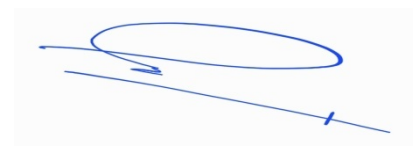




ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи



Аль-Зувайни Хашим Махмуд Хашим

**СИСТЕМА ПАССИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СОЛНЕЧНОЙ
ВЫТЯЖНОЙ ТРУБЫ И ГРУНТО-ВОЗДУШНОГО
ТЕПЛОБМЕННИКА**

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Высшей школе атомной и тепловой энергетики Института энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Киселёв Владимир Геннадьевич

доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы атомной и тепловой энергетики ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты:

Яковлев Павел Викторович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплотехника и теплоэнергетика» Энергетического факультета ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (СПГУ, г. Санкт-Петербург);

Сапрыкина Надежда Юрьевна

кандидат технических наук, главный инженер проектов Службы главного архитектора Федерального государственного унитарного предприятия «Центральные научно-реставрационные проектные мастерские» (ФГУП ЦНРПМ, г. Москва).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань).

Защита диссертации состоится 23 ноября 2021 г. в 16.00 на заседании диссертационного совета У.05.14.04 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 ПГК, ауд. 411.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, СПбПУ, ученому секретарю диссертационного совета У.05.14.04.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте <http://www.spbstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.05.14.04,
д.т.н., с.н.с.



Куколев М.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Во многих районах Республики Ирак энергоснабжение потребителей традиционными энергоресурсами затруднено из-за политических, экономических и экологических причин. Высокой потребности в энергии сопутствуют жаркие климатические условия и низкая надежность региональных электроэнергетических систем. В то же время, в таких местностях присутствуют в достаточном количестве такие энергоресурсы, как ветер и солнце. Применение данных ресурсов возможно даже без промежуточного получения электроэнергии и позволяет обеспечить работу холодильных установок, мельниц, насосов и, к примеру, 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 поверхностной температуры (затенение, орошение и т.д.).

Поэтому совершенствованиехарактеристик системы пассивного охлаждения по результатам трехмерного численного моделирования течения и теплообмена в интегрированной солнечной вытяжной трубе и грунто-воздушного теплообменника для условий 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., ShivLal, 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 натурального 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 также подтверждена натурными экспериментами.

Цель: совершенствование характеристик системы пассивного охлаждения по результатам трехмерного численного моделирования течения и теплообмена в

интегрированной солнечной вытяжной трубе и грунто-воздушного теплообменника для условий Республики Ирак (г. Басра).

Для достижения поставленной цели исследования были решены задачи:

1. Проанализирован современный уровень расчетно-экспериментальных исследований систем пассивного охлаждения с интегрированной СВТ и ГВТ;
2. Предложена численная модель по расчету турбулентного течения воздуха и теплообмена в СВТ, грунте и ГВТ, учитывающая расход воздуха и диаметр труб теплообменника;
3. Выполнено экспериментальное исследование системы охлаждения на натурном стенде в окрестностях г. Басра (Республика Ирак);
4. Проведен сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований с целью выработки рекомендаций по проектированию системы пассивного охлаждения с интегрированной СВТ и ГВТ в условиях Республики Ирак (г. Басра).

Объект исследования – интегрированная система пассивного охлаждения с солнечной вытяжной трубой и грунто-воздушным теплообменником.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Предложена расчетная модель для определения зависимости температуры грунта от глубины его залегания и времени суток и сезона (трехмерная модель) и проведена её валидация в течение года;
2. Разработаны трехмерные модели СВТ и ГВТ, проведена их экспериментальная проверка в течение года;
3. Предложена 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 – уравнения Навье-Стокса в приближении Рейнольдса, модель турбулентности k-ε с учетом стратификации плотности 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 WATANAL-AJDAD Trading Company LLC, Basra, Iraq, что подтверждается актом о внедрении.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, показана научная новизна исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту. Здесь дан обзор литературы по теме диссертации и приведено описание работы.

В главе 2 представлена модель грунтового воздушного теплообменника (ГВТ) и солнечной вытяжной трубы (СВТ). На рисунке 1 дается схема расчетной области, включающей в себя: слой почвы, грунто-воздушного теплообменника и солнечной вытяжной трубы

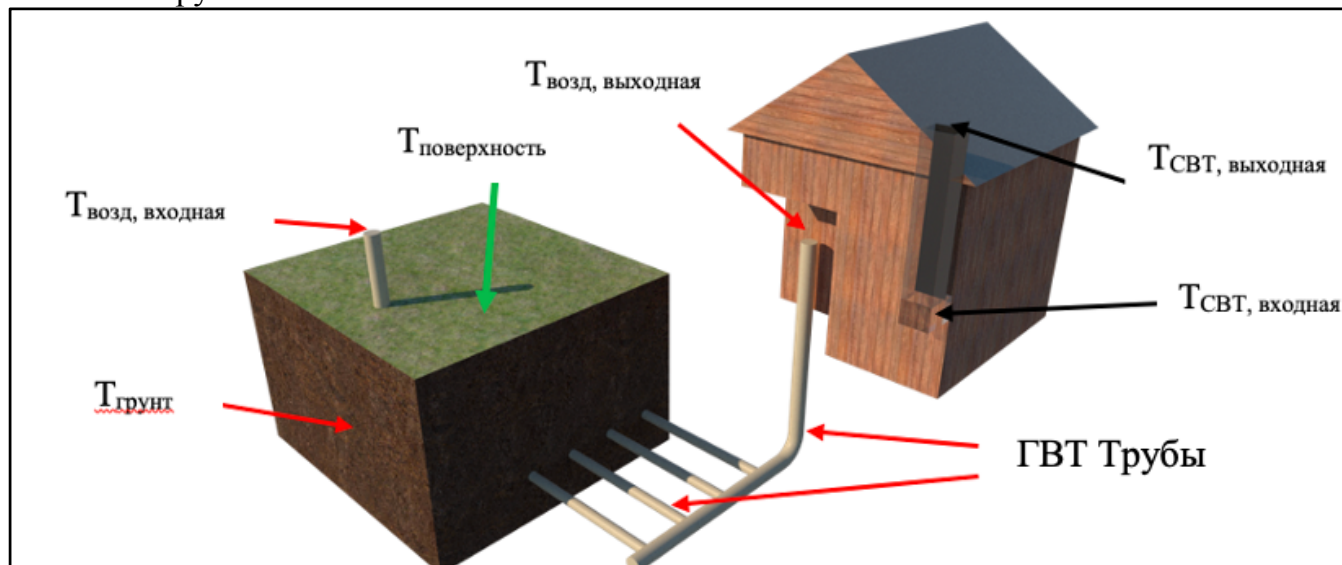


Рисунок 1. Трехмерная модель СВТ и ГВТ

Моделирование ГВТ осуществляется путем совмещения двух моделей: первая - тепловая модель для слоя почвы; вторая - модель ГВТ, рассчитывающая температуру воздуха на выходе из теплообменника в зависимости от температуры воздуха на входе и температуры слоя почвы, где пролегают трубы ГВТ.

Задача построения математической модели грунта состоит в том, чтобы получать температуру грунта на определенной глубине без учета влияния ГВТ на температуру почвы. Она учитывает влияние трех независимых факторов: атмосферные условия; перенос теплоты за счет теплопроводности от здания, расположенного вблизи участка; теплопроводность от подвала здания.

Учитывая все эти условия, уравнение теплопроводности для грунта записывается в виде:

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

где s – источник

На рисунке 2 даются пояснения относительно выбора граничных условий для уравнения (1). Граничные условия делятся на 3 группы: граничные условия, накладываемые на температуру поверхности почвы - $T = T_s$; для краевых слоев рассматриваемого объема - $q'' = 0$; глубинных слоев почвы $T = T(z, t)$.

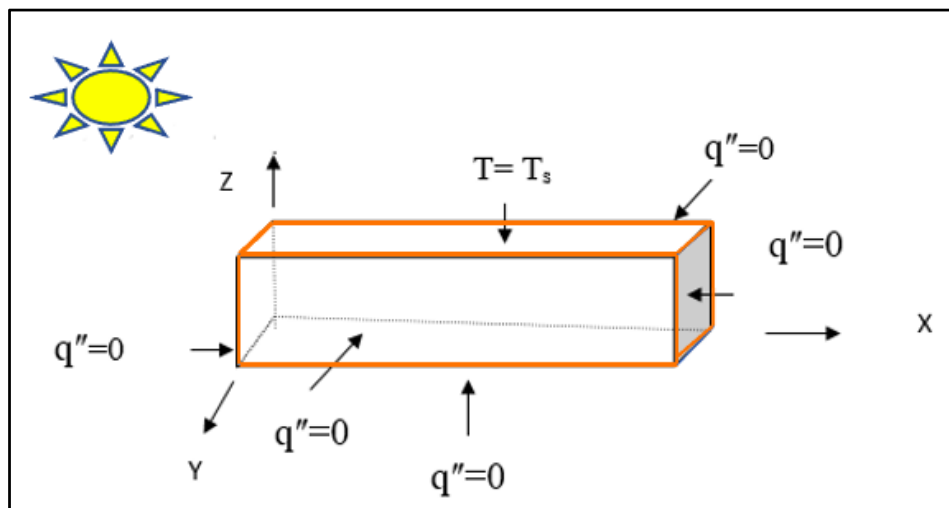


Рисунок 2. Трехмерный прямоугольный объем грунта

Для решения уравнений теплопроводности использовался алгоритм трехдиагональной матрицы Келлера.

Тепловой расчет теплообменника (рисунок 3), уложенного в грунт, выполнен без учета тепловых связей между рядами горизонтально расположенных труб, воздухозаборной и воздуховыпускной трубой (коллектором).

