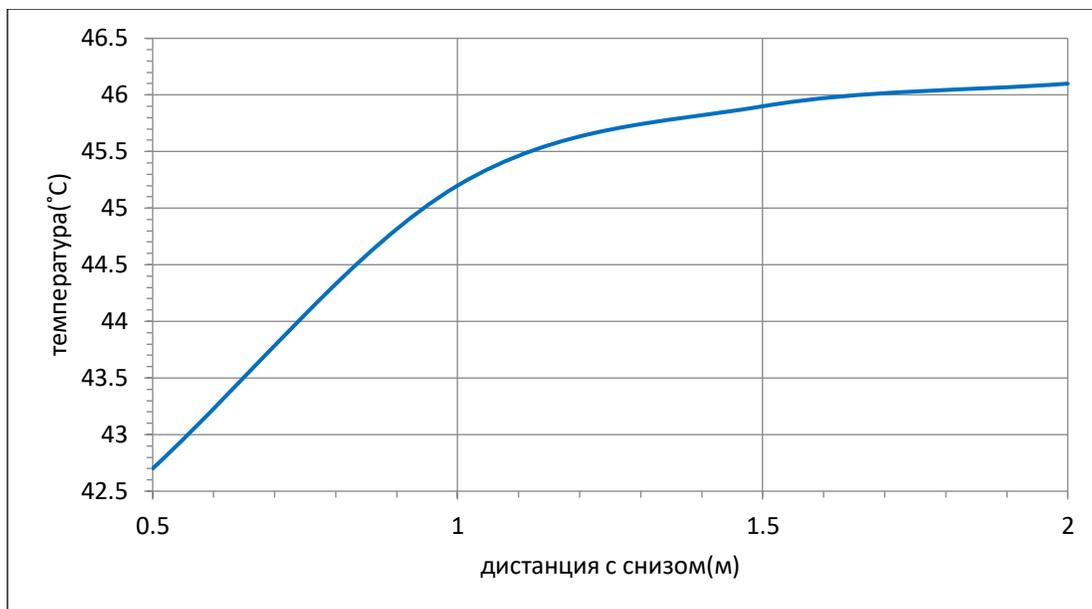


Рис. 18. Температура воздуха по высоте канала СВТ, ориентированной в южном направлении

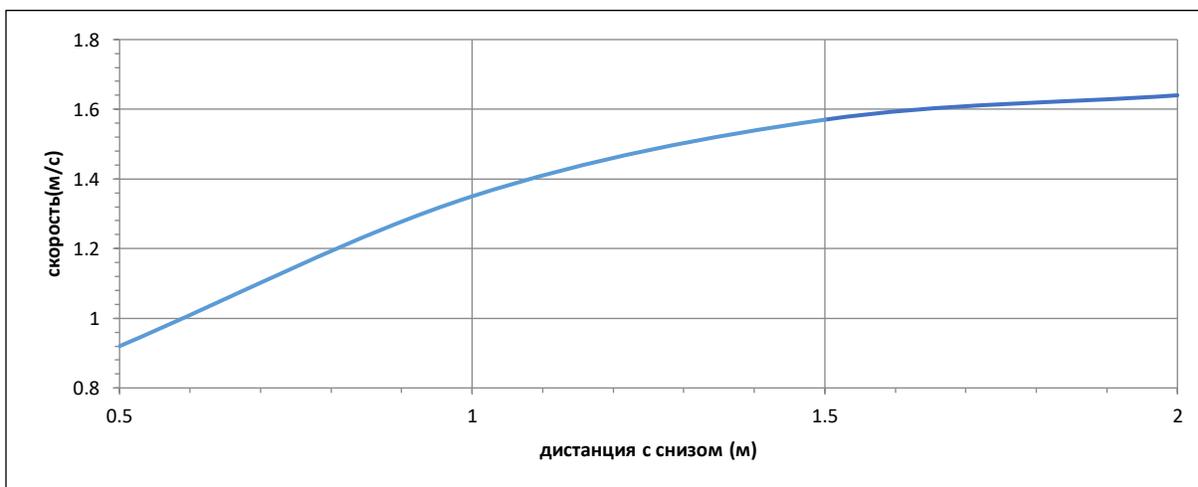


Рис. 19. Скорость воздушного потока по высоте канала солнечной трубы, ориентированной на юг, при ширине зазора 0.2 м

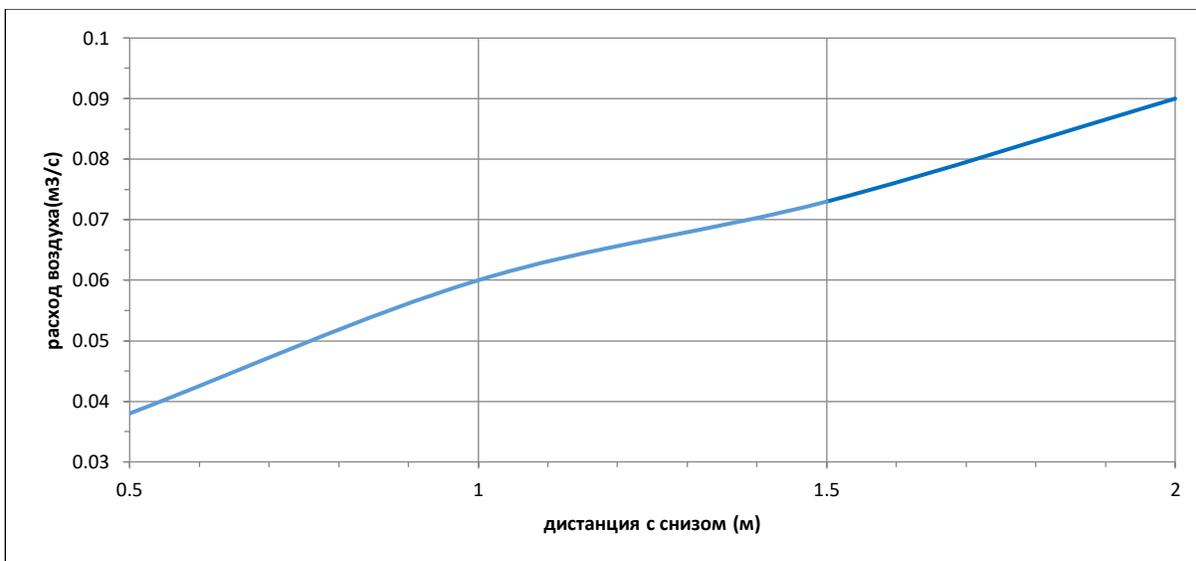


Рис.20. Расход воздуха по высоте канала солнечной трубы, ориентированной на юг, при ширине зазора 0.2 м.

