ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

СТАЦИОНАРНАЯ И НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
«РАСЧЕТ ДВУМЕРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ АНАЛОГИИ»

Цель работы. Изучение аналогии между процессами теплопроводности и электропроводимости. Ознакомление с типами электрических моделей. Разработка электрической модели – геометрического аналога сечения угла наружной стены с использованием масштабов длины и температуры.

Задание на моделирование. В лабораторной работе 1 исследуется стационарное температурное поле сечения угла наружной стены. Следует построить изотермы +5 °С, 0 °С, -5 °С, -10 °С, -15 °С, -20 °С, -25 °С. Задания выдаются по вариантам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1

Варианты задания на моделирование

Вариант	Толщина стены, $\Delta_{ст}^{Т}$, м	Ширина модели $\Delta_{ст}^{Э}$, м	Температура наружного воздуха $t_н$, °С	Температура внутреннего воздуха $t_в$, °С	Теплопроводность материала стены λ, Вт/(м·К)
1	2	3	4	5	6
1	0,25	0,1	-32	20	0,3
2	0,30	0,12	-30	22	0,35
3	0,36	0,1	-35	20	0,40
4	0,40	0,12	-37	22	0,25

1. Общая часть

Двумерные или трехмерные температурные поля в ограждающих конструкциях возникают там, где тепловой поток не может двигаться равномерно в одном направлении. Происходит это либо потому, что сама конструкция имеет изогнутую форму, например, в углу наружной стены, либо в конструкции находятся более теплопроводные, чем ее тело связи, удерживающие отдельные слои вместе, либо одна конструкция примыкает к другой, например, окно, примыкающее к наружной стене, имеет откосы, которые искривляют температурное поле стены. Так как специалиста по отоплению в этой ситуации интересуют среднее по площади ограждения сопротивление теплопередаче (для определения теплопотерь) и наиболее низкая температура на внутренней поверхности этого ограждения (для проверки отсутствия конденсата в локальных точках), то возникает задача расчета неодномерного температурного поля.

Аналогия между процессами теплопроводности и электропроводимости. Одним из методов расчета двумерного температурного поля является метод моделирования процесса теплопроводности с помощью электропроводимости. Возможность такой замены обоснована аналогией между ними, подтверждающейся одинаковым математическим описанием обоих процессов дифференциальными уравнениями [1].

В процессах теплопроводности и электропроводимости существуют соответствующие друг другу прямые аналоги, которые приведены в таблице 2. Так как работа основана на измерении внесистемных единиц электрических потенциалов, в таблице 2 и далее помимо единиц системы СИ приведены также и примененные в работе единицы измерения.

Таблица 2

Прямые аналоги в тепловом и электрическом полях

Тепловое поле	Электрическое поле
Температура, потенциал переноса теплоты, t, ^oC	Напряжение, электрический потенциал U, В или ед. потенциала.
Количество теплоты, Q, Дж	Количество электричества, Кул или ед. колич. эл.
Теплопроводность материала λ, Вт/(м·^oC) = Дж/(с·м·^oC)	Электрическая проводимость $1/\rho$, Кул/(с·м·В) или ед. колич. эл./ ((с·м·ед. потенциала), где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.
Термическое сопротивление однородного ограждения площадью А, $м^2$, и толщиной $\Delta_т$, м, $R_т = \Delta_т /(A\cdot \lambda)$, ^oC/Вт	Электрическое сопротивление проводника сечением S, $м^2$, и длиной $\Delta_э$, м, $R_э = \Delta_э \cdot \rho/S$, Ом или ед.потенциала·с/(ед. колич. эл.)
Тепловой поток, $q=\Delta t/R_т$, Дж/с=Вт	Сила электрического тока $I=\Delta U/ R_э$, А или ед. колич эл./с

Часто приходится решать задачи теплопередачи, а не только теплопроводности. Но в электрическом поле нет аналогов коэффициентам теплоотдачи на внутренней $\alpha_в$, Вт/($м^{2\cdot o}$C), и на наружной $\alpha_н$, Вт/($м^{2\cdot o}$C), поверхностях. Поэтому, процесс теплоотдачи на поверхностях ограждения при электромоделировании заменяется процессом теплопроводности, и граничные условия третьего рода заменяются на граничные условия первого рода.

