

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Экспериментальной Физики Атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

на тему Инерционные характеристики различных

датчиков температуры

Исполнитель Савченко Глафира Александровна

Руководитель к. физ.-мат .н., доцент

Григоров Николай Олегович

«К защите допускаю» Заведующий кафедрой

Зав. кафедрой д.ф.-м.н. профессор

Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«1» 06 2017.

Санкт-Петербург 2017



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Экспериментальной Физики Атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

на тему Инерционные характеристики различных

датчиков температуры

Исполнитель Савченко Глафира Александровна

Руководитель к. физ.-мат .н., доцент

Григоров Николай Олегович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись) Зав. кафедрой д.ф.-м.н. профессор

Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«___»____20__г.

Санкт–Петербург 2017

Содержание

		стр.
	Введение	4
1	Основные параметры датчиков температуры	6
1.1	Методы измерения температуры воздуха	6
1.2	Основные параметры, описывающие тепловую инерцию	
	термометра	6
2	Постановка экспериментов для определения коэффициента	
	конвективного теплообмена термометра с окружающей средой	10
2.1	Калибровка аэродинамической трубы	10
2.2	Определение коэффициента конвективного теплообмена для	
	ртутного термометра с шарообразным резервуаром	12
2.3	Определение коэффициента конвективного теплообмена для	
	ртутного термометра с цилиндрическим резервуаром	24
2.4	Определение коэффициента конвективного теплообмена для	
	биметаллической пластины термографа	34
2.4.1	Калибровка воздуходувки	37
2.4.2	Определение коэффициента инерции и коэффициента	
	конвективного теплообмена	39
3	Определение скорости восприятия температуры среды	
	термометрами различных видов	48
3.1	Эксперименты с шарообразным датчиком ртутного термометра.	48
3.2	Эксперименты с цилиндрическим датчиком ртутного	
	термометра	50
3.3	Эксперименты с биметаллическим датчиком термографа	55
4	Определение коэффициента инерции датчика плоской	
	биметаллической пластины термографа с обдувом одинаковой	
	скоростью ветра при разных углах обдува	63

4.1	Описание лабораторной установки	63
4.2	Описание постановки эксперимента	64
4.3	Применение числа Рейнольдса для определения характера	
	воздушного потока	66
	Заключение	71
	Список используемых источников	72

Введение

Температура (от лат. temperatura — надлежащее смешение, нормальное состояние) [1] –физическая величина, характеризующая термодинамическую систему и количественно выражающая интуитивное понятие о различной степени нагретости тел. Каждый день люди сталкиваются с этим понятием в течение долгого времени. Для метеорологии измерение температуры является основополагающим фактором и точность этих измерений должна быть высока. Для этого необходимо соблюдать правила измерения температуры-это быстрота, аккуратность, и своевременность.

Одним из важнейших критериев работы термометров является инерция датчика. Датчики с малой тепловой инерцией способны измерять температуру, которая быстро изменяется. Легко понять, что чем выше требования к точности измерения температуры, тем выше требования к Малоинерционные способны инерции датчика. датчики измерять кратковременные быстрые флуктуации температуры[11].

При измерении температуры чрезвычайно важным аспектом является тепловая инерция. Это свойство термометра воспринимать температуру окружающей среды с задержкой во времени. Оно характеризуется коэффициентом тепловой инерции термометров, который численно равен времени, в течении которого разность температур уменьшается в е раз.

Коэффициент тепловой инерции термометра зависит от интенсивности конвективного теплообмена между датчиком и средой.

Целью моей работы было определение коэффициента тепловой инерции и коэффициента конвективного теплообмена у различных датчиков, в

4

частности более подробное исследование параметров теплообмена биметаллической пластины термографа. 1Основные параметры датчиков температуры.

1.1.Методы измерения температуры воздуха.

При измерении температуры воздуха обычно определяют ее величину, ход, а также максимальное и минимальное значение.

Основным прибором для измерения температуры воздуха является термометр. Устройство его общеизвестно. Имеется, однако, большое число различных конструкций термометров, отличающихся размерами и некоторыми техническими деталями; они имеют различное назначение и различные названия.

Психрометрические термометры служат для определения температуры и влажности воздуха. Резервуар термометра имеет шарообразную форму. Эти термометры сравнительно большого размера. Их устанавливают в метеорологических будках попарно; один из них смоченный, другой сухой. По показаниям сухого и смоченного термометров определяют температуру и влажность воздуха. Цена нанесенных на шкале делений 0.2 °C.

Термометры аспирационного психрометра имеют меньший диаметр стержня. Резервуар термометра цилиндрический. Цена деления 0.2 °С. Термометры этой конструкции обладают большой чувствительностью.

Срочный термометр предназначен для определения температуры поверхности почвы. Резервуар его цилиндрический. Цена нанесенных на шкале делений 0.5 °C.

Максимальный термометр. Его назначение измерить максимальную температуру, которая наблюдалась с момента выкладывания термометра до момента наблюдения. Цена нанесенных на шкале делений 0.5 °C.

6

Термометр устанавливают в горизонтальном положении. Особенности его устройства следующие. В самом начале капиллярной трубки, около резервуара термометра, сделано сужение, оно достигается тем, что в капилляр входит конец стеклянного штифта, припаянного к внутренней стенке резервуара; в этом случае проход из резервуара в капилляр имеет вид кольца с меньшей площадью сечения, чем полное отверстие капилляра.

Существует также множество способов и приборов для измерения температуры: жидкостные термометры, биметаллические, акустические, радиационные, термометры сопротивления (уравновешенный и неуравновешенный) и другие.

В данной работе использовался ртутный термометр с шарообразным датчиком ТМ4-1 4-1982 ГОСТ 112-78, ртутный термометр с цилиндрическим датчиком ТЛ-4, а так же термограф М-16АН.

1.2 Основные параметры, описывающие тепловую инерцию термометра

Тепловая инерция термометра является одним из важнейших критериев его работы[2]. Обычно она характеризуется коэффициентом инерции, имеющим смысл времени, в течение которого разность температур между датчиком и средой уменьшается в *е* раз. При этом определяющим фактором является теплообмен датчика с окружающей средой, скорость которого определяется как параметрами датчика (его массой, теплоемкостью), так и параметрами окружающей среды - прежде всего, скоростью ветра.

В литературе нет конкретных значений, характеризующих коэффициент конвективного теплообмена α датчиков термометра с окружающим воздухом. Содержащиеся в разных источниках формулы зависимости α(v) весьма различаются друг от друга. Потому в РГГМУ предприняты попытки установить подобную зависимость для некоторых термометров (ртутных

7

термометров ТМ-4 с шарообразным резервуаром и ТЛ-4 с цилиндрическим резервуаром, а также биметаллического датчика термографа М-16АН). В опытах, проведенных с использованием аэродинамической трубы, определялся коэффициент тепловой инерции датчиков. Свойство термометра воспринимать температуру окружающей среды с задержкой во времени, тепловой инерцией термометра[12]. Тепловая называется инерция характеризуется коэффициентом тепловой инерции, который зависит от параметров термометра:

$$\lambda = \frac{m \times C}{\alpha \times S} \tag{1.1}$$

Где

λ - коэффициент тепловой инерции [c];

т - масса датчика [кг];

С - удельная теплоемкость материала [Дж/(кг×К)];

а - коэффициент конвективного обмена между термометрическим телом и средой [Дж/(с×кг×К)];

S- площадь датчика [м²].

Термометр с малым коэффициентом тепловой инерции сможет фиксировать не только погодные изменения, обусловленные суточными колебаниями температуры, но и флуктуации[3]. А для этого термометрическое тело термометра должно обладать малой массой, быть изготовленным из материала с малой удельной теплоемкостью и обладать большей поверхностью.

Таким образом, увеличение площади термометрического тела (через которую происходит теплообмен между датчиком и средой) приведёт к

уменьшению чувствительности термометра, но и повышение точности измерений будет связано с увеличением его инерционных свойств.

И поэтому, необходимо выяснить с какой скоростью может изменяться температура.

2 Постановка экспериментов для определения коэффициента конвективного теплообмена термометра с окружающей средой

2.1 Калибровка аэродинамической трубы.

В экспериментах по определению коэффициента тепловой инерции мы использовали аэродинамическую трубу УПАР-01. Схема этой трубы представлена на рисунке 2.1 (вид сверху).



 входное отверстие для воздуха; 2 – отверстие для помещения термометров и термоанемометра; 3 – вентилятор Рисунок 2.1 – Схема аэродинамической трубы УПАР-01

Она представляет собой воздуходувку с прикрепленным к ней лабораторным трансформатором напряжения. С помощью термоанемометра testo405-V1 эта труба была откалибрована следующим образом: на нее подавалось напряжение(U) от 0 до 100 В с шагом 10 В и в середину трубы был укреплен анемометр, фиксирующий скорость ветрового потока (v) в м/с. Таким образом, мы измерили значение скорости ветра при определенном напряжении. Опыты мы проводили 3 раза для повышенной точности, а затем осредняли полученные значения. Результаты этих значений занесены в таблицу 2.1:

Таблица	2.1 –	Калибровка	аэродинамической	трубы.