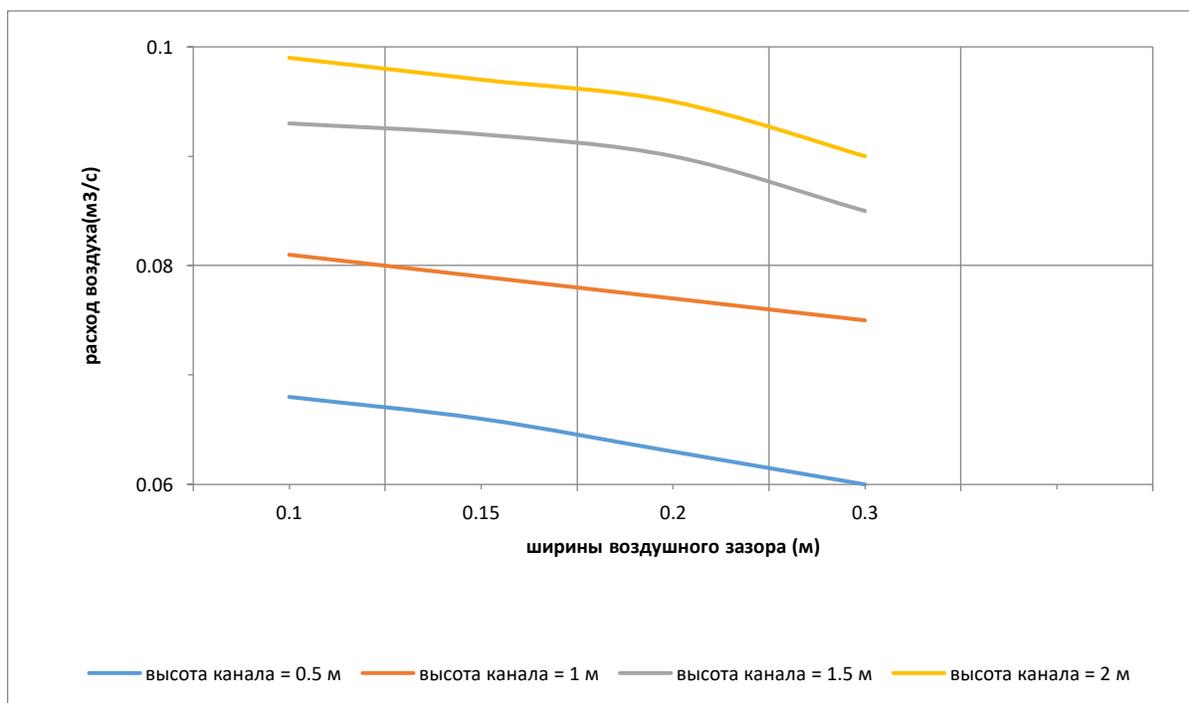


Рис. 21. Скорость потока в зависимости от ширины воздушного зазора при различной высоте канала СВТ

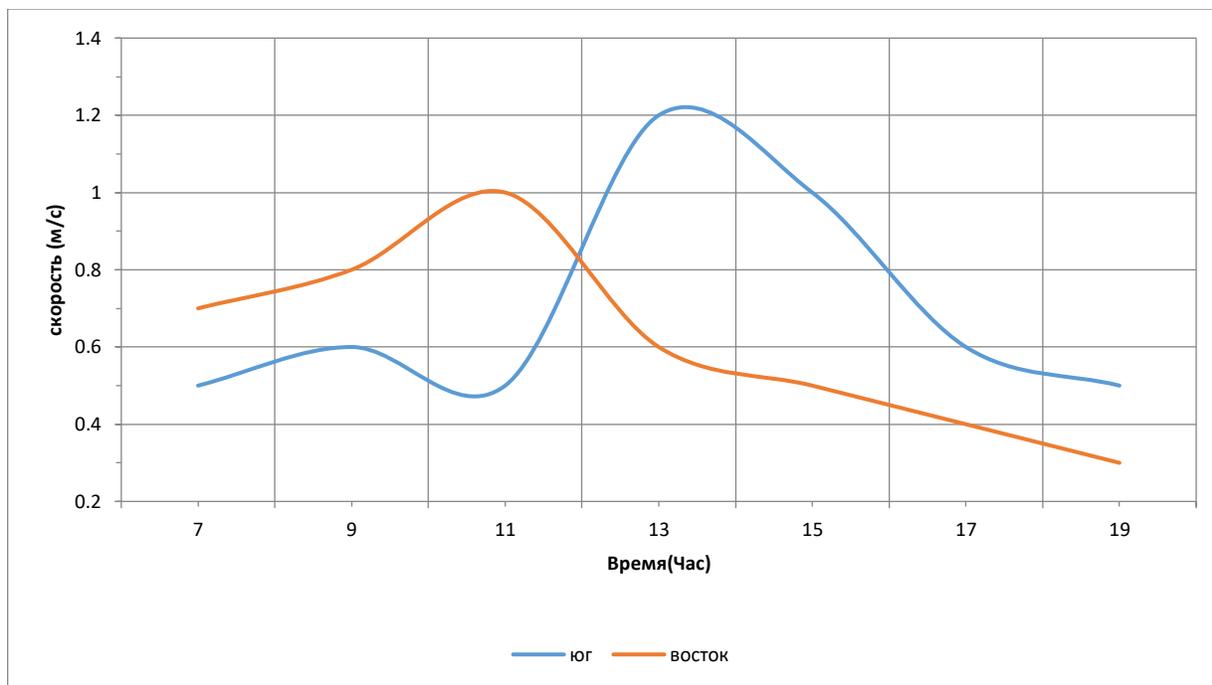


Рис. 22. Скорость воздушного потока на выходе СВТ при ширине воздушного зазора 0.2м и ориентации СВТ на южную и восточную стороны.

