



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

Кафедра Экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Минимизация погрешностей жидкостных термометров»

Исполнитель

Светачева Анна Александровна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Кузнецов Анатолий Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

«__» июня 2020 г.

Санкт-Петербург
2020

Оглавление

Введение	3
1 Методы измерения температуры воздуха	5
1.1 Основные параметры, описывающие тепловую инерцию термометра.	6
1.2 Основные характеристики измерительных приборов	7
2 Минимизация погрешностей шарообразного термометра.....	10
2.1 Определение коэффициента конвективного теплообмена для ртутного термометра с шарообразным резервуаром	10
3 Минимизация погрешностей шарообразного термометра.....	13
Глава 4.Минимизация погрешностей цилиндрического термометра.	29
Выводы	40
Литература	42
Примечание	44

Введение

Температура (от лат. *temperatura* — надлежащее смешение, нормальное состояние) [2] — 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 инерции датчика.

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 течение которого разность температур уменьшается в e раз.

Коэффициент тепловой инерции термометра [2] зависит от интенсивности конвективного теплообмена между датчиком и средой.

Целью моей работы было определение радиусов резервуаров термометров для точности измерения температуры, повышение чувствительности термометров и минимизация инерционных и шкаловых погрешностей.

Главной задачей этой работы является определение оптимальных значений радиуса для шарообразной и цилиндрической формы термометров. Для решения данной задачи необходимо определить погрешности: шкаловую и инерционную.

В данной работе представлены результаты расчета погрешностей термометров, обладающего шарообразным и цилиндрическим резервуарами. Для примера был выбран ртутный термометр, однако методика расчета может быть применена к любому типу термометров.

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 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Термометры аспирационного психрометра имеют меньший диаметр стержня. Резервуар термометра цилиндрический. Цена деления $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термометры этой конструкции обладают большой чувствительностью.

Срочный термометр предназначен для определения температуры поверхности почвы. Резервуар его цилиндрический. Цена нанесенных на шкале делений $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Максимальный термометр. Его назначение измерить максимальную температуру, которая наблюдалась с момента выкладывания термометра до момента наблюдения. Цена нанесенных на шкале делений $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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.

1.1 Основные параметры, описывающие тепловую инерцию термометра

Тепловая инерция термометра[2] является одним из важнейших критериев его работы. Обычно она характеризуется коэффициентом инерции, имеющим смысл времени, в течение которого разность температур между датчиком и средой уменьшается в e 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.

Свойство термометра воспринимать температуру окружающей среды с задержкой во времени, называется тепловой инерцией термометра. Тепловая инерция характеризуется коэффициентом тепловой инерции, который зависит от параметров термометра:

$$\lambda = \frac{m \times C}{\alpha \times S} \quad (1.1)$$

Где λ – коэффициент тепловой инерции [с];

m – масса датчика [кг];

C – удельная теплоемкость материала [Дж/(кг × К)];

α – 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.

1.2 Основные характеристики измерительных приборов

При работе с измерительными приборами необходимо прежде всего знать их основные характеристики, определяющие пригодность прибора для измерений данной величины в данных условиях. Обычно эти характеристики приводятся в паспорте прибора или в техническом описании. Перечислим их.

Важнейшей характеристикой прибора является его чувствительность[2]. Согласно определению, абсолютная чувствительность любого прибора (S) - это отношение изменения выходной величины (Y) к вызвавшему ее изменению входной величины (X). Математически это можно выразить в виде производной:

$$S = \frac{dY}{dX} \quad (1.2)$$

Входная величина – эта, собственно, величина, которую измеряет данный прибор (например, температура, влажность и т.д.). Выходная величина – это та, в которую преобразуется входная величина в процессе работы прибора (например, высота столба ртути, угол отклонения стрелки и т.д.). Если известна зависимость $Y(X)$, которая определяется устройством прибора, то можно, используя уравнение (1.2), выразить чувствительность и определить её величину.

Введем понятие относительной чувствительности прибора. Это отношение абсолютной чувствительности к значению выходной величины Y :

$$S = \frac{1}{Y} \frac{dY}{dX} \quad (1.3)$$

Относительная чувствительность показывает, на какую часть от выходной величины изменяется сама выходная величина при изменении входной величины на единицу. Например, известно, что при изменении температуры на один градус изменение высоты столбика ртути составляет 1 мм. Много это или мало? Для ответа на этот вопрос необходимо знать саму высоту столбика ртути. Если она равна, скажем, одному сантиметру, то один миллиметр – это достаточно много, это одна десятая часть от самого значения высоты. Относительная чувствительность в этом случае равна 0,1 1/К. Но если высота столбика ртути, например, 50 см, то относительная чувствительность термометра в 50 раз ниже.

Важной особенностью относительной чувствительности является то обстоятельство, что она имеет одинаковую размерность для всех однотипных приборов. Например, для термометров – 1/К, для барометров – 1/Па, и т.д. Значит, однотипные приборы, имеющие разную конструкцию, можно сравнивать между собой по их относительной чувствительности.

Второй важнейшей характеристикой прибора является погрешность измерения. Обычно она выражается так: $\pm \Delta X$, где X – измеряемая (входная) величина. Величину ΔX можно определить, зная чувствительность прибора и погрешность измерения выходной величины ΔY :

$$\Delta X = \frac{\Delta Y}{S} \quad (1.4)$$

Погрешность измерения выходной величины ΔY обычно равна половине деления шкалы для стрелочных приборов. Для других приборов значение ΔY определяется, исходя из физической природы величины Y .

Не нужно, однако, думать, что погрешность измерения полностью описывается уравнением (1.3). Как правило, к этому значению нужно прибавить погрешности, обусловленные влиянием других физических величин на работу прибора. Поэтому вопрос о погрешностях каждого прибора мы будем обсуждать особо. Кроме того, при измерениях также присутствуют случайная, систематическая и инструментальная погрешности. Нахождение средней величины измеренного значения с достаточной степенью достоверности – это отдельная математическая задача.

Важнейшей характеристикой работы прибора является его инерция[2]. Инерция прибора – это его свойство показывать измеряемую величину с задержкой во времени. В паспорте каждого прибора содержится параметр, описывающий его инерцию. Для термометра это коэффициент тепловой инерции, для ротоанемометров – путь синхронизации и т.д. Существуют, однако, безинерционные приборы, у которых инерция или вообще отсутствует, или пренебрежимо мала.

2 Минимизация погрешностей шарообразного термометра

2.1 Определение коэффициента конвективного теплообмена для ртутного термометра с шарообразным резервуаром

При определенных соотношениях размера

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 2.1).

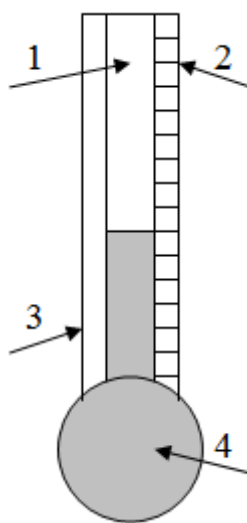


Рисунок 2.1 – Строение жидкостных стеклянных термометров

1 – капиллярная трубка; 2 – шкала; 3 – стеклянная трубка; 4 – резервуар

Рисунок 2.1 – 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 ТМ4-1 представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Шарообразный термометр ТМ4-1

Этот термометр имеет шарообразный резервуар со следующими габаритами:

Параметры шара:

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

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

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

Площадь шара($S_{\text{ш}}$):

$$S_{\text{ш}} = 4\pi R_{\text{внеш}}^2 \quad (2.1)$$

$$S_{\text{ш}} = 4,52 \times 10^{-4} (\text{м}^2)$$

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

$$\lambda = \frac{m \times C}{\alpha \times S} = \frac{m_{\text{рт}} C_{\text{рт}} + m_{\text{ст}} C_{\text{ст}}}{\alpha \times S}, \quad (2.2)$$

где $C_{\text{стекла}} = 779 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К})$,

$C_{\text{ртути}} = 138 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К})$.

Масса ртути вычислялась следующим образом:

$$m_{\text{рт}} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{рт}}^3 \times \rho_{\text{рт}} \quad (2.3)$$

Теперь вычислим массу стекла:

$$m_{\text{ст}} = (V_{\text{внеш}} - V_{\text{внутр}}) \times \rho_{\text{ст}} \quad (2.4)$$

Преобразуем формулу (2.4) в формулу (2.5):

$$m_{\text{ст}} = \frac{4}{3} \pi (R_{\text{внеш}}^3 - R_{\text{внутр}}^3) \times \rho_{\text{ст}} \quad (2.5)$$

С учетом

$$R_{\text{рт}} = 0,0037 \text{ м},$$

$$\rho_{\text{рт}} = 13500 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

$$R_{\text{ст}} = 0,006 \text{ м},$$

$$\rho_{\text{ст}} = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

получим

$$m_{\text{рт}} = 2.981 \times 10^{-3} \text{ кг}, \quad m_{\text{ст}} = 1.709 \times 10^{-3} \text{ кг}.$$

3 Минимизация погрешностей шарообразного термометра

Погрешности любого термометра складываются из двух основных величин – шкаловая погрешность [2] и инерционная погрешность[2]. Величина шкаловой погрешности может быть определена из чувствительности термометра S :

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta h}{S}, \quad (3.1)$$

где Δh – смещение столбика ртути (или другой жидкости) при изменении температуры на величину Δt_1 .

Инерционная погрешность [2] определяется как произведение скорости изменения температуры окружающей среды γ на коэффициент тепловой инерции термометра λ :

$$\Delta t_2 = \gamma \lambda \quad (3.2)$$

Полная погрешность термометра определяется как сумма $\Delta t_1 + \Delta t_2$ [2]. Для примера сделаем расчет погрешности ртутного термометра с шарообразным резервуаром. Чувствительность ртутного термометра есть производная от выходной величины h по входной t , где h – высота ртути в капилляре. Коэффициент тепловой инерции термометра есть время, в течение которого разность температур между термометром и средой изменяется в e раз. Чувствительность термометра с шарообразным резервуаром определяется выражением:

$$S = \frac{dh}{dt} = \beta \frac{4}{3r^2} \cdot R^3, \quad (3.3)$$

где β – коэффициент объемного расширения жидкости,

R – радиус резервуара термометра,

r – радиус капилляра,

t – температура.

Коэффициент тепловой инерции [3] рассчитывается по формуле, которая с учетом различных материалов, содержащихся в резервуаре – ртути и стекла – приводится к виду:

$$\lambda = \frac{m_1 C_1 + m_2 C_2}{\alpha S}. \quad (3.4)$$

Здесь m_1 – масса ртути а m_2 – масса стекла в резервуаре, C_1 и C_2 – удельная теплоемкость ртути и стекла соответственно, α – коэффициент конвективного теплообмена системы «резервуар – окружающая среда», S – внешняя поверхность резервуара.

Массу ртути и стекла в резервуаре легко выразить через внешний радиус резервуара R и толщину его стеклянной стенки d . Выражая поверхность S шарообразного резервуара через его радиус R , получим, с учетом плотности ртути ρ_1 и плотности стекла ρ_2 окончательную формулу:

$$\lambda = \frac{(R-d)^3 \rho_1 C_1 + (R^3 - (R-d)^3) \rho_2 C_2}{3\alpha R^2}. \quad (3.5)$$

Обращает на себя внимание тот факт, что с увеличением радиуса резервуара чувствительность термометра увеличивается, следовательно, его шкаловая погрешность уменьшается, а коэффициент тепловой инерции, следовательно, и инерционная погрешность, наоборот, возрастает. Значит, существует некоторое значение радиуса датчика, которое соответствует минимальной суммарной погрешности термометра.

Определим пределы возможных значений радиуса датчика, при которых суммарная погрешность не превышает 0,1 градуса. С этой целью, объединяя формулы (3.1) и (3.3), рассчитаем шкаловую погрешность термометра, а объединяя формулы (3.2) и (3.5) – его инерционную погрешность. Взяв в качестве образца ртутный термометр ТМ-4, примем значение радиуса капилляра $r = 0,06$ мм, значение $\Delta h = 0,33$ мм, значение $d = 2,25$ мм. Остальные константы возьмем из справочника [5]:

плотность ртути $\rho_1 = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м³;

удельная теплоемкость ртути $C_1 = 140$ Дж/кг·К;

плотность стекла $\rho_2 = 2,5 \cdot 10^3$ кг/м³;

удельная теплоемкость стекла $C_2 = 840$ Дж/кг·К;

коэффициент объемного расширения ртути $\beta = 0,181 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Величину γ – скорость изменения температуры воздуха – следует взять максимально возможной. В данном расчете было принято значение $\gamma = 0,002$ К/с, что соответствует примерно 7 градусам в час. Что касается коэффициента конвективного теплообмена резервуара с окружающим воздухом, то воспользуемся выведенной в работе [5] для шарообразного датчика эмпирической формулой зависимости коэффициента α от скорости ветра V :

$$\alpha = 19,0 + 32,3 \cdot V^{0,54}. \quad (3.6)$$

Были проведены расчеты суммарной погрешности термометра в зависимости от радиуса его резервуара. Результаты расчета представлены на рисунке 3.1. Видно, что график суммарной погрешности имеет минимум, равный 0,09 градуса при радиусе резервуара, равном 0,004 м (4 мм), а при значениях внешнего радиуса от 0,0032 до 0,0053 м погрешность не превышает 0,1 градуса. Указанные значения рассчитаны для скорости ветра 0,8 м/с, принятой для термометров в психрометрической будке.