U, B	v, м/с
0	0
10	0
20	1.5
30	3.6
40	4.9
50	6.3
60	7.8
70	9.2
80	10.6
90	12.0
100	13.4

2.2Определение коэффициента конвективного теплообмена для ртутного термометра с шарообразным резервуаром

Чувствительным элементом жидкостных стеклянных термометров является стеклянный резервуар шарообразной или цилиндрической формы, к которому припаяна стеклянная капиллярная трубка, радиус трубки должен быть во много раз меньше размера резервуара[4]. Резервуар, капилляр и шкала, находящаяся позади капилляра, помещаются в стеклянную трубку, один конец которой заканчивается резервуаром, а другой запаян (рисунок 2.2).



капиллярная трубка; 2 – шкала; 3 – стеклянная трубка; 4 – резервуар
 Рисунок 2.2 – Устройство жидкостного термометра

Резервуар и часть капилляра заполнены термометрической жидкостью. Чаще всего в термометрах в качестве жидкости используется ртуть или подкрашенный спирт.

При повышении температуры окружающей среды жидкость нагревается и, увеличиваясь в объеме, вытесняется из резервуара и начинает подниматься по капилляру. При понижении температуры объем жидкости уменьшается –

следовательно, она начинает опускаться. Таким образом, высота жидкости в капилляре, о которой мы можем судить по шкале термометра, зависит от температуры окружающей среды.

Шарообразный ртутный термометр ТМ4-1представлен на рисунке 2.3.



Рисунок2.3 – Шарообразный термометр ТМ4-1

Этот термометр имеет шарообразный резервуар со следующими габаритами:

Параметры шара:

Внешний радиус стеклянного резервуара 0,6 см (R_{внеш});

Внутренний радиус ртутного резервуара 0,375 см (R_{внутр});

Найдём площадь поверхности резервуара, через которую происходит теплообмен с окружающей средой:

Площадь шара(S_ш):

$$S_{\rm III} = 4\pi R_{\rm BHeIII}^2 \tag{2.1}$$

$$S_{\rm m} = 4,52 \times 10^{-4} ({\rm M}^2)$$

Тогда коэффициент тепловой инерции исследуемого термометра будет вычисляться по формуле (2.2) с учетом двух материалов, входящих в состав датчика:

$$\lambda = \frac{m \times C}{\alpha \times S} = \frac{m_{\rm pT}C_{\rm pT} + m_{\rm cT}C_{\rm cT}}{\alpha \times S}$$
(2.2)

Где

С_{стекла}=779 Дж/(кг × К), С_{ртути}= 138 Дж/(кг × К).

Масса ртути вычислялась следующим образом:

$$m_{\rm pt} = \frac{4}{3} \pi R_{\rm pt}^3 \times \rho_{\rm pt}$$
(2.3)

Теперь вычислим массу стекла:

$$m_{\rm ct} = \left(V_{\rm bhem} - V_{\rm bhytp}\right) \times \rho_{\rm ct} \tag{2.4}$$

Преобразуем формулу (2.4) в формулу (2.5):

$$m_{ct} = \frac{4}{3} \pi \left(R_{\text{внеш}}^3 \times R_{\text{внутр}}^3 \right) \times \rho_{ct}$$
(2.5)

С учетом

$$R_{pt} = 0,0037 \text{ м},$$

 $\rho_{pt} = 13500 \text{ кг/m}^3,$
 $R_{ct} = 0,006 \text{ м},$
 $\rho_{ct} = 2500 \text{ кг/m}^3,$

получим

 $m_{\rm pt} = 2.981 \times 10^{-3}$ кг, $m_{\rm ct} = 1.709 \times 10^{-3}$ кг.

Коэффициент конвективного теплообмена характеризует скорость и интенсивность теплообмена между термометром и средой за счет конвекции. Прежде чем найти коэффициент конвективного теплообмена α , опытным путем найдём коэффициент тепловой инерции λ . Зная λ , мы сможем вычислить коэффициент конвективного теплообмена α , преобразовав формулу (2.2).

Для выполнения эксперимента по определению коэффициента тепловой инерции λ были использованы: исследуемый жидкостный ртутный термометр с шарообразным резервуаром ТМ4-1 (см. рисунок 2.3), аэродинамическая труба (см. рисунок 2.1), сосуд и вода с возможностью изменять её температуру, секундомер.

Опыты проводились следующим образом: мы измерили комнатную температуру воздуха θ . Ее значение составляло 23°С. Максимальная температура нагрева термометра составляла 40 °С. Из этого значения мы вычитали комнатную температуру воздуха, и полученное значение делили на 2. Затем к этому значению мы прибавляли комнатную температуру. Таким образом, мы определяли значение, до которого должна опуститься температура с отметки 40 °С. Это значение составило 31.5°С.

$$40 - 23 = 17 \,^{\circ}\text{C}$$
 (2.6)

$$\frac{17}{2} = 8.5 \,^{\circ}\text{C}$$
 (2.7)

$$8.5 + 23 = 31.5 \,^{\circ}\text{C} \tag{2.8}$$

Опуская термометр в горячую воду, мы нагревали его до максимальной температуры 40 °C. Затем закрепляли его в отверстии аэродинамической трубы и засекали время на секундомере, останавливая его на конечной температуре 31.5° C. Полученное время- это время, за которое температура упадет в 2 раза (τ^*). Скорость потока в аэродинамической трубе регулировалась изменением напряжения, подаваемого на мотор вентилятора, и определялась по калибровочной таблице (см. таблицу 2.1).Напряжение на трубе подавалось с шагом 10 В, от 0 до 100 В. Значения скоростей ветра при этих напряжениях указаны в таблице 2.1. С целью повышения точности измерений опыт проводился 3 раза, затем проводилось осреднение результатов. Результаты занесены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – зависимость времени падения температуры в 2 раза (τ*) от скорости ветра (v)

v, м/с	τ*, сек
0	140.0
1.5	44.4
3.6	33.1
4.9	27.9
6.3	24.6
7.8	22.6
9.2	20.5
10.6	19.8
12.0	18.6
13.4	18.0

После полученных значений мы рассчитывали коэффициент тепловой инерции, разделив каждое полученное значение времени падения

температуры в два раза τ* на натуральный логарифм двух. Полученные значения занесены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Значения коэффициента инерции λ при различных скоростях ветра.

v, м/с	λ, c
0	202.0
1.5	64.2
3.6	47.8
4.9	40.3
6.3	35.6
7.8	32.7
9.2	29.7
10.6	28.6
12.0	26.9
13.4	26.1

По полученным значениям таблицы 2.3 построим график зависимости коэффициента тепловой инерции λ от скорости движения воздуха v (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента инерции λ от скорости ветра v

Из графика видно, что при увеличении скорости движения воздуха, коэффициент тепловой инерции уменьшается.

Вычислим коэффициент конвективного теплообмена α, выразив его из формулы (2.2), который, в свою очередь, зависит от свойств среды:

$$\alpha = \frac{m_{\rm pT}C_{\rm pT} + m_{\rm cT}C_{\rm cT}}{\lambda \times S} \tag{2.9}$$

Подставляя значения коэффициента инерции из таблицы 2.3, мы рассчитали коэффициент теплообмена α. Эти значения занесены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – значения коэффициента теплообмена при различных скоростях ветра

v, м/с	α, Дж/ с·кг·К
0	19.0
1.5	59.8
3.6	80.4
4.9	95.2
6.3	107.8
7.8	117.3
9.2	129.3
10.6	134.2
12.0	142.4
13.4	147.1

По полученным значениям таблицы 2.4 построим график зависимости коэффициента конвективного теплообмена α от скорости движения воздуха v (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента конвективного теплообмена α от скорости движения воздуха v

Из графика видно, что при увеличении скорости ветра, коэффициент конвективного теплообмена также увеличивается.

Теперь рассчитаем теоретические значения коэффициента конвективного теплообмена α_{теор} по формуле 2.10

$$\alpha = a + b \cdot (V \cdot \rho)^d \tag{2.10}$$

где

а, b – размерные константы;

- v скорость движения воздуха, м/с;
- ρ плотность среды ($\rho_{\text{возд}} = 1,3 \text{ кг/м}^3$).