Электрические модели. Как правило, все способы решения тепловых задач с помощью электротеплового моделирования разделяют на две группы [1]. К одной группе относят способы, использующие модель из материала с непрерывной проводимостью. Модели этой группы называют «геометрическими аналогами», так как они повторяют геометрию моделируемой системы и ее непрерывный характер. В другую группу входят способы, создающие модель из эквивалентных

электрических цепей с сосредоточенными электрическими характеристиками (сопротивлением и т.д.). Модели второй группы называют «моделирующими цепями».

2. Содержание работы, материалы, оборудование

Методика решения задач на электромодели. В настоящей работе применяются модели из тонкого листа токопроводящей графитовой бумаги, работающие по принципу «геометрического аналога».

Электрическая модель вырезается из листа по форме, геометрически подобной оригиналу; условия на границах задаются контактами из листовой латуни.

На рисунке 1 слева изображено сечение глади наружной стены, а справа – электрическая модель этого ограждения. Так как все рассуждения, приведенные ниже, сохраняют силу и для сечения конструкций с двумерным температурным полем для простоты на рисунке 1 слева рассмотрено однородное ограждение с одномерным распределением температуры. Изотермы в сечении такой стены горизонтальны. Справа представлена электромодель - геометрический аналог той же стены.

В модели толщине стены $\Delta_{ст}^{Т}$, м, соответствует $\Delta_{ст}^{Э}$, м, а длине стены $l_т$, м, соответствует $l_э$, м.

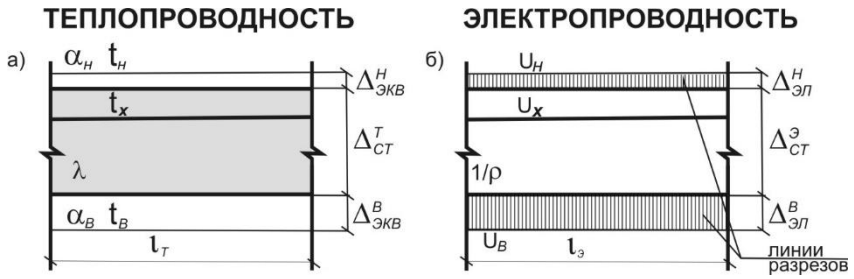

Рисунок 1. Электротепловая аналогия:
а) сечение наружной стены; б) электромодель стены

Введем в тепловой модели на внутренней и наружной поверхностях стены дополнительные слои, эквивалентные своим сопротивлением теплопроводности

реальному сопротивлению теплоотдачи $\Delta^{B}_{экв}$, м, и $\Delta^{H}_{экв}$, м. Толщины эквивалентных слоев на внутренней и наружной поверхностях стены, м, равны:

$$\Delta^{B}_{экв} = \frac{\lambda}{\alpha_{в}}, \quad \Delta^{H}_{экв} = \frac{\lambda}{\alpha_{н}} \tag{1}$$

где λ – теплопроводность материала стены, Вт/(м·К);

$\alpha_{в}$, $\alpha_{н}$ – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, Вт/(м^2·К);

В электрическом поле аналогами эквивалентных слоев будут $\Delta^{B}_{эл}$, м, и $\Delta^{H}_{эл}$, м. Эти слои должны обладать проводимостью только в одном, перпендикулярном поверхности ограждения направлении. Проводимость электрического тока в этих слоях в направлении, параллельном поверхности, устраняется разрезами, показанными на рис. 1б.

Если на поверхности эквивалентных слоев ограждения заданы значения температуры внутреннего $t_{в}$ и наружного $t_{н}$ воздуха, то распределение температуры по сечению ограждения в общем случае определяется величинами $1/\lambda$, $\Delta^{B}_{экв}$, $\Delta^{T}_{ст}$, $\Delta^{H}_{экв}$, $l_{т}$. Аналогичное распределению температуры в сечении стены распределение электрического потенциала на электромодели зависит от значений ρ, $\Delta^{B}_{эл}$, $\Delta^{Э}_{ст}$, $\Delta^{H}_{эл}$, $l_{э}$, где ρ – удельное электрическое сопротивление токопроводящей бумаги, Ом·м или м·ед.потенц.·с/(ед. колич. эл.).

