

Н.О. Григоров, К.Л. Восканян

ПРАКТИКУМ

по дисциплине

“Методы и средства гидрометеорологических измерений”



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2019

УДК 91(075.8)

Н.О. Григоров, К.Л. Восканян Практикум по дисциплине «Методы и средства гидрометеорологических измерений». СПб.: изд. «Страта», 2019. – 28 с.

N.J. Grigorov, K.L Voskanyan. Practical works by course “Methods and meanings of hydrometeorological measurements”. SPb.: izd. «Strata», 2019. – 28 p.

Рецензент: Г.Г. Щукин, д-р физ.-мат. наук, проф., ВКА имени А.Ф.Можайского.

ISBN 978-5-907127-48-7

Практикум по дисциплине «Методы и средства гидрометеорологических измерений». В книге приводятся описания расчетных практических работ по курсу «Методы и средства гидрометеорологических измерений». Описание каждой работы содержит краткие теоретические сведения. Затем дается порядок действий при выполнении работы студентами и порядок обработки результатов работы. В конце каждого описания приведены контрольные вопросы.

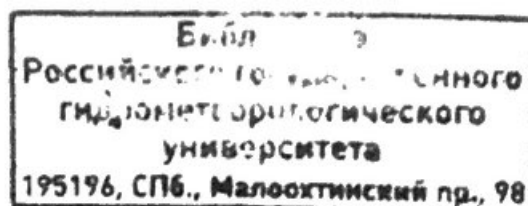
Книга предназначена для студентов университетов, а также для других учебных заведений, специализирующихся в области метеорологии.

Practical works by course “Methods and meanings of hydrometeorological measurements”. The book provides a description of the calculated practical works on the course “Methods and meanings of hydrometeorological measurements.” The description of each work contains brief theoretical information. Then the order of student’s work is written as well as the order of calculations. In the end of any description there are questions to control.

The book’s written for students of institutes, universities and meteorological colleges.

ISBN 978-5-907127-48-7

© Григоров Н.О., Восканян К.Л., 2019



Содержание

Предисловие

Введение

- 1 **Чувствительность и тепловая инерция жидкостных термометров** Практическая работа № 1
 - 1.1 Жидкостные термометры. Сведения из теории
 - 1.2 Задание для расчета
 - 1.3 Контрольные вопросы
 - 1.4 Литература
 - 2 **Чувствительность трансмиссометров** Практическая работа № 2
 - 2.1 Метеорологическая дальность видимости. Сведения из теории
 - 2.2 Задание для расчета
 - 2.3 Контрольные вопросы
 - 2.4 Литература
 - 3 **Инерционные погрешности ротоанемометров** Практическая работа № 3
 - 3.1 Ротоанемометры. Сведения из теории
 - 3.2 Задание для расчета
 - 3.3 Контрольные вопросы
 - 3.4 Литература
- ПРИЛОЖЕНИЕ** Форма отчета

Предисловие

Практикум подготовлен в соответствии с программой учебной дисциплины «Методы и средства гидрометеорологических измерений», читаемой авторами в РГГМУ бакалаврам по следующим направлениям и профилям подготовки:

1. 05.03.05 - Прикладная гидрометеорология. Профиль - Прикладная метеорология.

2. 05.03.05 - Прикладная гидрометеорология. Профиль - Гидрометеорологические информационно-измерительные системы.

3. 05.03.05 - Прикладная гидрометеорология. Профиль - Авиационная метеорология.

Практикум может быть использован при проведении практических работ по дисциплинам бакалавриата:

- «Методы наблюдения и анализа в гидрометеорологии» для направления подготовки 05.03.04 - Гидрометеорология;

- «Методы и средства гидрометеорологических измерений» для направления подготовки 03.03.02 – Физика

Практикум может быть использован в качестве учебного пособия по дисциплине «Информационно-измерительные системы в гидрометеорологии» для направления подготовки 05.04.05 - Прикладная гидрометеорология. Профиль - Прикладная метеорология.

Введение

Практикум по учебной дисциплине «Методы и средства гидрометеорологических измерений» представляет собой описание расчетных практических работ, которые предлагается выполнить обучающимся, изучающим данный курс.

Приведенные в практикуме расчетные работы посвящены исследованию чувствительности и инерции метеорологических приборов для измерения температуры воздуха, дальности видимости и определения скорости ветра. Рассматривается возможность совершенствования приборов на основе исследования зависимости их различных характеристик от метеорологических условий и конструктивных особенностей.

Расчетные практические работы помогают освоить актуальную и востребованную тему для приборостроения в области гидрометеорологии. Ведь потребителями метеорологической информации о таких параметрах как дальность видимости и скорость ветра являются строительные и спортивные объекты, отрасли дорожного, железнодорожного, водного и воздушного сообщения и другие хозяйственные объекты. Чем точнее будут проведены измерения скорости ветра и рассчитаны ветровые нагрузки, тем качественнее будут подготовлены проекты крупных и сложных объектов, а также высотных зданий. Сокращение количества ошибок в проектной документации и внесение корректировок на ранней стадии строительства приводит к значительному снижению издержек и возникновения возможных рисков. А о влиянии метеорологических параметров и явлений на транспортную сферу и говорить не приходится.

Практикум содержит теоретические сведения и формулы для выполнения расчетов по каждой теме. В конце каждой работы приводятся контрольные вопросы и список литературы.

В процессе выполнения работ студенты закрепляют теоретические знания о таких понятиях, как чувствительность прибора, его инерция, его специфические погрешности.

Примерная форма отчета приведена в Приложении.

1 Чувствительность и тепловая инерция жидкостных термометров

Практическая работа № 1

Цель работы – исследовать зависимость погрешностей жидкостных термометров от различных параметров резервуара (формы, радиуса, высоты и др.). Определить и оценить геометрические размеры термометра, обладающего минимальной погрешностью.

1.1 Жидкостные термометры. Сведения из теории

Как известно, чувствительность прибора – это его реакция на единичное изменение измеряемой величины [1,2]. Математически чувствительность – это производная от выходной величины прибора по его входной величине.

Входной, или иначе говоря, измеряемой величиной всех термометров является температура t . Выходная величина зависит от устройства термометра. В жидкостных термометрах это высота столбика жидкости в капилляре термометра h . Таким образом, чувствительность S жидкостных термометров можно выразить производной:

$$S = \frac{dh}{dt} \quad (1.1)$$

Выражая высоту h через параметры термометра с шарообразным резервуаром, приходим к выражению:

$$h = \beta \cdot t \cdot \frac{4}{3r^2} \cdot R^3, \quad (1.2)$$

где β – коэффициент объемного расширения жидкости,
 R – радиус резервуара термометра,
 r – радиус капилляра,
 t – температура.