Преобразуя формулу для случая, когда изменяется только скорость движения воздуха, перепишем её, объединив константы b и ρ^{d} . Тогда формула (2.10) с учётом упрощения примет следующий вид:

$$\alpha_{\text{reop}} = a + b \cdot V^d \tag{2.11}$$

Легко найти значение а в формуле (2.11). Оно соответствует значению α при скорости ветра равной нулю. Из таблицы 2.4, находим а = 19.0. Взяв степень d = 0.5 и применяя формулу (2.11) для одного из значений α (см. табл. 2.4), определим коэффициент b. Он оказался равным 32.4. Затем, зная величины а и b, построим расчетную таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – значения рассчитанного коэффициента теплообмена α_{теор} при различных скоростях ветра, полученных расчетным путем.

v, м/с	α _{теор} , Дж/ с·кг·К
0	19.0
1.5	58.6
3.6	80.4
4.9	90.6
6.3	100.2
7.8	109.4
9.2	117.2
10.6	124.4
12.0	131.1
13.4	137.5

По полученным значениям построим расчетную кривую зависимости α(v) (рисунок 2.6) сопоставив значения, полученные опытным путем и рассчитанные значения.



Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента конвективного теплообмена α и α_{теор} от скорости движения воздуха v

Красная кривая – это значения, полученные в ходе эксперимента. А синяя кривая – расчетные данные, полученные с учетом констант а и b. Так как эти кривые сильно отличаются друг от друга, можно сделать вывод, что кривая расчетных значений не подходит для описания кривой, полученной в ходе эксперимента. Нужно заменить степень d, чтобы было возможным описание опытных значений. Поскольку экспериментальная кривая гораздо менее крутая, то надо увеличивать степень.

Посмотрим вид кривой, если изменить степень в формуле (2.11):

$$\alpha_{\text{reop}} = a + b \cdot V^{0.6} \tag{2.12}$$

Тогда, повторив все наши действия, получим следующие значения: коэффициент a = 19.0, коэффициент b = 28.5, степень d = 0.6. занесем в таблицу 2.6 значения скорости ветра (v) и расчетного коэффициента теплообмена $\alpha_{\text{теор}}$.

Таблица 2.6 - значения коэффициента теплообмена α_{теор} при различных скоростях ветра, полученных расчетным путем.

v, м/с	а _{теор} , Дж/ с·кг·К
0	19.01
1.5	55.32
3.6	80.41
4.9	92.89
6.3	104.91
7.8	116.65
9.2	126.82
10.6	136.38
12	145.45
13.4	154.11

Построим по этим значениям график зависимости α(V) и сопоставим его с кривой, полученной в ходе эксперимента (рисунок 2.7).





Кривая синего цвета (расчетные данные) может максимально точно описать значения, полученные в ходе эксперимента, так как отклонения значений кривых минимально.

В результате была выведена эмпирическая формула определения коэффициента конвективного теплообмена между термометрическим телом (шарообразный резервуар ртутного термометра TM 4 – 1) и средой:

$$\alpha = 19.0 + 28.5 \cdot V^{0.6} \tag{2.13}$$

Ранее в РГГМУ проводились эксперименты по определению коэффициента конвективного теплообмена, но в качестве термометрического тела был взят термометр с почти шарообразным резервуаром (на конце датчика была небольшая выпуклость). Его изображение показано на рисунке (2.7).



Рисунок 2.7 – термометр ТМ – 4

Для этого термометра были рассчитаны коэффициенты a, b и d:

$$\alpha = 44,03 + 45,29 \cdot V^{0.7} \tag{2.14}$$

2.3Определение коэффициента конвективного теплообмена для ртутного термометра с цилиндрическим резервуаром.

Цилиндрический ртутный термометр ТМ4-1 представлен на рисунке (2.8).



Рисунок 2.8 – цилиндрический термометр ТЛ – 4.

Этот термометр имеет цилиндрический резервуар со следующими габаритами:

Параметры цилиндра:

Внешний радиус стеклянного резервуара 0.305 см (r_{ст});

Внутренний радиус ртутного резервуара 0,195см (r_{рт}).

Найдём площадь поверхности резервуара, через которую происходит теплообмен с окружающей средой:

Представим, что площадь цилиндра состоит из двух частей: цилиндра и полусферы на конце датчика. Рассчитаем эти значения отдельно, а затем вычислим общую площадь цилиндра, сложив эти значения.

$$S_{\rm u} = \pi \times D \times l_{\rm uun} \tag{2.15}$$

$$S_{\text{полусф}} = 2\pi \times (\frac{D}{2})^2 \tag{2.16}$$

Где

D – диаметр цилиндра,

l_{цил}–длина цилиндра.

Подставив значения D = 6.1 мм, l_{uun} =15 мм, найдем площади:

$$S_{II} = 2.87 \times 10^{-4} \text{ m}^2,$$

 $S_{\text{полусф}} = 0.19 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Сложив эти значения, найдем общую площадь датчика:

 $S_{oбщ} = 3.06 \times 10^{-4} \text{ м}^2$

Коэффициент тепловой инерции исследуемого термометра будет вычисляться также по формуле (2.2)с учетом двух материалов, входящих в состав датчика (стекла и ртути):

Масса ртути вычислялась следующим образом: сначала мы вычислили объем ртути в цилиндре и в полусфере, а затем сложили его. После этого умножили общий объем на плотность ртути.

$$V_{\mu\mu\pi} = S \times l = \pi \times \frac{D^2}{4} \times l \tag{2.17}$$

$$V_{\rm цил} = \frac{2}{3} \pi \times r_{\rm pr}^3$$
(2.18)

Радиус ртути $r_{\rm pr} = 1.95$ мм. Получим значения объемов цилиндра и полусферы:

$$V_{II} = 1.94 \times 10^{-7} \text{ м}^3,$$

 $V_{полусф} = 0.156 \times 10^{-7} \text{ м}^3$

Внутренний объем резервуара равен:

 $V_{pT} = 2.096 \times 10^{-7} M^3$

Рассчитаем массу ртути:

$$m_{pT} = V_{pT} \times \rho_{pT} \tag{2.19}$$

С учетом того, что плотность ртути $\rho_{pr} = 13500$ кг/м³, легко найти массу. $m_{pr} = 2.83 \times 10^{-3}$ кг

По такому же принципу вычислялась масса стекла, по формулам (2.17) и (2.18)рассчитывали объемы цилиндра и полусферы, но подставляли значение диаметра стекла вместо диаметра ртути $D_{cr} = 6.1$ мм. Затем вычисляли разность внешнего и внутреннего объема. Таким образом, объем стекла в резервуаре равен:

 $V_{ct} = 2.878 \times 10^{-7} M^3$

Подставив значение плотности для стекла $\rho_{ct} = 2500 \text{ кг/м}^3$ (в формуле 2.19) рассчитали массу стекла:

 $m_{ct} = 0.72 \times 10^{-3} \kappa \Gamma$

Подставляя новые значения в формулу (2.2) мы определили коэффициент тепловой инерции для цилиндрического датчика.

Для выполнения эксперимента по определению коэффициента тепловой инерции λ были использованы: исследуемый жидкостный ртутный термометр с цилиндрическим резервуаром ТЛ - 4 (рисунок 2.8), аэродинамическая труба (рис. 2.1), сосуд и вода с возможностью изменять её температуру, секундомер.

Опыты проводились так же, как и с шарообразным термометром: мы измерили комнатную температуру воздуха θ . Ее значение составляло 27.6°С. Максимальная температура нагрева термометра составляла 50 °С. Из этого значения мы вычитали комнатную температуру воздуха, и полученное значение делили на 2. Затем к этому значению мы прибавляли комнатную

температуру. Таким образом, мы определяли значение, до которого должна опуститься температура с отметки 50 °C. Это значение составило 38.8°C.

$$50 - 27.6 = 22.4 \,^{\circ}\text{C}$$
 (2.20)

$$\frac{22.4}{2} = 11.2 \,^{\circ}\text{C} \tag{2.21}$$

 $11.2 + 27.6 = 38.8 \,^{\circ}\text{C}$ (2.22)

Опуская термометр в горячую воду, мы нагревали его до максимальной температуры 50 °C. Затем закрепляли его в отверстии аэродинамической трубы и засекали время на секундомере, останавливая его на конечной температуре 38.8°C. Полученное время — это время, за которое температура упадет в 2 раза (τ^*). Скорость потока в аэродинамической трубе регулировалась изменением напряжения, подаваемого на мотор вентилятора, и определялась по калибровочной таблице (таблица 2.1).Напряжение на трубе подавалось с шагом 10 В, от 0 до 100 В. Значения скоростей ветра при этих напряжениях указаны в таблице 2.1. С целью повышения точности измерений опыт проводился 3 раза, затем проводилось осреднение результатов. Результаты занесены в таблицу 2.7.