Для того, чтобы процессы были подобны друг другу необходимо соблюдать следующие масштабные соотношения:

- масштаб температуры, ^{o}С/(ед. потенциала):

$$m_{t} = \frac{t_{в} - t_{н}}{U_{в} - U_{н}} \tag{2}$$

- масштаб длин, м/м:

$$m_l = \frac{l_T}{l_Э} = \frac{\Delta_{ст}^{T}}{\Delta_{ст}^{Э}} = \frac{\Delta_{экв}^{B}}{\Delta_{эл}^{B}} = \frac{\Delta_{экв}^{H}}{\Delta_{эл}^{H}} \qquad (3)$$

- масштаб сопротивлений, $\frac{м \cdot {}^{o}C / Вт}{м \cdot ед.потенц. \cdot с / ед.колич.эл.}$:

$$m_{1/\lambda} = \frac{1/\lambda}{\rho} \qquad (4)$$

В лабораторной работе рассматривается однородная наружная стена, поэтому масштаб сопротивлений не применяется. При моделировании неоднородных или многослойных ограждений следует при помощи масштаба сопротивлений $m_{1/\lambda}$ определить значения ρ для электромоделирования различных материалов, составляющих конструкцию. Чтобы изменить соотношение удельных сопротивлений, часть участков модели подвергается перфорации. Для этого участок разбивается на произвольное количество квадратов, и в центре каждого квадрата пробивается квадратное отверстие, размер которого рассчитывается в зависимости от необходимого соотношения удельных электрических сопротивлений двух участков из различных материалов.

Чтобы подвести к границам эквивалентных слоев электрические потенциалы, моделирующие температуру внутреннего и наружного воздуха, на модели за эквивалентными слоями предусматриваются еще полоски, расширяющие модель с каждой стороны на 5 мм, которые уйдут под зажим контактов.

Конструкция моделирующего устройства. В лабораторной работе используется установка , разработанная и изготовленная в лаборатории отопления и вентиляции. Электрическая схема питания и измерения потенциалов представлена на рисунке 2. Электромодель 1, вырезанная из токопроводящей бумаги, при помощи контактов 10 укрепляется на подставке 2. На контакты подается раз-

ность потенциалов $U_в$ – $U_н$ от источника постоянного электрического тока. Источником электропитания в моделирующих установках обычно бывают электрические батарейки. Для удобства дальнейших расчетов и для обеспечения независимости от значения разности потенциалов, создаваемой электробатарейкой, всю эту разность потенциалов считают равной 100 ед. потенциала. То есть считаем, что на один из контактов, моделирующий температуру внутреннего воздуха, подается потенциал 100 ед. потенц., а на другом, моделирующем температуру наружного воздуха потенциал равен 0.

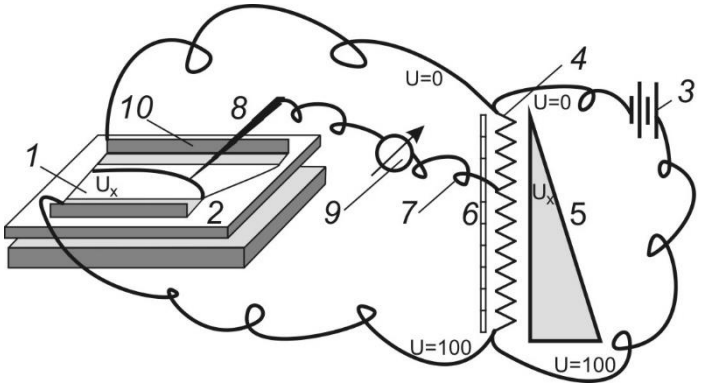

Рисунок 2 Электрическая схема питания и измерения потенциалов

Для измерения потенциалов на модели служит измерительное устройство, собранное по потенциометрической схеме. Делитель напряжения 4 (омическое сопротивление) присоединен параллельно электромодели. В делителе возникает линейное распределение потенциалов, показанное на рисунке 2 в виде эпюры 5. Делитель снабжен шкалой 6, которая позволяет установить движок 7 в положение, соответствующее искомому значению потенциала.

Определение положения изопотенциальной линии на электромодели осуществляется при помощи щупа 8, последовательно передвигая который и отыскивая точки, соответствующие нулевому положению гальванометра 9 (нулевое положение возникает при одинаковых потенциалах в месте установки движка на делителе напряжения и в точке на модели).

В лабораторной работе делитель напряжения выполнен из ползункового реостата, снабженного шкалой с ценой деления 1 условная ед. потенц. В качестве

щупов применяются графитовые карандаши. Грифель карандаша, кроме электропроводника, является еще и дополнительным электросопротивлением, уменьшающим ток, идущий через гальванометр во время отыскивания правильного положения щупа.

Передвигая движок делителя последовательно в различные положения, можно построить поле изопотенциальных линий.