Соответственно чувствительность термометра с шарообразным резервуаром можно рассчитать по формуле (1.3), а чувствительность жидкостного термометра с цилиндрическим резервуаром по формуле (1.4)

$$S = \frac{dh}{dt} = \beta \frac{4}{3r^2} \cdot R^3, \quad (1.3)$$

$$S = \beta \frac{R_1^2}{r^2} \cdot H, \quad (1.4)$$

где H - высота цилиндра,
 R_1 - его радиус.

Зная чувствительность термометра, можно определить его *шкаловую погрешность* Δt_1 , которая может быть выражена формулой:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta h}{S}, \quad (1.5)$$

где Δh - цена деления шкалы термометра в единицах длины.

Шкаловая погрешность не является единственной для жидкостных термометров. Большое значение имеет *инерционная погрешность*, которая связана с коэффициентом тепловой инерции термометра λ . По определению, коэффициент тепловой инерции термометра - это время, в течение которого разность температур между резервуаром термометра и окружающей средой уменьшается в e раз [1,2]. Тогда, при изменении температуры среды со скоростью γ инерционная погрешность Δt_2 рассчитывается как произведение коэффициента тепловой инерции на скорость изменения температуры среды:

$$\Delta t_2 = \gamma \lambda. \quad (1.6)$$

Следовательно, полная погрешность жидкостного термометра Δt равна сумме шкаловой и инерционной погрешности:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2. \quad (1.7)$$

Коэффициент тепловой инерции [3] рассчитывается по формуле, которая с учетом различных материалов, содержащихся в резервуаре - рабочей жидкости (ртути или спирта) и стекла - приводится к виду:

$$\lambda = \frac{m_1 C_1 + m_2 C_2}{\alpha s}, \quad (1.8)$$

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

Для шарообразного резервуара термометра выразим массу рабочей жидкости и стекла в резервуаре через внешний радиус резервуара R и толщину его стеклянной стенки d . Выражая поверхность s шарообразного резервуара через его радиус R ,

получим, с учетом плотности рабочей жидкости ρ_1 и плотности стекла ρ_2 окончательную формулу инерционной погрешности для шарообразного резервуара:

$$\Delta t_2 = \gamma \lambda = \gamma \frac{(R-d)^3 \rho_1 C_1 + (R^3 - (R-d)^3) \rho_2 C_2}{3\alpha R^2}. \quad (1.9)$$

Для цилиндрического резервуара массу жидкости в резервуаре найдем как:

$$m_1 = \rho_1 V = \rho_1 \pi (R-d)^2 (H-2d) \quad (1.10)$$

где ρ_1 – плотность рабочей жидкости,
 d – толщина стенки резервуара.

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

$$m_2 = 2\pi d \rho_2 \left(\left(R - \frac{d}{2} \right) H + R^2 \right). \quad (1.11)$$

Величину внешней поверхности цилиндрического резервуара s найдем по известной формуле:

$$s = \pi R (2H + R) \quad (1.12)$$

Объединяя формулы (1.6, 1.8, 1.10-1.12), найдем величину инерционной погрешности термометра с цилиндрическим резервуаром:

$$\Delta t_2 = \gamma \lambda = \gamma \frac{\rho_1 (R-d)^2 H C_1 + 2\rho_2 d \left(\left(R - \frac{d}{2} \right) H + R^2 \right) C_2}{\alpha R (2H + R)} \quad (1.13)$$

Обращает на себя внимание следующее обстоятельство. С увеличением геометрических размеров резервуара его чувствительность возрастает, следовательно, шкаловая погрешность уменьшается. В то же время его коэффициент тепловой инерции также возрастает, а следовательно, инерционная погрешность увеличивается. Значит, существуют некие оптимальные размеры резервуара, отвечающие минимальной погрешности.

В то же время коэффициент тепловой инерции зависит от коэффициента конвективного теплообмена α резервуара с окружающей средой. В свою очередь, коэффициент конвективного обмена зависит от скорости воздушного потока (скорости ветра). В работах [3,4] содержатся формулы, отражающие такую зависимость для шарообразного резервуара:

$$\alpha = 19,0 + 32,3 \cdot V^{0,54} . \quad (1.14)$$

И для цилиндрического резервуара:

$$\alpha = 24,49 + 30,67 \cdot V^{0,7} . \quad (1.15)$$

Кроме того, инерционная погрешность зависит от скорости изменения температуры воздуха γ .

1.2 Задание для расчета

1. Согласно варианту исходных данных рассчитайте по формулам (1.3, 1.5) шкаловую погрешность для шарообразного резервуара и постройте график зависимости погрешности Δt_1 от радиуса резервуара. Рекомендуется взять значение радиуса от 0,002 м (2 мм) до 0,015 м (1,5 см) с шагом расчета 0,001 м (через 1 мм).

2. Для того же варианта рассчитайте инерционную погрешность Δt_2 по формуле (1.9) с учетом зависимости (1.14) и постройте график зависимости Δt_2 от радиуса резервуара. Пределы изменения радиуса и шаг расчета должны быть теми же самыми.

3. По формуле (1.7) рассчитайте суммарную погрешность термометра. Постройте на одном чертеже три графика зависимости от радиуса шкаловой погрешности, инерционной погрешности и суммарной погрешности. Примерный вид графика представлен на рис. 1.1. Проанализируйте полученные зависимости. Каково значение радиуса резервуара, отвечающего минимальной суммарной погрешности? Каково значение этой минимальной погрешности?

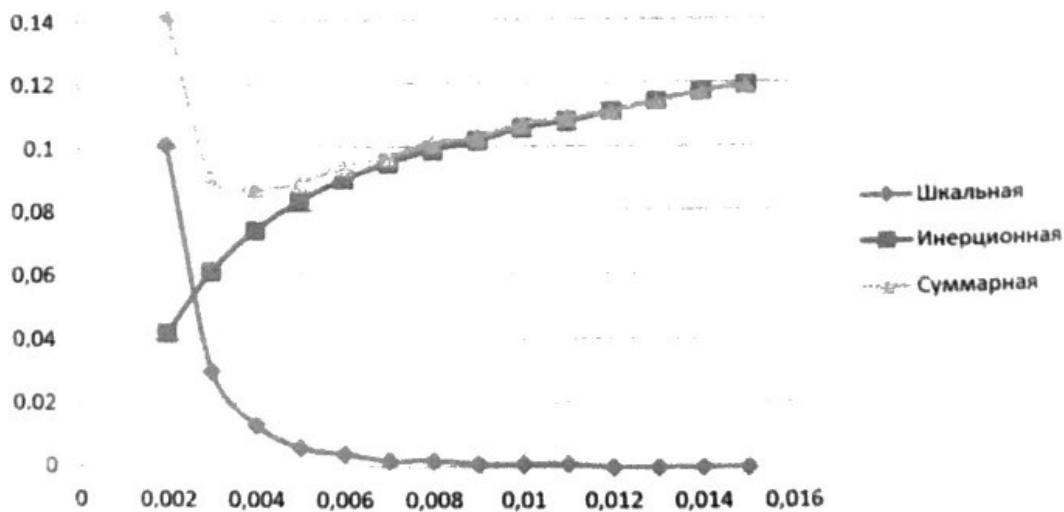


Рис. 1.1 Примерный вид графика зависимости шкаловой, инерционной и суммарной погрешности от радиуса резервуара

4. Прделайте те же расчеты для цилиндрического резервуара по формулам (1.4, 1.5, 1.6, 1.13 и 1.15).