Таблица 2.7 – Зависимость времени падения температуры в 2 раза (т*) от скорости ветра (v).

v, m/c	τ*, c
0	88
1.5	29
3.6	21
4.9	18
6.3	16
7.8	14

9.2	12
10.6	11
12	10
13.4	9.45

После полученных значений мы рассчитывали коэффициент тепловой инерции, разделив каждое полученное значение времени падения температуры в два раза т* на натуральный логарифм двух. Полученные значения занесены в таблицу 2.8.

Таблица 2.8 – Значения коэффициента инерции λ при различных скоростях ветрау.

V, м/с	λ, c
0	126.96
1.5	41.84
3.6	30.30
4.9	25.97
6.3	23.08
7.8	20.20
9.2	17.31
10.6	15.87
12	14.43
13.4	13.63

По полученным значениям таблицы 2.8 построим график зависимости коэффициента тепловой инерции λ от скорости движения воздуха v (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента инерции λ от скорости ветра v

Из графика видно, что при увеличении скорости движения воздуха, коэффициент тепловой инерции уменьшается.

По формуле (2.9) найдем коэффициент конвективного теплообмена, подставив туда массу ртути и стекла для цилиндрического термометра, а также значения коэффициента инерции из таблицы (2.8). Полученные значения занесены в таблицу (2.9).

Таблица 2.9 – значения коэффициента теплообмена α при различных скоростях ветрау.

V, м/с	α,Дж/ с•кг•К
0	24.49
1.5	74.32
3.6	102.63
4.9	119.73
6.3	134.70
7.8	153.94
9.2	179.60
10.6	195.92
12	215.51
13.4	228.06

По полученным значениям таблицы (2.9) построим график зависимости коэффициента конвективного теплообмена α от скорости движения воздуха v (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициента конвективного теплообмена α от скорости движения воздуха v

Из графика видно, что при увеличении скорости ветра, коэффициент конвективного теплообмена также увеличивается.

Теперь рассчитаем теоретические значения коэффициента конвективного теплообмена α_{теор} по формуле (2.11)

Значение а в формуле (2.11) соответствует значению α при скорости ветра равной нулю. Из таблицы 2.9 находим а = 24.49. Взяв степень d = 0.5 и применяя формулу (2.11) для одного из значений α (см. табл. 2.9), определим коэффициент b. Он оказался равным 41.18.Скорость ветра также взяли из таблицы 2.9. Она была равна v = 3.6 м/с. Затем, зная величины а и b, построим расчетную таблицу 2.10.

30

Таблица 2.10 – значения коэффициента теплообмена α_{теор} при различных скоростях ветра, полученных расчетным путем.

V	α _{теор} , Дж/ с·кг·К
0	24.49
1.5	74.93
3.6	102.63
4.9	115.65
6.3	127.86
7.8	139.51
9.2	149.41
10.6	158.57
12	167.15
13.4	175.25

По полученным значениям построим расчетную кривую зависимости α(v) (рисунок 2.11) сопоставив значения, полученные опытным путем и рассчитанные значения.



Рисунок 2.11 - Зависимость коэффициента конвективного теплообмена α и α_{reop} от скорости движения воздуха v Кривая красного цвета – это значения, полученные непосредственно в опыте. Кривая синего цвета – это кривая, построенная с учётом полученных констант а и b. Как видно из графика, эти кривые сильно отличаются друг от друга, следовательно, кривой теоретических значений нельзя описывать экспериментальные. Нужно изменить степень d, чтобы было возможно описать экспериментальные значения. Поскольку экспериментальная кривая менее крутая, то надо увеличивать степень.

Посмотрим вид кривой, если изменить степень в формуле (2.11):

$$\alpha_{\text{reop}} = a + b \cdot V^{0.7} \tag{2.23}$$

Тогда, повторив все наши действия, получим следующие значения: коэффициент a = 24.49, коэффициент b = 30.67, степень d = 0.7, скорость ветра v = 3.6. Занесем в таблицу 2.11 значения скорости ветра и $\alpha_{\text{теор}}$.

Таблица 2.11 - значения коэффициента теплообмена при различных скоростях ветра, полученных расчетным путем.

V	α _{теор} , Дж/ с·кг·К
0	19.01
1.5	55.32
3.6	80.41
4.9	92.89
6.3	104.91
7.8	116.65
9.2	126.82
10.6	136.38
12	145.45
13.4	154.11

Построим по этим значениям график зависимости α(V) и сопоставим его с кривой, полученной в ходе эксперимента (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 - Зависимость коэффициента конвективного теплообмена α и α_{теор} от скорости движения воздуха v

Кривая расчетных данных может максимально точно описать значения, полученные в ходе эксперимента, так как отклонения кривых друг от друга минимально.

В результате опытов была выведена эмпирическая формула определения коэффициента конвективного теплообмена между термометрическим телом (цилиндрический резервуар ртутного термометра ТЛ – 4) и средой:

$$\alpha = 24.49 + 30.67 \cdot V^{0.7} \tag{2.24}$$

2.4Определение коэффициента конвективного теплообмена для биметаллической пластины термографа.

Термограф-прибор непрерывной регистрации ДЛЯ температуры др.[5]. Чувствительным элементом термографа может воздуха, воды и служить биметаллическая пластинка, термометр жидкостной или термометр В метеорологии наиболее сопротивления. распространён термограф, чувствительным элементом которого является изогнутая биметаллическая пластинка, деформирующаяся при изменении температуры. Перемещение её конца передаётся стрелке, которая чертит кривую на разграфленной ленте. 1 мм записи по вертикали соответствует около 1 °C. По времени полного оборота барабана термографы подразделяются на суточные и недельные. Работа термографа контролируется по ртутному термометру. Биметаллический термограф представлен на рисунке 2.13



1 – биметаллическая пластина, 2 – передаточные рычаги, 3 – стрелка, 4 – барабан.

Рисунок 2.13 – Биметаллический термограф

В наших опытах был использован термограф М – 16АН. Поговорим более подробно о пластине, которая находится в приборе.

Чувствительным элементом такого термографа является двойная (отсюда и пошло другое название «биметаллическая») пластина, которая состоит из двух разнородных металлических полосок, обладающих различным коэффициентом расширения[4]. Полоски спаиваются между собой. Если температура изменяется, то пластина изгибается вследствие различного расширения двух составляющих её полосок. На рисунке 2.14 отражена деформация пластины.



1 – пластина состоит из двух металлов (справа расположен металл, обладающий меньшим коэффициентом расширения), 2 – при увеличении температуры металл с меньшим коэффициентом расширения окажется с вогнутой стороны пластины, 3 – при понижении температуры пластина изгибается в противоположную сторону.

Рис.2.14 – Деформация биметаллической пластины

Обычно пластину изготавливают из инвара и стали, так как у этих сплавов различные коэффициенты теплового расширения.

Чтобы определить коэффициент тепловой инерции (см. формулу2.2) и коэффициент конвективного теплообмена (см. формулу 2.9) необходимо было измерить параметры датчика:

Ширина пластины $D_{nn} = 3.1 \times 10^{-2}$ м; Длина дуги пластины $L_{nn} = 1.98 \times 10^{-2}$ м; Толщина пластины $b_{nn} = 7 \times 10^{-4}$ м.
Исходя из этих параметров, легко вычислить площадь поверхности S, через которую происходит теплообмен с окружающей средой:

$$S_{nn} = 2D_{nn} \times L_{nn} \tag{2.25}$$

Площадь датчика $S = 12.28 \times 10^{-4} \text{ м}^2$.

Масса пластины вычислялась по формуле:

$$m_{n\pi} = \rho \times \frac{V_{n\pi}}{2} \tag{2.26}$$

Где

V_{пл} – объем датчика, м³

ρ – плотность материала (сталь или инвар), кг/м³

Объем вычислялся по формуле:

$$V_{n\pi} = L_{n\pi} \times D_{n\pi} \times b_{n\pi}$$
(2.27)

С учетом значения плотности инвара $\rho_{\text{инвара}} = 8130 \text{ кг/м}^3$ и плотности стали $\rho_{\text{стали}} = 7800 \text{ кг/м}^3$, вычислялась масса материалов:

 $m_{\text{стали}} = 1.67 \times 10^{-3}$ кг,

 $m_{\text{инвара}} = 1.74 \times 10^{-3}$ кг.

Удельная теплоемкость материалов:

 $C_{\text{стали}} = 460 \ \text{Дж/(кг*K)},$ $C_{\text{инвара}} = 472 \ \text{Дж/(кг*K)}.$

С учетом этих значений вычислялся коэффициент тепловой инерции. Но формула, по которой он рассчитывался, отличается от предыдущей (формулы2.2), но об этом поговорим позже.