Подготовка к выполнению лабораторной работы. В лабораторной работе следует определить расположение заданных изотерм в сечении наружного угла наружной стены. Предварительная подготовка к расчету температурного поля на модели из токопроводящей бумаги сводится к следующему:

- по заданным значениям $\alpha_в$, $\alpha_н$, Вт/(м^2·К) и λ Вт/(м·К) определяются размеры эквивалентных слоев на поверхности ограждения по формулам (1);

- по известной толщине реальной стены $\Delta_{ст}^{Т}$ и заданной толщине стены $\Delta_{ст}^{Э}$ на модели рассчитывается масштаб m_l длин по формуле (3);

- зная масштаб длин, находятся толщины эквивалентных слоев в электрической модели:

$$\Delta_{эл}^{В} = \frac{\Delta_{экв}^{В}}{m_l} \quad \text{и} \quad \Delta_{эл}^{Н} = \frac{\Delta_{экв}^{Н}}{m_l} \qquad (5)$$

- определяется масштаб температуры m_t по формуле (2) при условии, что значения температуры внутреннего $t_в$ и наружного $t_н$ воздуха заданы, разность потенциалов $U_в$ - $U_н$ равна 100 ед. потенциала;

- по заданным значениям температуры t_x, °С, изотермы которых следует провести на электромодели, рассчитываются значения электропотенциалов, ед.потенц.:

$$U_x = \frac{t_x - t_н}{m_t} \qquad (6)$$

полученные значения потенциалов заносятся в таблицу 3.

Таблица 3

Электрические потенциалы, соответствующие заданным значениям температуры

Температура, t_x, °C	Электрический потенциал, U_x, ед. потенц.
+5	
0	
-5	
-10	
-15	
-20	
-25	

- на листе токопроводящей бумаги вычерчивается модель сечения угла наружной стены. Причем, так как угол симметричен относительно линии, проходящей через вершину угла и внутренний угол, рассматривается только одна из симметричных сторон угла. Модель должна занимать всю длину выданной токопроводящей бумаги. Сама стена моделируется полосой заданной ширины $\Delta_{ст}^{Э}$, один край которой скошен линией, пересекающей обе грани стены под углом 45 град. к ним. Со стороны тупого угла находится внутренняя грань стены, со стороны острого – наружная. С каждой стороны строятся соответствующие эквивалентные слои, толщиной $\Delta_{эл}^{B}$, $\Delta_{эл}^{H}$. За ними откладываются слои под зажимы электроконтактов по 5 мм. Модель вырезается ножницами. В пределах эквивалентных слоев лезвием делаются надрезы через 5-7 мм перпендикулярно поверхности ограждения.

Порядок выполнения работы.

1. Модель встраивается в установку для электропитания и измерения потенциалов.

2. К границам эквивалентных слоев при помощи линейных контактов подводится разность потенциалов.

3. Находится местоположение потенциалов, составляющих искомые изотермы.

4. Определяется потенциал на внутренней поверхности угла стены, как наиболее низкая температура внутренней поверхности стены $U_{уг}$, ед. потенц., и полученный потенциал пересчитывается в температуру угла $t_{уг}$, °С:

$$t_{УГ} = t_н + m_t \cdot U_{УГ} \qquad (7)$$

5. Рассчитывается температура в углу заданной однородной стенки по формуле [2]:

$$t_{УГ} = t_B - (R_B / R_o)^{2/3} \cdot (t_B - t_H) \qquad (8)$$

где $R_в$ – сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности стены, м^{2}·К/Вт, равное:

$$R_B = 1/\alpha_B \qquad (9)$$

здесь $\alpha_в$ – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности наружной стены, Вт/(м^{2}·°С), принимаемый равным $\alpha_в$= 8,7 Вт/(м^{2}·К),

R_o – общее сопротивление теплопередаче глади исследуемой однородной наружной стены, м^{2}·К/Вт, определяемое по формуле:

$$R_o = 1/\alpha_B + \Delta_{CT}^{T} / \lambda + 1/\alpha_H \qquad (10)$$

здесь $\alpha_н$ – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности наружной стены, Вт/(м^{2}·К), принимаемый равным $\alpha_в$= 23 Вт/(м^{2}·К).

6. Сравниваются значения температуры на внутренней поверхности в углу наружной стены, вычисленные по результатам замера (7) и по формуле (8). Если результаты расходятся, необходимо перемерить $U_{уг}$.

3. Обработка результатов, оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Конспект всех разделов методического указания по Лабораторной работе 1 с рисунками и таблицей аналогов в тепловом и электрическом полях.