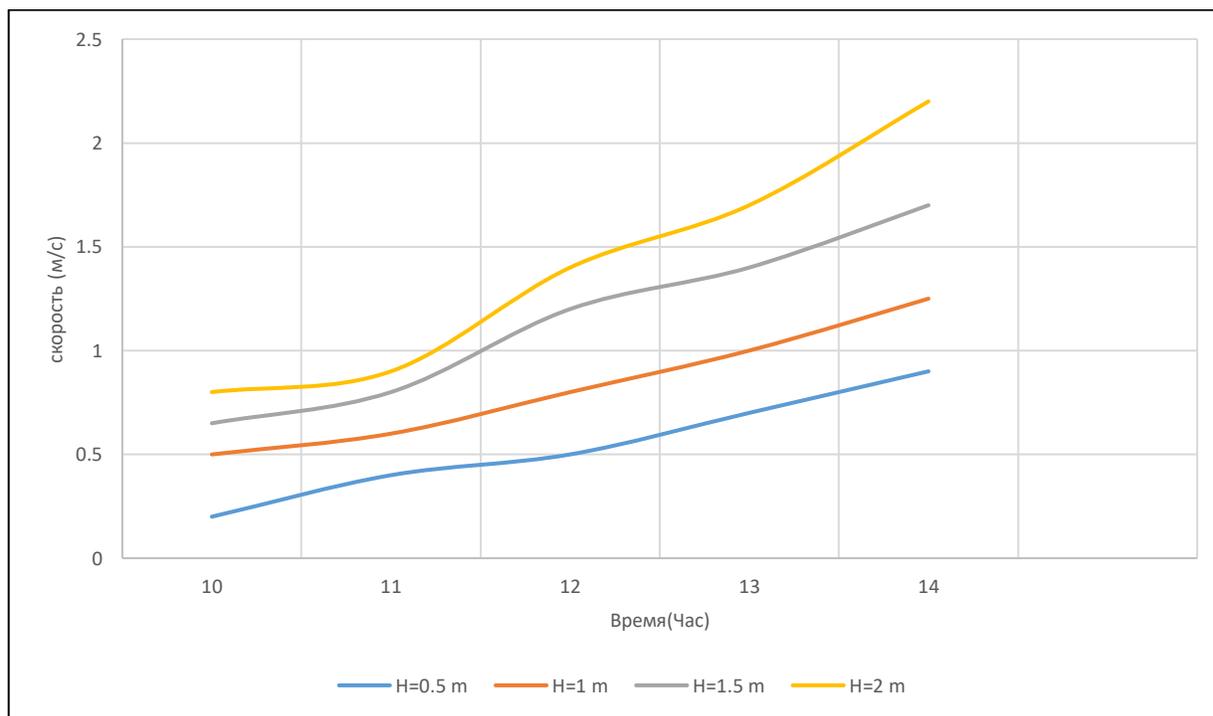


Рис. 23. Средняя скорость воздушного потока в СВТ, обращенной на южную сторону, при ширине воздушного зазора 0.2м в зависимости от времени.

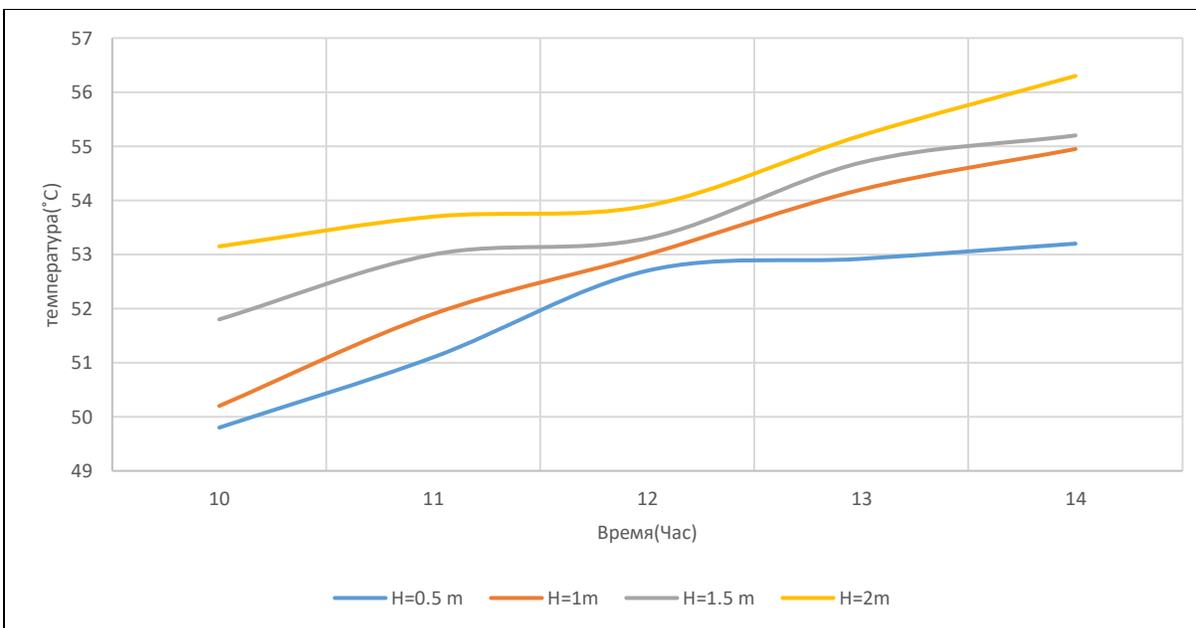


Рис. 24. Температура воздушного потока в СВТ, обращенной на южную сторону, при ширине воздушного зазора 0.2м в зависимости от времени и различной высоты канала.

#### 4.5. Численное моделирование:

**4.5.1. Моделирование пассивной системы охлаждения:** Сравнение данных, полученных при натуральных экспериментах, и при CFD-моделировании. Вследствие некоторых ограничений при проведении натуральных испытаний проводится численное моделирование пассивной системы охлаждения приточного воздуха. В данном исследовании модель составлялась с использованием ПО ANSYS FLUENT, а также Gambit 2.2.30.

CFD-моделирование требует таких входных данных, как метеорологические данные о температуре окружающего воздуха, сведения о температуре почвы на различных глубинах, конструктивных особенностей пассивной системы охлаждения и зданий и помещений, где планируется ее монтаж. Данные о погоде, используемые программой моделирования, состоят из ежемесячной температуры почвы на различной глубине, часовой величины температуры сухого грунта и точки росы. На рис.25-26. ниже

показано, что данные, полученные с помощью CFD-моделирования, аналогичны данным, полученным в ходе натурных испытаний.

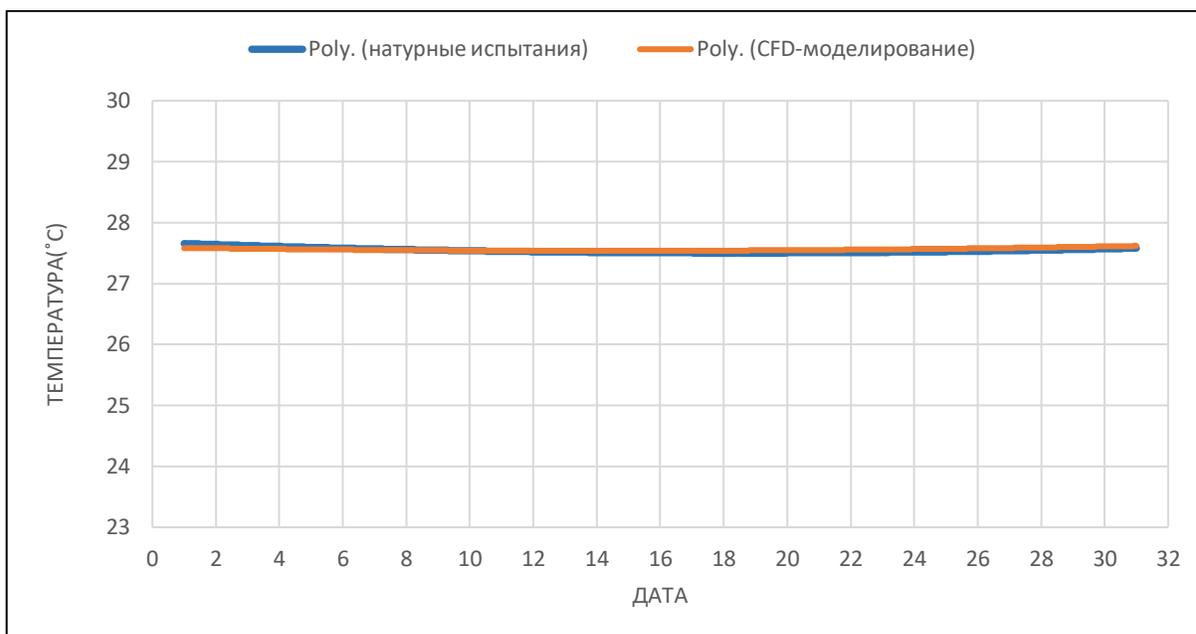


Рис. 25. Температура воздуха на выходе из ГВТ, полученная в ходе натурных испытаний и в ходе численного моделирования в течение **июля**