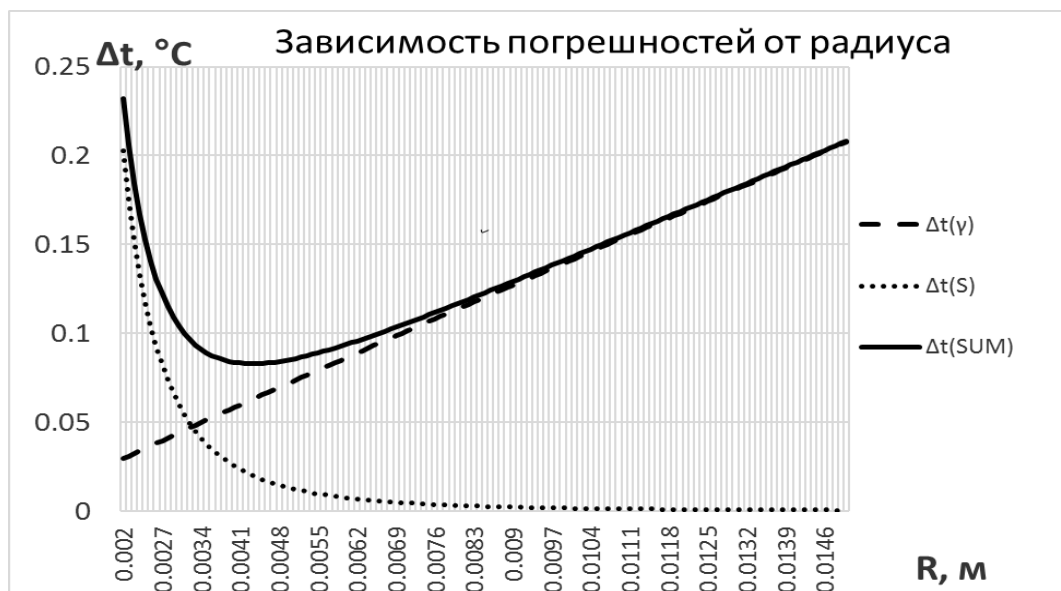


Рисунок 3.1 – Зависимость шкаловой погрешности термометра $\Delta t(S)$, инерционной $\Delta t(\gamma)$ и суммарной $\Delta t(\text{SUM})$ от радиуса резервуара при скорости ветра 0,8 м/с.

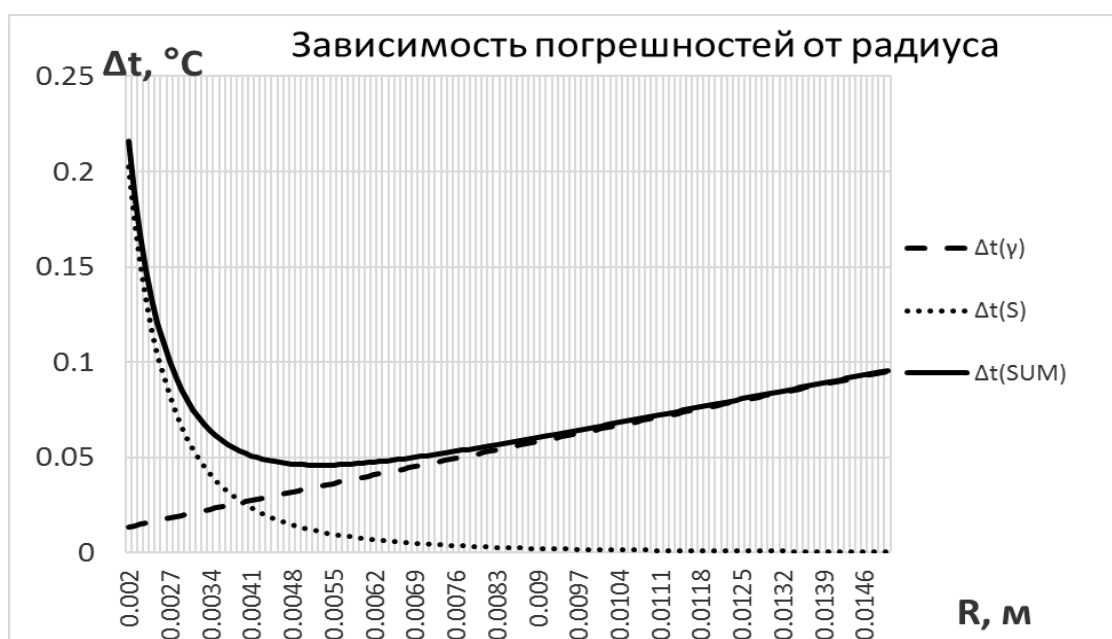


Рисунок 3.2 – Зависимость шкаловой погрешности термометра $\Delta t(S)$, инерционной $\Delta t(\gamma)$ и суммарной $\Delta t(\text{SUM})$ от радиуса резервуара при скорости ветра 6 м/с.

Картина меняется других значениях скорости ветра. Для скорости ветра 6 м/с (рис.3.2) минимальная погрешность не превышает 0,05 градуса и достигается при радиусе, равном 5 мм. Возможные значения радиуса резервуара, при которых погрешность не превышает 0,1 градуса, теперь расширяются и находятся в интервале от 0,0027 до 0,015 м.

Для наглядности приведем еще зависимость интервала значений радиуса, при котором погрешность не превышает 0,1 градуса, от скорости ветра (рис 3.3 и 3.4).

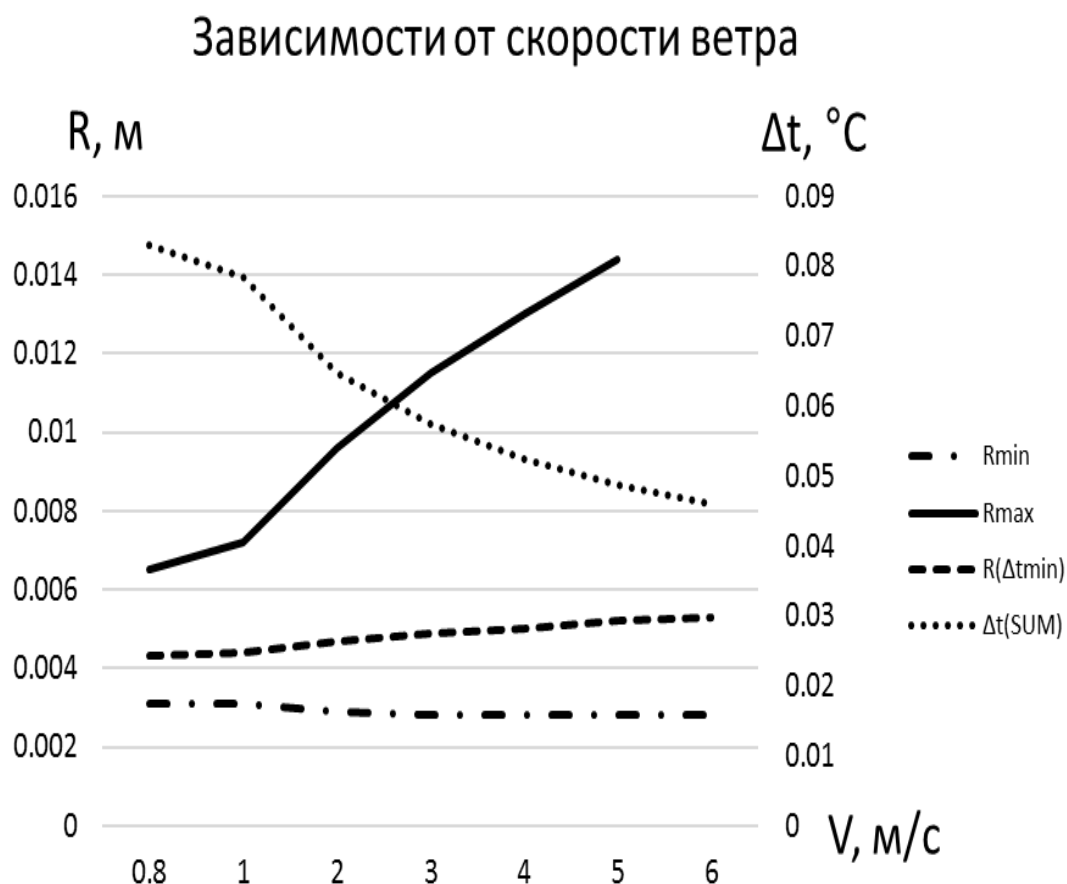


Рис.3.3. Зависимость от скорости ветра радиуса резервуара, при котором погрешность не превышает $0,1^\circ$ – минимального R_{min} , максимального R_{max} и соответствующего минимальной погрешности $R(\Delta t_{min})$, а также самой минимальной погрешности $\Delta t(SUM)$.

Значение $\gamma = 0,001 \text{ К/с}$.

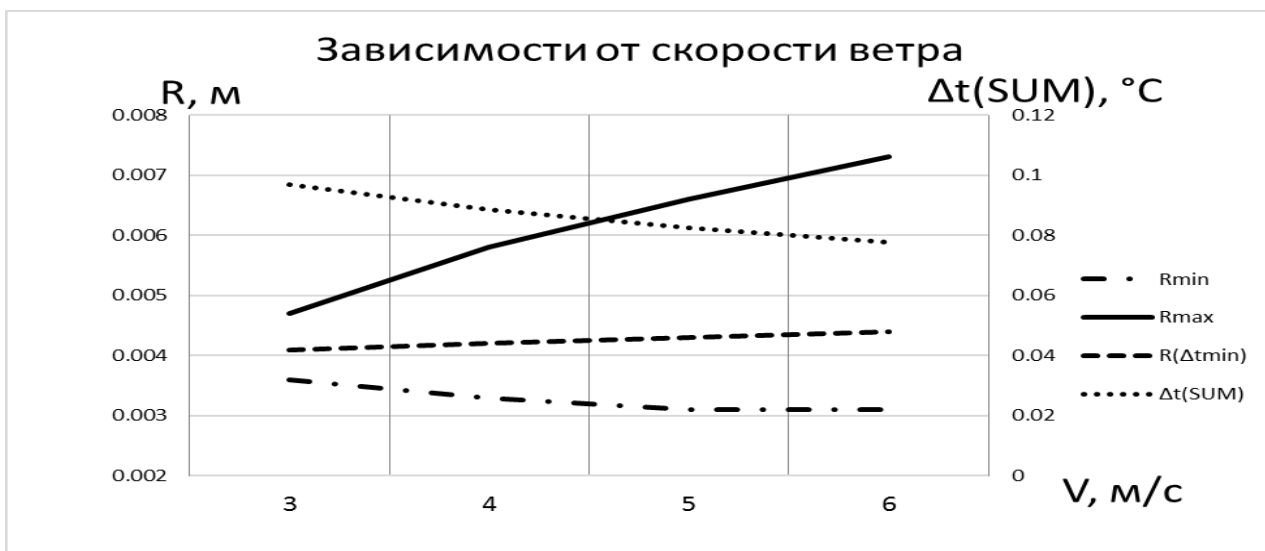


Рис.3.4. Зависимость от скорости ветра радиуса резервуара, при котором погрешность не превышает $0,1^0$ – минимального $R_{\min}$, максимального $R_{\max}$ и соответствующего минимальной погрешности R ($\Delta t_{\min}$), а также самой минимальной погрешности $\Delta t(\text{SUM})$). Значение $\gamma = 0,002$ K/с.

Видно, что с увеличением скорости ветра этот интервал расширяется. Само же значение минимальной погрешности уменьшается, а радиус резервуара, при котором она достигается, возрастает. Расчеты сделаны для двух значений скорости изменения температуры воздуха $\gamma = 0,001$ и $0,002$ K/с, что соответствует примерно от 3.6 до 7.2 градуса в час. При меньших значениях γ могут быть достигнуты еще меньшие значения погрешности.

Такие значения скорости изменения температуры характерны для быстро изменяющейся погоды. Для суточных изменений погоды характерны гораздо меньшие значения γ . Для случайных флуктуаций температуры значение γ , наоборот, гораздо большее. Следовательно, значения погрешности измерений будут гораздо больше.

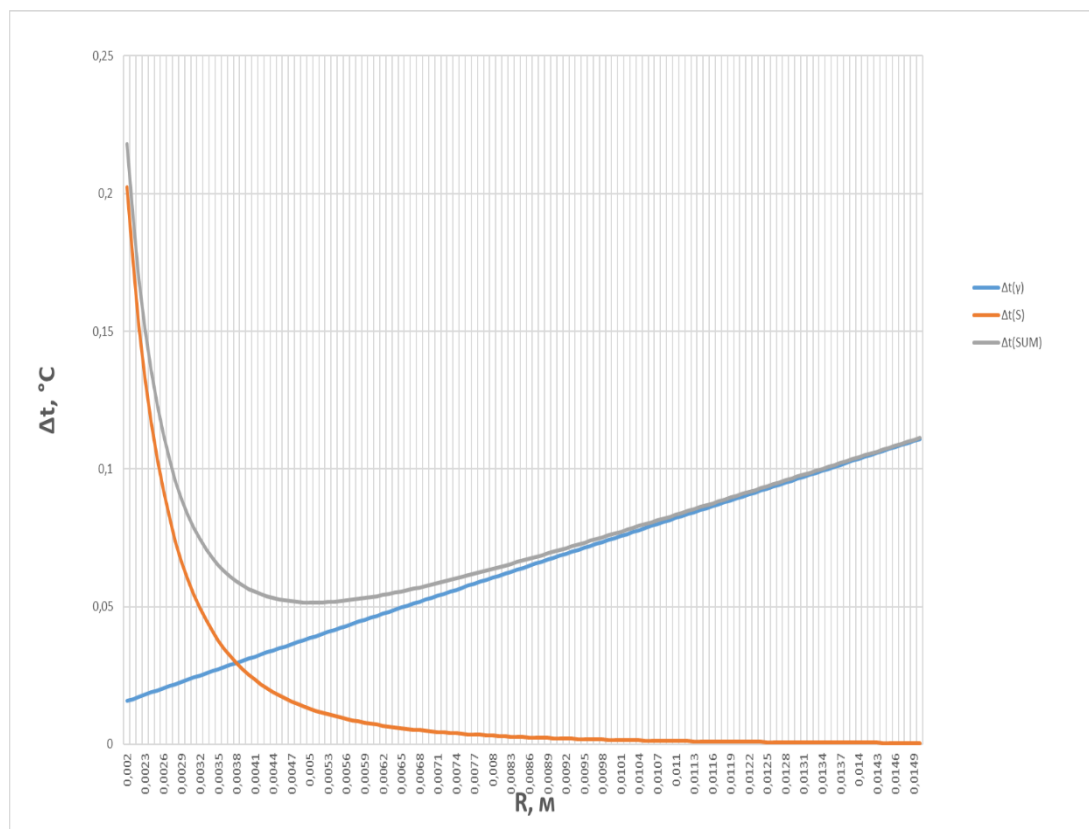


Рис 3.5 Зависимость $\Delta t(R)$ при $V = 1$ м/с , $\gamma = 1$

Данный график иллюстрирует зависимость $\Delta t(R)$ при $V = 1$ м/с , $\gamma = 1$, на котором оптимальные значения радиуса резервуара лежат в интервале от 4.4 до 5.6 мм.