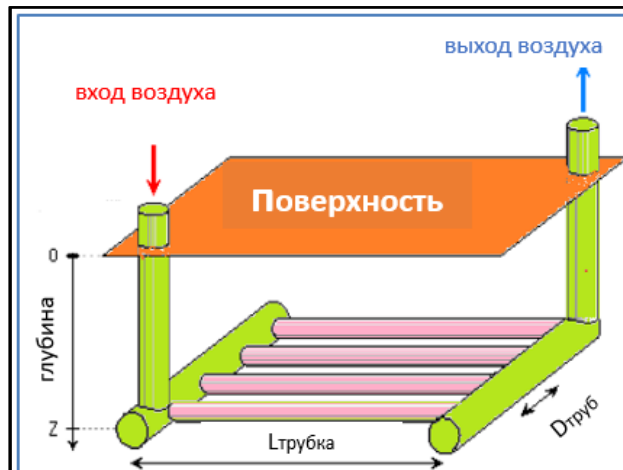


Рисунок3. Модель грунто-воздушного теплообменника

Гидравлический расчет предполагал отсутствие потерь давления в коллекторах, допущений об изотропности свойств грунта и идентичности соединений труб с коллекторами. На рисунках 4 и 5 представлены схематические изображения расчетной области для трубок теплообменника, уложенных в грунт.

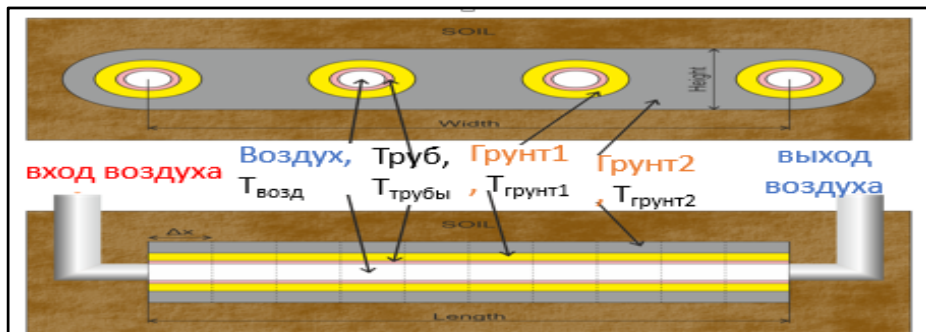


Рис. 4. Схематическое изображение предлагаемого вида сетки спереди (сверху) и сбоку (снизу)

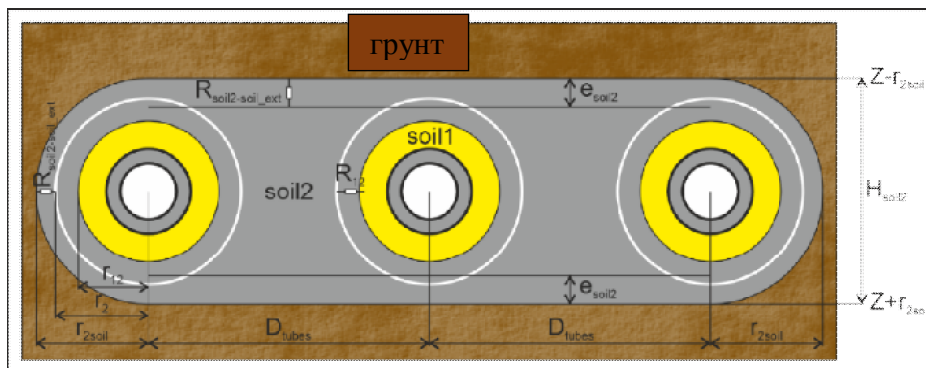


Рис. 5. Структура ячейки «грунт2» для трех трубок теплообменника

Где:

R : теплового сопротивления между ячейками i и j . $r_{внутр}$: Внутренний радиус трубки теплообменника и ячейки «трубка», а также внешний радиус ячейки «воздух»; r_i - внутренний

радиус трубки; $r_{внеш}$ - внешний радиус трубки и ячейки «трубка», а также внутренний радиус ячейки «грунт1»; r_1 - внутренний радиус ячейки «грунт1»; r_{12} - внешний радиус ячейки «грунт1» и внутренний радиус ячейки «грунт2»; r_2 - внутренний радиус крайних частей ячейки «грунт2» цилиндрической формы; $r_{2грунт}$ - внешний радиус крайних частей ячейки «грунт2» цилиндрической формы; $H_{грунт2}$ - высота ячейки «грунт2»; $e_{грунт2}$ - толщина центральной части сетки ячейки «грунт2» до слоя грунта.

Численный метод предполагает разбиение на множество контрольных объемов (ячеек). Причем, ячейки с круглым поперечным сечением, расположены в центральной части трубки, по этому пространству циркулирует воздух (ячейка «воздух»). Ячейка, представляющая кольцевое пространство трубки обозначается, как ячейка «трубка». Первая ячейка кольцевого сечения грунта (ячейка «грунт1»). Вторая ячейка прямоугольного сечения грунта (ячейка «грунт2»). Означает, что вся сетка имеет 4 ячейки на вертикальное сечение.

Температуры $T_{возд}$, $T_{трубка}$, $T_{грунт1}$ и $T_{грунт2}$ определяются из решения четырех уравнений, вид которых основан на составлении тепловых балансов в каждой ячейке. Эти балансы представлены двумя типами: баланс "закрытой" и "открытой" ячеек. Уравнение баланса энергии для ячейки «воздух» записывается в виде:

$$C_{возд} \dot{m}_{возд} \Delta T_{возд} = KS_{возд-трубка} (\bar{T}_{трубка} - \bar{T}_{возд}) \quad (2)$$

Здесь $\Delta T_{возд}$ 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»:

$$C_{трубка} \frac{d\bar{T}_{возд}}{dt} = KS_{возд-трубка} (\bar{T}_{возд} - \bar{T}_{трубка}) + KS_{трубка-грунт1} (\bar{T}_{грунт1} - \bar{T}_{трубка}) \quad (3)$$

Уравнение баланса энергии для ячейки «грунт1»:

$$C_{грунт1} \frac{d\bar{T}_{грунт1}}{dt} = KS_{трубка-грунт1} (\bar{T}_{трубка} - \bar{T}_{грунт1}) + KS_{грунт1-грунт2} (\bar{T}_{грунт2} - \bar{T}_{грунт1}) \quad (4)$$

Уравнение баланса энергии для ячейки «грунт2»:

$$C_{грунт2} \frac{d\bar{T}_{грунт2}}{dt} = KS_{грунт1-грунт2} (\bar{T}_{грунт1} - \bar{T}_{грунт2}) + KS_{грунт2-грунт} (\bar{T}_{грунт} - \bar{T}_{грунт2}) \quad (5)$$

Здесь $\bar{T}_{грунт} = \frac{T_{грунтa} + T_{грунтb}}{2}$, $T_{грунтa} = T_{грунт}(Z - r_{2грунт})$, $T_{грунтb} = T_{грунт}(Z + r_{2грунт})$.

Физический смысл коэффициентов KS_{i-j} - это обратные величины эквивалентного теплового сопротивления между соседними ячейками расчетной области. В диссертации для вычисления KS_{i-j} использовалось выражение для коэффициента теплоотдачи в виде

$$\alpha = 0.0214(Re^{0.8} - 100)Pr^n \frac{\lambda_{возд}}{2r_{внутр}}$$

Моделирование солнечной вытяжной трубы (СВТ) проводится с использованием предположений, что теплообмен между стеклянной поверхностью трубы и стенкой поглотителя, а также теплообмен при излучении отсутствуют. Рабочая жидкость обладает постоянными физическими свойствами, плотность воздуха зависит только от температуры;

Схема движения потока жидкости, создаваемого за счет естественной конвекции, при пренебрежении тепловым излучением в СВТ показана на рисунке 6.

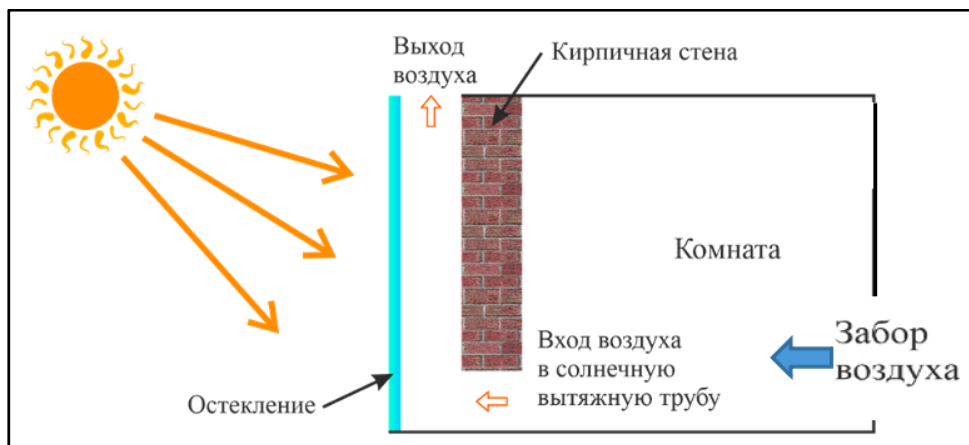


Рисунок 6. СВТ для создания естественной циркуляции воздуха

Естественную конвекцию в СВТ можно рассчитать с помощью, записанных в декартовых координатах, трехмерных уравнений Навье-Стокса в сочетании с уравнением сохранения энергии для области для расчетной области, представленной на рисунке 6.

В третьей главе приводится описание натуральных экспериментов по монтажу и монтажной 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). Измерения температуры почвы в зимний период (январь). Измерения температуры почвы в летний период (июль). Измерения температуры почвы и окружающего воздуха в течение года.