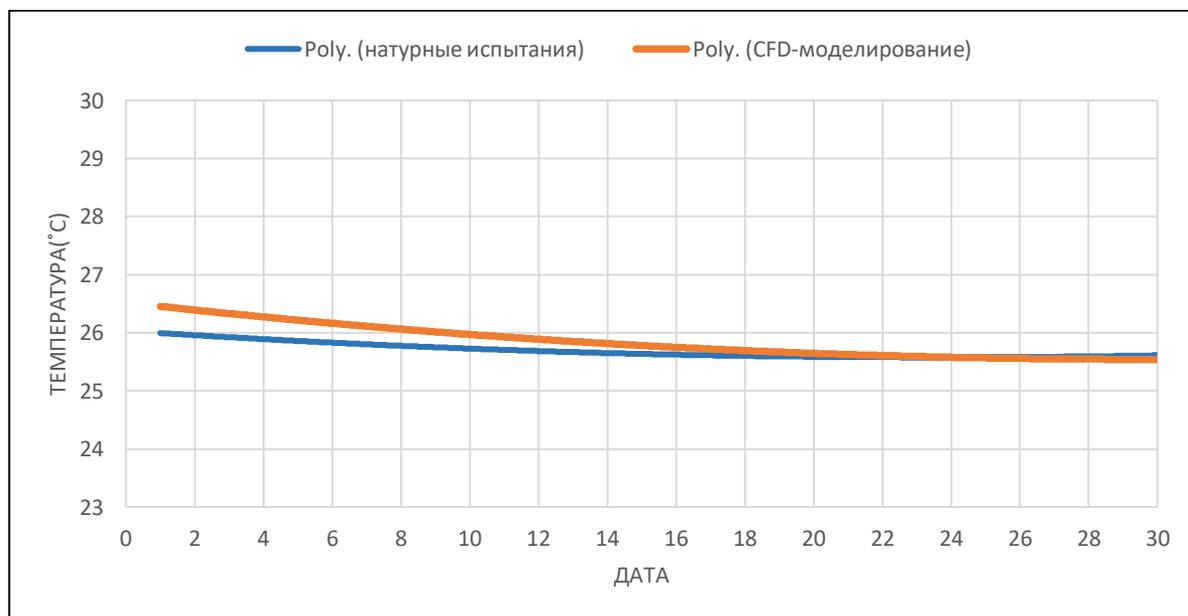


Рис. 26. Температура воздуха на выходе из ГВТ, полученная в ходе натурных испытаний и в ходе численного моделирования в течение **ноября**

Основной целью моделирования системы ГВТ является расширенная обработка переменных, оказывающих влияние на работу установки. На рис.27-28 для температуры воздуха  $50^{\circ}\text{C}$  и скорости воздуха  $1\text{ м/с}$  показано распределение скорости для системы ГВТ и окружающего ее грунта соответственно.

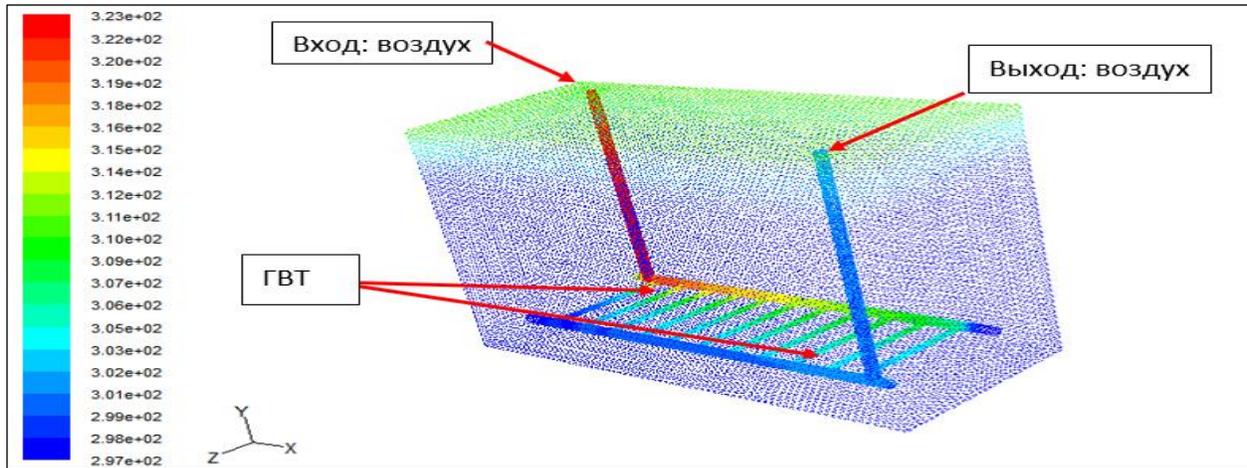


Рис. 27. Векторы скорости при заданной статической температуре слоев грунта

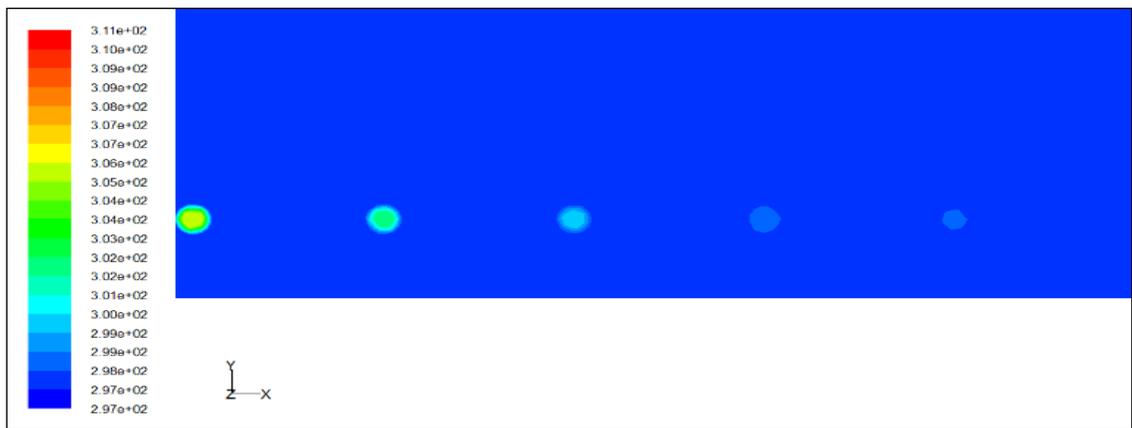


Рис.28. Вертикальный разрез распределения температуры в ГВТ.