5. Отдельно сосчитайте зависимость шкаловой погрешности от высоты резервуара H , инерционной погрешности и полной погрешности от высоты резервуара. Рекомендуется взять значение высоты H в пределах от 0,003 м (3 мм) до 0,01 м (1 см) с шагом 0,001 м и с шагом 0,005 м в пределах от 0,01 до 0,03 м (3 см). Сделайте выводы о том, как зависит шкаловая погрешность, инерционная и суммарная погрешность от высоты резервуара. Есть ли в этом случае значение H , отвечающее минимальной погрешности? Каково значение этой погрешности и какой высоте резервуара она соответствует?

Используемые константы

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

Плотность спирта $\rho_1 = 0,79 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

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

Удельная теплоёмкость спирта $C_1 = 2390 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$

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 $\beta = 0,181 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$

Коэффициент объемного расширения спирта $\beta = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$

Радиус капилляра $r = 0,06 \text{ мм} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}$

Цена деления $\Delta h = 0,33 \text{ мм}, = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$

Варианты исходных данных

Варианты 1-20 выполняются исходя из толщины стеклянной стенки резервуара $d = 2,25 \text{ мм} = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Номер варианта	Рабочая жидкость	Скорость ветра V м/с	Скорость изменения температуры γ град/с	Радиус цилиндрического резервуара R м
1	ртуть	0,8	0,004	0,003
2	ртуть	2	0,004	0,004
3	ртуть	6	0,004	0,005
4	ртуть	0,8	0,002	0,006
5	ртуть	2	0,002	0,007
6	ртуть	6	0,002	0,003
7	ртуть	0,8	0,001	0,004
8	ртуть	2	0,001	0,005
9	ртуть	6	0,001	0,006
10	ртуть	0,8	0,003	0,007
11	спирт	0,8	0,004	0,003
12	спирт	2	0,004	0,004
13	спирт	6	0,004	0,005
14	спирт	0,8	0,002	0,006
15	спирт	2	0,002	0,007

16	спирт	6	0,002	0,003
17	спирт	0,8	0,001	0,004
18	спирт	2	0,001	0,005
19	спирт	6	0,001	0,006
20	спирт	0,8	0,003	0,007

Следующие варианты 21-40 выполняются, исходя из толщины стеклянной стенки резервуара $d = 2,0$ мм ($2,0 \cdot 10^{-3}$ м).

Номер варианта	Рабочая жидкость	Скорость ветра V м/с	Скорость изменения температуры γ град/с	Радиус цилиндрического резервуара R м
21	ртуть	0,8	0,004	0,003
22	ртуть	2	0,004	0,004
23	ртуть	6	0,004	0,005
24	ртуть	0,8	0,002	0,006
25	ртуть	2	0,002	0,007
26	ртуть	6	0,002	0,003
27	ртуть	0,8	0,001	0,004
28	ртуть	2	0,001	0,005
29	ртуть	6	0,001	0,006
30	ртуть	0,8	0,003	0,007
31	спирт	0,8	0,004	0,003
32	спирт	2	0,004	0,004
33	спирт	6	0,004	0,005
34	спирт	0,8	0,002	0,006
35	спирт	2	0,002	0,007
36	спирт	6	0,002	0,003
37	спирт	0,8	0,001	0,004
38	спирт	2	0,001	0,005
39	спирт	6	0,001	0,006
40	спирт	0,8	0,003	0,007

1.3 Контрольные вопросы

1. Что такое чувствительность прибора? Чувствительность жидкостного термометра?
2. Что такое шкаловая погрешность термометра?
3. Что такое коэффициент тепловой инерции термометра?
4. Что такое инерционная погрешность термометра?
5. Из каких величин складывается полная погрешность термометра?
6. Какие параметры термометра влияют на величину шкаловой погрешности? Как именно они влияют? Почему параметры окружающей среды не влияют на шкаловую погрешность?
7. Какие параметры термометра влияют на величину инерционной погрешности? Как именно они влияют?

8. Какие параметры окружающей среды влияют на величину инерционной погрешности термометра? Как именно они влияют?
9. Почему для увеличения чувствительности жидкостных термометров нельзя применять резервуар, обладающий слишком большим объемом?
10. Почему зависимость суммарной погрешности жидкостного термометра от радиуса шарообразного резервуара имеет минимум? Какова эта минимальная погрешность в Вашем варианте? Какому значению радиуса она соответствует?
11. Изменяются ли результаты расчетов, если скорость ветра изменится в ту или в другую сторону?
12. Изменяются ли результаты расчетов, если скорость изменения температуры среды изменится в ту или в другую сторону?
13. Какой будет зависимость суммарной погрешности от радиуса шарообразного резервуара при постоянной температуре среды ($\gamma = 0$)? Возможно ли такое в природе?
14. Предложите метод уменьшения погрешности для любого типа жидкостных термометров (шарообразный или цилиндрический резервуар) без изменения его параметров.
15. Каков, по Вашему мнению, наиболее перспективный путь уменьшения погрешности для термометра с цилиндрическим резервуаром – увеличение радиуса резервуара или увеличение высоты резервуара? Почему?

1.4 Литература

1. 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.
2. Качурин Л.Г. Методы метеорологических измерений. Методы зондирования атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985.– 465 с.
3. Григоров Н.О., Светачева А.А. Методика определения погрешностей датчиков температуры шарообразной формы. Международная практическая конференция «Узбекистан в Центрально-азиатском районе – география, геоэкономика, геоэкология». 11-12 мая 2017 г, г.Ташкент. Сб. статей с. 340-343.
4. Григоров Н.О., Светачева А.А. Погрешности ртутных термометров с цилиндрическим резервуаром. Southern Almanac of Scientific Reseach, <http://yunia.ru/article/2-2>

2 Чувствительность трансмиссометров

Практическая работа № 2

Цель работы – выполнить расчет чувствительности трансмиссометра и оценить максимальную чувствительность, как функцию расстояния между источником и приемником света.