Для более точного определения оптимального значения в конце таблицы предусмотрено дополнение в виде маленькой таблицы:

Минимальные значения		
при R		$\Delta t(\text{SUM})$
0,0051		0,051527

Для нахождения минимальной погрешности используем формулу Excel:
 =МИН(AF2:AF132) , где AF2:AF132 – указывает на расположение всех значений погрешности.

Для нахождения значения R, при котором достигается минимальное значение погрешности используем формулу несколько сложнее:

=ИНДЕКС(E2:E132;ПОИСКПОЗ(AJ3;AF2:AF132;0);1), где

«ПОИСКПОЗ()» - формула для нахождения индекса элемента в массиве значений. В данном случае мы ищем значение 0,051527, расположенное по адресу AJ3, в массиве значений от AF2 до AF132. Результат, возвращаемый данной формулой сразу же используется формулой «ИНДЕКС()», которая ищет в массиве значений E2:E132, значение с индексом, найденном на предыдущем этапе и возвращает его. В нашем случае это 0,0051.

В каждом файле MicrosoftExcel помимо семи листов, содержащих графики для определённой скорости ветра, будет находиться восьмой лист, в котором будет таблица, содержащая ссылки на значения погрешности, полученные на каждом листе, для каждой скорости ветра и радиус резервуара, при котором данное значение было получено. Эта таблица необходима для построения 3d-графика, который позволит быстро оценить диапазоны значений V и R при которых погрешность минимальна, и при которых погрешность выходит за рамки допустимой погрешности 0.1.

3D график объединяет в себе множество полученных 2D графиков:

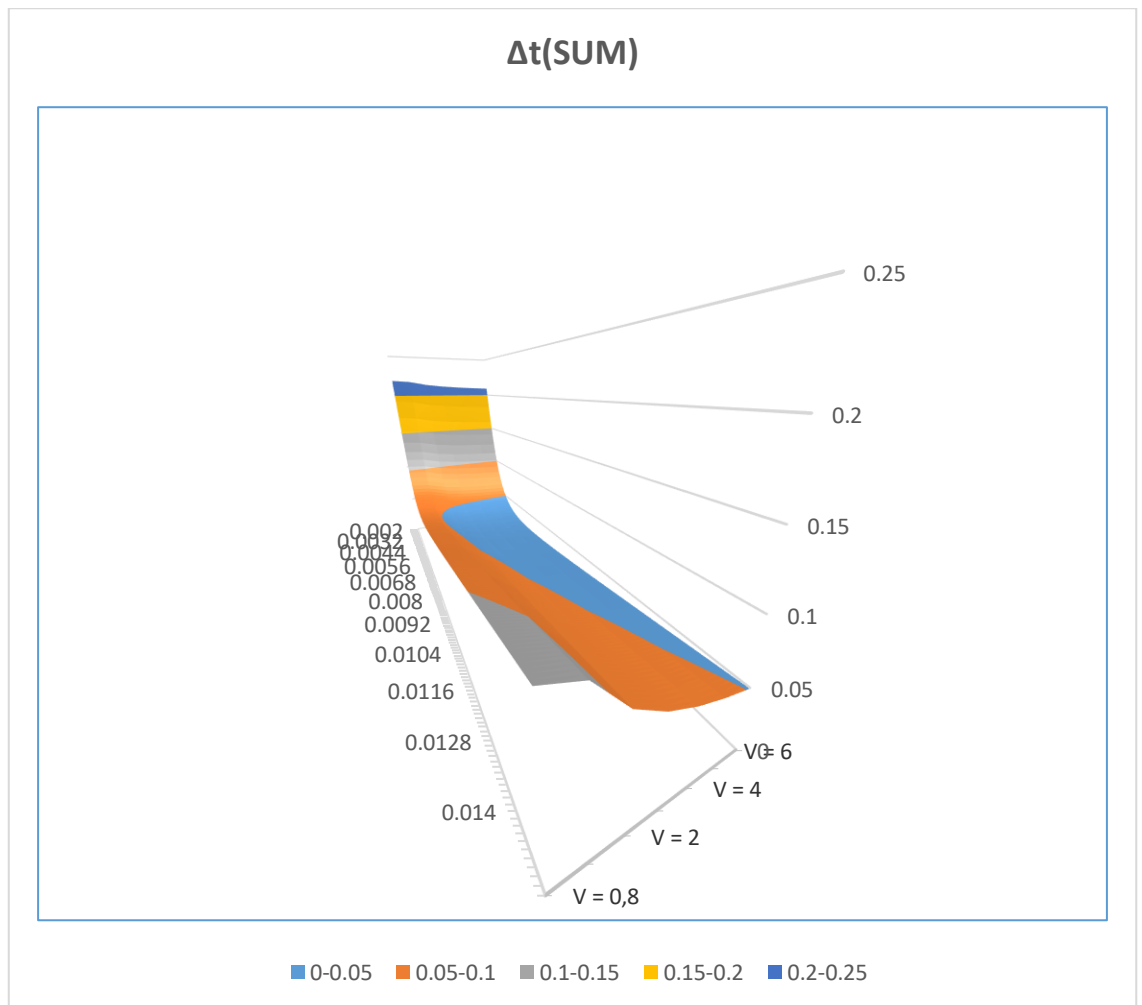


Рис 3.6 3D график при гамма 0.001 15 мм

С помощью условного форматирования настроим таблицу ссылок 3d-графика. Красным цветом обозначим ячейки, значения которых превышают 0.1, жёлтым цветом – ячейки со значениями от 0.05 до 0.1, и зелёным цветом – ячейки со значениями от 0 до 0.05. Такое цветовое разделение так же способствует быстрому анализу всех значений погрешностей, зависящих не только от R, но и от V.

Фрагмент таблицы ссылок:

	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.219367	18126	14356	12328	11011	1007	09355
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
92644	91342	87383	85254	83872	82883	82133
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
70709	69345	65198	62967	61519	60484	59698
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
52565	51139	46804	44472	42958	41875	41053
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
37455	35967	31443	2901	2743	263	25443
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
24795	23245	18533	15999	14353	13177	12283
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
14132	1252	0762	04985	03274	0205	01121
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
05108	03435	98348	95611	93835	92565	916
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
97442	95707	90433	87596	85754	84438	83438
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90907	8911	8365	80713	78806	77442	76407
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
85319	83462	77816	74778	72806	71396	70326
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
80532	78613	72782	69644	67608	66152	65046
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
76423	74443	68427	6519	63089	61586	60446
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72892	70852	64651	61315	59149	57601	56425

Для этого создаём 3 правила:

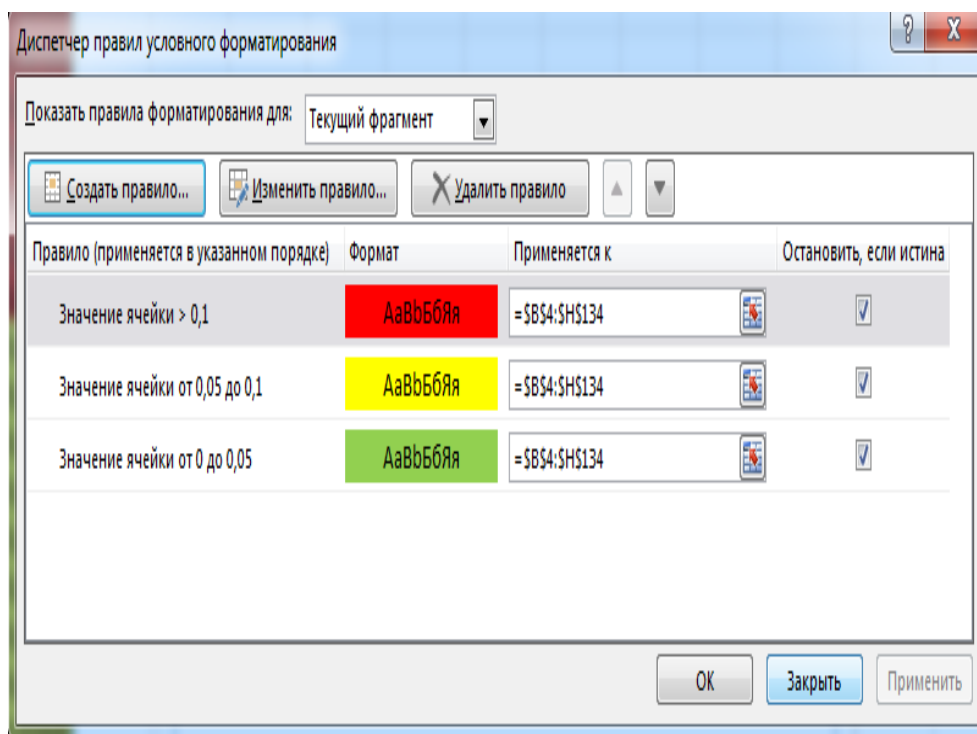


Рис 3.7 Диспетчер правил

С помощью условного форматирования настроим таблицу ссылок 3d-графика. Красным цветом обозначим ячейки, значения которых превышают 0.1, жёлтым цветом – ячейки со значениями от 0.05 до 0.1, и зелёным цветом – ячейки со значениями от 0 до 0.05. Такое цветовое разделение так же способствует быстрому анализу всех значений погрешностей, зависящих не только от R , но и от V .

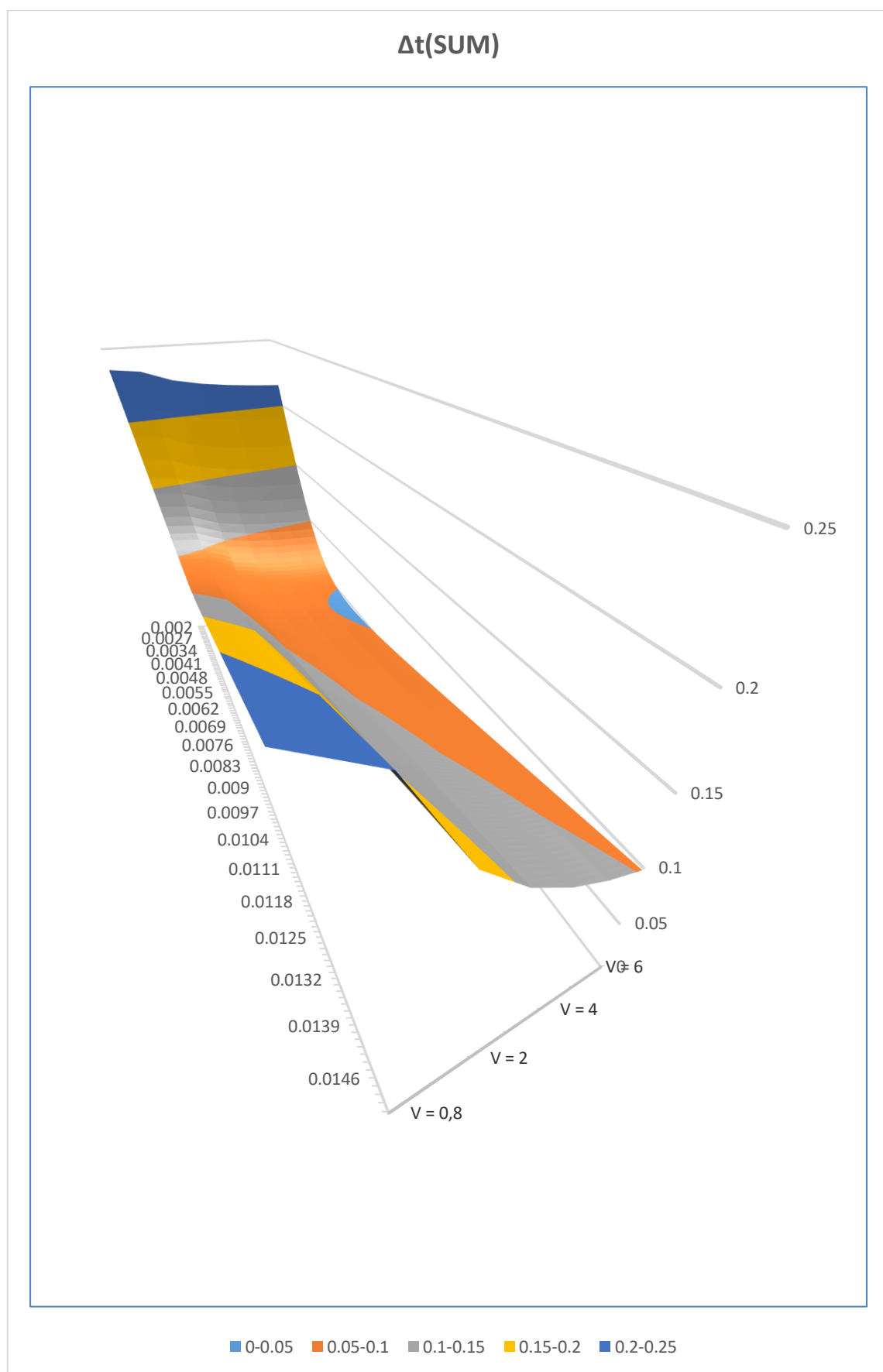


Рис 3.8. 3D график при Гамма равной 0,002 15 мм

Фрагмент таблицы ссылок:

0.236284	0.233803	0.226262	0.222206	0.219573	0.21769	0.21626
0.210404	0.2078	0.199883	0.195625	0.19286	0.190883	0.189382
0.189315	0.186586	0.178293	0.173832	0.170935	0.168864	0.167292
0.172016	0.169164	0.160494	0.15583	0.152802	0.150637	0.148993
0.157751	0.154775	0.145728	0.140861	0.137702	0.135443	0.133728
0.145936	0.142835	0.133412	0.128343	0.125052	0.122699	0.120913
0.136115	0.132891	0.123092	0.117821	0.114399	0.111952	0.110095
0.127933	0.124585	0.114412	0.108939	0.105386	0.102846	0.100917
0.121105	0.117635	0.107088	0.101414	0.09773	0.095096	0.093097
0.115407	0.111814	0.100893	0.095018	0.091205	0.088478	0.086408
0.110654	0.106938	0.095646	0.089571	0.085628	0.082808	0.080667
0.106698	0.102861	0.091198	0.084923	0.08085	0.077938	0.075727
0.103419	0.09946	0.087427	0.080954	0.076751	0.073747	0.071465
0.100717	0.096636	0.084234	0.077562	0.073231	0.070134	0.067783
0.098508	0.094306	0.081536	0.074666	0.070206	0.067017	0.064596
0.096723	0.092401	0.079263	0.072196	0.067607	0.064327	0.061836
0.095305	0.090862	0.077358	0.070094	0.065378	0.062006	0.059446
0.094205	0.089642	0.075773	0.068312	0.063468	0.060005	0.057376
0.093383	0.0887	0.074466	0.066809	0.061838	0.058284	0.055585
0.092802	0.088	0.073402	0.065549	0.060451	0.056806	0.054039
0.092434	0.087512	0.072552	0.064503	0.059279	0.055543	0.052707
0.092253	0.087212	0.071889	0.063646	0.058294	0.054468	0.051563
0.092237	0.087076	0.071392	0.062954	0.057477	0.05356	0.050587
0.092366	0.087087	0.071042	0.06241	0.056806	0.0528	0.049758
0.092625	0.087227	0.070822	0.061996	0.056267	0.05217	0.04906
0.092999	0.087483	0.070718	0.061699	0.055844	0.051658	0.048479
0.093476	0.087842	0.070718	0.061506	0.055525	0.051249	0.048003
0.094046	0.088293	0.07081	0.061405	0.0553	0.050934	0.04762
0.094697	0.088827	0.070986	0.061388	0.055158	0.050703	0.047321
0.095423	0.089435	0.071237	0.061447	0.055091	0.050547	0.047097
0.096215	0.09011	0.071554	0.061572	0.055092	0.050459	0.046941
0.097067	0.090845	0.071933	0.061759	0.055154	0.050432	0.046847
0.097974	0.091634	0.072366	0.062001	0.055272	0.050461	0.046808
0.09893	0.092473	0.07285	0.062293	0.05544	0.05054	0.04682
0.09993	0.093357	0.073378	0.06263	0.055653	0.050665	0.046877
0.100971	0.094281	0.073948	0.063009	0.055908	0.050831	0.046976
0.10205	0.095243	0.074555	0.063426	0.056201	0.051035	0.047113
0.103161	0.096238	0.075196	0.063876	0.056528	0.051274	0.047284
0.104304	0.097264	0.075869	0.064359	0.056886	0.051544	0.047488
0.105475	0.098319	0.07657	0.064869	0.057274	0.051843	0.04772
0.106671	0.099399	0.077297	0.065407	0.057688	0.052169	0.047979
0.107891	0.100503	0.078048	0.065968	0.058126	0.052519	0.048262
0.109133	0.101629	0.078821	0.066552	0.058587	0.052892	0.048568

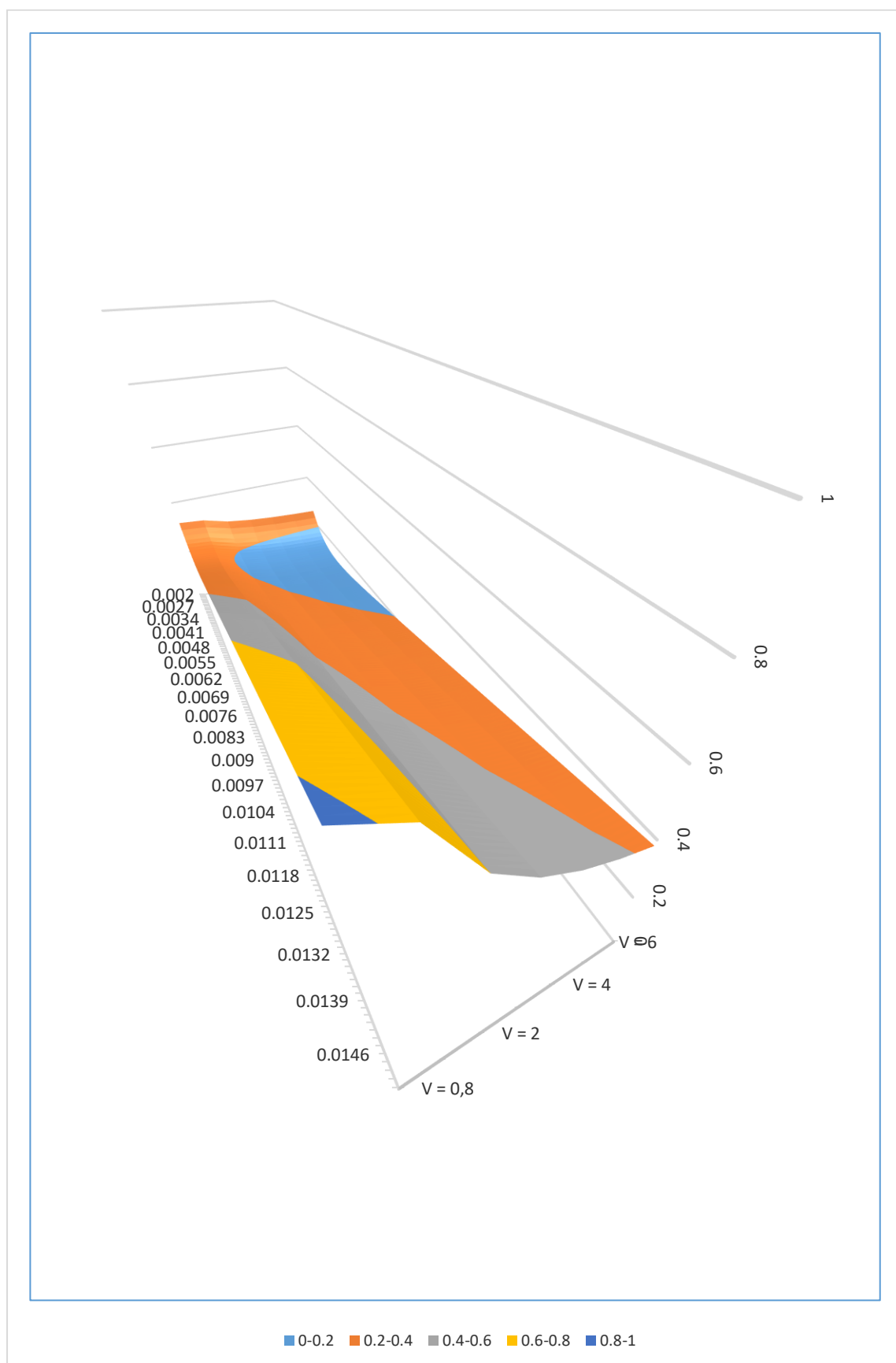


Рис 3.9. 3 D график гамма 0,004 при 15 мм

Фрагмент таблицы ссылок:

0.270119	0.265157	0.250076	0.241963	0.236696	0.23293	0.230071
0.245926	0.240716	0.224883	0.216366	0.210837	0.206883	0.203882
0.226526	0.221069	0.204483	0.19556	0.189767	0.185626	0.182481
0.210919	0.205214	0.187874	0.178546	0.17249	0.16816	0.164873
0.198345	0.192392	0.174298	0.164564	0.158245	0.153727	0.150297
0.188217	0.182017	0.16317	0.153032	0.14645	0.141744	0.138171
0.180082	0.173634	0.154037	0.143494	0.13665	0.131757	0.128041
0.173581	0.166887	0.14654	0.135594	0.128488	0.123407	0.11955
0.168432	0.161491	0.140396	0.129048	0.121681	0.116414	0.112415
0.164406	0.15722	0.13538	0.12363	0.116003	0.110549	0.106408
0.161322	0.153892	0.131307	0.119157	0.11127	0.105631	0.101349
0.159032	0.151357	0.12803	0.115482	0.107335	0.101511	0.097088
0.157413	0.149495	0.125428	0.112481	0.104076	0.098067	0.093504
0.156366	0.148205	0.1234	0.110056	0.101394	0.0952	0.090498
0.155808	0.147405	0.121864	0.108124	0.099205	0.092827	0.087985
0.155671	0.147026	0.120751	0.106616	0.09744	0.090879	0.085898
0.155897	0.147011	0.120003	0.105474	0.096042	0.089299	0.084178
0.156437	0.14731	0.119572	0.10465	0.094963	0.088036	0.082778
0.15725	0.147884	0.119416	0.104102	0.09416	0.087052	0.081655
0.158302	0.148696	0.119501	0.103795	0.093599	0.086309	0.080775
0.159562	0.149718	0.119797	0.103701	0.093251	0.08578	0.080107
0.161007	0.150924	0.120278	0.103792	0.09309	0.085437	0.079628
0.162613	0.152292	0.120923	0.104048	0.093093	0.08526	0.079313
0.164362	0.153803	0.121713	0.104449	0.093242	0.085229	0.079145
0.166237	0.155442	0.122631	0.10498	0.093521	0.085328	0.079107
0.168225	0.157193	0.123663	0.105625	0.093915	0.085542	0.079185
0.170314	0.159045	0.124797	0.106372	0.094411	0.085859	0.079367
0.172491	0.160987	0.126021	0.107211	0.095	0.086269	0.07964
0.174749	0.163009	0.127328	0.108132	0.095671	0.086761	0.079997
0.177079	0.165104	0.128707	0.109127	0.096416	0.087328	0.080428
0.179473	0.167263	0.130152	0.110188	0.097228	0.087961	0.080926
0.181925	0.16948	0.131656	0.111309	0.0981	0.088655	0.081484
0.184429	0.17175	0.133214	0.112484	0.099026	0.089403	0.082098
0.186981	0.174068	0.134821	0.113707	0.100001	0.090201	0.082761
0.189575	0.176428	0.136471	0.114975	0.101021	0.091044	0.083468
0.192208	0.178828	0.138161	0.116284	0.102082	0.091927	0.084217
0.194877	0.181263	0.139887	0.117629	0.103179	0.092847	0.085003
0.197577	0.183731	0.141647	0.119007	0.10431	0.093802	0.085823
0.200307	0.186228	0.143436	0.120416	0.105472	0.094787	0.086674
0.203063	0.188752	0.145253	0.121853	0.106662	0.0958	0.087554
0.205844	0.1913	0.147096	0.123315	0.107878	0.09684	0.08846
0.208647	0.193871	0.148961	0.124801	0.109117	0.097903	0.089389
0.21147	0.196462	0.150847	0.126308	0.110378	0.098988	0.09034

При данных параметрах нет оптимальных значений радиуса резервуара.

Подводя итог выполненным расчетам, заметим следующее.

Предложена методика расчета погрешностей термометра в зависимости от размеров его чувствительного элемента. Проведенные расчеты для ртутного шарообразного термометра свидетельствуют о возрастании минимальной возможной погрешности при увеличении размеров датчика. Это возрастание обуславливается прежде всего инерционной погрешностью.

Инерционная погрешность в значительной степени зависит от скорости ветра и от скорости изменения температуры воздуха. При увеличении скорости ветра она уменьшается, а при увеличении скорости изменения температуры воздуха – возрастает.

Ртутные термометры с шарообразным резервуаром пригодны для измерения суточных и погодных изменений температуры, но совершенно непригодны для регистрации случайных флуктуаций температуры. Для этих целей необходимо применять, например, термометры сопротивления со специальной конструкцией датчика.

Глава 4. Минимизация погрешностей цилиндрического термометра.

Цилиндрический ртутный термометр ТМ4-1 представлен на рисунке (4.1).



Рисунок 4.1 – цилиндрический термометр ТЛ – 4.

Представляется необходимым изучить, каким образом влияет форма и объем цилиндрического резервуара на погрешность измерения. Как известно погрешности складываются из двух основных величин – шкаловая погрешность и инерционная погрешность [1, 2]. Величина шкаловой погрешности может быть определена из чувствительности термометра S :

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta h}{S}, \quad (4.1)$$

где Δh – смещение столбика ртути (или другой жидкости) при изменении температуры на величину Δt_1 .