На рис.29. показано (В Августе), связь диаметра трубы теплообменника и эффективности теплообмена между воздухом и грунтом при постоянных длине (70м), глубине прокладки (4м) и  $3\text{ м/с}$  скорость воздуха.увеличение диаметра трубы приводит к увеличению диапазона температур на выходе из трубы.

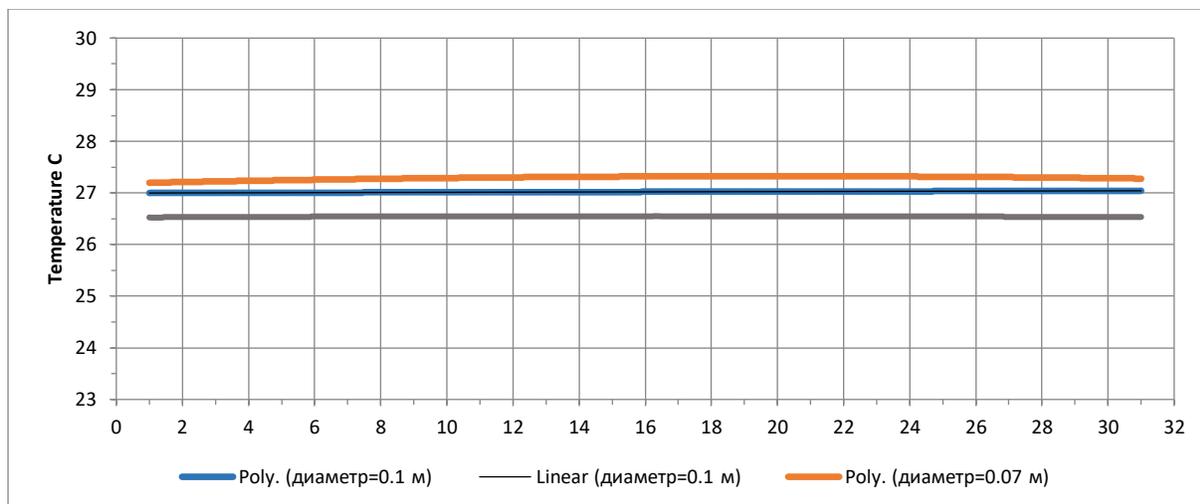


Рис. 29. Данные изменения температуры воздуха в течение месяца, полученные в ходе численного моделирования, для ГВТ с различным диаметром труб.

На рис. 30. Показано (в сентябре), параметрическое исследование ГВТ включает в себя влияние различных скоростей воздуха. Скорости воздуха, выбранные для данного исследования, составляют 1.0 м/с, 2 м/с, 3 м и 5 м/с. Оптимальной скоростью воздуха является скорость равная 1-1.5 м/с.

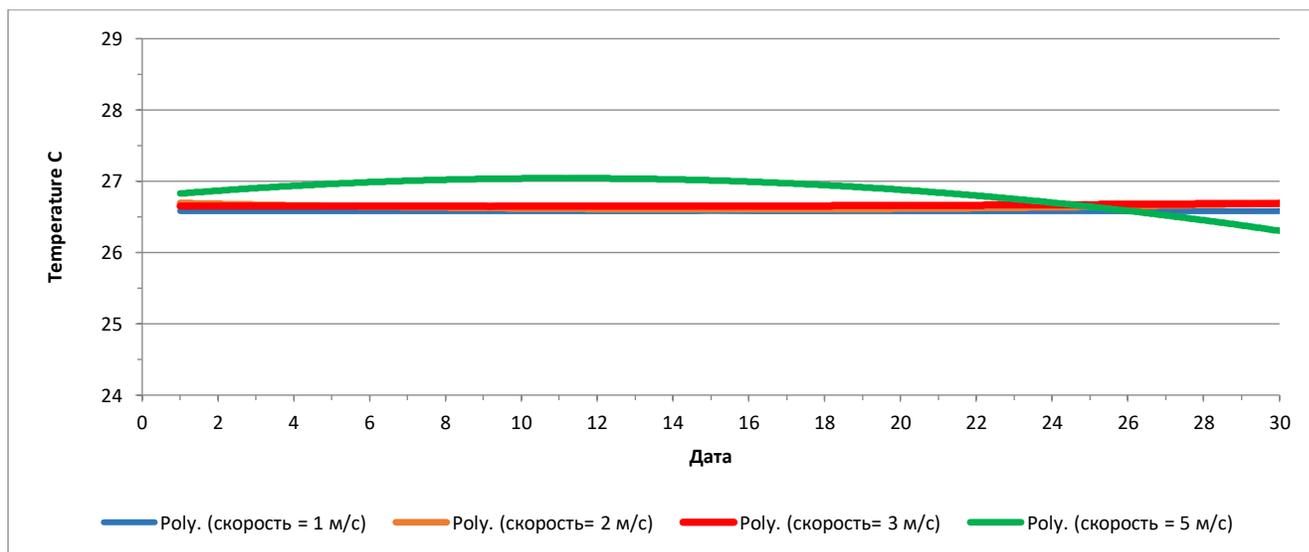


Рис. 30. Параметрическое исследование ГВТ при использовании CFD-моделирования с различными скоростями воздушного потока.

#### 4.5.2. Моделирование солнечной вытяжной трубы (СВТ):

При составлении математической модели СВТ также учитывались климатические данные региона г. Басры, а также конструктивные особенности самой системы естественной вентиляции. На рис. 31-33 приведены данные для сравнения численной модели и натуральных экспериментов по работе СВТ.

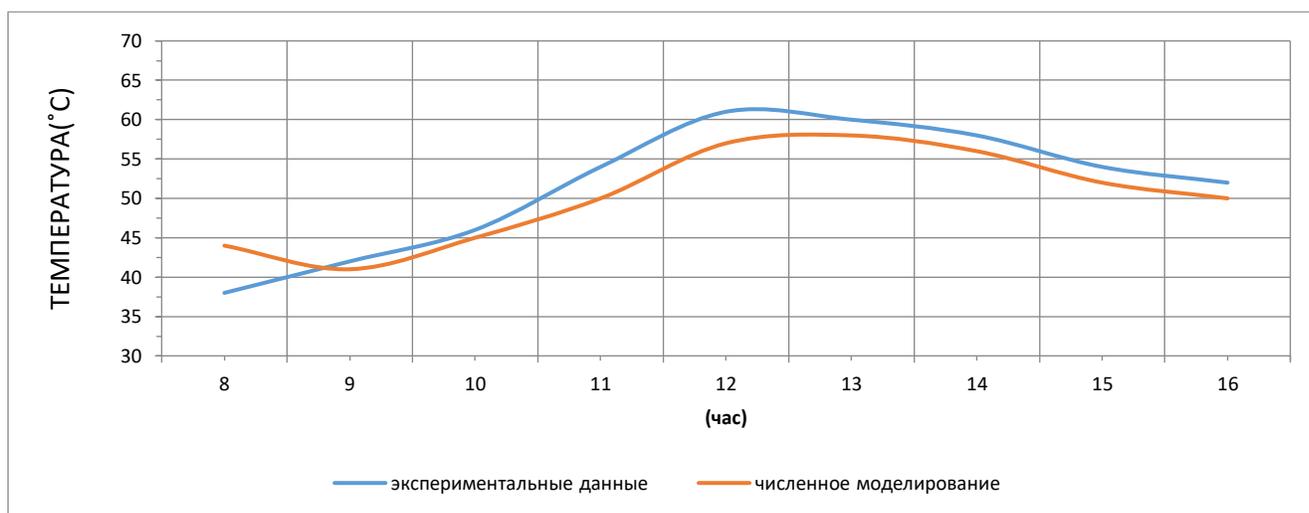


Рис. 31. Данные, полученные в ходе численного моделирования и экспериментальные данные изменения температуры воздуха на выходе из вертикально расположенной СВТ.