2.4.1 Калибровка воздуходувки

Для проведения опытов с термографом была сконструирована специальная установка, которая предусматривала крепление термографа на горизонтальной поверхности. Рядом ставилась воздуходувка. Схема установки представлена на рисунке 2.15 (вид сверху):



1 – термограф; 2 – воздуходувка; 3 – контрольный термометр

Рисунок 2.15 – лабораторная установка для проведения опытов с термографом

Но, прежде чем ставить эксперименты, нужно было откалибровать воздуходувку. Проделывался опыт по измерению скорости ветра. Меняя напряжение на воздуходувке с помощью лабораторного автотрансформатора, регулировалось напряжение, подаваемое на прибор. Скорость ветра (v) измерялась с помощью термо-анемометра testo 405 – V1. Анемометр был закреплен на расстоянии 4 см от среза воздуходувки. У нее есть 2 режима, второй более мощный, по сравнению с первым. При подаче напряжения на воздуходувку, специально увеличивалось напряжение (U) на 10 – 20 В выше желаемой величины, а затем уменьшалось до желаемого значения. Это

37

делалось для получения более точных результатов. Таблица значений, получившихся в ходе эксперимента, представлена ниже.

Первый режим		Второй режим	
U, B	v, м/с	U, B	v, м/с
50	0.96	50	2.80
60	1.51	60	3.45
70	1.95	70	4.10
80	2.31	80	4.60
90	2.63	90	4.95
100	2.87	100	5.25
110	3.18	110	5.59
120	3.56	120	5.94
130	3.88	130	6.30
140	4.19	140	6.64
150	4.45	150	6.94
160	4.71	160	7.28
170	4.93	170	7.54
180	5.15	180	7.82
190	5.29	190	8.05
200	5.52	200	8.39
210	5.70	210	8.61
220	5.85	220	8.90

Таблица 2.12 – калибровка воздуходувки

38

2.4.2Определение коэффициента инерции и коэффициента конвективного теплообмена

Для выполнения эксперимента по определению коэффициента тепловой инерции λ были использованы: исследуемый термограф М – 16АН (рисунок 2.13), воздуходувка (рисунок2.15), высокотемпературный фен, с помощью которого нагревалась биметаллическая пластина, секундомер.

Опыты проводились также как и с термометрами: мы измерили комнатную температуру воздуха ($\theta_{термометр}$) контрольным термометром (см. рисунок 2.15). Ее значение составляло 24.8 °C. Максимальная температура нагрева термографа T_{max} составляла 50 °C по ленте термографа (комнатной температуре $\theta_{термограф}$ соответствовало значение 12.5 °C на ленте термографа). Из максимального значения T_{max} мы вычитали комнатную температуру воздуха ($\theta_{термограф}$), и полученное значение делили на 2. Затем к этому значению мы прибавляли комнатную температуру. Таким образом, мы определяли значение, до которого должна опуститься температура с отметки 50 °C. Это значение составило 31.25°C на ленте термографа.

$$50 - 12.5 = 37.5 \circ C$$
 (2.28)

$$\frac{37.5}{2} = 18.75 \,^{\circ}\text{C} \tag{2.29}$$

$$18.75 + 12.5 = 31.25 \circ C$$
 (2.30)

Нагрев биметаллическую пластину до максимальной температуры 50 °C, засекали время на секундомере, останавливая его на конечной температуре 31.25 °C. Полученное время - это время, за которое температура упадет в 2 раза (τ*). Скорость потока в воздуходувке регулировалась изменением

напряжения, подаваемого на мотор вентилятора, и определялась по калибровочной таблице (таблица 2.11).Напряжение на трубе подавалось с шагом 10 В, от 0 до 100 В. Значения скоростей ветра при этих напряжениях указаны в таблице 2.11. С целью повышения точности измерений, опыт проводился 3 раза, затем проводилось осреднение результатов. Объединив два режима в зависимости от скорости ветра, получим результаты эксперимента указанных в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – зависимость времени падения температуры в 2 раза(т*) от скорости ветраv

v, м/с	τ*, c
0.0	62.3
0.95	18.3
1.52	14.7
1.95	12.3
2.8	10.0
3.18	10.0
4.19	8.3
4.95	7.3
5.15	7.0
5.94	6.7
6.95	6.0
8.05	5.3
8.9	5.3

После полученных значений мы рассчитывали коэффициент тепловой инерции. Но значения времени падения температуры в 2 раза (τ^*) мы делили на натуральный логарифм двух в степени . Об этой степени более подробно говорится в пункте 3.3. Таким образом, коэффициент тепловой инерции вычислялся по формуле (2.31):

$$\lambda = \frac{\tau^*}{(\ln 2)^{\frac{1}{\beta}}} \tag{2.31}$$

Степень β равнялась 0.6. Результаты расчетов коэффициента тепловой инерции (λ) занесены в таблицу 2.14.

Таблица 2.14 – Значения коэффициента инерции λ при различных скоростях ветра v.

v, м/с	λ, c
0.0	114.78
0.95	33.71
1.52	27.08
1.95	22.66
2.8	18.42
3.18	18.42
4.19	15.29
4.95	13.45
5.15	12.90
5.94	12.34
6.95	11.05
8.05	9.76
8.9	9.76

По полученным значениям таблицы 2.14 построим график зависимости коэффициента тепловой инерции λ от скорости движения воздуха v (рисунок 2.16).



Рис. 2.16 – Зависимость коэффициента инерции λ от скорости ветра v

Из графика видно, что при увеличении скорости движения воздуха, коэффициент тепловой инерции уменьшается.

По формуле (2.9) найдем коэффициент конвективного теплообмена, подставив туда массу стали и инвара для термографа, а также значения коэффициента инерции из таблицы 2.14. Полученные значения занесены в таблицу 2.15.

Таблица 2.15 – значения коэффициента теплообмена α при различных скоростях ветра v.

v, м/с	α,Дж/ с·кг·К
0.0	11.28
0.95	38.39
1.52	47.79
1.95	57.12
2.8	70.26
3.18	70.26
4.19	84.65
4.95	96.24
5.15	100.37

5.94	104.86
6.95	117.10
8.05	132.56
8.9	132.56

По полученным значениям таблицы 2.15 построим график зависимости коэффициента конвективного теплообмена α от скорости движения воздуха v (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 – Зависимость коэффициента конвективного теплообмена α от скорости движения воздуха v

Из графика видно, что при увеличении скорости ветра, коэффициент конвективного теплообмена также увеличивается. Неровности графика можно объяснить большей погрешностью термографа, по сравнению с термометрами.

Теперь рассчитаем теоретические значения коэффициента конвективного теплообмена α_{теор} по формуле (2.11)

Значение а в формуле (2.11) соответствует значению α при скорости ветра равной нулю. Из таблицы 2.14 находим a = 11.28. Взяв степень d = 0.5 и применяя формулу (2.11) для одного из значений α (см. табл. 2.15), определим коэффициент b. Он оказался равным 33.07.Скорость ветра также взяли из таблицы 2.15. Она была равна v = 3.18 м/с. Затем, зная величины а и b, построим расчетную таблицу 2.16.

Таблица 2.16 – значения коэффициента теплообмена α_{теор} при различных скоростях ветра, полученных расчетным путем.

v, м/с	а _{теор} ,Дж/ с·кг·К
0.0	11.28
0.95	43.52
1.52	52.06
1.95	57.47
2.8	66.62
3.18	70.26
4.19	78.98
4.95	84.87
5.15	86.34
5.94	91.89
6.95	98.47
8.05	105.12
8.9	109.95

По полученным значениям построим расчетную кривую зависимости α(v) (рисунок 2.18) сопоставив значения, полученные опытным путем и рассчитанные значения.



Рис. 2.18 – Зависимость коэффициента конвективного теплообмена α и α_{теор} от скорости движения воздуха v

Кривая красного цвета – это значения, полученные в ходе опыта. Кривая синего цвета – с учётом полученных констант а и b. Как видно из графика, эти кривые сильно отличаются друг от друга. Следовательно, кривой теоретических значений нельзя описывать экспериментальные данные. Как и в предыдущих опытах, нужно заменить степень d, чтобы было возможно описать экспериментальные значения. Поскольку экспериментальная кривая гораздо менее крутая, то также надо увеличивать степень.

Посмотрим вид кривой, если изменить степень в формуле (2.11):

$$\alpha_{\text{reop}} = a + b \cdot V^{0.8} \tag{2.32}$$

Тогда, повторив все наши действия, получим следующие значения: коэффициент a = 11.28, коэффициент b = 23.38, степень d = 0.8, скорость ветра v = 3.18. Занесем в таблицу 2.16 значения скорости ветра и $\alpha_{\text{теор}}$. Таблица 2.17 – значения коэффициента теплообмена при различных скоростях ветра, полученных расчетным путем.

v, м/с	α _{теор} , Дж/ с·кг·К
0.0	11.28
0.95	33.72
1.52	43.96
1.95	51.16
2.8	64.55
3.18	70.26
4.19	84.82
4.95	95.31
5.15	98.02
5.94	108.51
6.95	121.52
8.05	135.27
8.9	145.64

Построим по этим значениям график зависимости α(V) и сопоставим его с кривой, полученной в ходе эксперимента (рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 - Зависимость коэффициента конвективного теплообмена а и $\alpha_{\text{теор}}$ от скорости движения воздуха v

Кривая расчетных данных лучше описывает значения, полученные в ходе эксперимента, так как отклонения значений кривых меньше, чем на рисунке (2.18).