Рис. 7. Термосопротивления типа NTC с термопреобразователями WillhiWH7016C и KI&BNT

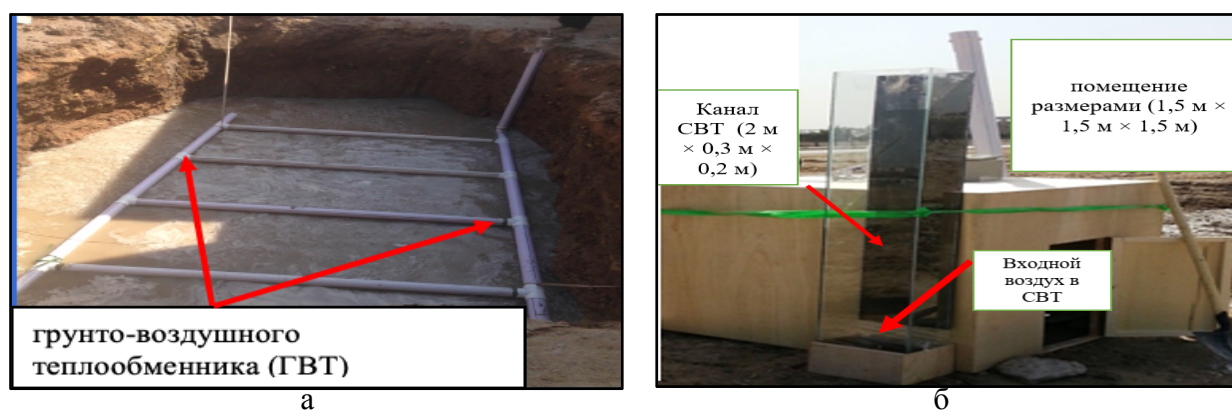


Рис.8. Поливинилхлоридные трубы ГВТ, проложенные на глубине 4м (а); СВТ и воздушный зазор (б)

Канал СВТ на экспериментальной установке 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 рисунке 8а,б изображены фотографии СВТ. Опытная установка оснащена приборами 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. максимальная погрешность измерения 0.5-1.4%.

Четвертая глава: Анализ результатов А. Результаты, полученные в ходе натуральных испытаний:

1. Температура почвы

Таблица 1 - Температура окружающего воздуха и почвы на различной глубине в январе 2018 года (зимний период).

| Измеряемые величины | Температурный максимум (°C) | Температурный минимум (°C) | Средняя температура (°C) | Амплитуда колебаний (°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. 1) В течение года проведения исследований температура окружающего воздуха находилась в диапазоне от 4°C до 22°C.

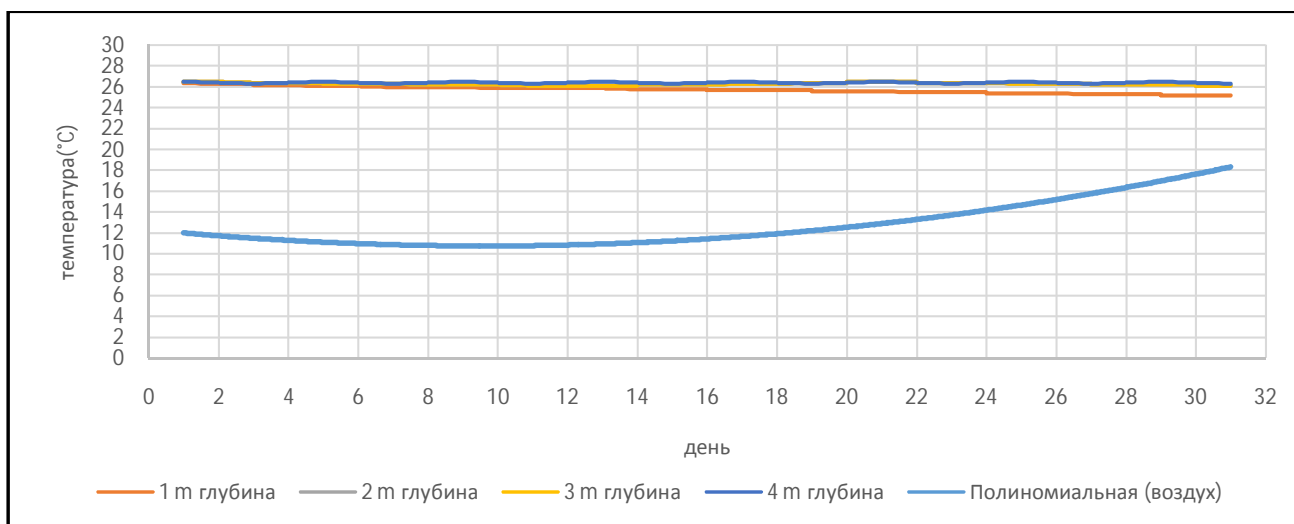


Рис. 9. Колебания температуры воздуха и почвы в течение **января** 2018г

Таблица 2 - 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 |

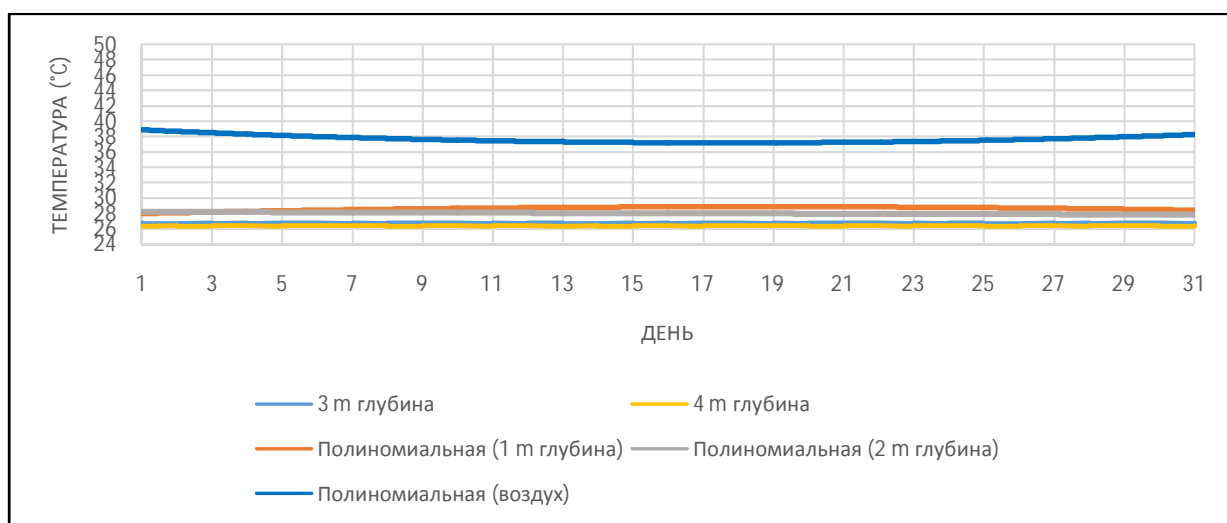


Рис. 10. Колебания температуры воздуха и почвы в течение **июля** 2018г.

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.10).

2.А.Анализ работы грунто-воздушного теплообменника: Труб ПВХ длиной 50м на глубине 4 м

2.А.1.Зимний период: Рис.11. отображает изменение температуры в ноябре. Температура наружного воздуха колеблется от 5°C до 32°C. 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.

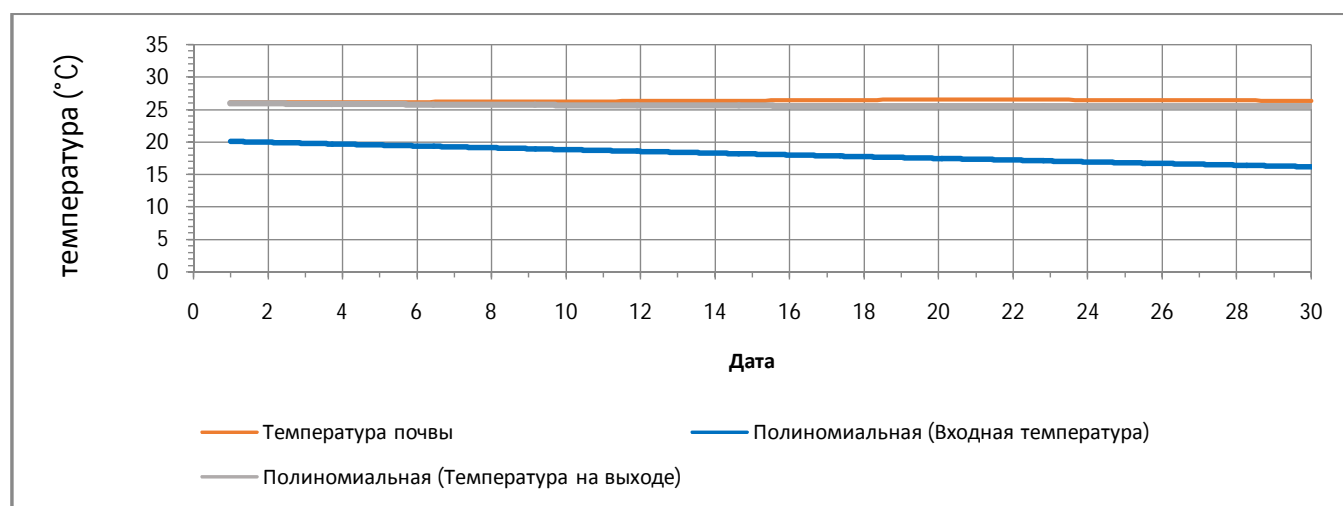


Рис. 11. Изменение температуры в ноябре 2018 года

2.В.2.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.12).