2.1 Метеорологическая дальность видимости. Сведения из теории

Метеорологическая дальность видимости (МДВ) – это расстояние, на котором человек с нормальным зрением может на фоне неба различить черный предмет, угловые размеры которого не менее 15'. Для количественного описания этого определения вводится понятие светового контраста K [1,3]:

$$K = \frac{J_{\phi} - J_{об}}{J_{\phi}} \quad (2.1)$$

где J_{ϕ} – видимая яркость фона,

$J_{об}$ – видимая яркость объекта, наблюдаемого на фоне светлого неба.

Из определения ясно, что величина яркостного контраста может изменяться от 0 до 1. Чем ниже контраст, тем хуже виден предмет. Минимальный контраст, различимый человеческим глазом, составляет около 0,03 и обозначается буквой ε :

$$\min K = \varepsilon \quad (2.2)$$

Значение метеорологической дальности видимости L можно рассчитать из уравнения Кошмидера [1]:

$$k = -\frac{\ln \varepsilon}{L} \quad (2.3)$$

В этом уравнении k – показатель ослабления. Его величину можно определить из уравнения Бугера-Ламберта, которое описывает закон ослабления света в мутной атмосфере [1,4]:

$$J = J_0 e^{-kl} \quad (2.4)$$

Здесь J – видимая яркость света, наблюдаемого на расстоянии l от источника с исходной яркостью J_0 .

Объединяя оба уравнения (2.3) и (2.4), имеем:

$$J = J_0 \varepsilon^{\frac{l}{L}} \quad (2.5)$$

На этом принципе основано действие трансмиссометров – приборов для измерения МДВ. Прибор включает в себя источник света и фотоприемник, расположенный на известном расстоянии l от источника. Чем более мутная атмосфера (чем меньше МДВ), тем меньше яркость светового сигнала, дошедшего и воспринятого приемником. В качестве примера трансмиссометров можно привести серию импульсных фотометров ФИ-1, ФИ-2, ФИ-3 и ФИ-4, разработанных и выпускаемых в России.

Выходным параметром всех трансмиссометров можно принять отношение величины воспринятого светового сигнала J и исходного J_0 . Тогда чувствительность трансмиссометра можно выразить производной:

$$S = \frac{d \frac{J}{J_0}}{dL} = \frac{d}{dL} (\varepsilon^{\frac{l}{L}}) = -\varepsilon^{\frac{l}{L}} \cdot \ln \varepsilon \cdot \left(\frac{l}{L^2}\right) \quad (2.6)$$

Студентам предлагается самостоятельно определить размерность чувствительности S , определяемой таким образом.

Анализ уравнения (2.6) приводит к выводу о существовании максимума чувствительности на некотором расстоянии l между приемником и источником. Для нахождения максимума чувствительности зафиксируем значение L и возьмём производную по l от выражения (2.6):

$$\frac{dS}{dl} = -\ln \varepsilon \cdot \varepsilon^{\frac{l}{L}} \cdot \frac{1}{L^2} \left(\frac{\ln \varepsilon \cdot l}{L} + 1 \right). \quad (2.7)$$

Можно поступить по-другому – зафиксировать значение длины базы l и определить максимум чувствительности при постоянной базе, взяв производную от S по L :

$$\frac{dS}{dL} = \ln \varepsilon \cdot \varepsilon^{\frac{l}{L}} \cdot \frac{1}{L^4} (l \cdot \ln \varepsilon + 2L). \quad (2.8)$$

Приравнявая нулю выражение (2.7), найдем соотношение между длиной базы и МДВ при постоянной МДВ, отвечающее максимальной чувствительности, а приравняв нулю выражение (2.8), найдем соотношение между теми же величинами при постоянной длине базы.

2.2 Задание для расчета

1. Рассчитайте величину чувствительности по формуле (2.6) для заданных, согласно варианту, значений МДВ (L), как функцию длины базы (l). Постройте на одном чертеже два графика зависимости $S(l)$. Сделайте вывод о том, как изменяется чувствительность при заданных значениях МДВ от длины базы. В каких точках графика наблюдается максимальная чувствительность?

2. Постройте на одном чертеже по формуле (2.6) два графика зависимости $S(L)$, взяв фиксированные значения l согласно варианту. Сделайте вывод о том, как изменяется чувствительность трансмиссометра при изменении МДВ. В каких точках этих графиков наблюдаются максимумы чувствительности?

3. Приравняв нулю производные, найденные по формулам (2.7) и (2.8), найдите соотношение между длиной базы и значением МДВ, отвечающее максимуму чувствительности в двух случаях:

- при фиксированной МДВ по формуле (2.7);
- при фиксированной длине базы по формуле (2.8).

Сопоставьте найденные значения максимумов чувствительности в п.п. 1 и 2 с выведенными соотношениями. Соблюдаются ли они в Вашем варианте?

4. По результатам расчетов сделайте вывод о том, какова должна быть длина базы трансиссометра. Учтите, что в реальных условиях МДВ может изменяться в широких пределах – от нескольких метров при густом тумане до десятков километров при прозрачной атмосфере.

Варианты исходных данных

Номер варианта	Значение контрастной чувствительности глаза ϵ	Значения МДВ для первого расчета (L_1 и L_2)	Значения длины базы для второго расчета (l_1 и l_2)
1	0,03	10 м, 1000 м	20 м, 150 м
2	0,03	20 м, 2000 м	25 м, 160 м
3	0,03	30 м, 3000 м	30 м, 170 м
4	0,03	40 м, 4000 м	35 м, 180 м
5	0,03	50 м, 5000 м	40 м, 190 м
6	0,03	60 м, 6000 м	45 м, 200 м
7	0,03	70 м, 7000 м	50 м, 210 м
8	0,03	80 м, 8000 м	55 м, 220 м
9	0,03	90 м, 9000 м	60 м, 230 м
10	0,03	100 м, 10000 м	70 м, 240 м
11	0,03	110 м, 11000 м	80 м, 250 м
12	0,03	120 м, 12000 м	90 м, 260 м
13	0,03	130 м, 13000 м	100 м, 280 м
14	0,04	10 м, 1000 м	20 м, 150 м
15	0,04	20 м, 2000 м	25 м, 160 м
16	0,04	30 м, 3000 м	30 м, 170 м
17	0,04	40 м, 4000 м	35 м, 180 м
18	0,04	50 м, 5000 м	40 м, 190 м
19	0,04	60 м, 6000 м	45 м, 200 м
20	0,04	70 м, 7000 м	50 м, 210 м
21	0,04	80 м, 8000 м	55 м, 220 м
22	0,04	90 м, 9000 м	60 м, 230 м
23	0,04	100 м, 10000 м	70 м, 240 м
24	0,04	110 м, 11000 м	80 м, 250 м
25	0,04	120 м, 12000 м	90 м, 260 м
26	0,04	130 м, 13000 м	100 м, 280 м
27	0,05	10 м, 1000 м	20 м, 150 м
28	0,05	20 м, 2000 м	25 м, 160 м
29	0,05	30 м, 3000 м	30 м, 170 м
30	0,05	40 м, 4000 м	35 м, 180 м
31	0,05	50 м, 5000 м	40 м, 190 м
32	0,05	60 м, 6000 м	45 м, 200 м
33	0,05	70 м, 7000 м	50 м, 210 м