Инерционная погрешность [1–4] определяется как произведение скорости изменения температуры окружающей среды γ на коэффициент тепловой инерции термометра λ :

$$\Delta t_2 = \gamma \lambda. \quad (4.2)$$

Полная погрешность термометра определяется как сумма $\Delta t_1 + \Delta t_2$. Чувствительность ртутного термометра [1–4] есть производная от выходной величины h по входной t , где h – высота ртути в капилляре, t – температура. Коэффициент тепловой инерции термометра есть время, в течение которого разность температур между термометром и средой изменяется в e раз. Рассчитаем чувствительность термометра с цилиндрическим резервуаром из следующих условий.

Объем ртути dV , перешедший в капилляр при изменении температуры на величину dt :

$$dV = V\beta dt = \pi(R-d)^2(H-2d)\beta dt, \quad (4.3)$$

где V – объём резервуара, β – коэффициент объемного расширения ртути, H – высота цилиндрического резервуара, R – его радиус, d – толщина стенки резервуара.

Этот же объем ртути в капилляре, имеющем радиус r :

$$dV = \pi r^2 dh, \quad (4.4)$$

где dh – изменение высоты ртутного столбика в капилляре.

Приравнивая (3) и (4), получаем чувствительность термометра:

$$S = \frac{dh}{dt} = \left(\frac{R-d}{r}\right)^2 H\beta. \quad (4.5)$$

Тогда шкаловая погрешность:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta h}{S} = \left(\frac{r}{R-d}\right)^2 \frac{1}{(H-2d)\beta} \quad (4.6)$$

Для нахождения инерционной погрешности воспользуемся формулой для вычисления коэффициента тепловой инерции термометра $\lambda[1]$:

$$\lambda = \frac{m_1 C_1 + m_2 C_2}{\alpha S}, \quad (4.7)$$

где m_1 и m_2 – соответственно масса ртути и стекла в резервуаре, C_1 и C_2 – удельная теплоемкость ртути и стекла соответственно, α – коэффициент конвективного теплообмена системы «резервуар – окружающая среда», s – внешняя поверхность резервуара.

Массу ртути в резервуаре найдем как:

$$m_1 = \rho_1 V = \rho_1 \pi (R-d)^2 (H-2d) \quad (4.8)$$

где ρ_1 – плотность ртути, d – толщина стенки резервуара.

Масса стекла складывается из массы боковой поверхности цилиндра и массы его торцов:

$$m_2 = 2\pi d \rho_2 \left(\left(R - \frac{d}{2}\right) H + R^2 \right). \quad (4.9)$$

Величину внешней поверхности цилиндрического резервуара найдем по известной формуле:

$$s = \pi R(2H + R) \quad (4.10)$$

Объединяя формулы (4.2, 4.8-4.11), найдем величину инерционной погрешности термометра:

$$\Delta t_2 = \gamma \lambda = \gamma \frac{\rho_1(R-d)^2 H C_1 + 2\rho_2 d((R - \frac{d}{2})H + R^2) C_2}{\alpha R(2H + R)} \quad (4.11)$$

Анализируя формулы (4.6) и (4.11), можно заметить, что полная погрешность термометра с цилиндрическим резервуаром является функцией следующих четырех переменных:

- радиуса резервуара R ,
- высоты резервуара H ,
- скорости изменения температуры воздуха γ ,
- коэффициента α конвективного теплообмена резервуара с окружающей средой, который зависит от скорости ветра V .

Зависимость α от V для цилиндрического резервуара приводится в работе [5]:

$$\alpha = 24,49 + 30,67 \cdot V^{0,7} \quad (4.12)$$

По формулам (4.6) и (4.11) с учетом зависимости (4.12) были проделаны расчеты. В расчетах приняты следующие численные значения. Радиус капилляра $r = 0,06$ мм, значение $\Delta h = 0,33$ мм, значение $d = 2,25$ мм. Указанные значения взяты из работы [1], где в качестве образца принят ртутный термометр ТМ-4. Остальные константы, так же как и в работе [1], взяты из справочника [6]:

плотность ртути $\rho_1 = 13,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;

удельная теплоемкость ртути $C_1 = 140 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

плотность стекла $\rho_2 = 2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;

удельная теплоемкость стекла $C_2 = 840 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

коэффициент объемного расширения ртути $\beta = 0,181 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

Расчеты проводились в достаточно широком спектре изменения основных переменных. Так, скорость ветра варьировалась в пределах от 0,8 до 6 м/с, скорость изменения температуры воздуха от 0,001 К/с (около 3,6 градуса в час) до 0,004 К/с (около 15 градусов в час). Были взяты следующие значения радиуса резервуара – 0,003 м, 0,005 м и 0,007 м. Высота цилиндрического резервуара H варьировалась от 0,003 м до 0,035 м. Основные графики построены как зависимость погрешности Δt_{tot} высоты резервуара H . Отдельно считалась шкаловая погрешность $\Delta t(S)$, инерционная погрешность $\Delta t(\lambda)$ и суммарная погрешность $\Delta t(\text{sum})$.

Результаты расчетов свидетельствуют о следующих тенденциях изменения погрешности.

1. При быстром изменении температуры воздуха ($\gamma = 0.004 \text{ К/с}$) и широком резервуаре термометра ($R = 0,007 \text{ м}$) наблюдается ярко выраженный минимум зависимости $\Delta t(\text{sum})$ от высоты резервуара. Минимум наблюдается при H около 0,004 м и соответствует $\Delta t(\text{sum}) = 0,25 \text{ С}$ при $V=0,8 \text{ м/с}$. При большей скорости ветра минимум сдвигается в сторону больших значение погрешности уменьшается до 0,12 С при $V=6 \text{ м/с}$ (Рис. 4.2).

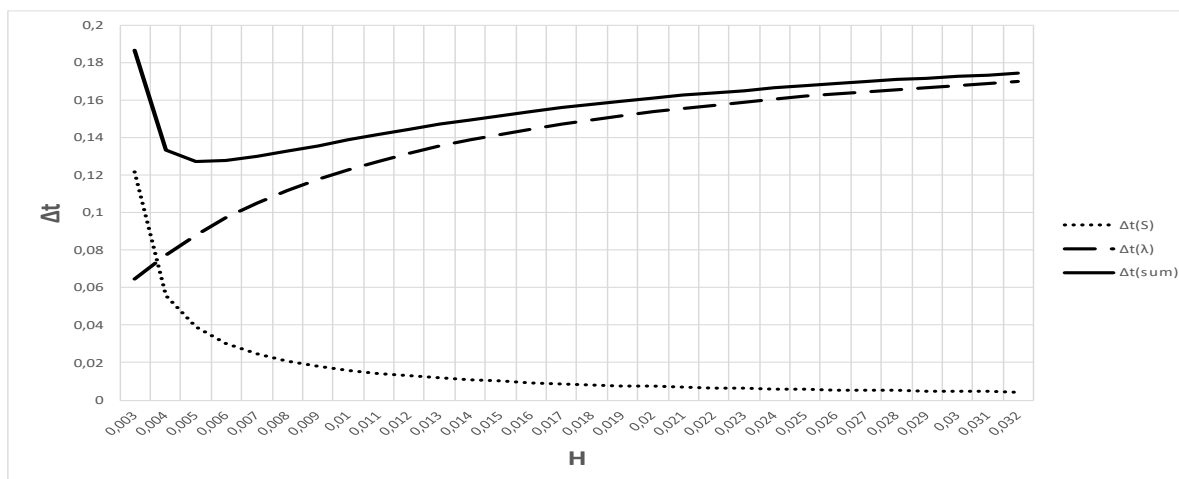


Рис.4.2. Зависимость погрешности измерения температуры при $\gamma = 0.004$ К/с и $R = 0.007$ м для случая $V=6$ м/с.

2. Если при той же скорости изменения температуры среды применить термометр с более широким резервуаром ($R = 0.007$ м), то погрешность уменьшается, а минимум становится менее четким при больших значениях скорости ветра ($V = 6$ м/с). Минимальные значения погрешности составляют около 0,1 С при H порядка 0,005 м.
3. При уменьшении скорости изменения температуры среды погрешность во всех случаях уменьшается (за счет уменьшения инерционной погрешности). При $\gamma = 0.001$ К/с кривая с минимумом наблюдается только при достаточно большом значении радиуса ($R = 0.007$ м) и малой скорости ветра ($V = 0.8$ м/с). Во всех других случаях получены плавно убывающие кривые зависимости $\Delta t(\text{sum})$ от высоты резервуара. Наименьшие значения суммарной погрешности получены при $R = 0.003$ м и скорости ветра 6 м/с, погрешность составляет около 0,03 С при H порядка 0,03 м. (рис.4.3).

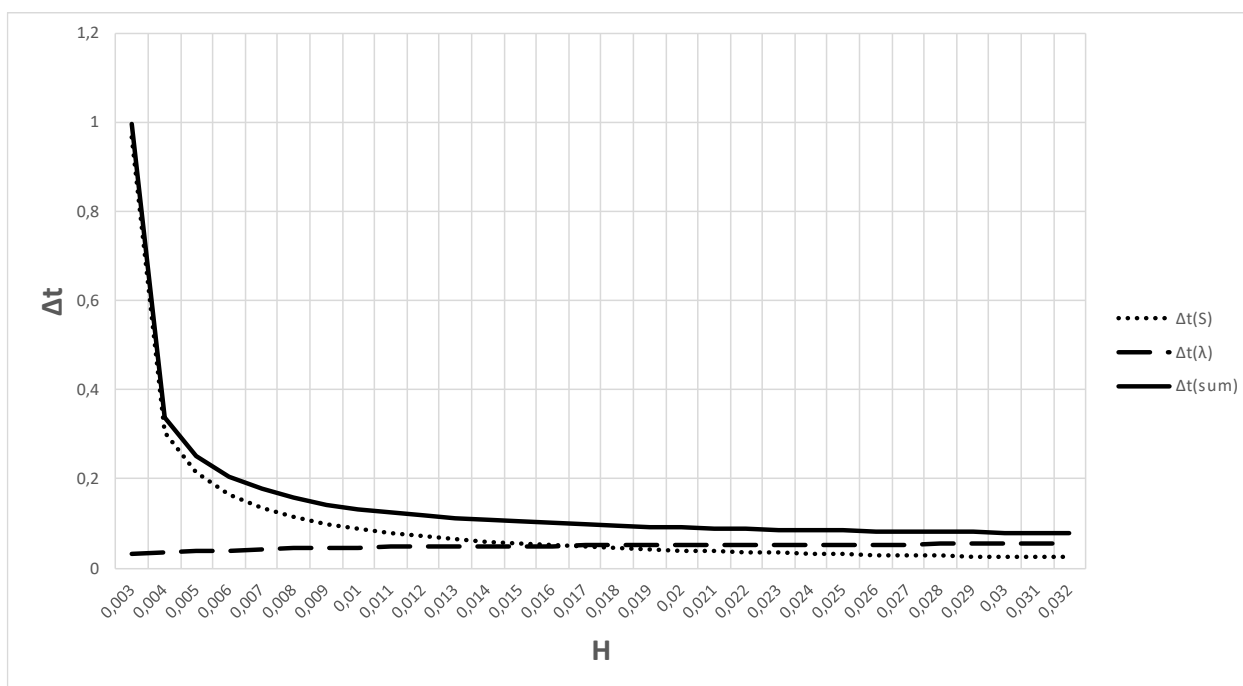


Рис. 4.3. Зависимость погрешности измерения температуры при $\gamma = 0.001$ К/с и $R = 0.003$ м для случая $V = 6$ м/с.

Полученные в работе формулы и основные закономерности можно использовать для расчета погрешностей существующих термометров. Скорость изменения температуры воздуха нетрудно определить путем численного дифференцирования ряда измеренных значений.

Были проведены расчеты суммарной погрешности термометра в зависимости от радиуса его резервуара. Результаты расчета представлены на рисунке 4.4. Видно, что график суммарной погрешности имеет минимум, равный 0,09 градуса при радиусе резервуара, равном 0,004 м (4 мм), а при значениях внешнего радиуса от 0,0032 до 0,0053 м погрешность не превышает 0,1 градуса. Указанные значения рассчитаны для скорости ветра 0,8 м/с, принятой для термометров в психрометрической будке.