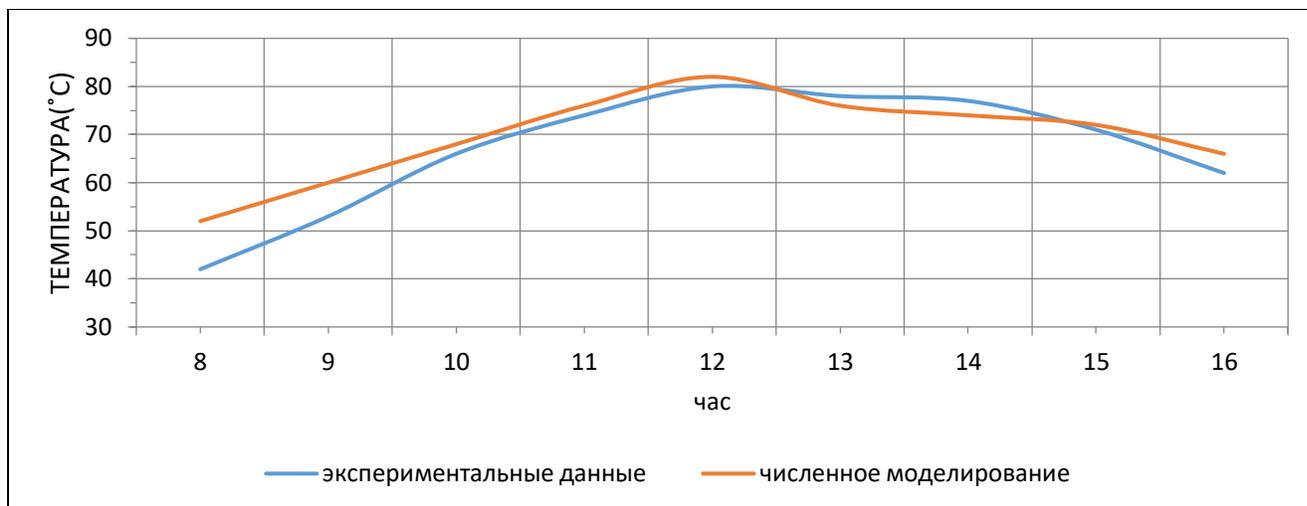


Рис.32. Данные, полученные в ходе численного моделирования и экспериментальные данные изменения температуры в промежуточной точке на поглощающей поверхности СВТ.

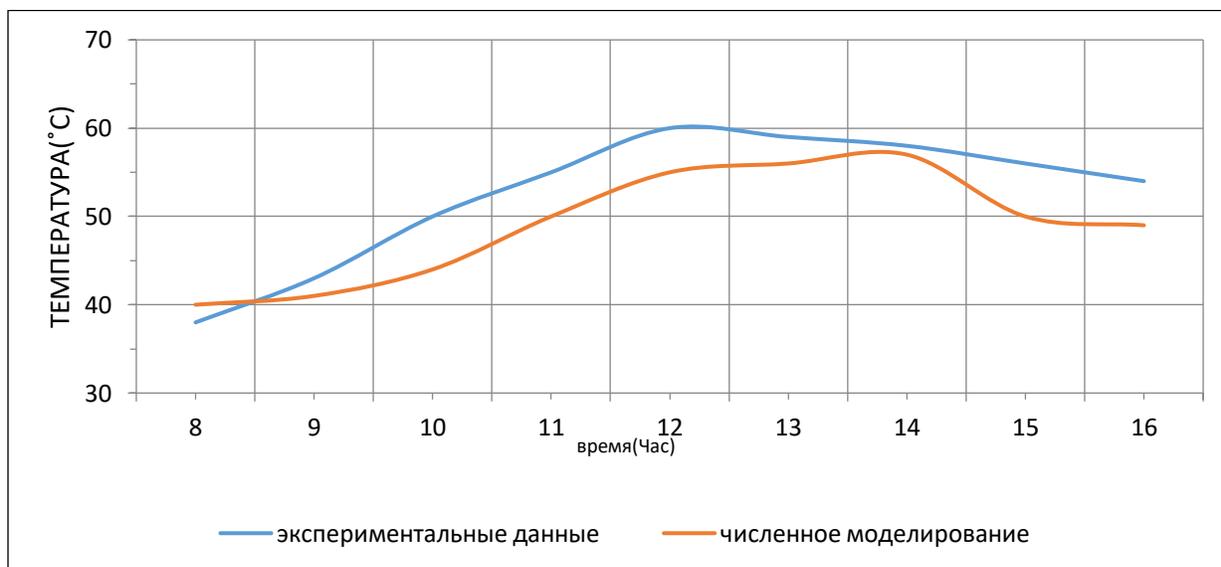


Рис. 33. Данные, полученные в ходе численного моделирования и экспериментальные данные изменения температуры в промежуточной точке на остекленной поверхности СВТ.

На рис.34. показаны изменения температуры в центре помещения со временем при использовании нескольких СВТ с шириной зазора 0,2 м, когда температура воздуха, поступающего в помещение, составляет 26,4°С. Можно

отметить значительное снижение температуры в центре вентилируемого помещения при использовании нескольких вытяжных труб, что объясняется увеличением кратности воздухообмена. Так, в пик солнечной активности (час дня) две работающие СВТ снижают температуру воздуха на 6%, три СВТ – на 10%, а при использовании четырех вытяжных труб температура в помещении снижается на 12% по сравнению с помещением, где работает только одна СВТ.