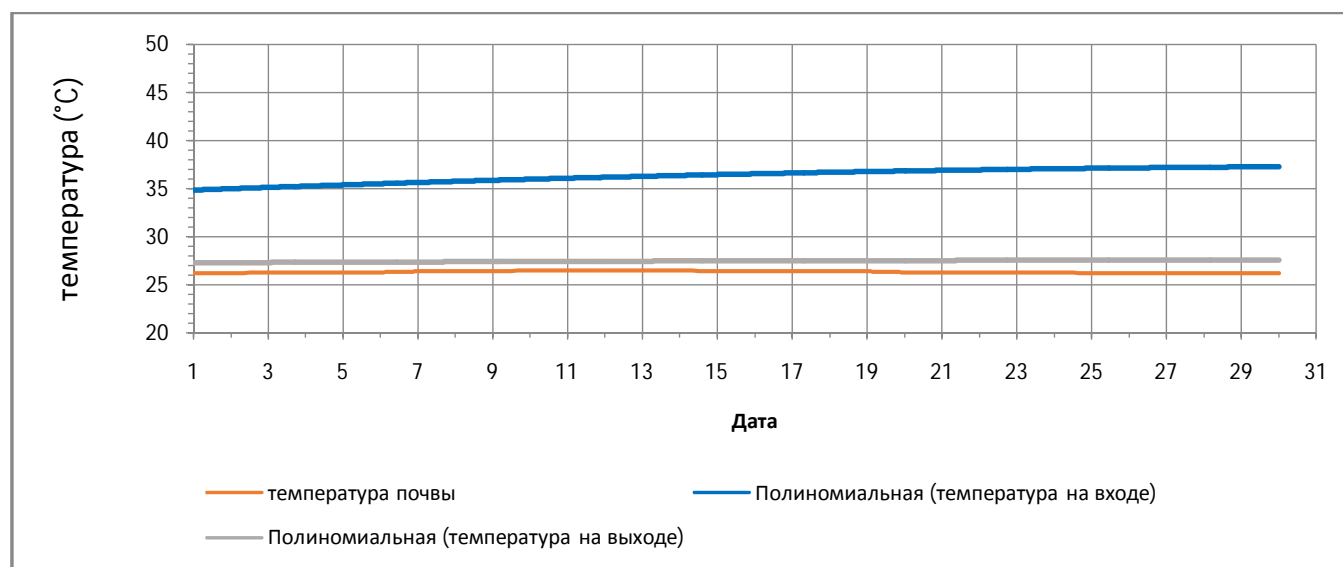


Рис.12. Изменение температуры в июне 2018 года

2.В. Анализ работы грунто-воздушного теплообменника; Труб ПВХ длиной 30м на глубине 2 м

2.В.1. В зимний период, ноябрь: На рис.13. представлены данные, собранные в ходе натурных 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 $21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

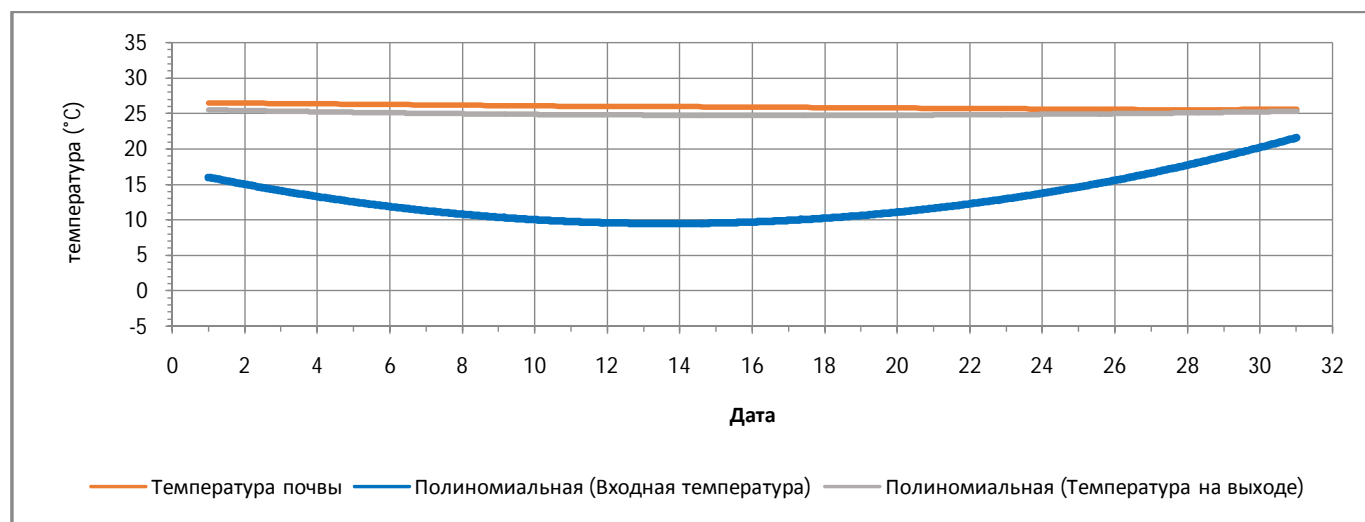


Рис. 13. Изменение температур воздуха в зимний период 2019 года

2.В.2.В летний период, июнь: На рис.14. представлена температура воздуха подземной теплообменной системы длиной 30м и расположенной на глубине 2м в июне. Относительная температура почвы колеблется от $26,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура на входе в трубу от $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура на выходе - от $26,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $29,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

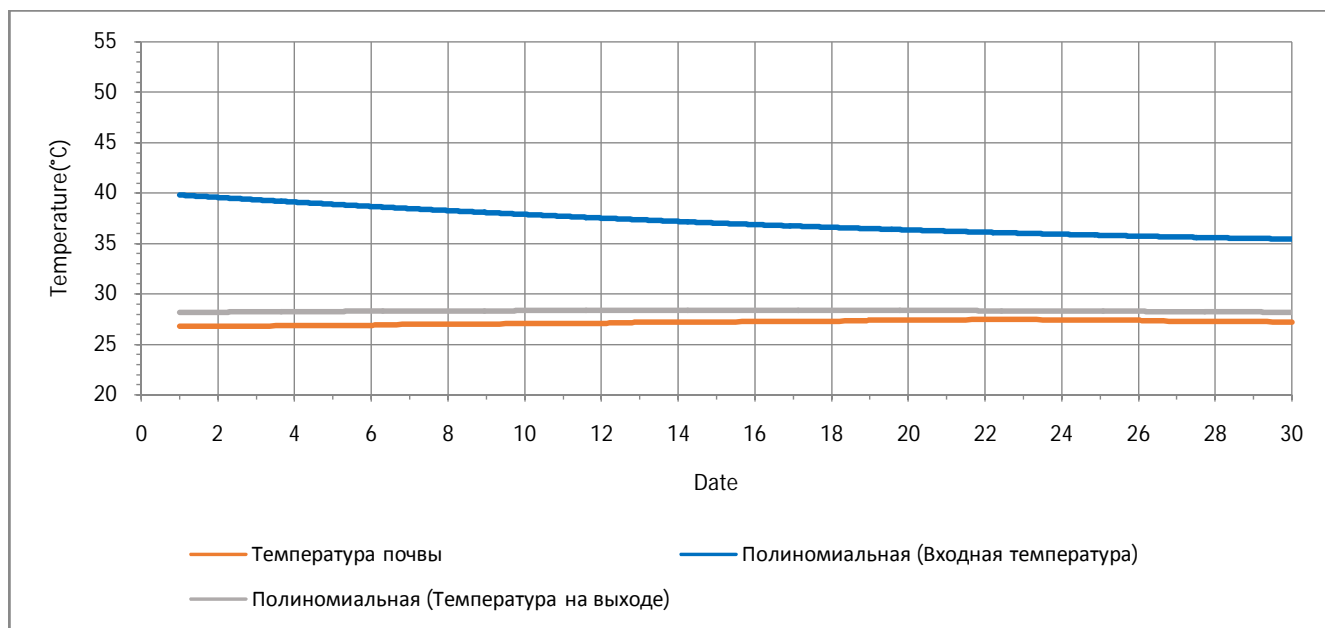


Рис. 14. Изменение температур воздуха в летний период 2019 года

1. **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. 15. видно, что температура воздуха увеличивается по высоте СВТ.

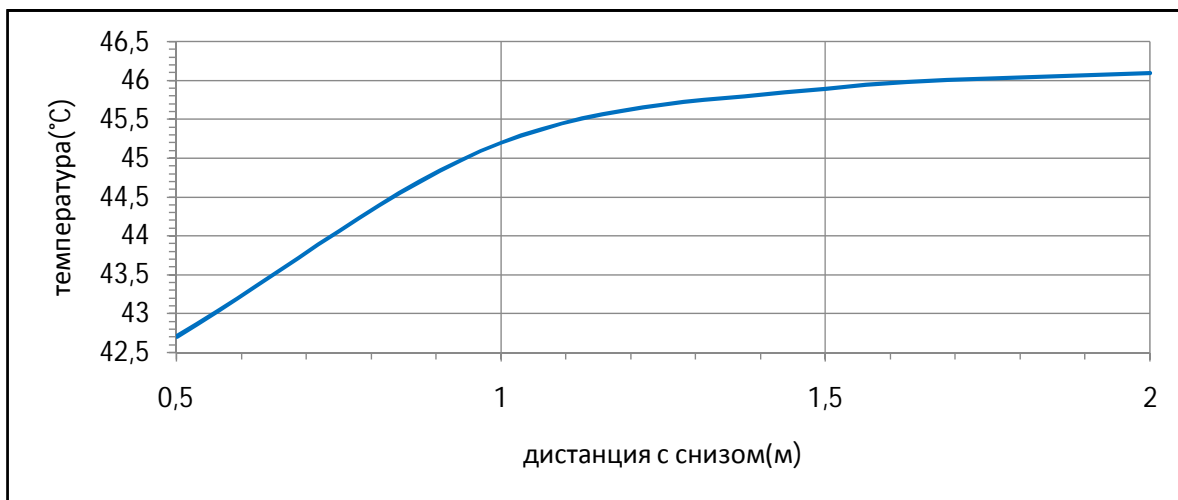


Рис. 15. Температура воздуха по высоте канала СВТ, ориентированной в южном направлении

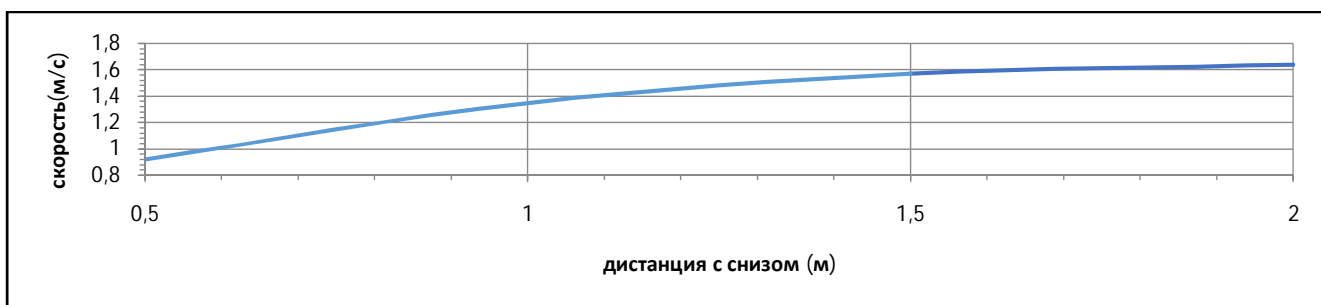


Рис. 16. Скорость воздушного потока по высоте канала солнечной трубы, ориентированной на юг, при ширине зазора 0.2 м