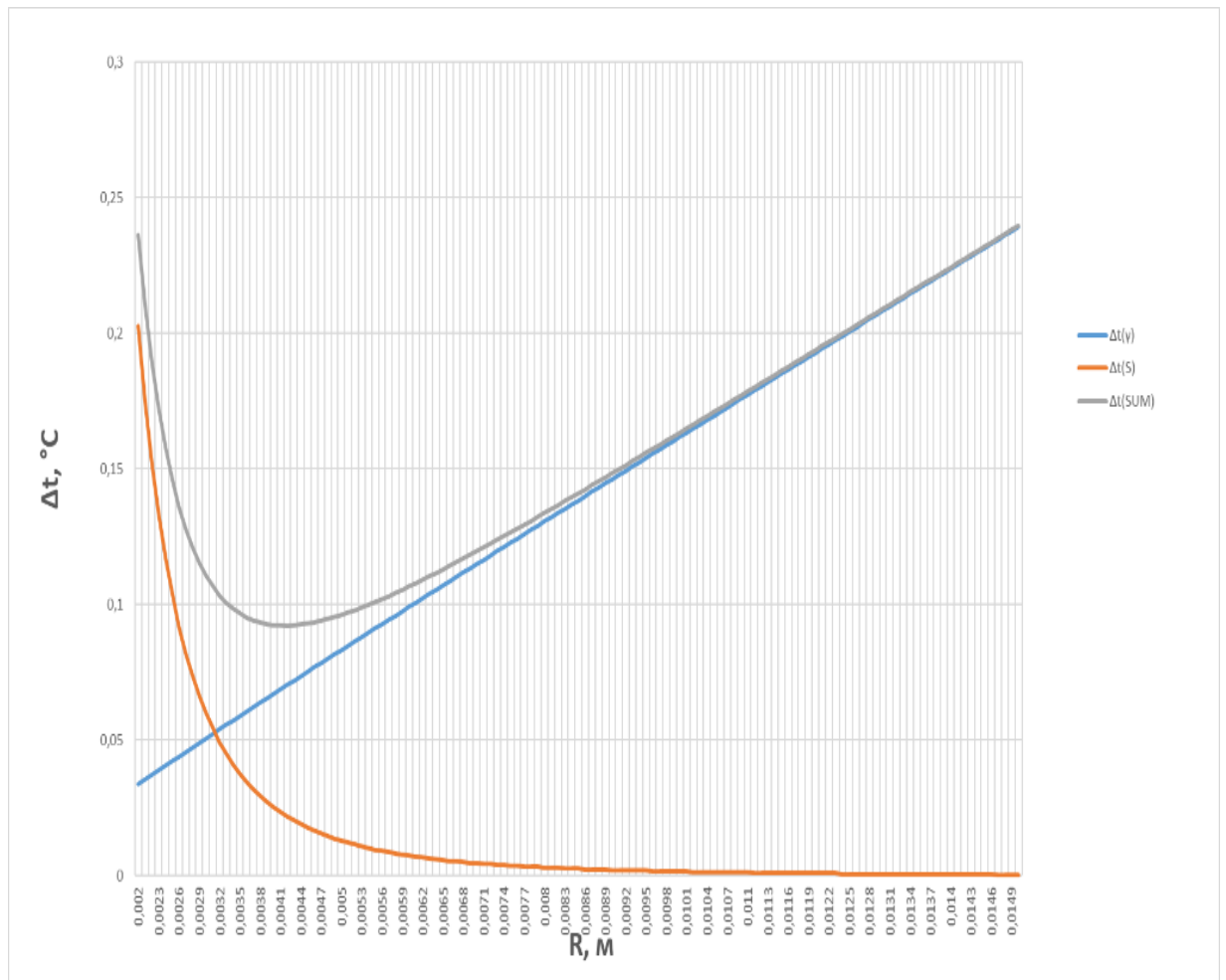


Рис.4.4. Зависимость погрешности термометра от радиуса внешнего резервуара при скорости ветра 0,8 м/с.

Картина меняется других значениях скорости ветра. Для скорости ветра 6 м/с (Рис.4.5) минимальная погрешность не превышает 0,05 градуса и достигается при радиусе, равном 5 мм. Возможные значения радиуса резервуара, при которых погрешность не превышает 0,1 градуса, теперь расширяются и находятся в интервале от 0,0027 до 0,015 м.

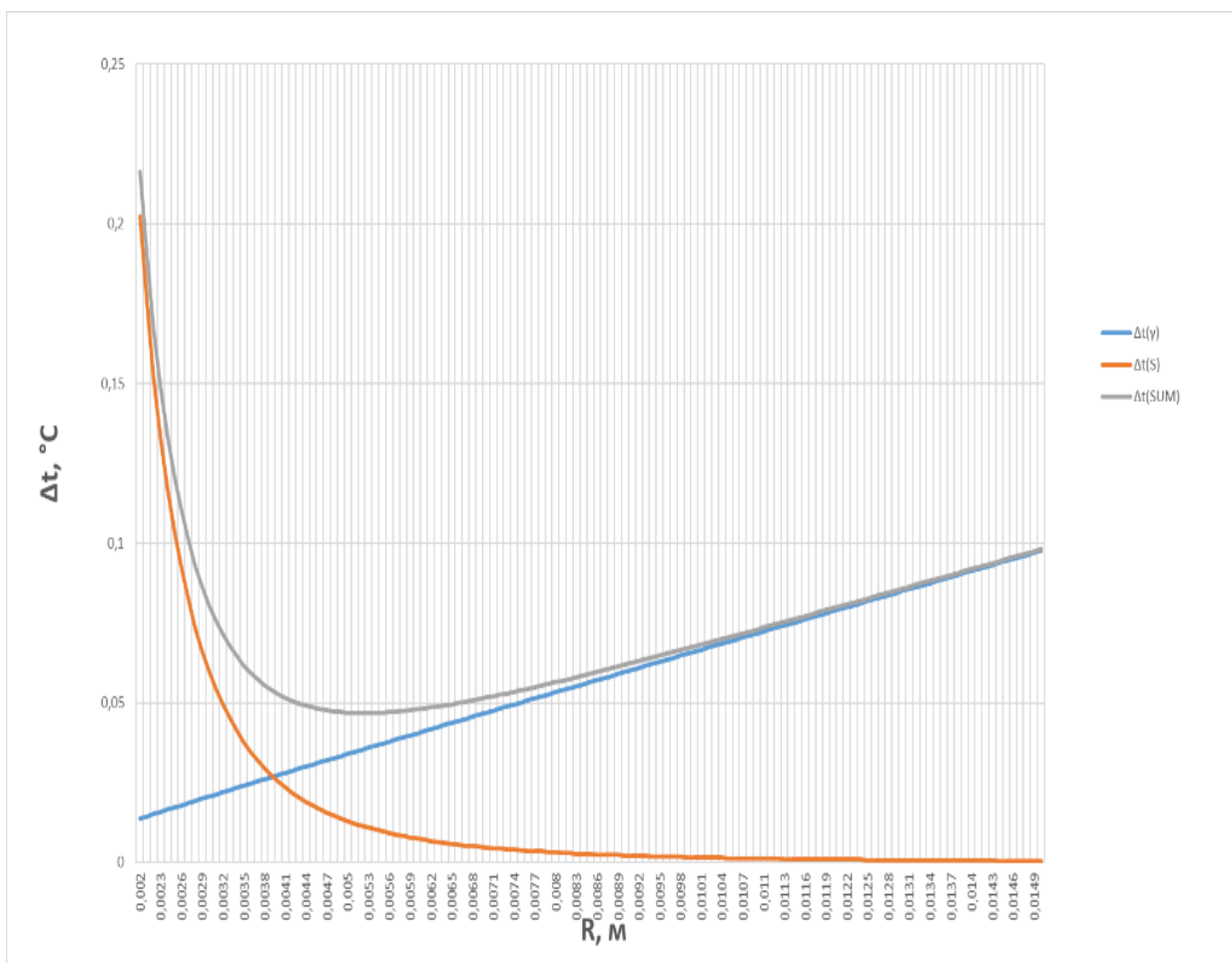


Рис.4.5. Зависимость погрешности термометра от радиуса внешнего резервуара при скорости ветра 6 м/с.

Для наглядности приведем еще зависимость интервала значений радиуса, при котором погрешность не превышает 0,1 градуса, от скорости ветра (Рис 4.4 и 4.5). Видно, что с увеличением скорости ветра этот интервал расширяется. Само же значение минимальной погрешности уменьшается, а радиус резервуара, при котором она достигается, возрастает. Расчеты сделаны для двух значений скорости изменения температуры воздуха $\gamma = 0,001$ и $0,002$ К/с, что соответствует примерно от 3.6 до 7.2 градуса в час. При меньших значениях γ могут быть достигнуты еще меньшие значения погрешности.

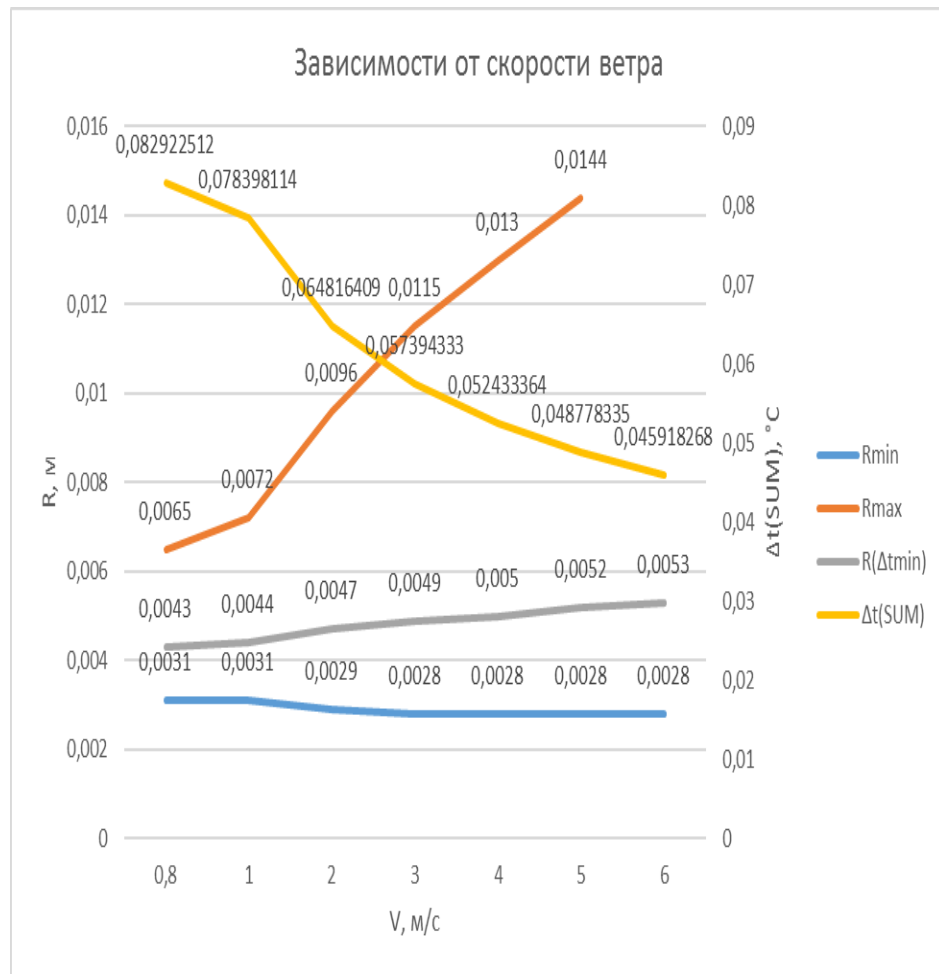


Рис. 4.6. Зависимость от скорости ветра пределов изменения радиуса, при котором погрешность не превышает 0,1 градуса, минимальной возможной погрешности, и значения радиуса, при котором эта погрешность достигается. Значение $\gamma = 0,001 \text{ K/c}$.

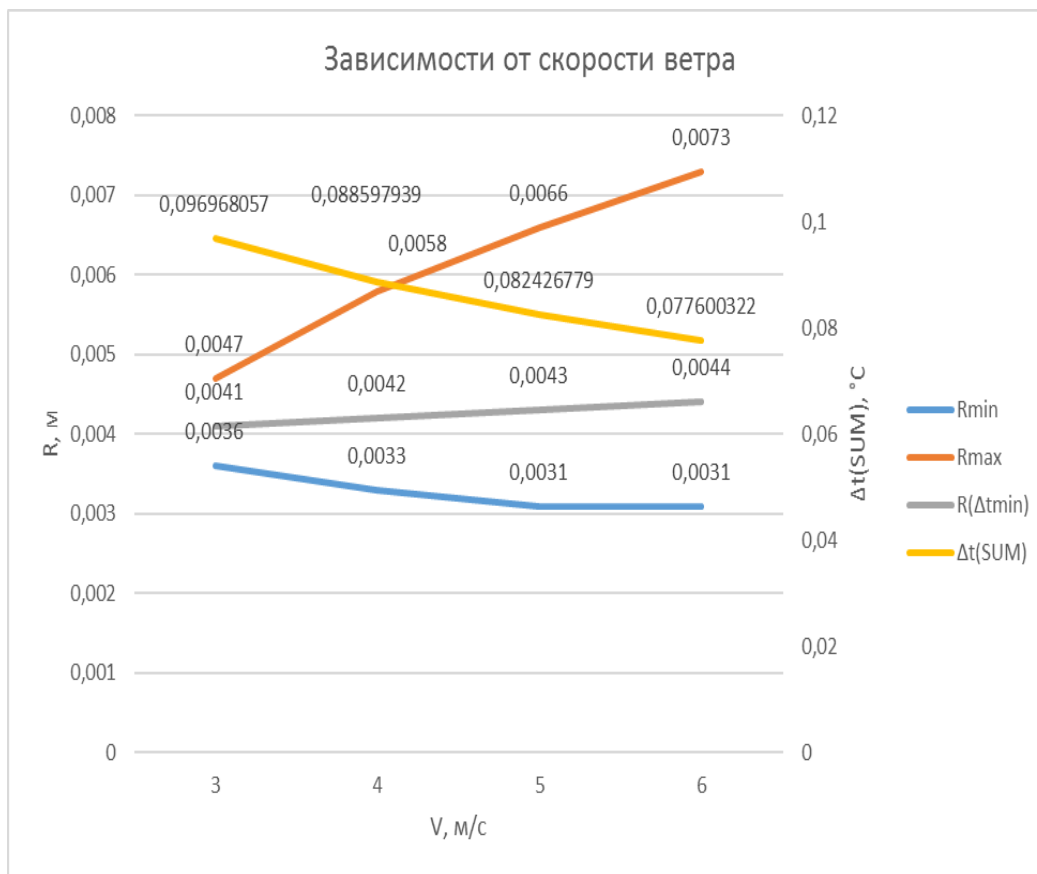


Рис.4.7. . Зависимость от скорости ветра
 пределов изменения радиуса, при котором
 погрешность не превышает 0,1 градуса,
 минимальной возможной погрешности, и значения
 радиуса, при котором эта погрешность достигается.
 Значение $\gamma = 0,002 \text{ K/с}$.