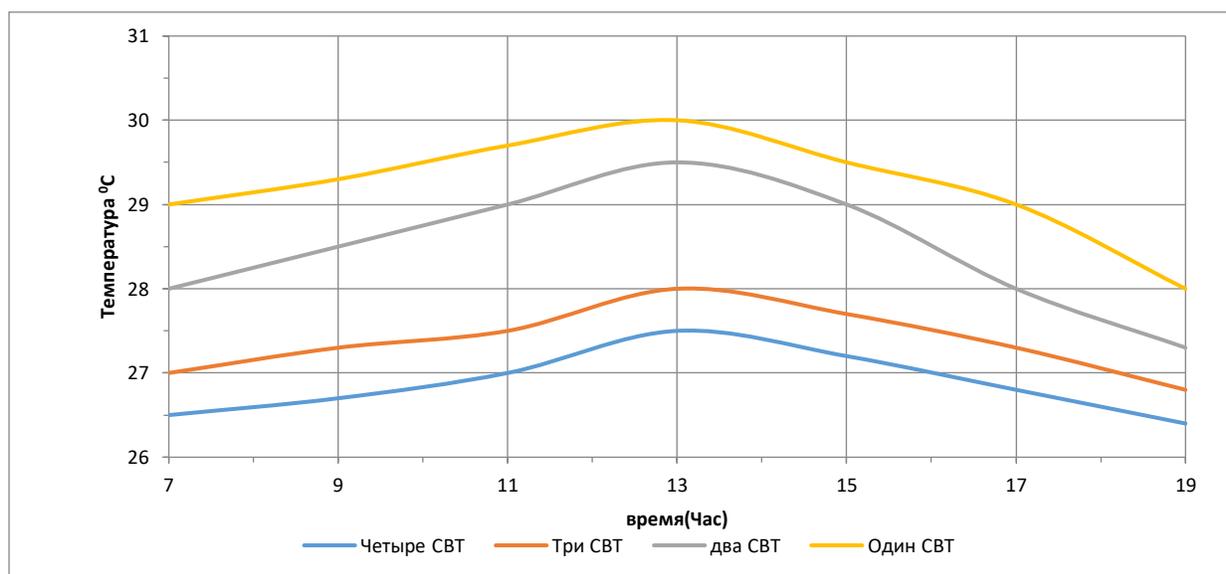


Рис.34. Влияние ширины заборного окна СВТ и расхода воздуха на расход воздуха в системе вентиляции.

Рис.35. показывает скорость неустановившегося воздушного потока внутри помещения, в котором используются несколько СВТ с воздушным зазором 0,2м. Увеличение количества вытяжных труб увеличивает скорость вентиляционного потока. Наконец, можно заметить, что в час дня при использовании двух дымоходов можно увеличить расход воздуха на 13.3%, а увеличение числа СВТ до трех может увеличить расход воздуха на 32%.

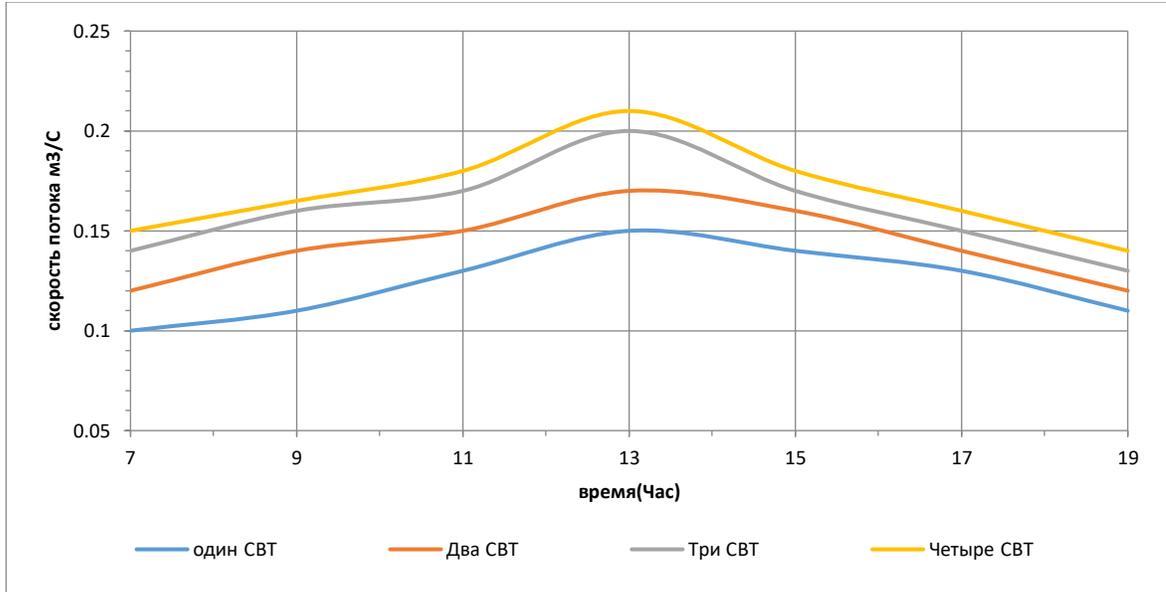


Рис.35. Скорость воздуха в центре вентилируемого помещения в зависимости от времени и количества используемых СВТ с шириной воздушного зазора 0,2м

### Заключение

1. В данной диссертации выполнено моделирование турбулентного потока воздуха и связанного с ним теплообмена в солнечной вытяжной трубе. Модель создавалась с использованием уравнения Навье-Стокса и k-ε модели.
2. Для анализа процессов теплопроводности и теплопередачи в грунто-воздушном теплообменнике была выполнена его CFD-модель с использованием метода контрольного объема.
3. Проведён сравнительный анализ теоретических и экспериментальных данных, полученных в ходе моделирования СВТ и ГВТ.
4. Установлено, что колебания температуры почвы на глубине 4 м незначительны и составляют 26,4°C - 26,6°C. Рассеивание тепла от системы ГВТ в слои грунта не оказывает существенного влияния на температуру почвы в краткосрочной перспективе.
5. В холодное время года максимальное повышение температуры при использовании ГВТ составило 21,3°C, а в жаркое - 20,7°C. В обоих случаях трубы ГВТ были проложены на глубине 4 м.  
На глубине 2 м и при длине трубы ГВТ 30 м диапазон температур на выходе составил 21,8°C и 20,6°C в зимний и летний периоды соответственно, температура на выходе на той же глубине варьировалась от 26,9°C до 29,4°C. Для дальнейшего исследования была выбрана конструкция ГВТ при прокладке труб на глубине 4 м.
6. Эффективная длина трубы ГВТ составляет 50 м, при дальнейшем увеличении длины трубы не повышает эффективность работы. Также исследования показали, что увеличение диаметра трубы ГВТ ведёт к уменьшению конвективной теплоотдачи.

7. Оптимальный диапазон скоростей воздуха для наиболее эффективной работы ГВТ составляет 1-1,5 м/с. При увеличении скорости воздуха в трубах ГВТ наблюдается незначительное повышение температуры воздуха на выходе из теплообменника.
8. Эффективная работа системы естественной вентиляции воздуха достигается в основном за счет оптимальной высоты и размеров шахты СВТ, количестве возведенных СВТ и ориентации труб на южную сторону. При наличии 2, 3 и 4 СВТ достигается снижение температуры в здании на 6% 10% и 12% соответственно.
9. При использовании двух СВТ позволяет увеличить воздухообмен на 13.3%, а увеличение количества СВТ до трех увеличивает воздухообмен на 32%.
10. При использовании двух СВТ, обращенных на восток, и двух СВТ, обращенных на юг, температура в помещении остается практически постоянной в течение суток.

**Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:**

1. Аль-Зувайни Х.М., Скулкин С.В. Экспериментальное исследование геотермального кондиционирования воздуха в странах Среднего Востока / Х. М. Аль Зувайни, С. В. Скулкин // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-23 ноября 2019 г., Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – С. 188-190.