34	0,05	80 м, 8000 м	55 м, 220 м
35	0,05	90 м, 9000 м	60 м, 230 м
36	0,05	100 м, 10000 м	70 м, 240 м
37	0,05	110 м, 11000 м	80 м, 250 м
38	0,05	120 м, 12000 м	90 м, 260 м
39	0,05	130 м, 13000 м	100 м, 280 м
40	0,05	25 м, 500 м	5 м, 500 м

2.3 Контрольные вопросы

1. Что такое трансмиссометры? Для чего они служат в метеорологических измерениях?
2. Что такое чувствительность прибора? Как применить общее определение чувствительности к трансмиссометру?
3. Какие отечественные трансмиссометры Вы знаете?
4. Что такое яркостной контраст? В каких пределах он изменяется? Докажите, что это именно так.
5. Почему в уравнении Кошмидера стоит знак «минус», хотя дальность видимости не может быть отрицательной?
6. Как изменится яркость света в мутной атмосфере при удалении от источника света? Изобразите эту зависимость графически.
7. От каких параметров зависит чувствительность трансмиссометра? Все ли эти параметры зависят от желания конструктора прибора?
8. Почему можно сказать, что графики, построенные по уравнению (2.6) имеют максимум?
9. Выведите формулы (2.7) и (2.8) для определения положения максимума чувствительности трансмиссометра.
10. В какой области находится максимум чувствительности трансмиссометра в Вашем варианте расчета? Чему равно максимальное значение чувствительности?

2.4 Литература

1. 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.
2. Качурин Л.Г. Методы метеорологических измерений. Методы зондирования атмосферы. - Л.: Гидрометеиздат, 1985.- 465 с.
3. Григоров Н.О., Симакина Т.Е. Задачник по дисциплине «Методы и средства гидрометеорологических измерений». С-Пб, РГГМУ, 2006.-41с.
4. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. Л.: Гидрометеиздат, 1987.- 136 с.

3 Инерционные погрешности ротоанемометров

Практическая работа № 3

Цель работы – выполнить расчет погрешности измерения средней скорости, возникающей при флуктуациях скорости ветра.

3.1 Ротоанемометры. Сведения из теории

Ротоанемометры – приборы для измерения скорости ветра, снабженные чашечной вертушкой или винтом [1,2]. При вращении винта под действием ветра скорость ветра преобразуется в угловую скорость вращения, которая связана со скоростью ветра прямой зависимостью [1]:

$$V = a + b\omega, \quad (3.1)$$

где a и b – размерные константы,

V – скорость ветра,

ω – угловая скорость вращения винта или чашечной вертушки.

Величина a имеет размерность скорости и называется *пороговой скоростью* вертушки. Легко видеть, что если скорость ветра ниже значения пороговой скорости, то вертушка вообще не вращается. Значение пороговой скорости обусловлено силой трения на оси вертушки. Для серийных анемометров она не превышает нескольких десятых долей метра в секунду.

При изменении скорости ветра вертушка воспринимает новую скорость вращения не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, необходимым для изменения её угловой скорости до нового значения. В этот переходный период времени зависимость угловой скорости вращения вертушки от времени выражается уравнением [1]:

$$\omega - \Omega = (\omega_0 - \Omega) \cdot e^{-\frac{V \cdot \tau}{L}}, \quad (3.2)$$

где ω_0 – угловая скорость вращения вертушки в начальный момент времени,

Ω – установившаяся новая угловая скорость,

τ – время,

V – скорость ветра,

L – путь синхронизации вертушки.

Смысл понятия «путь синхронизации» становится ясен, если произведение $V\tau$ в числителе показателя экспоненты в формуле (3.2) приравнять к L . Путь синхронизации – это путь, пройденный воздушным потоком за время, в течение которого разность угловых скоростей между начальной скоростью вращения вертушки ω_0 и её установившейся угловой скоростью Ω уменьшается в e раз. (Напомним: основание натуральных логарифмов $e \approx 2,71828\dots$)

Путь синхронизации является константой данного анемометра, его значение приводится в паспорте прибора и может быть выражено формулой:

$$L = \frac{n \cdot m \cdot R}{k \cdot \sigma}, \quad (3.3)$$

где n – количество чашек в чашечной вертушке,
 m – масса одной чашки,
 R – радиус плеча вертушки,
 k – постоянный коэффициент зависящий от устройства вертушки,
 σ – константа, значение которой равно 3.

С учетом линейной зависимости $\omega(V)$ при скорости ветра выше пороговой – см. формулу (3.1) – в формуле (3.2) величину ω можно заменить на V и понимать здесь V как показания анемометра в текущий момент времени τ , $V_{уст}$ – новое значение скорости ветра, которую покажет анемометр, а V_0 – показания анемометра в начальный момент времени $\tau = 0$, то есть значение скорости ветра перед ее изменением. Сделав в (3.2) очевидную замену:

$$\omega = \frac{V}{R}; \quad \Omega = \frac{V_{уст}}{R}; \quad \omega_0 = \frac{V_0}{R};$$

получаем:

$$V - V_{уст} = (V_0 - V_{уст}) \cdot e^{-\frac{V_{уст} \cdot \tau}{L}} \quad (3.4)$$

Уравнение (3.4) дает возможность рассчитать, сколь быстро вертушка воспринимает новую скорость ветра. Легко видеть, что скорость восприятия зависит от пути синхронизации L – чем *меньше* путь синхронизации, тем быстрее вертушка воспринимает новое значение установившейся скорости ветра $V_{уст}$. Однако, скорость восприятия также зависит от значения $V_{уст}$ – чем *больше* значение установившейся скорости, тем быстрее вертушка воспринимает её. Следовательно, при порывистом ветре вертушка будет быстро воспринимать большие значения скорости и медленно – малые (рис. 3.1).

Это обстоятельство ведет к погрешности при определении средней скорости ветра. В самом деле, строгое осреднение истинной скорости ветра дает величину \bar{V} , обозначенную линией на рис. 3.1. Осреднение же показаний анемометра дает величину, обозначенную на том же рисунке как \bar{V}_a . Таким образом, значение средней скорости, полученное в результате осреднения измерений, несколько выше истинного её значения.