Такие значения скорости изменения температуры характерны для быстро изменяющейся погоды. Для суточных изменений погоды характерны гораздо меньшие значения γ . Для случайных флуктуаций температуры значения γ , наоборот, гораздо большее. Следовательно, значения погрешности измерений будут гораздо больше.

Выводы

1. Предложена методика расчета погрешностей термометра в зависимости от размеров его чувствительного элемента. Проведенные расчеты для ртутного шарообразного термометра свидетельствуют о возрастании минимальной возможной погрешности при увеличении размеров датчика. Это возрастание обуславливается прежде всего инерционной погрешностью.

2. Инерционная погрешность в значительной степени зависит от скорости ветра и от скорости изменения температуры воздуха. При увеличении скорости ветра она уменьшается, а при увеличении скорости изменения температуры воздуха – возрастает.

3. Для скорости ветра 0,8 м/с, принятой для термометров в психрометрической будке, суммарная погрешность шарообразного датчика минимальна и равна 0,09 градуса при радиусе резервуара, равном 0,004 м (4 мм). При значениях внешнего радиуса от 0,0032 до 0,0053 м погрешность не превышает 0,1 градуса.

4. При увеличении скорости ветра до 6 м/с минимальная погрешность не превышает 0,05 градуса и достигается при радиусе, равном 5 мм. Возможные значения радиуса резервуара, при которых погрешность не превышает 0,1 градуса, теперь расширяются и находятся в интервале от 0,0027 до 0,015 м. При еще большем значении скорости ветра минимальная суммарная погрешность становится еще меньше.

5. Существенное влияние на погрешность измерений оказывает скорость измерения температуры воздуха. Расчеты сделаны для двух значений скорости изменения температуры воздуха $\gamma = 0,001$ и $0,002$ К/с, что соответствует примерно от 3.6 до 7.2 градуса в час. Как ясно из формулы (3), при меньших значениях γ могут быть достигнуты еще меньшие значения погрешности.

6. Для цилиндрического датчика минимум погрешности наблюдается только при быстром изменении температуры воздуха ($\gamma = 0.004 \text{ K/s}$) и широком резервуаре термометра ($R = 7 \text{ мм}$). Эта минимальная погрешность равна $0,33 \text{ K}$ и достигается при высоте резервуара около 5 мм .

7. При значениях радиуса цилиндрического датчика меньше 7 мм (что обычно для жидкостных термометров) и скорости ветра больше $0,8 \text{ м/с}$ наблюдается плавная зависимость суммарной погрешности от высоты резервуара h с уменьшением погрешности при увеличении высоты резервуара. Это дает возможность практически сколь угодно снизить погрешность измерения. Например, при значении $h = 3,2 \text{ см}$ погрешность не превышает $0,05 \text{ K}$.

8. Имеются возможности для уменьшения погрешности измерения температуры с помощью ртутных термометров путем правильного подбора значений радиуса и высоты резервуара. Наиболее выгодным представляется увеличение длины цилиндрического резервуара, так как увеличение радиуса неизбежно увеличивает инерционную погрешность. Весьма перспективно уменьшение погрешности с помощью искусственного обдува (аспирации) термометра.

9. Для измерения флуктуаций температуры, при которых скорость изменения температуры воздуха достигает больших значений, ртутные термометры следует считать непригодными.

Результаты могут быть использованы при проектировании термометров с целью снижения погрешностей измерения, а также для расчета погрешности применяющихся термометров.

Литература

1. Григоров Н.О., Светачева А.А. Методика определения погрешностей датчиков температуры шарообразной формы [статья], международная практическая конференция <<Узбекистан в Центральноазиатском районе – география, геоэкономика, геоэкология>>, 11-12 мая 2017 г., г.Ташкент.
2. Григоров Н.О., Саенко А.Г. Восканян К.Л. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. //Учебник по курсу//. - С-Пб.: РГГМУ, 2012.– 306 с.
3. Качурин Л.Г. Методы метеорологических измерений. Методы зондирования атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985.– 465 с.
4. Григоров Н.О., Восканян К.Л., Караваева М.С. О соотношении чувствительности и тепловой инерции различных типов термометров. Труды РГГМУ, №33, 2014 г., СПб, с. 69-77.
5. Тепловая инерция чувствительного элемента термометров и исследование его теплообмена с окружающей средой. Григоров Н.О., Савченко Г.А. Заочный доклад на III Международном молодежном научном форуме «Молодая наука - 2015», посвященным 70-летию Победы в Великой Отечественной войне. Туапсе, март 2015 г.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике. Перевод с немецкого под ред. Е.М.Лейкина. М.: Мир, 1983.– 520 с.
7. Григоров 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 2017 г.

8. Светачева А.А. Погрешности ртутных термометров с шарообразными резервуарами [текст] / студенческое научное общество РГГМУ: тезисы доклада, апрель 2017 г.
9. Светачева А.А. Погрешности ртутных термометров с цилиндрическим резервуаром [статья] / 2017 г.
10. Светачева А.А. Исследование погрешностей датчиков температуры [доклад]/ Всероссийская конференция <<Гидрометеорологии и экологии: Достижения и перспективы развития>>, 19-20 декабря 2018 г., г. Санкт-Петербург.

Примечание

Фрагмент таблицы ссылок из главы 3 для графика 3.6

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69857	67756	61371	57936	55706	54112	52901
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
67249	65088	58519	54985	52691	51051	49806
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65009	62788	56036	52404	50046	4836	4708
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6309	60808	53874	50143	47721	4599	44675
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
61449	59108	51991	48162	45677	439	42551
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60053	57651	50353	46426	43877	42055	40671
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5887	56409	48929	44905	42292	40425	39006
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57876	55355	47694	43572	40897	38984	37531
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57049	54468	46626	42407	39669	3771	36224
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
56368	53729	45706	4139	38588	36585	35064
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55819	5312	44917	40505	3764	35592	34037
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55386	52628	44246	39736	36809	34716	33126
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55058	52241	43679	39072	36082	33944	32321

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54823	51946	43205	38502	3545	33267	3161
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54671	51736	42815	38017	34901	32674	30983
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54594	51601	42501	37606	34429	32157	30432
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54586	51533	42256	37265	34025	31708	29949
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54638	51527	42071	36984	33682	31321	29528
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54746	51576	41942	3676	33395	3099	29163
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
54904	51676	41864	36586	33159	30709	28849
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55108	51821	41832	36458	32969	30475	28581
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55353	52008	41841	36372	32821	30283	28355
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55636	52233	41889	36324	32712	30129	28168
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55953	52492	41971	36311	32637	3001	28015
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
56302	52783	42085	3633	32594	29922	27894
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5668	53102	42228	36378	3258	29865	27803
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57085	53449	42397	36452	32593	29834	27738

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57513	53819	42592	36552	32631	29827	27699
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57964	54212	42809	36674	32691	29844	27682
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
58436	54626	43046	36817	32773	29881	27686
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
58926	55059	43303	36979	32873	29938	27709
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
59435	55509	43577	37159	32992	30012	2775
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
59959	55975	43868	37355	33127	30103	27808
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60498	56457	44174	37566	33277	3021	27881
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
61051	56952	44494	37792	33441	3033	27968
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
61617	57461	44827	38031	33619	30464	28069
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
62195	57981	45172	38281	33808	3061	28182
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
62784	58512	45528	38544	34009	30767	28306
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
63384	59054	45895	38816	34221	30935	2844
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
63993	59606	46272	39099	34442	31112	28585
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
64611	60166	46657	3939	34672	31299	28738

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65237	60735	47051	3969	34911	31495	28901
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65871	61311	47453	39998	35159	31698	29071
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
66512	61895	47863	40314	35413	31909	29249
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6716	62486	48279	40636	35675	32127	29434
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
67815	63083	48702	40965	35943	32351	29625
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
68476	63686	49131	413	36217	32582	29823
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69142	64295	49565	41641	36497	32819	30026
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69813	64909	50005	41987	36782	3306	30235
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
70489	65528	5045	42338	37073	33307	30449
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7117	66152	509	42694	37368	33559	30668
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71856	6678	51354	43055	37667	33815	30891
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72545	67412	51812	4342	37971	34076	31119
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
73238	68048	52274	43788	38279	34341	3135
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
73935	68688	5274	44161	38591	34609	31586

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
74635	69331	53209	44537	38906	34881	31824
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75339	69977	53682	44916	39225	35156	32067
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
76045	70627	54158	45298	39547	35435	32312
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
76755	71279	54637	45684	39872	35716	32561
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
77467	71934	55118	46072	40199	36	32812
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
78182	72592	55602	46463	4053	36287	33066
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
78899	73252	56089	46856	40862	36577	33323
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
79618	73914	56578	47252	41198	36869	33582
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8034	74579	57069	4765	41535	37163	33844
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
81063	75246	57563	4805	41875	37459	34107
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
81789	75914	58058	48452	42217	37758	34373
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
82517	76585	58556	48857	4256	38058	3464
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
83246	77257	59055	49263	42906	38361	3491
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
83977	77931	59556	4967	43253	38665	35181

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
84709	78607	60058	5008	43602	3897	35454
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
85443	79284	60562	50491	43953	39278	35729
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
86179	79962	61068	50903	44305	39587	36005
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
86915	80642	61575	51317	44658	39897	36282
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
87654	81323	62083	51732	45013	40209	36561
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
88393	82006	62592	52149	45369	40522	36841
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
89133	82689	63103	52567	45727	40836	37123
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
89875	83374	63615	52986	46085	41151	37406
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90618	8406	64128	53406	46445	41468	37689
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
91361	84747	64642	53827	46806	41786	37974
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
92106	85435	65157	54249	47168	42105	3826
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
92852	86123	65673	54672	47531	42424	38547
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
93598	86813	6619	55096	47894	42745	38835
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
94345	87503	66708	55521	48259	43067	39124

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
95093	88195	67227	55947	48625	43389	39414
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
95842	88887	67747	56374	48991	43712	39705
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
96592	8958	68267	56801	49358	44036	39996
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
97342	90273	68788	5723	49726	44361	40288
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
98093	90967	69309	57658	50095	44687	40581
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
98845	91662	69832	58088	50464	45013	40875
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
99597	92358	70355	58518	50834	4534	41169
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0035	93054	70879	58949	51205	45668	41464
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
01103	9375	71403	59381	51576	45996	41759
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
01857	94448	71928	59813	51948	46325	42055
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
02611	95145	72453	60245	5232	46654	42352
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
03366	95843	72979	60678	52693	46984	42649
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
04122	96542	73505	61112	53067	47315	42947
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
04877	97241	74032	61546	53441	47645	43245

0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
05634	97941	74559	61981	53815	47977	43544
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0639	98641	75087	62416	5419	48309	43843
0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
07147	99341	75615	62851	54566	48641	44143
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
07905	00042	76144	63287	54941	48974	44443
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
08663	00743	76673	63724	55318	49307	44744
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
09421	01445	77202	6416	55694	49641	45045
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10179	02147	77732	64598	56071	49975	45346
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10938	02849	78262	65035	56448	50309	45648
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11697	03551	78792	65473	56826	50644	4595
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12457	04254	79323	65911	57204	50979	46252
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13217	04957	79854	66349	57582	51314	46555
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13977	05661	80385	66788	57961	5165	46858
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14737	06364	80917	67227	5834	51986	47161
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15497	07068	81449	67666	58719	52322	47465

0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16258	07772	81981	68106	59099	52659	47769
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17019	08477	82513	68546	59479	52995	48073
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1778	09181	83046	68986	59859	53332	48378
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18542	09886	83579	69426	60239	5367	48682
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19304	10591	84112	69867	60619	54007	48987
0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20065	11297	84645	70308	61	54345	49293