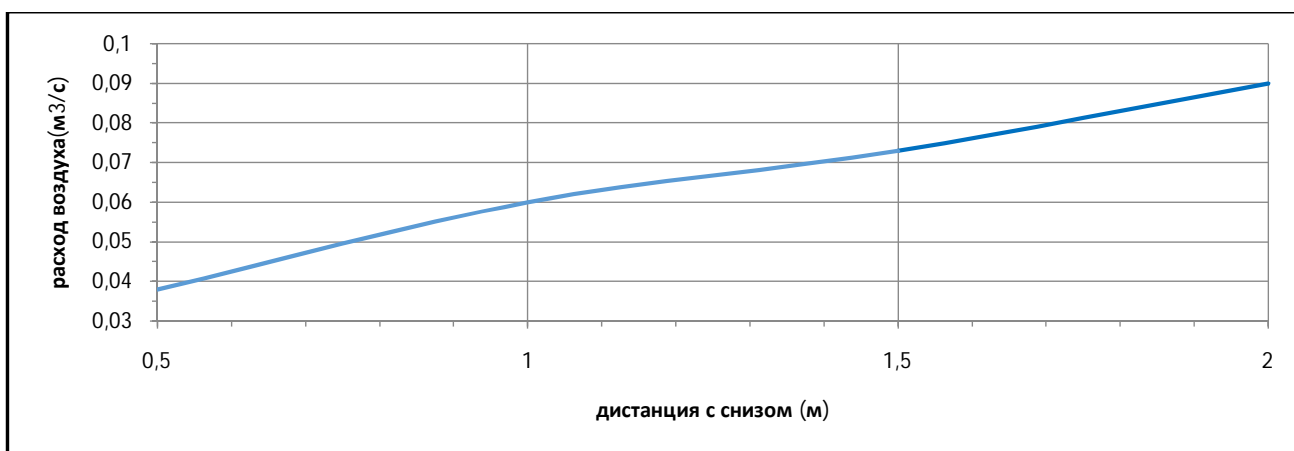


Рис. 17. Расход воздуха по высоте канала солнечной трубы, ориентированной на юг, при ширине зазора 0.2 м.

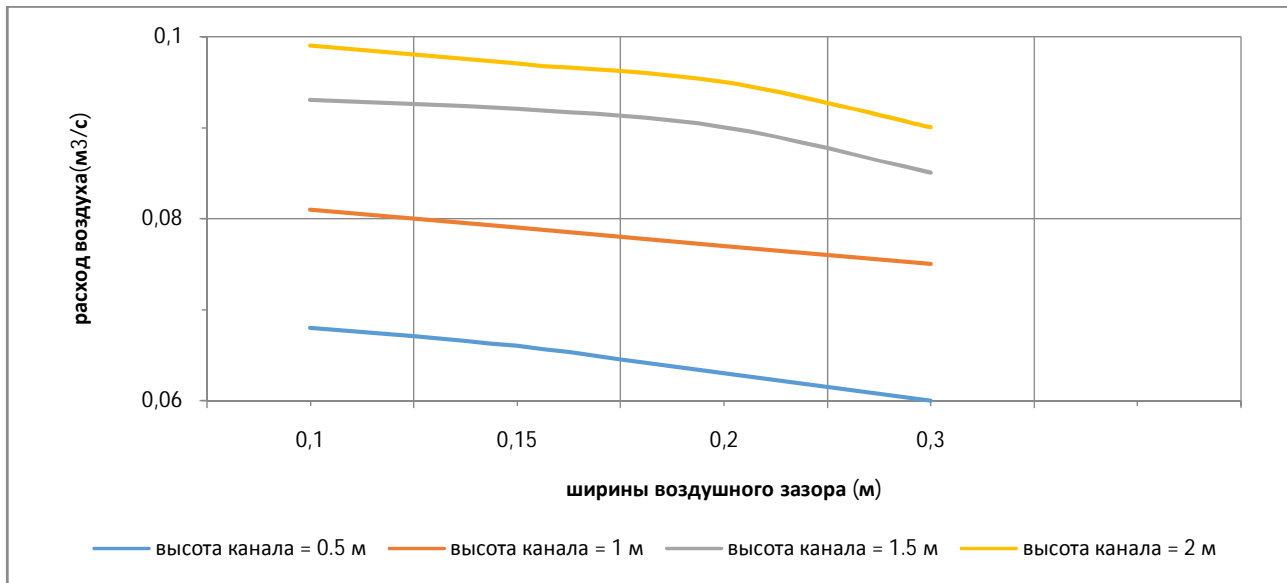


Рис. 18. Скорость потока в зависимости от ширины воздушного зазора при различной высоте канала СВТ

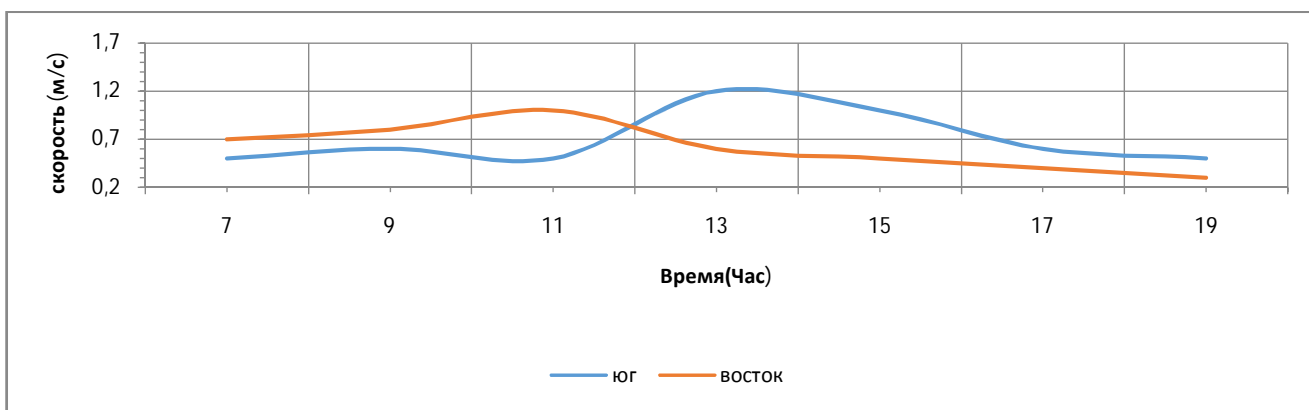


Рис. 19. Скорость воздушного потока на выходе СВТ при ширине воздушного зазора 0.2м и ориентации СВТ на южную и восточную стороны.

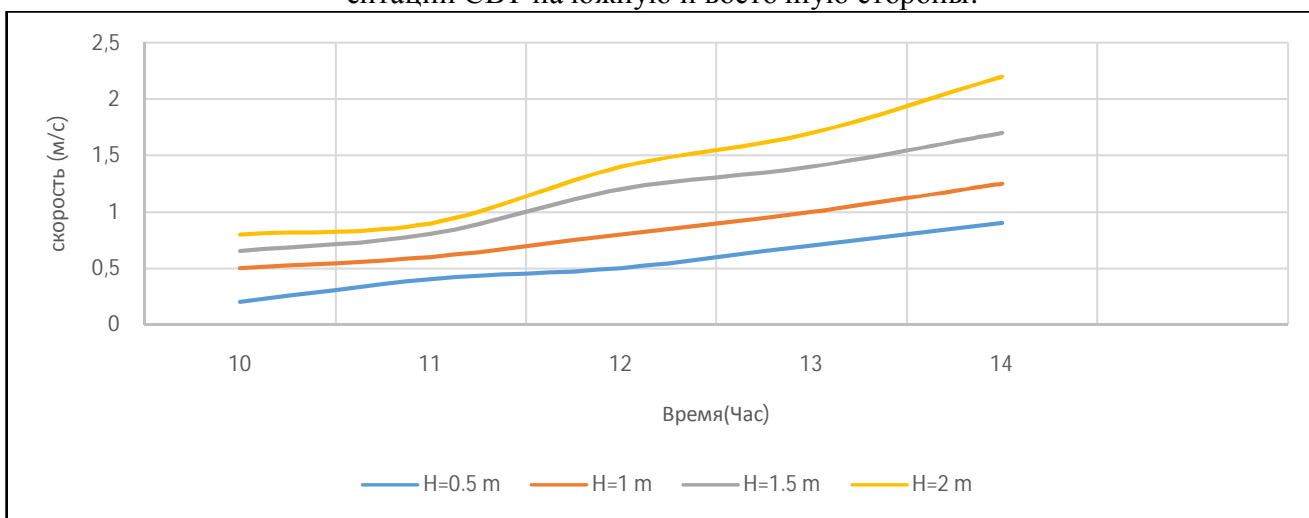


Рис. 20. Средняя скорость воздушного потока в СВТ, обращенной на южную сторону, при ширине воздушного зазора 0.2м в зависимости от времени.