2. Чертеж модели с эквивалентными слоями, можно в масштабе М 1:2. На чертеже должны быть показаны найденные изотермы с подписанной температурой в ^{o}C и обозначенной температурой на внутренней поверхности угла. Пример схематично показан на рисунке 3.

3. Расчет температуры на внутренней поверхности наружной стены в углу по данным замеров и аналитически.

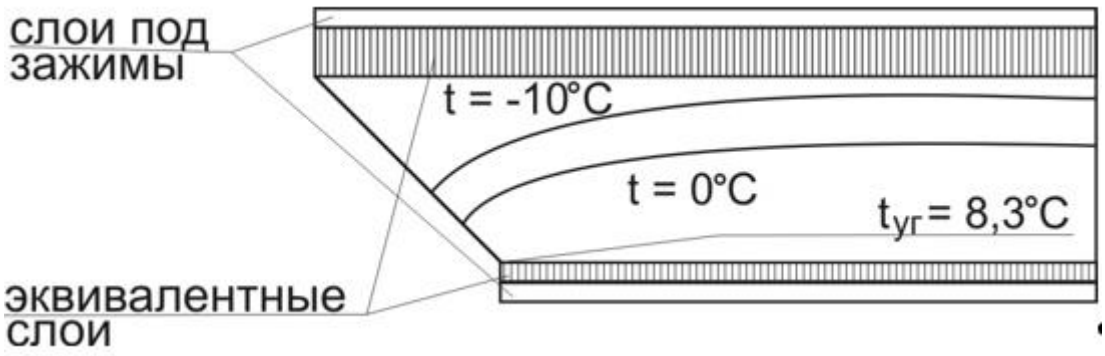

Рисунок 3. Схема модели из токопроводящей бумаги сечения угла однородной наружной стены с нанесенными на нее изотермами 0^{o}C и -10^{o}C и указанием температуры на внутренней поверхности угла стены

Список литературы к лабораторной работе №1

1. Малявина, Е.Г. Теплофизика зданий [Текст] : учебное пособие для студентов ВПО, обучающихся по программе бакалавриата по направлению подготовки 270800 – «Строительство» /Е.Г. Малявина - М.: Издательство АСВ, 2013 – 144 с.

2. Гагарин, В. Г. Теплотехнический расчет наружных ограждений и расчет теплового режима здания [Текст] : учебное пособие / В. Г. Гагарин, Е. Г. Малявина, А. С. Маркевич ; Московский государственный строительный университет ; [рец.: И. К. Васильев, О. Д. Самарин]. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – Москва : МГСУ, 2014. – 110 с.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ПАРАМЕТРЫ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЯ И НАРУЖНОГО КЛИМАТА

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА»

Цель работы: ознакомление с основными средствами и приборами для измерения параметров микроклимата помещения [1], [2].

Содержание работы, материалы, оборудование. В ходе работы измеряются:

- температура внутреннего воздуха по сухому термометру $t_в$, ^{0}С (жидкостным термометром – ртутным или спиртовым или многофункциональным прибором *Testo* 435-4 [3] с зондом для измерения температуры и относительной влажности воздуха, регистратор данных температуры внутреннего воздуха *Testo* 175-*T*3);

Рис. 1. Многофункциональный измерительный прибор Testo 435-4 и зонд температуры воздуха, термопара типа К [3].

Модель внесена в Государственный Реестр средств измерений РФ.

Технические характеристики:

Память на 10 000 измерительных блоков

Класс защиты *IP* 54

Температура хранения –30 ... +70 °C

Рабочая температура –20 ... +50 °C

Тип зонда *NTC* (температуры)

Диапазон измерений –40 ... +150 °C

Погрешность ±0.2 °C (–25 ... +74.9 °C); ±0.4 °C (–40 ... –25.1 °C); ±0.4 °C (+75 ... +99.9 °C); ±0.5% от измеренного значения (в остальном диапазоне)

Разрешение: 0.1 °C

Тип зонда CO_2

Диапазон измерений 0 ... +10000 *ppm* CO_2

Разрешение 1 *ppm* CO_2

Тип зонда Дифференциальное давление

Диапазон измерений 0 ... +25 гПа

Погрешность ±0.02 гПа (0 ... +2 гПа)

1% от измеренного значения (в остальном диапазоне)

Разрешение 0.01 гПа

Тип зонда Датчик влажности, емкостной

Диапазон измерений 0 ... +100 % относительной влажности.

Разрешение 0.1 % относительной влажности.