В результате опытов была выведена эмпирическая формула определения коэффициента конвективного теплообмена между термометрическим телом (биметаллическая пластина термографа М – 16АН) и средой:

$$\alpha = 11.28 + 23.38 \cdot V^{0.8} \tag{2.33}$$

ЗОпределение скорости восприятия температуры среды термометрами различных видов

3.1Эксперименты с шарообразным датчиком ртутного термометра

Для выполнения первого эксперимента были использованы: исследуемый жидкостный ртутный термометр с шарообразным резервуаром ТМ4 – 1 (рисунок 2.3), аэродинамическая труба (рисунок 2.1), позволяющая зафиксировать термометр (скорость ветра при всех опытах была равна нулю), сосуд и вода с возможностью изменять её температуру, секундомер.

Так же как и в предыдущих опытах, термометр нагревался с помощью горячей воды и опускался в отверстие аэродинамической трубы, после чего снимались измерения.

Наша цель- проверить предположение, что температура окружающего воздуха понижается согласно формуле:

$$T = \theta + (T_0 - \theta)e^{-(\frac{\tau}{\lambda})}$$
(3.1)

Где

θ – температура окружающей среды,

Т₀ – начальная температура,

τ – время, в течение которого температура опускается до температуры
 окружающей среды,

λ – коэффициент тепловой инерции термометра.

В наших измерениях $\theta = 22,4$ °C, $T_0 = 40$ °C, τ изменяется от 0 до какого-то предельного значения (определяемого скоростью уменьшения температуры термометра)с шагом в 10 секунд, λ вычисляется графически.

Разность $T_0 - \theta = 40 - 22,4 = 17,6^{\circ}C$

Разделим это значение на е:

$$\frac{17,6}{2,718} = 6,47\tag{3.3}$$

Чтобы найти коэффициент тепловой инерции термометра (λ) нужно измерить время, прошедшее с начала опыта до момента достижения термометром температуры, превышающую комнатную на 6,47:

$$6,47 + 22,4 = 28,87 \tag{3.4}$$

На рисунке (3.1) указан ход зависимости температуры термометра от времени. Если из точки на кривой, соответствующей температуре 28,87 опустить перпендикуляр на ось времени (т), мы увидим, что разность

температур термометра и среды уменьшается в *е* раз примерно через 200 секунд. Это значение является коэффициентом тепловой инерции термометра. Далее (по формуле 3.1) рассчитывалась зависимость Т от τ . Обе кривые (экспериментальная и расчетная) представлены на графике 3.1. Варьируя значение коэффициента тепловой инерции λ (в формуле 3.1) мы добиваемся максимального совпадения двух кривых. Это соответствует значению $\lambda = 202$ с.



Рисунок3.1 – График зависимости падения температуры от времени

На данном графике видно, что эмпирическая кривая в конце лежит выше теоретической. Это можно объяснить незначительным повышением температуры среды. Также из графика следует, что формула 3.1 справедлива для шарообразного датчика.

3.2Эксперименты с цилиндрическим датчиком ртутного термометра

Для выполнения этого эксперимента применялись те же материалы, что и в предыдущем опыте, но вместо шарообразного датчика термометра ТМ4 – 1, использовался цилиндрический датчик термометра ТЛ – 4 (рисунок 2.8).

С исследуемым термометром мы проводили три опыта с определением времени, в течение которого разность температур термометра и среды уменьшится в е раз (коэффициент тепловой инерции термометра λ) и теоретической температуры, вычисленной по формуле 3.1.

Для этого отметим и запишем комнатную температуру (θ) и температуру T₀, с которой начнётся отсчёт времени. Комнатная температура θ для трех опытов численно равна:

θ₁=26,8°С
θ₂=27,7°С
θ₃=28,5°С.
Начальная температура T₀=50°С.

1 .

Первый опыт

Разность $T_0 - \theta_1$ составит:

$$50 - 26,8 = 23,2^{\circ}C$$
 (3.5)

Разделим это значение на е:

$$\frac{23,2}{2,718} = 8,54 \tag{3.6}$$

Чтобы найти коэффициент тепловой инерции термометра (λ) нужно прибавить к значению 8,54 комнатную температуру (θ):

$$\frac{23,2}{2,718} = 8,54 \tag{3.6}$$

Если опустить перпендикуляр на ось времени (τ) (на рисунке3.2) мы увидим, что разность температур термометра и среды уменьшается в *е* раз примерно через 145 секунд. На этом графике присутствуют две кривые – эмпирических значений и расчетных. Варьируя значение λ в формуле (3.1) мы добиваемся максимального совпадения двух кривых. Вследствие этого подставим $\lambda = 150$.



Рисунок 3.2 – График зависимости температуры от времени в первом опыте.

На данном графике видно, что эмпирическая кривая лежит выше теоретической. Это объясняется тем, что комнатная температура θ при проведении опыта поднялась, соответственно теоретическая кривая стремится к другому значению – к температуре окружающей среды.

Второй опыт

Разность $T_0 - \theta_2$ равна:

$$50 - 27,7 = 22,3^{\circ}C$$
 (3.8)

Разделим это значение на е:

$$\frac{22,3}{2,718} = 8,2\tag{3.9}$$

И прибавим комнатную температуру:

$$8,2 + 22,3 = 30,5 \tag{3.10}$$

Температура, при которой наблюдается коэффициент тепловой инерции, составляет 30,5°С. Наиболее подходящее значение $\lambda = 145$ с.



Рисунок 3.3 – График зависимости температуры от времени во втором опыте

На данном графике также видно, что эмпирическая кривая лежит выше теоретической. Теоретическая кривая опять стремится к изначальному значению θ.

Третий опыт

Разность $T_0 - \theta_3$:

$$50 - 28,5 = 21,5^{\circ}C.$$
 (3.11)

Разделим на е:

$$\frac{21,5}{2.718} = 7,91 \tag{3.12}$$

И прибавим комнатную температуру:

$$28,5 + 7,91 = 36,4 \tag{3.13}$$

36,4 – это температура, при которой наблюдается коэффициент тепловой инерции (наиболее подходящее значение λ = 145 c)



Рисунок 3.4 – График зависимости температуры от времени в третьем опыте

На данном графике видно, что эмпирическая кривая и теоретическая практически совпадают.

3.3Эксперименты с биметаллическим датчиком термографа

С исследуемым термографом M-16AH мы также проводили опыты по определению времени, в течение которого разность температур термометра и среды уменьшится в е раз (коэффициент тепловой инерции термометра λ) и теоретической температуры, вычисленной по формуле (3.1).Во всех четырех опытах скорость ветра была равна 0.

Для этого отметим и запишем комнатную температуру (θ) и температуру T₀, с которой начнётся отсчёт времени.

Комнатная температура θ для трех опытов численно равна:

$$\theta_1 = 24.3^{\circ}C,$$

 $\theta_2 = 24.4^{\circ}C,$
 $\theta_3 = 24.7^{\circ}C,$
 $\theta_4 = 26.6^{\circ}C.$

Начальная температура на ленте термографа составляла T₀=90°C. Первый опыт

Сперва рассчитывалась разность, стоящая в скобках в формуле (3.1) $T_0 - \theta_1$:

$$90 - 24,3 = 65,7 \,^{\circ}\text{C}$$
 (3.14)

Разделим это значение на е:

$$\frac{65,7}{2,718} = 24,17 \,^{\circ}\text{C} \tag{3.15}$$

Чтобы найти коэффициент тепловой инерции термометра (λ) нужно прибавить к значению 8,54 комнатную температуру (θ₁):

$$24,17 + 24,3 = 48,47 \ ^{\circ}\text{C} \tag{3.16}$$

Если опустить перпендикуляр значения температуры 48,47°С (кривая эмпирических данных) на ось времени (τ) (на рисунке 3.1) мы увидим, что разность температур термометра и среды уменьшается в *е* раз примерно через 45 секунд.



Рисунок 3.5 – График зависимости температуры от времени в первом опыте

Синяя кривая построена с учетом данных, полученных опытным путем, красная кривая – по данным, рассчитанным по формуле (3.1).