Эта погрешность при осреднении показаний анемометра известна как *инерционная погрешность*.

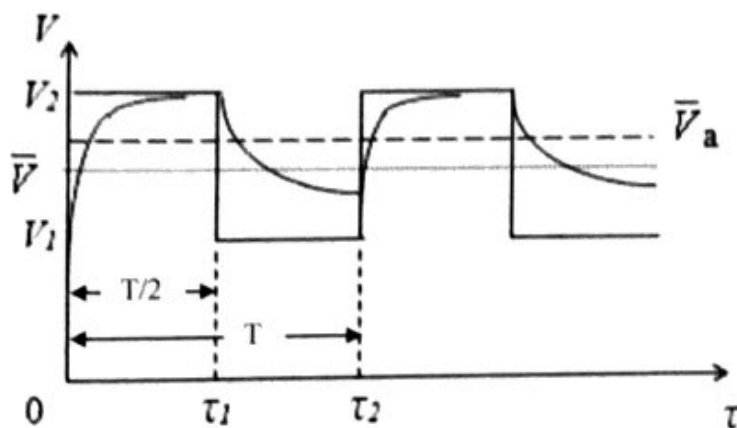


Рис. 3.1. Восприятие вертушкой скорости ветра при прямоугольных флуктуациях его скорости

В настоящей работе студентам предлагается рассчитать значение инерционной погрешности при прямоугольных флуктуациях (порывах) скорости ветра. Далее необходимо выяснить, как инерционная погрешность зависит от пути синхронизации анемометра, от амплитуды флуктуаций скорости ветра и от значения средней скорости ветра. Также предлагается расчет (с помощью программы) времени достижения установившихся показаний анемометра и зависимости этого времени от указанных выше параметров.

3.2 Задание для расчета

1. Для исходных значений прямоугольных флуктуаций скорости ветра от V_{\min} до V_{\max} , указанных в варианте, постройте кривую восприятия анемометром показаний скорости ветра. Для этого в формуле (3.4) задайте

$$V_0 = V_{\min} \quad V_{\text{уст}} = V_{\max},$$

значение L возьмите из варианта исходных данных. Затем разделите половину периода флуктуаций $T/2$, указанного в Вашем варианте, на 10 равных частей, и для каждого значения τ , в этом промежутке проведите расчет показаний анемометра V по формуле:

$$V = V_{\max} + (V_{\min} - V_{\max}) \cdot \exp\left(-\frac{V_{\max} \tau}{L}\right). \quad (3.5)$$

В результате получится возрастающая кривая, начинающаяся от значения V_{\min} но не достигающая значения V_{\max} . Верхнее полученное значение V_1 возьмите в качестве нового значения начальной скорости на следующем промежутке, который также разделите на 10 моментов времени, и для каждого из них рассчитайте показания анемометра по формуле:

$$V = V_{\max} + (V_1 - V_{\min}) \cdot \exp\left(-\frac{V_{\min} \tau}{L}\right) \quad (3.6)$$

Имейте в виду, что на каждом следующем промежутке начинается новый отсчет времени от нулевого значения (в момент, когда показания анемометра равны V_1).

В результате расчета получится убывающая кривая, начинающаяся от значения V_1 , но не достигающая значения V_{\min} . Нижнее полученное значение показаний анемометра V_2 возьмите в качестве нового значения на третьем промежутке времени, и так же, как и раньше, разделите этот промежуток на 10 частей и для каждого момента времени проведите расчет по формуле, аналогичной формуле (3.5):

$$V = V_{\max} + (V_2 - V_{\max}) \cdot \exp\left(-\frac{V_{\max} \tau}{L}\right)$$

с той разницей, что вместо V_{\min} в формулу в скобках следует подставить V_2 . Как и прежде, начните новый отсчет времени с момента, когда показания анемометра равны V_2 . Получится возрастающая кривая на третьем промежутке. Далее проведите расчет для четвертого участка, подставив в скобках формулы (3.6) максимальное значение V на третьем участке V_3 . Расчет продолжайте до тех пор, пока максимальные и минимальные значения показаний анемометра V не станут одинаковыми для двух-трех последовательно взятых промежутков.

Нанесите рассчитанные значения на график. В итоге должна получиться кривая, аналогичная приведенной на рис. 3.2.

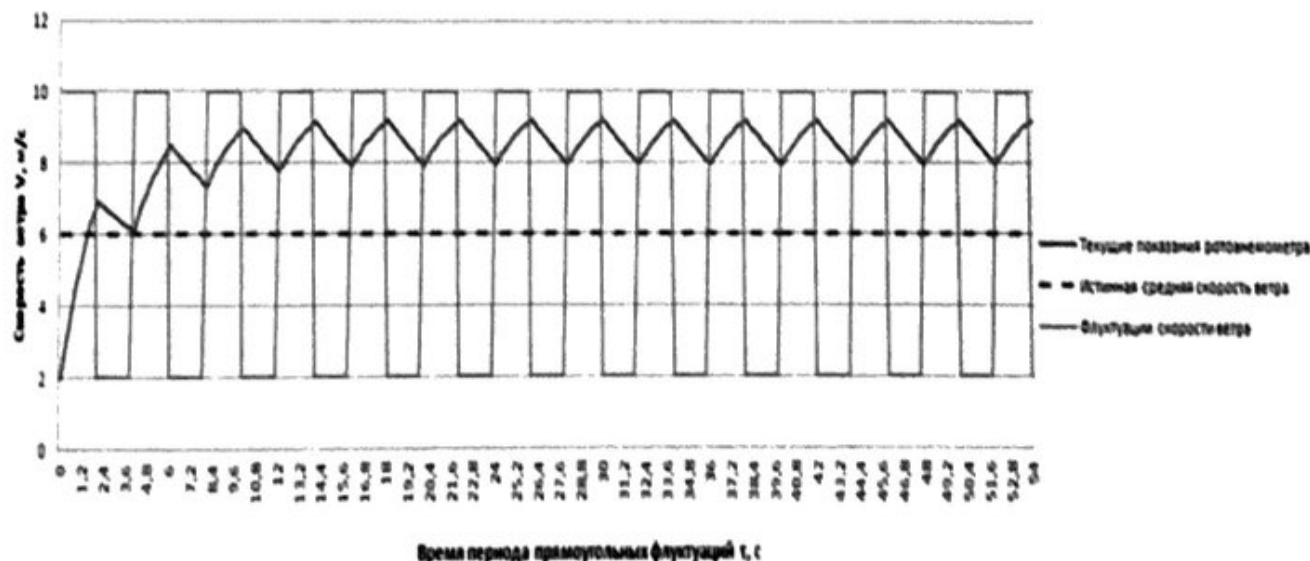


Рис. 3.2. Примерный вид кривой, изображающей показания анемометра

2. Определите инерционную погрешность анемометра. Истинную среднюю скорость ветра рассчитайте по формуле:

$$\bar{V} = \frac{V_{\min} + V_{\max}}{2} \quad (3.7)$$

Среднее значение показаний анемометра, выраженное кривой с возрастающими и убывающими участками, следует, вообще говоря, считать по известной формуле интеграла, деленного на промежуток времени. Практически же, учитывая почти линейный характер возрастания и убывания V на соседних участках, можно ограничиться упрощенным расчетом средней величины максимальных и минимальных значений показаний анемометра на соседних участках:

$$\bar{V}_{an} = \frac{V_i + V_{i+1}}{2} \quad (3.8)$$

Инерционная погрешность определяется как разность

$$\bar{V}_a - \bar{V} \quad (3.9)$$

3. Получите у преподавателя программу для вычисления кривой показаний анемометра. Программа приводится в папке *ECalc*. Откройте папку *ECalc*, затем откройте внутри нее папку *bin*, далее откройте папку *Debug*, и внутри нее откройте приложение *ECalc*. Вид открывшейся страницы показан на рис. 3.3.

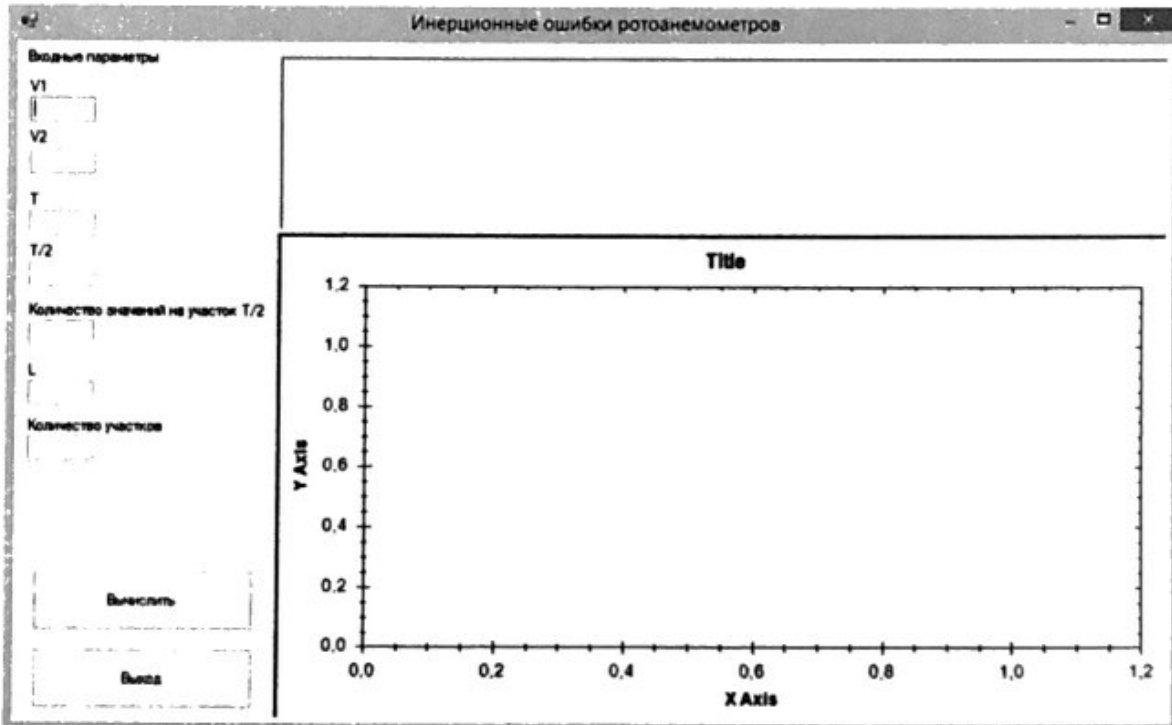


Рис. 3.3. Окно для ввода исходных данных и вывода графика показаний анемометра в программе *ECalc*

Далее приступайте к вводу исходных данных.

Прежде всего, исследуйте зависимость показаний анемометра от величины пути синхронизации L . Для этого введите указанные в варианте значения $V_1 = V_{\min}$, $V_2 = V_{\max}$, период флуктуаций T и половину этого периода $T/2$. Например, если $T = 4$ с, то $T/2 = 2$ с. Количество вычисляемых значений на участок $T/2$ принимается равным 10. Количество участков примите равным 28. Значения пути синхронизации изменяйте от $L = 5$ метрам до $L = 50$ метрам через 5 метров в промежутке от 5 до 20 метров и через 10 метров в промежутке от 20 до 50 метров. При этом каждый раз нажимайте клавишу «вычислить» и копируйте полученные кривые. Определите в каждом случае инерционную погрешность по формулам (3.7-3.9). Сделайте выводы – как зависит инерционная погрешность от пути синхронизации. Сделайте график этой зависимости $\Delta V(L)$.

Определите также время достижения стабильных показаний анемометра – то есть время, в течение которого максимальные и минимальные значения показаний анемометра V становятся одинаковыми для двух-трех последовательно взятых промежутков. Это время определяется «на глаз» и может содержать случайные ошибки наблюдателя, но тенденция его изменения должна сохраниться. Сделайте график этой зависимости $\Delta t(L)$.

✗ 4. Исследуйте зависимость инерционной ошибки и времени достижения стабильных показаний от периода флуктуаций T . С этой целью сохраните все исходные параметры варианта, кроме периода T . Изменяйте период T от значения 0,5 секунд до значения 20 секунд (это явно неразумное значение рекомендуется лишь для определения тенденции изменения кривой). Рекомендуется изменять T через 0,5 секунд в интервале до 2 секунд, через 2 секунды в интервале до 10 секунд и через 5 секунд в интервале до 20 секунд. Каждый раз копируйте полученные кривые и определяйте инерционную ошибку и время достижения стабильных показаний анемометра. Сделайте графики этих величин в зависимости от периода флуктуаций T . ✗

✗ 5. Исследуйте зависимость инерционной ошибки и времени достижения стабильных показаний от амплитуды флуктуаций скорости ветра. С этой целью сохраните все исходные параметры варианта, кроме значений $V_1 = V_{\min}$, и $V_2 = V_{\max}$. Изменяйте их значения так, чтобы средняя скорость ветра была бы неизменной – например, $V_1 = 2$ м/с, $V_2 = 4$ м/с, а следующий расчет для $V_1 = 1$ м/с, $V_2 = 5$ м/с. Рекомендуется провести не менее 5 расчетов с разными значениями амплитуды флуктуаций. Постройте графики этих величин в зависимости от амплитуды флуктуаций. Сделайте вывод о влиянии амплитуды флуктуаций на инерционную ошибку и время достижения стабильных показаний.