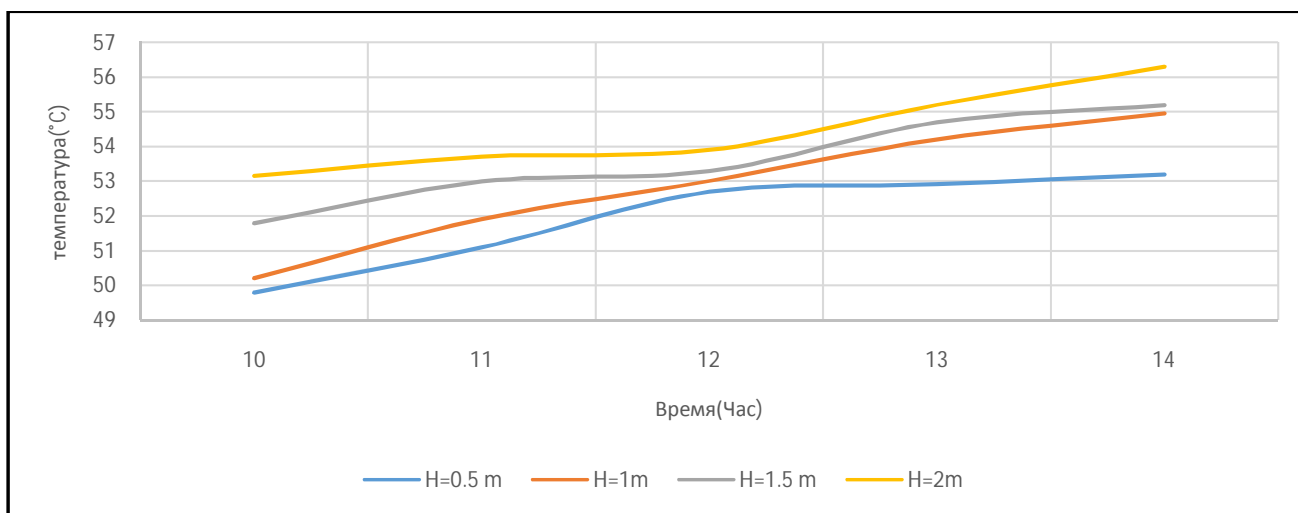


Рис. 21. Температура воздушного потока в СВТ, обращенной на южную сторону, при ширине воздушного зазора 0.2м в зависимости от времени и различной высоты канала.

В. Численное моделирование:

В.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 особенностях 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.22-23. ниже показано, что данные, полученные с помощью CFD-моделирования, аналогичны данным, полученным в ходе натуральных испытаний.

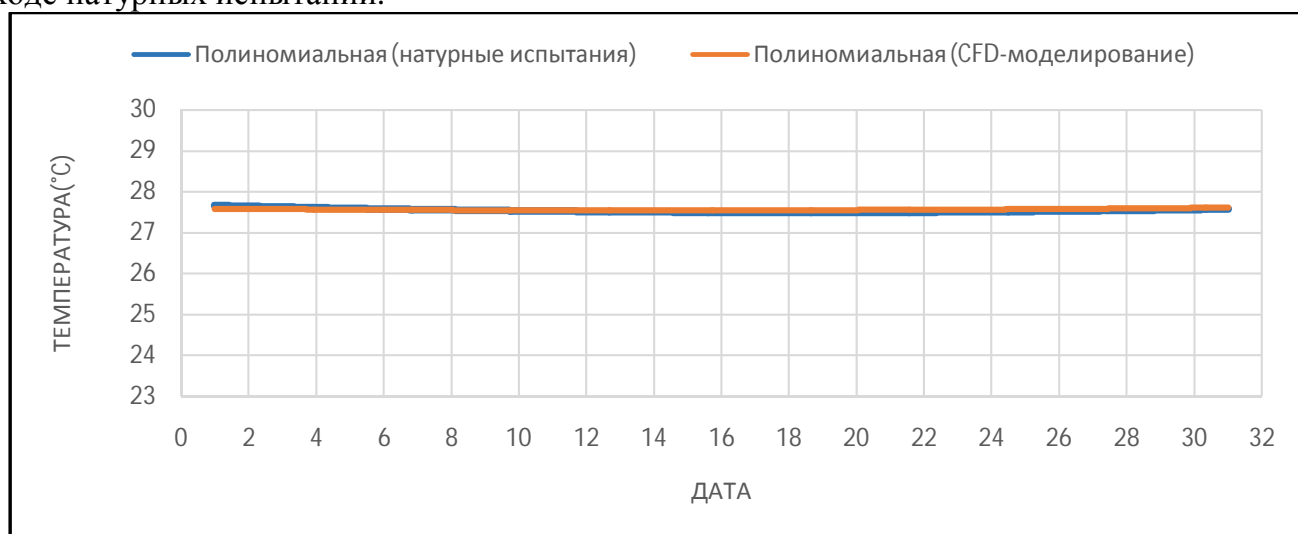


Рис. 22. Температура воздуха на выходе из ГВТ, полученная в ходе натуральных испытаний и в ходе численного моделирования в течение **июля**

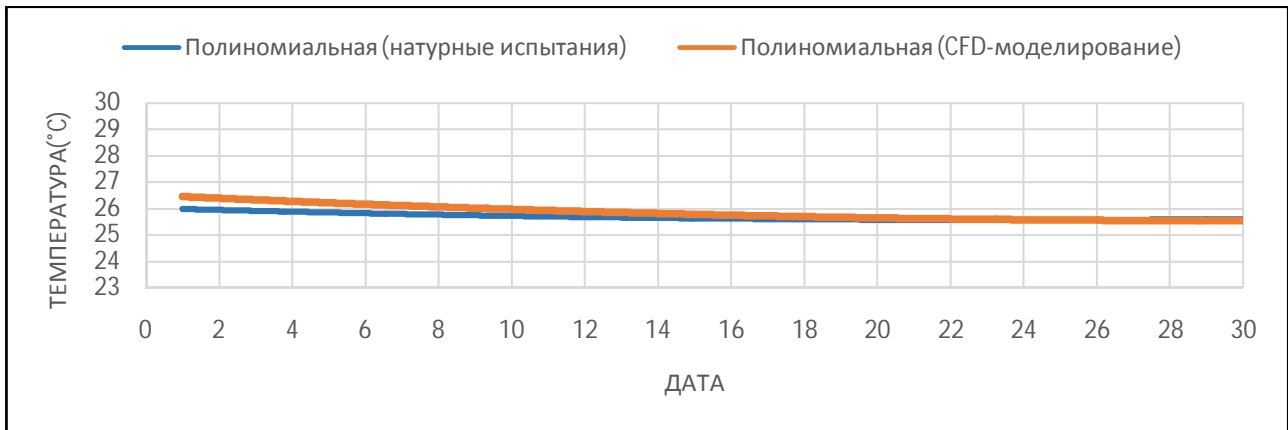


Рис. 23. Температура воздуха на выходе из ГВТ, полученная в ходе натурных испытаний и в ходе численного моделирования в течение **ноября**

Основной целью моделирования системы ГВТ является расширенная обработка переменных, оказывающих влияние на работу установки. На рис.24-25 для температуры воздуха 50°C и скорости воздуха 1 м/с показано распределение скорости для системы ГВТ и окружающего ее грунта соответственно.

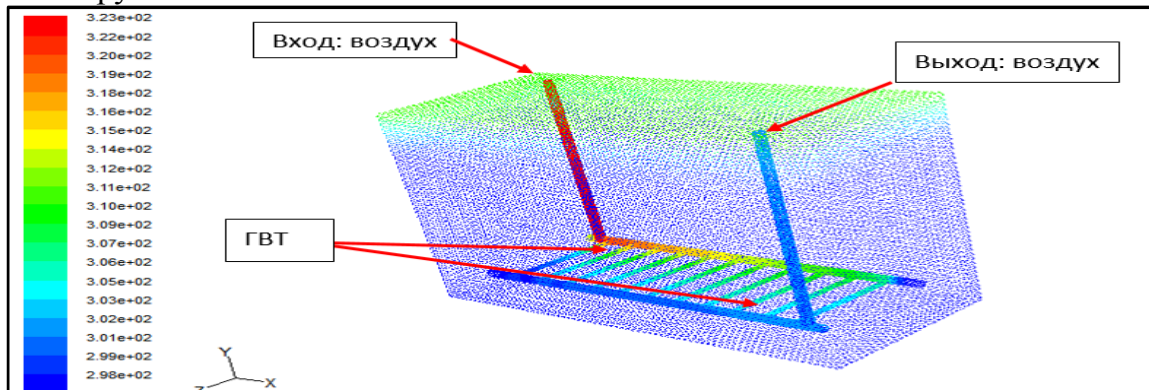


Рис. 24. Векторы скорости при заданной статической температуре слоев грунта

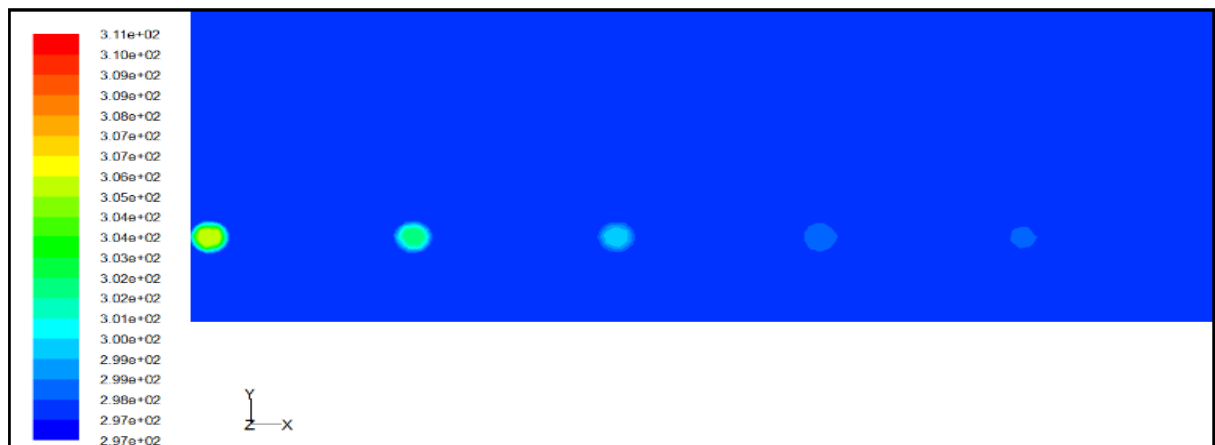


Рис.25. Вертикальный разрез распределения температуры в ГВТ.

На рис.26. показано (в Августе), связь диаметра трубы теплообменника и эффективности теплообмена между воздухом и грунтом при постоянных длине (70 м), глубине прокладки (4 м) и 3 м/с скорость воздуха. Увеличение диаметра трубы приводит к увеличению диапазона температур на выходе из трубы.