Тип зонда Крыльчатка

Диапазон измерений 0 ... +60 м/с

Разрешение 0.01 м/с (60 лопаток); 0.1 м/с (16 лопаток)

Рис. 2. Регистратор данных температуры Testo 175-T3 [3]

Модель внесена в Государственный Реестр средств измерений РФ.

Технические характеристики:

- Память: 16000 измерительных блоков
- Температура хранения: –40...+85ºС
- Рабочая температура: –35...+70ºС
- Элемент питания: *LI*(1*AA*)
- Диапазон измерений: –50...+1000ºС
- Разрешение: 0.1 °С

Погрешность внутренняя и внешняя: 0.5°С (–20 ...+70 °С), 1°С (–35 ... –20.1 °С)

- температура внутреннего воздуха по мокрому термометру $t_м$, ^{0}С (психрометром Ассмана);

Рис. 3. Психрометр Ассмана

- радиационная температура t_R, ^{0}C (многофункциональным прибором *Testo* 435-4 с зонтом с плоским контактным элементом для измерения температуры поверхности с подпружиненной термопарой);

Рис. 4. Прибор Testo 435-4 с зонтом с плоским контактным элементом для измерения температуры поверхности с подпружиненной термопарой [3]

- подвижность воздуха в помещении $v_в$, м/с (многофункциональным прибором *Testo* 435-4 с зонтом крыльчатым анемометром).

Рис. 5. Многофункциональный прибор Testo 435-4 с зонтом крыльчатым анемометром [3]

По значениям $t_в$ и $t_м$ с помощью психрометрической таблицы или *I-d*-диаграммы определяется относительная влажность воздуха в помещении $\varphi_в$, %.

Обработка результатов, оформление отчета. Всего выполняется от 2 до 4 замеров и вычисляются средние значения. Результаты записываются в таблицу 1. Остальные параметры состояния влажного воздуха определяются по средним $t_в$ и $\varphi_в$ с помощью расчетных формул и *I-d*-диаграммы и также заносятся в таблицу, после чего производится сопоставление полученных данных.

Таблица 1. ПАРАМЕТРЫ ВНУТРЕННЕГО МИКРОКЛИМАТА

Параметры	Номера замеров				
	1	2	3	4	Среднее
$t_в$, °С					
$t_м$, °С					
$\varphi_в$, %					
$v_в$, м/с					
t_R, °С					
	Вычислено		Определено по *I-d*-диаграмме		
$P_{нас}$, Па					
$P_{вп}$, Па					
$d_в$, г/кг					
$I_в$, кДж/кг					
$t_р$, °С					
$t_м$, °С					

Формулы для аналитического расчета остальных характеристик воздуха [1]:

Парциальное давление водяного пара при полном насыщении, Па:

$$P_{НАС} = A \cdot e^{\left(-\frac{C}{t+273{,}15}\right)}$$

(где A=1,8424×10^{11} при t>0, A=2,498×10^{11} при t<0;

c = 5331 при t>0, c = 5419 при t<0)

Парциальное давление водяного пара, Па:

$$P_{ВП} = P_{НАС}\frac{\varphi_B}{100};$$

Влагосодержание, г/кг: $d = 630\,\frac{P_{ВП}}{B}$ (где В – барометрическое давление, Па)

Энтальпия, кДж/кг: $I = 1{,}005 \cdot t + 2{,}49 \cdot d$

Температура точки росы, °С: $t_P = \frac{c}{D - \ln P_{ВП}} - 273{,}15$ (где D = 25,94 при t>0, D = 26,24 при t<0)

Температура мокрого термометра, °С: $t_M = 4{,}47\sqrt{I} - 13{,}83$ (при I > 0)

$$t_M = 0{,}82 \cdot I - 5{,}54 \text{ (при } I < 0)$$

Плотность, кг/м^3: $\rho = \frac{353}{t + 273}$; Удельный вес: $\gamma = \rho \cdot g$, Н/м^3.

Список литературы к лабораторной работе №2

1. Малявина Е.Г., Самарин О.Д. Строительная теплофизика и микроклимат зданий. – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2018. 288 с.

2. Самарин О.Д., Латушкин А.П., Лушин К.И., Титков Д.Г. Средства измерения параметров микроклимата и моделирование процессов в системах обеспечения микроклимата. Методические указания к лабораторным работам для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство», профиль «Теплогазоснабжение, вентиляция, отопление, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений и населенных пунктов». – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2016. 16 с.

3. Многофункциональный измерительный прибор *Testo* 435-4 [Электронный ресурс] URL: https://www.testo.ru/ (Дата обращения 14.02.2016)