2. Аль-Зувайни Х.М., Скулкин С.В. Эффективность геотермального охлаждения приточного воздуха в странах Среднего Востока / Х. М. Аль

Зувайни, С. В. Скулкин // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г., Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 89-91.

3.Mohammed A. H. Passive cooling by integrate solar chimney with earth to air heat exchanger / A. H. Mohammed, H. Al-zuwaini, V. Sergeev, E. Socolova // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. Volume. 10 - IAEME Publication, 2019 – p. 1375-1390.

4.Hashim Al-Zuwaini. Cooling Load Calculations / Hashim, H.M., Sokolova, E., Derevianko, O., Solovev, D.B.// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 463, Issue 3, 31 December 2018 – Article number 032030.

5.H Alzuwaini. Problems of Petroleum industry in Iraq / H Alzuwaini., D Vasil'kov., N Kirillov., A Khitrov., V Tolmachev., R Okorokov., O Gatsenko., D Zaripova. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 337 (2019) 012046. Volume 337, Issue 1, 18 November 2019, Article number 012046.

### Список сокращений и условных обозначений

- |   |  |
|---|--|
| 1. $\gamma$ – коэффициент теплообмена, определяемый как $\mu/Pr$  | 14. $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаг расчетной сетки по направлению $x, y$ и $z$ , м                                       |
| 2. $\Gamma_{ij}$ – тензор коэффициентов при диффузионном теплопереносе                                    | 15. $\mu$ – динамическая вязкость, $(Н \cdot с)/м^2$   |
| 3. $\varepsilon$ – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, $м^2/с^3$                       | 16. $\mu_t$ – вязкость при турбулентном течении, $(Н \cdot с)/м^2$   |
| 4. $\lambda$ – теплопроводность   | 17. $\mu_{eff}$ – эффективный коэффициент кинематической вязкости, $(Н \cdot с)/м^2$   |
| 5. $\sigma_t$ – турбулентное число Прандтля   | 18. $\nu$ – кинематическая вязкость, $м^2/с$   |
| 6. $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – константы, используемые при составлении численной турбулентной модели | 19. $\delta$ – толщина теплового пограничного слоя, м  |
| 7. $\tau$ – проводимость  | 20. $S$ – площадь поверхности, $м^2$   |
| 8. $\tau_{ij}$ – тензор турбулентных напряжений   | 21. $A_0, A_S, C_1, C_2, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ – константы, используемые при построении модели |
| 9. $\rho$ – плотность, $кг/м^3$   | 22. $C_d$ – коэффициент расхода через трубу ГВТ  |
| 10. $\Delta P$ – перепад давлений, $Н/м^2$  | 23. $C_p$ – удельная теплоемкость, $Дж/(кг \cdot К)$   |
| 11. $\eta$ – теплоотдача, тепловой КПД  | 24. $d$ – диаметр трубы ГВТ, м   |
| 12. $\gamma$ – адиабатическая постоянная воздуха  | 25. $a_{возд}$ – коэффициенту теплопроводности   |
| 13. $\Delta t$ – промежуток времени, с  |  |

26.  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$
27.  $g$  – кинетическая энергия сдвига, Дж
28.  $G_k, G_b$  – скорость/отношение турбулентной кинетической энергии и сил плавучести
29.  $Gr$  – число Грасгофа
30.  $H$  – тепловой поток на поверхности,  $\text{Вт/м}^2$
31.  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , поглощающая способность
32.  $I$  – интенсивность солнечного излучения,  $\text{Вт/м}^2$
33.  $k$  – турбулентная кинетическая энергия,  $\text{м}^2/\text{с}^2$
34.  $\lambda$  – коэффициент теплообмена для воздуха,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
35.  $\lambda_s$  – теплопроводность почвы,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
36.  $L$  – высота СВТ, м
37.  $m$  – массовый расход среды,  $\text{кг/с}$
38.  $p$  – давление,  $\text{Н/м}^2$
39.  $Pr$  – число Прандтля
40.  $Q$  – общая теплопередача, Вт
41.  $Q_c$  – общее почасовое охлаждение, Вт
42.  $q''$  – тепловой поток,  $\text{Вт/м}^2$
43.  $r_o$  – радиус трубы ГВТ, м
44.  $Ra$  – число Релея
45.  $s$  – источник тепла, южное направление
46.  $t$  – время, с
47.  $T$  – температура, К
48.  $T_\infty$  – температура окружающего воздуха, К
49.  $K_s$  – общий коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$
50.  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости,  $\text{м/с}$
51.  $v$  – скорость,  $\text{м/с}$
52.  $V$  – объем,  $\text{м}^3$
53.  $z$  – глубина, м
54. ГВТ – грунто-воздушный теплообменник
55. СВТ – солнечная вытяжная труба
56. ХК – холодильный коэффициент

## Список литературы

1. Maerefat M. and Haghghi A.P., " Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney", *Renewable Energy* vol. 35, p 2316 -2324, (2010).
2. Pfafferott J., "Enhancing the design and operation of passive cooling concepts, monitoring and data analysis in four low energy office buildings with night ventilation", PhD thesis, University of Karlsruhe, (2004).
3. Lee E., "Development, verification and implementation of a horizontal buried pipe ground heat transfer model in energy plus", M.Sc. Thesis, Oklahoma State University, (2008).
4. AL-Ajmi F. F., Loveday D.L. and Hanby V.I., " The cooling potential of earth -air heat exchangers for domestic buildings in desert climate", *Building and Environment*, Vol.41, p 235-244, (2006).
5. Shiv Lal, Kaushik S.C. and Bhargav P.K., "Solar chimney: A sustainable approach for ventilation and building space conditioning", *International Journal of Development and Sustainability*, Vol.2, No.1, (2013).
6. Karima E. Amori and Saif Watheq Mohammed, "Experimental and numerical studies of solar chimney for natural ventilation in Iraq", *Energy and Buildings* Vol.47, p 450–457, (2012).
7. Shafik M., " Feasibility study of Solar Driven Underground Cooling System", M.Sc. thesis, University of Nebraska - Lincoln., (2010).
8. Banks D., "An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling", A John Wiley & Sons, Ltd., Publication, Second Edition (2008).

9. Sanusi A. N. and Zamri A. A., "Achieving Cooler Soil as an Effective Heat Sink for Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE) Cooling Technology in Malaysia Tropical Climate", *Natural Resources*, Vol.5, p 804-809, (2014).
10. Talib R. A. and Rajaa R. A. " Variation of Soil Temperature with Time and Depth in Karbala Region". *Journal of Kerbala University*, Vol. 7, No.3 Scientific, (2009).
11. Goswami D.Y. and Biseli K. M., "Use of Underground Air Tunnels for Heating and Cooling Agricultural and Residential Buildings", Fact Sheet EES 78, Florida Energy Extension Service, University of Florida, p 1-4, (1993).
12. Krarti M., Lopez-Alonzo C., Claridge D. E., Kreider J. F.. Analytical model to predict annual soil surface temperature variation. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 117, p 91-99, (1995).