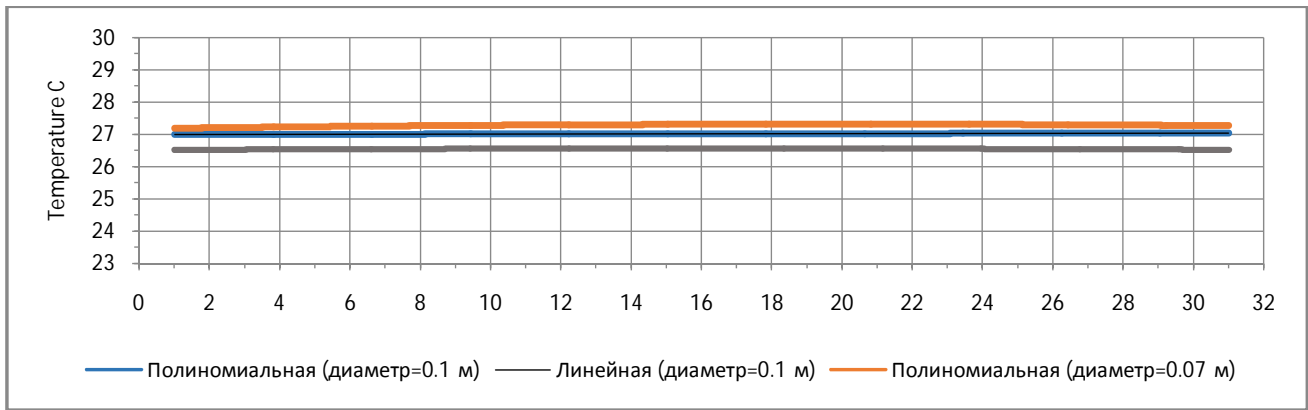


Рис. 26. Данные изменения температуры воздуха в течение месяца, полученные в ходе численного моделирования, для ГВТ с различным диаметром труб.

На рис. 27. 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.

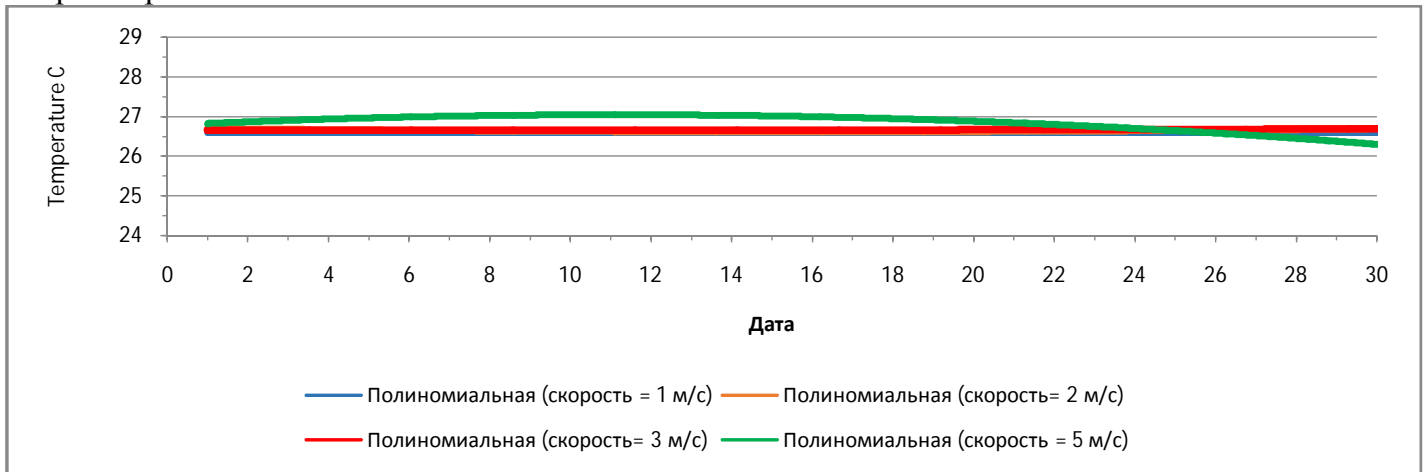


Рис. 27. Параметрическое исследование ГВТ при использовании CFD-моделирования с различными скоростями воздушного потока.

В.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. 28-30 приведены данные для сравнения численной модели и натуральных экспериментов по работе СВТ.

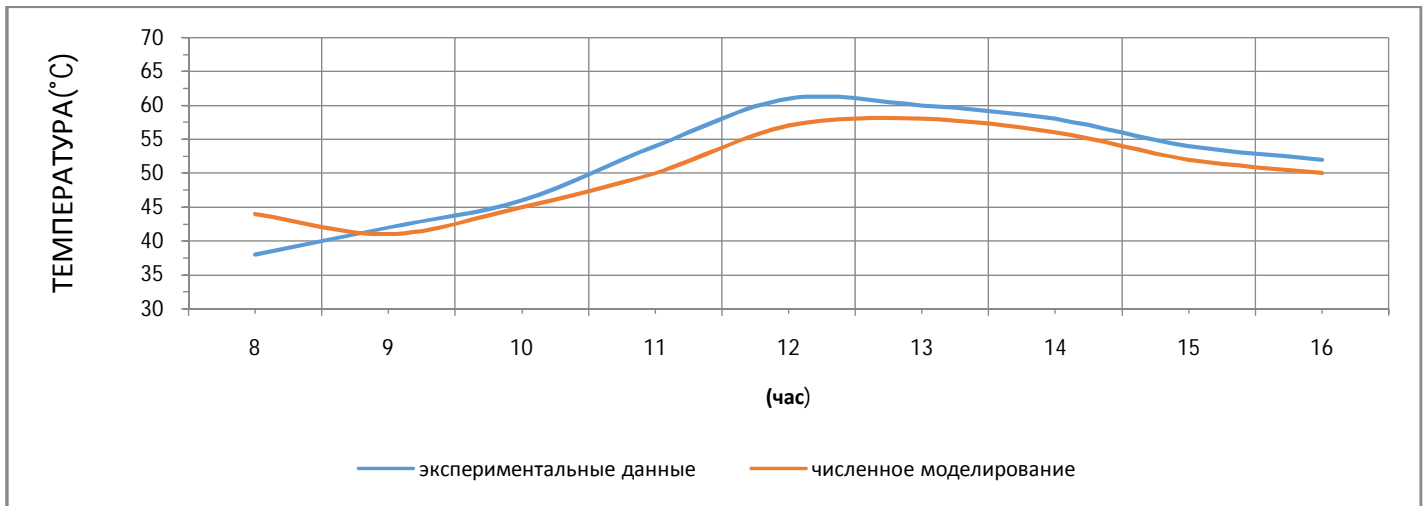


Рис. 28. Данные, полученные в ходе численного моделирования и экспериментальные данные изменения температуры воздуха на выходе из вертикально расположенной СВТ.

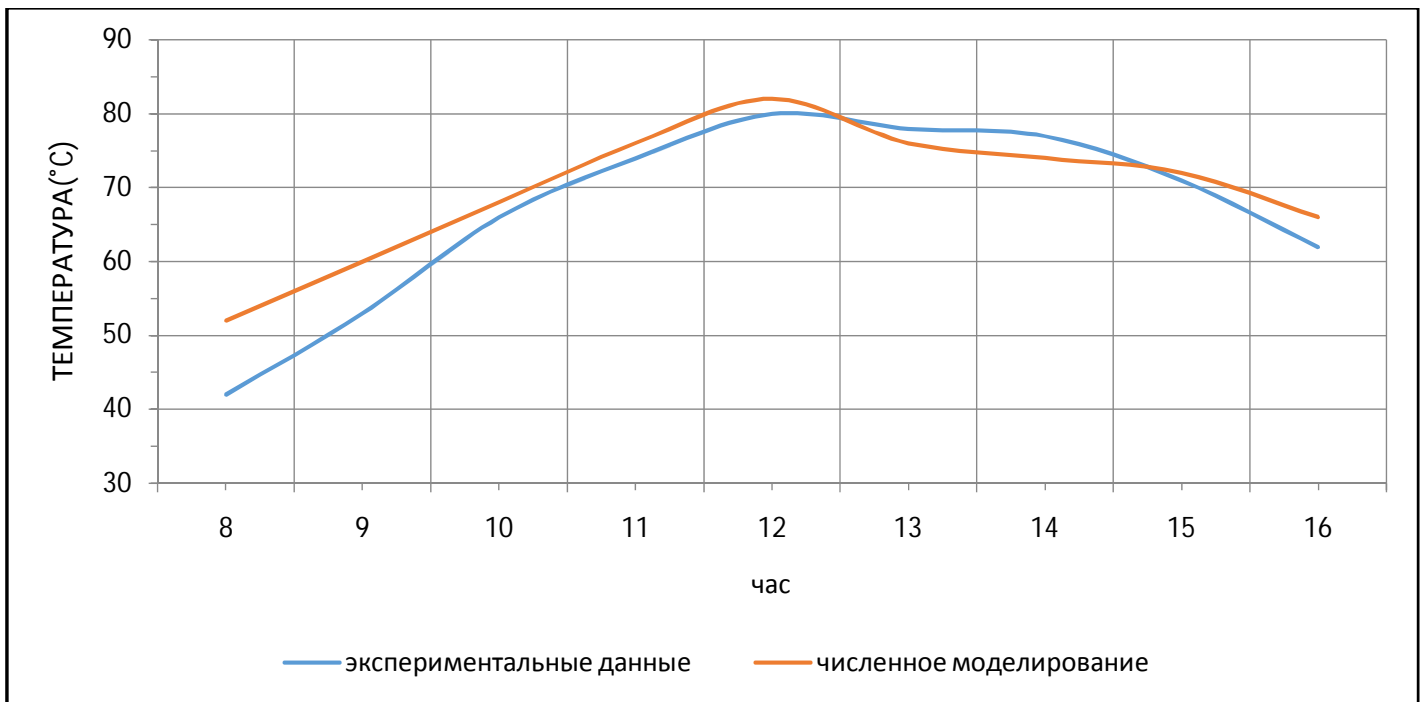


Рис.29. Данные, полученные в ходе численного моделирования и экспериментальные данные изменения температуры в промежуточной точке на поглощающей поверхности СВТ.