Как видно из графика, кривая расчетных значений практически не совпадает с кривой, построенной по экспериментальным данным. Уменьшение температуры происходит по закону, отличающемуся от формулы (3.1). Кривая расчетных значений лежит ниже кривой с опытными данными, следовательно, нужно изменить показатель степени экспоненты. Поэтому, возникло предположение добавить степень β в формуле (3.1). С учетом преобразований, формула будет выглядеть следующим образом:

56

$$\Gamma = \theta + (T_0 - \theta) e^{-\left(\frac{\tau}{\lambda}\right)^{\beta}}$$
(3.17)

Путем подстановки подходящей нам степени β (от 0 до 1) добьемся максимального совпадения эмпирических и расчетных кривых на графиках зависимости температуры от времени.

Проведя этот же опыт с расчетными данными, полученными по формуле (3.17), получены новые графики зависимости падения температуры от времени:



Рисунок 3.5 – График зависимости температуры от времени в первом опыте

На этом графике присутствуют две кривые – эмпирических значений и расчетных. Варьируя значение λ в формуле (3.17) достигается максимальное совпадение двух кривых. Вследствие этого подставлялась $\lambda = 42$. Степень β возьмем равную 0.5.

На графике видно небольшое отклонение эмпирической кривой от теоретической. Это можно объяснить большей погрешностью термографа по

сравнению с термометрами, так как цена деления термографа составляет 1 градус, а цена деления термометра 0.1 градуса.

Второй опыт

Разность $T_0 - \theta_2$ равна:

$$90 - 244 = 656 \,^{\circ}\text{C}$$
 (3.18)

Разделим это значение на е:

$$\frac{65,6}{2,718} = 24,13 \,^{\circ}\text{C} \tag{3.19}$$

Чтобы найти коэффициент тепловой инерции термометра (λ), нужно прибавить к значению 8,54 комнатную температуру (θ₂):

$$24,13 + 24,4 = 48,5 \,^{\circ}\text{C} \tag{3.20}$$

Опустив перпендикуляр от значения температуры 48.5° С (кривая опытных значений) на ось времени (τ) (на рисунке 3.6) наблюдаем, что разность температур термометра и среды уменьшается в *е* раз примерно через 80 секунд. Подставим это значение в формулу (3.17), степень β возьмем равную 0.6.



Рисунок 3.6 – График зависимости температуры от времени во втором опыте

Как видно из графика, кривые практически идеально совпали друг с другом.

Третий опыт

Разность $T_0 - \theta_3$ равна:

$$90 - 24,7 = 65,3 \,^{\circ}\text{C}$$
 (3.21)

Разделим это значение нае:

$$\frac{65,3}{2,718} = 24,0 \,^{\circ}\text{C} \tag{3.22}$$

Чтобы найти коэффициент тепловой инерции термометра (λ) нужно прибавить к значению 8,54 комнатную температуру (θ₃):

$$24,0+24,7=48,72$$
 °C (3.23)

Опустив перпендикуляр от значения температуры 48,72°C на ось времени (τ) (на рисунке 3.7) наблюдаем, что разность температур термометра и среды уменьшается в *е* раз примерно через 36 секунд. Подставим это значение в формулу (3.17), степень β возьмем равную 0.5.



Рисунок 3.7 – График зависимости температуры от времени в третьем опыте

В начале графика мы видим небольшое отклонение теоретических данных от эмпирических. Опять же, это связано с погрешностью, присутствовавшей в опыте.

Четвертый опыт

Разность $T_0 - \theta_4$

$$90 - 26,6 = 63,4 \,^{\circ}\text{C}$$
 (3.24)

Разделим это значение на е:

$$\frac{63,4}{2,718} = 23,32 \,^{\circ}\text{C} \tag{3.25}$$

Чтобы найти коэффициент тепловой инерции термометра (λ) нужно прибавить к значению 8.54 комнатную температуру (θ₄):

$$23,32 + 26,6 = 49,92 \ ^{\circ}\text{C} \tag{3.26}$$

Опускаем перпендикуляр от значения температуры 48.5° C на ось времени (τ) (на рисунке 3.8) и наблюдаем, что разность температур термометра и среды уменьшается в *е* раз примерно через 50 секунд. Подставим это значение в формулу (3.17), степень β возьмем равную 0,5.



Рисунок 3.8 – График зависимости температуры от времени в четвертом опыте

Как видно из графика, в начале наблюдается небольшое расхождение кривых.

Из проделанных опытов и расчетов можно сделать вывод, что в формуле (3.17) наиболее подходящее значение степени β составляет 0,5. Но оно может варьироваться в пределах от 0,5 до 0,6 и должно быть определено расчетным путем.

4Определение коэффициента инерции датчика плоской биметаллической пластины термографа с обдувом одинаковой скоростью ветра при разных углах обдува

4.1Описание лабораторной установки

На рисунке 4.1 представлена схема лабораторной установки (фронтальная проекция), с помощью которой осуществлялись эксперименты, целью которых было изучение коэффициента тепловой инерции биметаллической пластины термографа.

Обдув пластины производился при одной скорости ветра (2 м/с), но при разных углах направления воздушного потока к пластине. Углы обдува ф составляли: 90°, 60°, 45°, 30° и 0°.



1 – термограф; 2 – биметаллическая пластина; 3 – 7 – положение воздушного потока относительно пластины (от 0° до 90 ° соответственно);

8 – контрольный термометр

Рисунок 4.1 – Схема лабораторной установки для проведения опытов с термографом

Ранее, в главе 2.4 описывались технические характеристики исследуемого термографа, и в параграфе 2.4.1 описывалась калибровка воздуходувки.

4.2 Описание постановки эксперимента

На кафедре ЭФА было поставлено продолжение ранее проделанных экспериментов с целью изучения коэффициента тепловой инерции биметаллической пластины термографа. Искусственно смещалась стрелка термографа вниз на 40 °C, и пластина нагревалась до максимальной температуры на ленте – 50 °C. Следовательно, 90 °C соответствует 50 °C на ленте термографа. Таким образом, мы увеличивали диапазон измерения, чтобы провести более точно эксперименты. Затем измерялась температура по истечении времени в 40 секунд. Обдув пластины производился при одной скорости ветра (2 м/с), но при разных углах направления воздушного потока к пластине. Углы обдува составляли: 90°, 60°, 45°, 30° и 0°.

Были получены результаты, которые нуждаются в проверке и уточнении, но единственное что достоверно – качественная зависимость, но не количественная. Учитывая большую погрешность измерений, возможно, что количественную зависимость – эмпирическую формулу, получить не удастся. Ниже представлены графики, отражающие зависимость коэффициента инерции λ, и коэффициента теплообмена α, от угла наклона ф.

64



Рисунок 4.2 – График зависимости коэффициента инерции λ от угла обдува φ



Рисунок 4.3 – График зависимости коэффициента теплообмена от угла обдува ф

Экспериментальные данные показали (и это видно на графиках) что наиболее значимые изменения коэффициента тепловой инерции происходят при углах обдува от 0° до 60°, а при углах от 60° до 90° коэффициент практически не изменяется.

4.3 Применение числа Рейнольдса для определения характера воздушного потока

Вязкие жидкости (например, масла) движутся по большей части упорядоченно, а маловязкие жидкости (вода, бензин, газообразные вещества)– почти всегда неупорядоченно[6]. Кроме того, на характер движения жидкости явно влияет скорость потока – медленно перемещающаяся по руслу жидкость (или газ) ведет себя спокойно. Но с увеличением скорости потока изменяется и характер движения этой жидкости (газа). О. Рейнольдс определил общие условия, при которых возможны существование ламинарного и турбулентного режима движения жидкости (или газа) и переход от одного характера движения к другому. Оказалось, что характер (режим) потока жидкости (газа) в трубе зависит от величины некоторого безразмерного числа, учитывающего основные факторы, определяющие это движение: среднюю скорость, диаметр трубы, плотность жидкости(газа) и вязкость. Влияние всех этих величин на характер движения потока выражены формулой, отражающей число Рейнольдса (Re):

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho \times v \times R}{\eta} \tag{4.1}$$

где

 ρ – плотность среды [кг/м³];

v – скорость движения воздуха, [м/с];

R – гидравлический радиус потока, [м];

η – динамическая вязкость потока, [Па × с].

Рассчитывался коэффициент Рейнольдса для воздушной среды, с учетом натекания на препятствие. Этим «препятствием» служили ртутные резервуары шарообразного и цилиндрического термометров (измерялся их диаметр и

66

формула (4.1) была преобразована с учетом этой поправки) и толщина биметаллической пластины термографа М – 16АН (в случае с термографом воздушный поток был направлен под углом 0° относительно пластины). Измененная под исследуемые параметры формула расчета коэффициента Рейнольдса представлена ниже:

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho \times v \times d}{\eta} \tag{4.2}$$

где

 ρ – плотность воздуха [$\rho_{возд}$ = 1,29 кг/м³];

v- скорость движения воздушного потока, [м/с];

d – ширина препятствия (диаметр резервуара цилиндрического и шарообразного термометра и толщина пластины термографа), [м];

 η – динамическая вязкость воздуха [η = 1,82 × 10⁻⁵ Па × c].