∅ 6. Исследуйте зависимость инерционной ошибки и времени достижения стабильных показаний от средней скорости ветра. С этой целью сохраните все параметры варианта, кроме значений $V_1 = V_{\min}$, и $V_2 = V_{\max}$. Однако, на этот раз изменяйте их так, чтобы амплитуда флуктуаций V_1-V_2 сохранялась бы неизменной, а средняя скорость изменялась бы в промежутке от минимально возможной, при которой значение $V_2 = 1$ м/с, до максимальной величины около 30-35 м/с. Проведите не менее 5-7 расчетов в указанном промежутке. Постройте графики этих величин в зависимости от средней скорости ветра. Сделайте вывод относительно влияния средней скорости ветра на инерционную ошибку и время достижения стабильных показаний анемометра.

Варианты исходных данных

Номер варианта	Путь синхронизации L м	Значение минимальной скорости ветра V_{\min} м/с	Значение максимальной скорости ветра V_{\max} м/с	Значение половины периода флуктуаций $T/2$ с
1	5	2	4	1
2	5	3	7	1
3	5	10	15	1
4	5	20	25	1
5	5	25	30	1
6	10	2	4	2
7	10	3	7	2
8	10	10	15	2
9	10	20	25	2
10	10	25	30	2
11	15	2	4	3
12	15	3	7	3
13	15	10	15	3
14	15	20	25	3
15	15	25	30	3
16	20	2	4	4
17	20	3	7	4
18	20	10	15	4
19	20	20	25	4
20	20	25	30	4
21	25	2	4	1
22	25	3	7	1
23	25	10	15	1
24	25	20	25	1
25	25	25	30	1
26	30	2	4	2
27	30	3	7	2
28	30	10	15	2
29	30	20	25	2
30	30	25	30	2
31	35	2	4	2
32	35	3	7	2
33	35	10	15	2
34	35	20	25	2
35	35	25	30	2
36	40	2	4	4
37	40	3	7	4
38	40	10	15	4
39	40	20	25	4
40	40	25	30	4

$$= (A_2 + A_3) / 2$$

3.3 Контрольные вопросы

1. Поясните принцип действия ротоанемометра.
2. Какова зависимость угловой скорости вращения вертушки от скорости ветра?
3. Что такое пороговая скорость ротоанемометра? Как можно уменьшить пороговую скорость?
4. Каков характер восприятия ротоанемометром изменившейся скорости ветра? Каковы особенности восприятия большой и малой скорости ветра?
5. Что такое путь синхронизации ротоанемометра? Каким образом, по Вашему мнению, можно уменьшить путь синхронизации?
6. Что такое инерционная погрешность ротоанемометра? Каковы причины этой погрешности?
7. Как можно рассчитать инерционную погрешность ротоанемометра при скачкообразном изменении скорости ветра?
8. Какова инерционная погрешность ротоанемометра в вашем варианте расчета?
9. Каково время установления стабильных показаний ротоанемометра в вашем варианте расчета?
10. Как зависит инерционная погрешность и время установления стабильных показаний от пути синхронизации ротоанемометра?
11. Как зависит инерционная погрешность и время установления стабильных показаний от периода флуктуаций скорости ветра?
12. Как зависит инерционная погрешность и время установления стабильных показаний от амплитуды флуктуаций скорости ветра?
13. Как зависит инерционная погрешность и время установления стабильных показаний от величины средней скорости ветра (при неизменной величине других параметров)?
14. Какие еще особенности восприятия анемометром скорости ветра Вы заметили при расчете?
15. Ваши расчеты проведены при начальном значении скорости ветра, равном V_{\min} . Как вы считаете, будут ли результаты расчета теми же самыми, если анемометр в начальный момент времени показывает V_{\max} ? Что изменится в характере кривой?

3.4 Литература

1. 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.
2. Качурин Л.Г. Методы метеорологических измерений. Методы зондирования атмосферы. – Л.: Гидрометеониздат, 1985.– 465 с.
3. Григоров Н.О., Симакина Т.Е. Задачник по дисциплине «Методы и средства гидрометеорологических измерений». С-Пб, РГГМУ, 2006.-41с.
4. Толмачева Н.И. Методы и средства гидрометеорологических измерений (для метеорологов): учебное пособие /Н.И. Толмачёва; Пермский университет. – Пермь, 2011. – 233 с.

Форма отчета

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

кафедра экспериментальной физики атмосферы

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

по дисциплине

“Методы и средства гидрометеорологических измерений”.

Чувствительность и тепловая инерция жидкостных термометров

вариант 1

Выполнил
студент группы ПМ-Б17-1
Иванов И.И.

Санкт - Петербург
2019

Цель работы: _____

Сведения из теории _____

Выполнение работы:

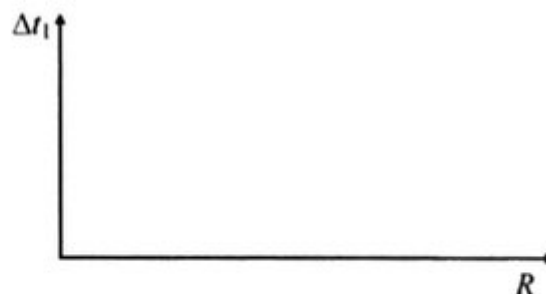
1. Определить чувствительность и шкаловую погрешность для шарообразного резервуара по формулам:

$$S = \frac{dh}{dt} = \beta \frac{4}{3r^2} \cdot R^3, \quad \Delta t_1 = \frac{\Delta h}{S}$$

Результаты расчета шкаловой погрешности для шарообразного резервуара

R	S	Δt_1

График зависимости погрешности Δt_1 от радиуса резервуара



Анализ зависимости шкаловой погрешности от радиуса резервуара

2. Рассчитал инерционную погрешность Δt_2 по формуле ...

Результаты расчета инерционной погрешности для шарообразного резервуара

R	α	Δt_2

График зависимости погрешности Δt_2 от радиуса резервуара

Анализ зависимости инерционной погрешности от радиуса резервуара

3. Рассчитал суммарную погрешность ...

R	Δt_1	Δt_2	Δt

График зависимости шкаловой погрешности, инерционной погрешности и суммарной погрешности от радиуса резервуара.

Анализ зависимости

4. Рассчитал зависимости шкаловой, инерционной и суммарной погрешностей от высоты цилиндрического резервуара ...

H	S	α	Δt_1	Δt_2	Δt

График зависимости шкаловой, инерционной и суммарной погрешностей от высоты цилиндрического резервуара...

Выводы: _____

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**Григоров Николай Олегович
Восканян Карина Левановна**

**Практикум
по дисциплине**

«Методы и средства гидрометеорологических измерений».