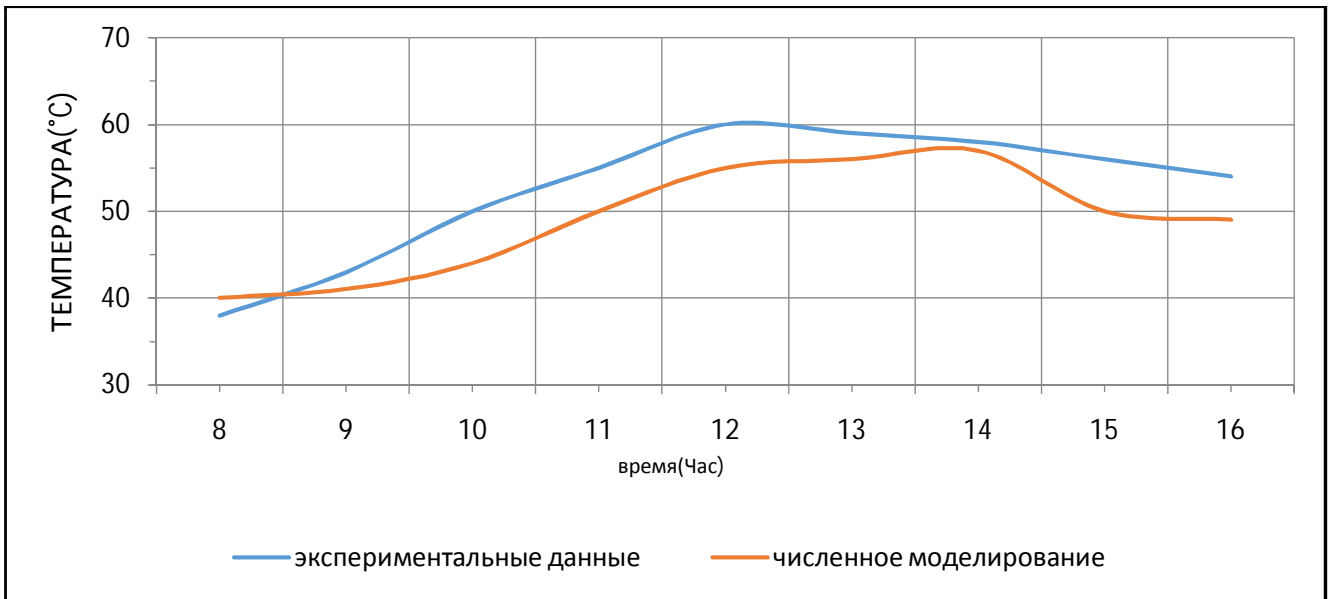


Рис. 30. Данные, полученные в ходе численного моделирования и экспериментальные данные изменения температуры в промежуточной точке на остекленной поверхности СВТ.

На рис.31. 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°C. 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.

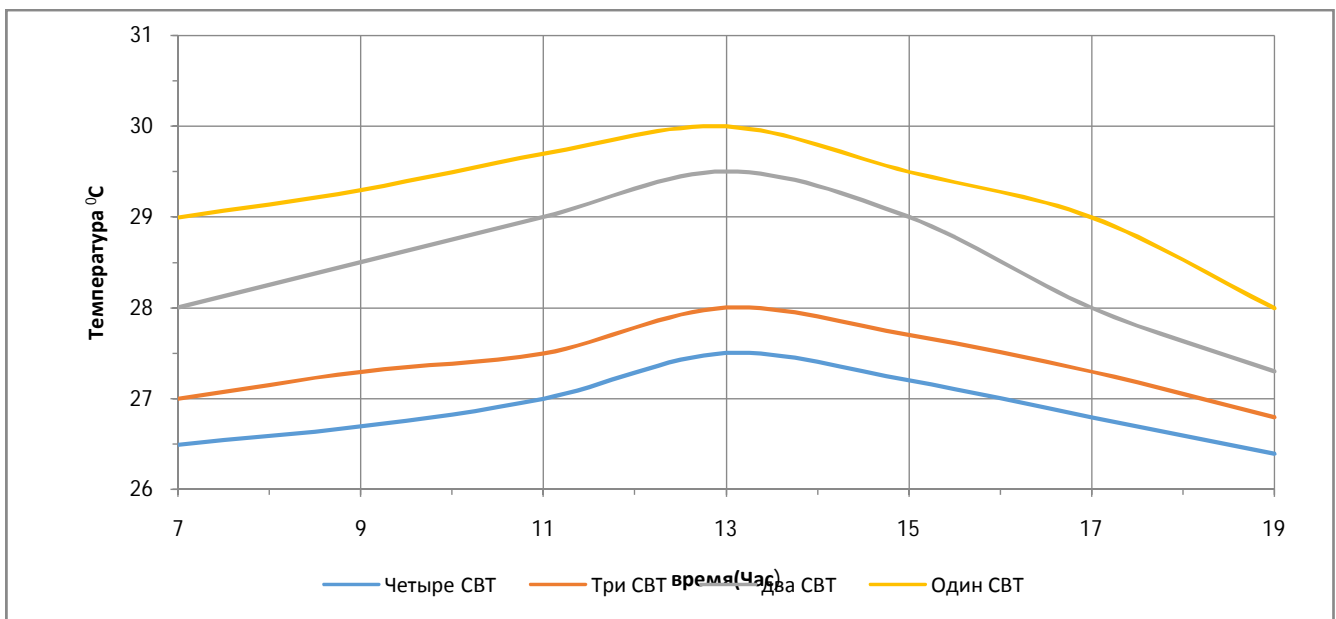


Рис.31. Влияние ширины заборного окна СВТ и расхода воздуха на расход воздуха в системе вентиляции.

Рис.32. 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%.

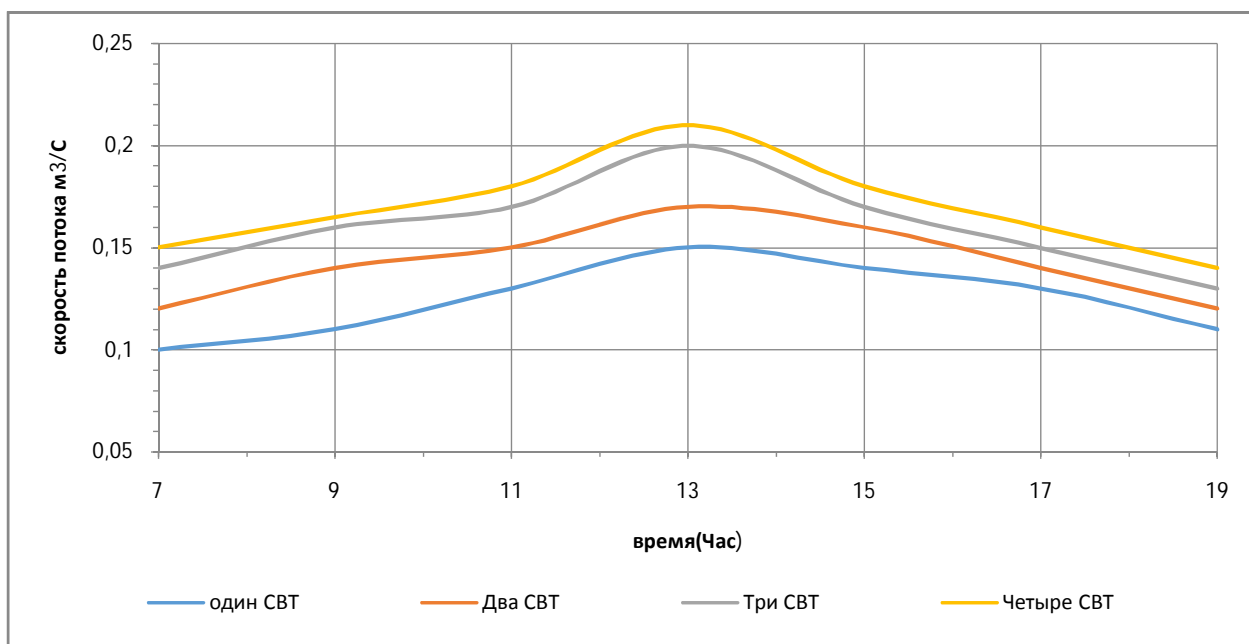


Рис.32. Скорость воздуха в центре вентилируемого помещения в зависимости от времени и количества используемых СВТ с шириной воздушного зазора 0,2м.

Заключение

1. Предложена комплексная трехмерная модель системы пассивного охлаждения, включающая взаимосвязанные модели массива грунта, СВТ и ГВТ. Она включает в себя численную модель по расчету турбулентного течения воздуха и теплообмена в СВТ, грунте и ГВТ, учитывающая расход воздуха и диаметр труб теплообменника.
2. Создан экспериментальный макет системы пассивного охлаждения в районе г. Басра (Республика Ирак), оборудованный цифровыми измерителями температуры почвы и скорости воздуха.
3. Экспериментально установлено, что колебания температуры почвы на глубине 4 м незначительны и составляют 26,4°C - 26,6°C. Рассеивание теплоты от системы ГВТ в слой грунта не оказывает существенного влияния на температуру почвы в краткосрочной перспективе. В холодное время года максимальное повышение температуры составило 21,3°C, а в жаркое - 20,7°C. В обоих случаях трубы ГВТ были проложены на глубине 4м. На глубине 2 м и при длине трубы ГВТ, равной 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.

4. Показано, что 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. Оптимальный диапазон скоростей воздуха для наиболее эффективной работы ГВТ составляет 1-1,5 м/с.

5. 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. При использовании двух СВТ позволяет увеличить воздухообмен на 13.3%, а увеличение количества СВТ до трех увеличивает воздухообмен на 32%.

6. Отмечено, что 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.

Подписано в печать 29.09.2021. Формат 60x84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,00. Тираж 100. Заказ 3057.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета Петра Великого.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.