Число Рейнольдса определяет границы, между которыми режим движения жидкости (газа) может принимать ламинарный или турбулентный характер. Ламинарный– режим движения, при котором отдельные слои жидкости скользят друг относительно друга, не, смешиваясь между собой; турбулентный– режим движения, при котором частицы в потоке движутся по сложным, все время изменяющимся траекториям и в жидкости (газе) происходит интенсивное перемешивание. Границей раздела между турбулентным и ламинарным движением для воздуха принято считать значение 2300. Т.е. если число Рейнольдса меньше значения 2300, то режим течения ламинарный, а если больше – турбулентный[9].

Нужно было выяснить какой характер имеет струя воздуха вокруг «препятствия» и при какой скорости ветра характер течения меняется. Чтобы это сделать, в первую очередь нужно было преобразовать формулу (4.2) таким

67

образом, чтобы определить при каком диаметре или скорости ветра осуществляется этот переход– из ламинарного движения в турбулентное.

Эта задача решалась с помощью формулы (4.3) – вместо числа Рейнольдса подставлялось критическое число (Rкр). Эта формула представлена ниже:

$$R\kappa p = \frac{\rho \times v \times d}{\eta}$$
(4.3)

Арифметически преобразовав формулу(4.3) можно вычислить параметры ширины датчика – d, а также скорости ветра v, при которой меняется режим течения, подставив значение Rкp = 2300.

$$d = \frac{R\kappa p \times \eta}{\rho \times v}$$
(4.4)

$$\mathbf{v} = \frac{\mathrm{R}\kappa \mathbf{p} \times \mathbf{\eta}}{\mathbf{\rho} \times \mathbf{d}} \tag{4.5}$$

В формуле (4.4) скорость ветра подставлялась от значения 0,1 м/с до 15 м/с (в промежутке значений от 0,1 до 1 – с шагом 0,1 м/с, а в промежутке от 1 до 15 м/с – с шагом 0,5 м/с). Более подробные значения брались для того, чтобы была возможность более детально изучить соответствующую зависимость в случае ее резких изменений. Это дает возможность узнать, какой режим потока присущ каждому изучаемому диаметру (в случае с термографом – толщина пластины) метеорологического прибора.

Расчетным путем (формула 4.5) было установлено, что для шарообразного и цилиндрического датчика критические скорости ветра такие, какие есть в природе. Критическая скорость ветра для шарообразного датчика – 3,24 м/с, это значит что при скорости ветра меньше обозначенной – характер

течения воздуха после прохождения «препятствия» ламинарный. Если скорость ветра больше – режим течения турбулентный.

Для цилиндрического датчика пороговое значение составляет 5,32 м/с. Т.е. до этого значения скорости ветра, характер движения ламинарный, после этого значения – турбулентный.

Для биметаллической пластины термографа пороговое значение составляет много больше – 46,36 м/с. Т.е. до этого высокого порогового значения характер потока ламинарный. Поскольку все эксперименты с обдувом пластины проводились до 15 м/с, то при обдуве под углом 0° характер движения всегда был ламинарным.

Ситуация резко меняется при обдуве пластины потоком, направленным перпендикулярно к пластине (к широкой ее части). Пороговое значение при этом направлении потока составляет 1,08 м/с, что означает одно– характер потока практически сразу переходит в турбулентный режим.

На рисунке (4.4) представлен график зависимости скорости ветра v от диаметра датчика d. До этой границы графика (левее и ниже) характер движения ламинарный, после – турбулентный.



Рисунок 4.4 – График зависимости скорости ветра v от диаметра датчика d

Характер обдува пластины потоком воздуха при изменении угла от 0° до 90° (переход из ламинарного в турбулентный режим) является одной из весомых причин изменения характера зависимости коэффициента инерции λ и коэффициента теплообмена α . Поэтому зависимость этих коэффициентов от угла обдува неоднозначна, и причиной этой неоднозначности, является смена характера потока. И вычислить где конкретно она изменилась довольно сложно как технически, так и эмпирически.

1. Формула (2.11) для расчета теоретического коэффициента теплообмена α_{теор} выполняется достаточно удовлетворительно для ртутных термометров ТМ4 – 1 и ТЛ – 4 (с шарообразным и цилиндрическим резервуарами).

2. Установлена зависимость коэффициента теплообмена α от скорости ветра для шарообразного датчика термометра ТМ4 – 1:

$$\alpha = 19.0 + 28.5 \cdot V^{0.6}$$

для цилиндрического термометра ТЛ – 4:

$$\alpha = 24.49 + 30.67 \cdot V^{0.7}$$

и для биметаллической пластины термографа:

$$\alpha = 11.28 + 23.38 \cdot V^{0.8}$$

 Опытным путем установлено, что классическая формула зависимости падения температуры от времени (формула 3.1), опубликованная ранее в литературе, не выполняется для биметаллической пластины термографа.
 Для термографа формулу (3.1) следует изменить на формулу (3.17), так как после проделанных экспериментов выяснилось, что нужно добавить степень β= 0.6.

$$\mathbf{T} = \theta + (\mathbf{T}_0 - \theta) e^{-\left(\frac{\tau}{\lambda}\right)^{\beta}}$$

 В заключение можно сделать вывод, что с увеличением угла, увеличивается коэффициент конвективного теплообмена *α*(V), а λ – коэффициент тепловой инерции датчика, в свою очередь, уменьшается.
Список источников

1 Материал из Википедии — свободной энциклопедии: Версия 70943180, [Электронный ресурс] сохранённая в 19:07 UTC 21 мая 2015 / Авторы Википедии // Википедия, свободная энциклопедия. — Электрон. дан.

— Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2015. — Режим доступа: <u>http://ru.wikipedia.org/?oldid=70943180</u>

2Савченко, Г.А. Тепловая инерция чувствительного элемента термометров и исследование его теплообмена с окружающей средой [текст] / Н.О.Григоров, Савченко Г.А.// Заочный доклад на III Международном молодежном научном форуме «Молодая наука – 2015», посвященного 70-летию Победы в Великой Отечественной войне, Туапсе, март, 2015г.

ЗСавченко, Г.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена чувствительного элемента термометров с окружающей средой [текст] / Г.А.Савченко//Студенческая научная конференция метеорологического факультета: тезисы, Санкт-Петербург, 6 – 10 апр.,2015г.– СПб.:изд. РГГМУ, 2015.–С. 17 – 19

4Караваева, М.С. Исследование тепловой инерции и чувствительности различных датчиков температуры [текст] / М.С.Караваева//дипломный проект. РГГМУ.–2014г.

5Термограф // Википедия. [2013]. Дата обновления: 13.03.2013. URL: http://ru.wikipedia.org/?oldid=53415715 (дата обращения: 13.03.2013)

6Гончаров О.Г., Режимы движения реальных жидкостей [электронный pecypc] / О.Г. Гончаров // Основы гидравлики – Режим доступа: http://k-a-t.ru/gidravlika/6_rejimy_dvij

7Григоров, Н.О., Савченко Г.А.Исследование процесса теплообмена чувствительного элемента термометров с окружающей средой[текст] /

72

Н.О.Григоров, Г.А.Савченко// итоговая сессия Ученого Совета РГГМУ: тезисы доклада, январь 2015 г.

8Савченко, Г.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена чувствительного элемента термометров с окружающей средой [текст] / Г.А.Савченко//Студенческая научная конференция метеорологического факультета: доклад, Санкт-Петербург, 6 – 10 апр.,2015г.

9Кухлинг Х. Справочник по физике[текст] / Х.Кухлинг. – Москва: Мир, 1983. – 520с.

10Григоров Н.О., Савченко Г.А., Светачева А.А. Погрешности и процесс теплообмена с окружающей средой термометров различного типа [текст] / Н.О.Григоров, Г.А.Савченко, А.А.Светачева// итоговая сессия Ученого Совета РГГМУ: тезисы доклада, апрель 2017г.

11Качурин, Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы [Текст] :эксперим. физика атмосферы учеб. для вузов по спец. "Метеорология" / Л. Г. Качурин. - Л. :Гидрометеоиздат, 1990. - 462, 1 с.

12Геращенко О.А., Федоров В.Г., Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство.- Киев: «Наукова думка», 1965г.

13Григоров Н.О., Савченко, Г.А. Исследование процессов теплообмена термометров, обдува чувствительного элемента термографа при разных углах [текст] / Г.А.Савченко//Студенческая научная конференция метеорологического факультета: доклад, Санкт-Петербург, 13 – 15 апр., 2017г.

73