Фрагмент таблицы ссылок из главы 3 для графика 3.8

0.110395	0.102775	0.079615	0.067156	0.059068	0.053285	0.048894
0.111675	0.103939	0.080427	0.067779	0.059568	0.053697	0.04924
0.112972	0.10512	0.081257	0.06842	0.060086	0.054127	0.049603
0.114284	0.106317	0.082103	0.069076	0.06062	0.054573	0.049983
0.115611	0.107529	0.082963	0.069748	0.061169	0.055035	0.050377
0.116952	0.108754	0.083837	0.070433	0.061731	0.05551	0.050786
0.118304	0.109991	0.084724	0.071131	0.062307	0.055998	0.051208
0.119669	0.11124	0.085622	0.071841	0.062895	0.056498	0.051641
0.121044	0.1125	0.086532	0.072562	0.063493	0.057009	0.052086
0.122428	0.113769	0.087451	0.073293	0.064102	0.05753	0.052541
0.123822	0.115048	0.08838	0.074034	0.064721	0.058062	0.053006
0.125224	0.116335	0.089318	0.074783	0.065348	0.058602	0.05348
0.126635	0.117631	0.090264	0.075541	0.065984	0.05915	0.053962
0.128052	0.118933	0.091217	0.076307	0.066628	0.059707	0.054452
0.129477	0.120243	0.092178	0.07708	0.067278	0.06027	0.05495
0.130908	0.121559	0.093145	0.077859	0.067936	0.060841	0.055454
0.132345	0.122882	0.094119	0.078645	0.0686	0.061418	0.055965
0.133788	0.12421	0.095098	0.079437	0.06927	0.062001	0.056482
0.135236	0.125543	0.096083	0.080234	0.069946	0.06259	0.057005
0.136689	0.126881	0.097073	0.081037	0.070627	0.063183	0.057532
0.138146	0.128224	0.098067	0.081844	0.071313	0.063782	0.058065
0.139608	0.129571	0.099067	0.082656	0.072003	0.064386	0.058603
0.141074	0.130923	0.10007	0.083472	0.072698	0.064994	0.059145
0.142543	0.132278	0.101077	0.084293	0.073397	0.065606	0.059691
0.144017	0.133637	0.102089	0.085117	0.074099	0.066222	0.060241
0.145493	0.134999	0.103103	0.085945	0.074806	0.066841	0.060794
0.146973	0.136365	0.104121	0.086776	0.075515	0.067464	0.061352
0.148456	0.137733	0.105142	0.08761	0.076228	0.06809	0.061912
0.149941	0.139104	0.106167	0.088447	0.076944	0.06872	0.062475
0.15143	0.140478	0.107193	0.089287	0.077663	0.069352	0.063042
0.15292	0.141855	0.108223	0.09013	0.078385	0.069987	0.063611
0.154413	0.143234	0.109255	0.090976	0.079109	0.070625	0.064183
0.155908	0.144615	0.110289	0.091823	0.079836	0.071265	0.064757
0.157406	0.145998	0.111326	0.092673	0.080565	0.071907	0.065334
0.158905	0.147383	0.112364	0.093525	0.081296	0.072551	0.065913
0.160406	0.14877	0.113405	0.09438	0.082029	0.073198	0.066493
0.161909	0.150159	0.114447	0.095236	0.082764	0.073847	0.067076
0.163414	0.15155	0.115491	0.096094	0.083501	0.074497	0.067661
0.16492	0.152942	0.116537	0.096953	0.08424	0.075149	0.068248
0.166427	0.154336	0.117585	0.097814	0.08498	0.075803	0.068836
0.167936	0.155731	0.118634	0.098677	0.085722	0.076459	0.069426

0.169447	0.157127	0.119684	0.099542	0.086465	0.077116	0.070017
0.170958	0.158525	0.120736	0.100407	0.08721	0.077774	0.07061
0.172471	0.159924	0.121789	0.101274	0.087956	0.078434	0.071205
0.173985	0.161324	0.122844	0.102143	0.088704	0.079095	0.0718
0.1755	0.162726	0.123899	0.103012	0.089453	0.079758	0.072397
0.177016	0.164128	0.124956	0.103883	0.090203	0.080421	0.072995
0.178533	0.165531	0.126013	0.104755	0.090954	0.081086	0.073594
0.180051	0.166935	0.127072	0.105627	0.091706	0.081752	0.074195
0.18157	0.168341	0.128132	0.106501	0.092459	0.082419	0.074796
0.183089	0.169747	0.129192	0.107376	0.093213	0.083087	0.075398
0.18461	0.171153	0.130254	0.108251	0.093968	0.083755	0.076002
0.186131	0.172561	0.131316	0.109128	0.094724	0.084425	0.076606
0.187653	0.173969	0.132379	0.110005	0.095481	0.085095	0.077211
0.189176	0.175378	0.133443	0.110883	0.096238	0.085767	0.077817
0.190699	0.176788	0.134507	0.111762	0.096996	0.086439	0.078423
0.192223	0.178198	0.135572	0.112642	0.097755	0.087112	0.079031
0.193747	0.179609	0.136638	0.113522	0.098515	0.087785	0.079639
0.195272	0.18102	0.137705	0.114403	0.099276	0.08846	0.080248
0.196797	0.182432	0.138772	0.115284	0.100037	0.089134	0.080857
0.198323	0.183845	0.139839	0.116166	0.100798	0.08981	0.081467
0.19985	0.185258	0.140908	0.117049	0.10156	0.090486	0.082078
0.201377	0.186672	0.141976	0.117932	0.102323	0.091163	0.082689
0.202904	0.188085	0.143045	0.118816	0.103086	0.09184	0.083301
0.204432	0.1895	0.144115	0.1197	0.10385	0.092518	0.083914
0.20596	0.190915	0.145185	0.120585	0.104615	0.093196	0.084527
0.207489	0.19233	0.146256	0.12147	0.105379	0.093875	0.08514
0.209018	0.193745	0.147327	0.122355	0.106145	0.094554	0.085754
0.210547	0.195161	0.148398	0.123241	0.10691	0.095233	0.086368
0.212077	0.196577	0.14947	0.124128	0.107676	0.095913	0.086983
0.213606	0.197994	0.150542	0.125015	0.108443	0.096594	0.087598
0.215137	0.199411	0.151614	0.125902	0.10921	0.097275	0.088213
0.216667	0.200828	0.152687	0.126789	0.109977	0.097956	0.088829
0.218198	0.202246	0.15376	0.127677	0.110744	0.098638	0.089446
0.219729	0.203663	0.154834	0.128565	0.111512	0.099319	0.090062
0.22126	0.205081	0.155907	0.129454	0.112281	0.100002	0.090679
0.222792	0.206499	0.156981	0.130342	0.113049	0.100684	0.091297
0.224323	0.207918	0.158055	0.131232	0.113818	0.101367	0.091914
0.225855	0.209337	0.15913	0.132121	0.114587	0.10205	0.092532
0.227388	0.210756	0.160205	0.13301	0.115356	0.102734	0.09315
0.22892	0.212175	0.16128	0.1339	0.116126	0.103418	0.093769
0.230452	0.213594	0.162355	0.13479	0.116896	0.104102	0.094388
0.231985	0.215013	0.16343	0.135681	0.117666	0.104786	0.095007
0.233518	0.216433	0.164506	0.136571	0.118437	0.10547	0.095626
0.235051	0.217853	0.165582	0.137462	0.119207	0.106155	0.096246

0.236584	0.219273	0.166658	0.138353	0.119978	0.10684	0.096865
0.238118	0.220693	0.167734	0.139244	0.120749	0.107525	0.097485
0.239651	0.222114	0.16881	0.140136	0.12152	0.108211	0.098105

Фрагмент таблицы ссылок из главы 3 для графика 3.9.

0.214312	0.199072	0.152753	0.127835	0.111659	0.100093	0.091312
0.217171	0.2017	0.154677	0.12938	0.112958	0.101217	0.092302
0.220046	0.204343	0.156617	0.130942	0.114275	0.102357	0.093309
0.222935	0.207001	0.158572	0.132519	0.115606	0.103513	0.094332
0.225838	0.209673	0.160541	0.134111	0.116953	0.104684	0.09537
0.228753	0.212357	0.162524	0.135715	0.118312	0.105869	0.096421
0.231679	0.215052	0.164518	0.137332	0.119684	0.107065	0.097485
0.234616	0.217758	0.166523	0.13896	0.121067	0.108274	0.098561
0.237562	0.220474	0.168538	0.140599	0.122461	0.109493	0.099647
0.240517	0.223199	0.170563	0.142247	0.123865	0.110722	0.100743
0.243481	0.225933	0.172597	0.143904	0.125278	0.11196	0.101849
0.246452	0.228674	0.174639	0.14557	0.126699	0.113207	0.102963
0.24943	0.231422	0.176688	0.147244	0.128129	0.114462	0.104085
0.252415	0.234177	0.178745	0.148924	0.129566	0.115724	0.105215
0.255406	0.236939	0.180808	0.150612	0.131009	0.116993	0.106352
0.258403	0.239706	0.182877	0.152306	0.132459	0.118269	0.107496
0.261405	0.242478	0.184952	0.154005	0.133915	0.119551	0.108645
0.264412	0.245256	0.187032	0.155711	0.135377	0.120839	0.109801
0.267424	0.248038	0.189118	0.157421	0.136844	0.122132	0.110961
0.27044	0.250825	0.191208	0.159136	0.138316	0.12343	0.112127
0.27346	0.253616	0.193302	0.160856	0.139793	0.124732	0.113298
0.276483	0.25641	0.195401	0.16258	0.141273	0.126039	0.114473
0.27951	0.259208	0.197503	0.164308	0.142758	0.12735	0.115652
0.282541	0.26201	0.199609	0.166039	0.144247	0.128665	0.116835
0.285574	0.264814	0.201718	0.167774	0.145739	0.129984	0.118022
0.28861	0.267622	0.20383	0.169513	0.147235	0.131306	0.119212
0.291649	0.270432	0.205945	0.171254	0.148733	0.132631	0.120406
0.29469	0.273244	0.208063	0.172998	0.150235	0.133959	0.121602
0.297733	0.276059	0.210184	0.174745	0.15174	0.13529	0.122802

0.300779	0.278877	0.212307	0.176495	0.153247	0.136624	0.124004
0.303827	0.281696	0.214432	0.178247	0.154756	0.13796	0.125209
0.306876	0.284517	0.21656	0.180001	0.156268	0.139299	0.126416
0.309928	0.287341	0.218689	0.181758	0.157782	0.14064	0.127625
0.312981	0.290165	0.220821	0.183516	0.159299	0.141983	0.128837
0.316035	0.292992	0.222954	0.185276	0.160817	0.143328	0.13005
0.319091	0.29582	0.225089	0.187038	0.162337	0.144675	0.131266
0.322149	0.298649	0.227225	0.188802	0.163859	0.146024	0.132483
0.325207	0.30148	0.229363	0.190568	0.165382	0.147375	0.133703
0.328267	0.304312	0.231503	0.192334	0.166907	0.148727	0.134923
0.331328	0.307145	0.233644	0.194103	0.168434	0.15008	0.136146
0.33439	0.30998	0.235786	0.195872	0.169962	0.151435	0.13737
0.337453	0.312815	0.237929	0.197643	0.171491	0.152792	0.138595
0.340517	0.315651	0.240073	0.199416	0.173021	0.154149	0.139821
0.343582	0.318488	0.242219	0.201189	0.174553	0.155508	0.141049
0.346648	0.321327	0.244365	0.202963	0.176086	0.156869	0.142278
0.349714	0.324165	0.246513	0.204739	0.17762	0.15823	0.143508
0.352782	0.327005	0.248661	0.206515	0.179155	0.159592	0.14474
0.355849	0.329846	0.25081	0.208292	0.180691	0.160955	0.145972
0.358918	0.332687	0.25296	0.21007	0.182227	0.16232	0.147205
0.361987	0.335528	0.255111	0.211849	0.183765	0.163685	0.148439
0.365057	0.338371	0.257262	0.213629	0.185304	0.165051	0.149674
0.368127	0.341214	0.259414	0.21541	0.186843	0.166417	0.15091
0.371197	0.344057	0.261567	0.217191	0.188383	0.167785	0.152147
0.374268	0.346901	0.26372	0.218973	0.189924	0.169153	0.153384
0.37734	0.349745	0.265874	0.220755	0.191465	0.170522	0.154622
0.380412	0.35259	0.268029	0.222538	0.193007	0.171892	0.155861
0.383484	0.355435	0.270184	0.224322	0.19455	0.173262	0.1571
0.386557	0.358281	0.272339	0.226106	0.196093	0.174633	0.158341
0.38963	0.361127	0.274495	0.227891	0.197637	0.176005	0.159581
0.392703	0.363973	0.276652	0.229676	0.199181	0.177377	0.160823
0.395777	0.36682	0.278809	0.231462	0.200726	0.178749	0.162064
0.39885	0.369667	0.280966	0.233248	0.202271	0.180123	0.163307
0.401925	0.372514	0.283123	0.235035	0.203817	0.181496	0.16455
0.404999	0.375361	0.285281	0.236822	0.205363	0.18287	0.165793
0.408073	0.378209	0.28744	0.238609	0.20691	0.184245	0.167037
0.411148	0.381057	0.289598	0.240397	0.208457	0.185619	0.168281
0.414223	0.383905	0.291757	0.242185	0.210004	0.186995	0.169525
0.417298	0.386753	0.293916	0.243974	0.211552	0.18837	0.17077
0.420374	0.389602	0.296076	0.245762	0.2131	0.189746	0.172016
0.423449	0.392451	0.298235	0.247551	0.214648	0.191123	0.173261
0.426525	0.3953	0.300395	0.249341	0.216197	0.192499	0.174507
0.4296	0.398149	0.302555	0.25113	0.217746	0.193876	0.175754
0.432676	0.400998	0.304716	0.25292	0.219295	0.195254	0.177001

0.435752	0.403847	0.306876	0.25471	0.220845	0.196631	0.178248
0.438828	0.406697	0.309037	0.256501	0.222395	0.198009	0.179495
0.441904	0.409546	0.311198	0.258291	0.223945	0.199387	0.180742
0.44498	0.412396	0.313359	0.260082	0.225495	0.200766	0.18199
0.448057	0.415246	0.315521	0.261873	0.227046	0.202144	0.183238
0.451133	0.418095	0.317682	0.263664	0.228596	0.203523	0.184487
0.454209	0.420945	0.319844	0.265455	0.230147	0.204902	0.185735
0.457286	0.423795	0.322005	0.267247	0.231698	0.206281	0.186984
0.460362	0.426646	0.324167	0.269038	0.23325	0.207661	0.188233
0.463439	0.429496	0.326329	0.27083	0.234801	0.209041	0.189482
0.466515	0.432346	0.328491	0.272622	0.236353	0.21042	0.190732
0.469592	0.435196	0.330654	0.274414	0.237905	0.2118	0.191981
0.472669	0.438046	0.332816	0.276206	0.239457	0.213181	0.193231
0.475745	0.440897	0.334978	0.277999	0.241009	0.214561	0.194481
0.478822	0.443747	0.337141	0.279791	0.242561	0.215941	0.195731

При данных параметрах нет оптимальных значений радиуса резервуара.