



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
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

На тему «Исследование инерции и чувствительности датчиков
метеорологической измерительной техники»

Исполнитель Никитина Виктория Сергеевна

(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)

«31» мая 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Введение	3
1 Погрешность, чувствительность и инерция прибора	6
2 Общие сведения об актинометрических измерениях	10
2.1 Приборы для измерения прямой солнечной радиации	15
2.2 Приборы для измерения суммарной, рассеянной и отраженной солнечной радиации	18
2.3 Приборы для измерения радиационного баланса	21
3 Вывод рабочих формул для определения тепловой инерции и чувствительности балансомера в случае стационарного состояния системы	24
3.1 Анализ размерностей	30
4. Расчет чувствительности и инерции балансомера в зависимости от различных параметров при стационарном состоянии системы	32
4.1 Определение коэффициента внутренней теплопроводности балансиомера	32
4.2 Определение ветрового множителя балансомера Φ_v	33
4.3 Определение коэффициента конвективного теплообмена α	34
4.4 Расчет чувствительности балансомера в зависимости от скорости ветра	36
4.5 Расчет коэффициента тепловой инерции балансомера в зависимости от скорости ветра	39
4.6 Расчет временного хода разности температур пластин балансомера при разных значениях скорости ветра	42
4.7 Расчет чувствительности и коэффициента инерции балансомера при разных значениях толщины балансомера	44
4.8 Расчет чувствительности и коэффициента инерции балансомера при применении разных материалов для брусков балансомера	44
5. Вывод рабочих формул для расчета тепловой инерции и чувствительности балансомера для случая нестационарного состояния	47

5.1 Исследование чувствительности балансомера при нестационарном состоянии системы	54
5.2 Исследование инерционной погрешности балансомера	55
6. Вывод рабочих формул для расчета тепловой инерции актинометра	59
6.1 Анализ размерностей	65
Заключение	67
Список использованных источников	70

Введение

Известно, что лучистая энергия является одним из основных видов энергии на планете Земля. Такая энергия имеет название солнечной радиации, и она непрерывно поступает от Солнца на поверхность Земли, принося тепло и свет, подпитывая все природные процессы и оказывая влияние на обитателей планеты. Безусловно, она оказывает влияние также на метеорологические процессы и явления, возникающие и происходящие в атмосфере.

Солнечная радиация является основообразующим фактором для всех без исключения погодных процессов. С другой стороны, прогнозирование метеорологических условий и величин имеет большое значение, поскольку переизбыток солнечной радиации, как и ее недостаток, может негативно сказываться на нормальной жизнедеятельности человека, а также представителей флоры и фауны. При увеличении или уменьшении количества радиации наблюдается ухудшение экологической обстановки – например, опустынивание местности вследствие губительного воздействия излучения, таяние вечной мерзлоты, миграции популяций насекомых и т. д. Кроме того, весь спектр солнечной радиации включен в перечень факторов, канцерогенных для человека. Таким образом, производство измерений параметров солнечной радиации является первостепенной задачей метеорологического мониторинга, что подтверждается вышеизложенными фактами.

Для изучения и контроля радиационного режима на сети метеорологических станций ежедневно с помощью приборов производят актинометрические наблюдения. Получаемая информация должна быть максимально точной. Согласно «Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам» [1] для измерений должны использоваться только приборы, которые рекомендованы для сети Государственной системы наблюдений и контроля природной среды, и соответствуют виду измерений.

К каждому прибору обязательно должен прилагаться паспорт, в котором указаны технические характеристики прибора, и свидетельство о пригодности прибора для производства соответствующих измерений.

Однако, известно, что все приборы производят измерение метеорологических величин с ошибкой, называемой погрешностью прибора. Эта ошибка неизбежна, поскольку каждый прибор состоит из отдельных элементов, преобразующих измеряемую величину в различные сигналы, воспринимаемые человеком или специальной аппаратурой. В результате таких преобразований точность значения величины, получаемой на выходе, существенно снижается, т. к. возрастает погрешность измерений. Понятие величины погрешностей прибора тесно связано с понятием чувствительности прибора.

Целью данной магистерской работы является исследование чувствительности и инерционной погрешности метеорологических приборов для измерения прямой солнечной радиации и радиационного баланса – актинометра и балансомера соответственно, с целью увеличения точности измерений путем модернизации прибора и использования методики цифровой обработки сигнала, поступающего с прибора.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Вывод уравнения, описывающего зависимость выходного тока балансомера от радиационного баланса и от времени, прошедшего с момента открытия балансомера.
2. Определить понятие коэффициента тепловой инерции балансомера и выяснить его зависимость от различных параметров.
3. Рассчитать значения чувствительности и коэффициента тепловой инерции балансомера в зависимости от скорости ветра.
4. Рассчитать временной ход разности температур между пластинами балансомера с целью определить минимальное время для начала измерений.

5. При разных гипотетических значениях толщины балансомера и разных материалов брусков балансомера рассчитать значения чувствительности и коэффициента тепловой инерции.
6. Вывод уравнения, описывающего зависимость выходного тока актинометра от прямой солнечной радиации.
7. Определить понятие коэффициента тепловой инерции актинометра и выяснить его зависимость от различных параметров.
8. Рассчитать значения коэффициента тепловой инерции актинометра.
9. Дать рекомендации по усовершенствованию конструкции датчиков приборов, а также предложить методику цифровой обработки сигнала приборов для устранения инерционной погрешности и увеличения чувствительности.

Актуальность данной работы заключается в том, что исследование инерции и чувствительности метеорологических приборов для измерения актинометрических величин открывает возможность существенно увеличить точность получаемой информации и, как следствие, улучшить качество метеорологических прогнозов.

Практическая значимость данного исследования состоит в возможности автоматизации процесса учета погрешности измерения при производстве наблюдений на метеорологических станциях.

Структура и объем работы

Магистерская диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка использованных источников, содержащего 11 наименований. Общий объем работы составляет 73 страницы.

1 Погрешность, чувствительность и инерция прибора

При работе с тем или иным метеорологическим прибором обязательным является знание основных характеристик данного прибора, а именно – чувствительности, инерции и погрешности. Эти характеристики показывают, насколько прибор пригоден для измерения в данных конкретных условиях.

Абсолютная чувствительность прибора представляет собой отношение изменения выходной величины Y к вызвавшему ее изменению входной величины X [2]. С точки зрения математики это отношение можно выразить в виде производной:

$$S = \frac{dY}{dX} \quad (1.1)$$

Очевидно, что входная величина представляется собой ту величину, которую измеряет прибор (например, солнечная радиация, скорость ветра, давление и т.д.). Выходная величина – это та величина, в которую преобразуется входная в ходе работы прибора. Это может быть отклонение стрелки прибора, высота столбика ртути и т.п. Если нам заранее известна зависимость $Y(X)$, то можно узнать чувствительность, проведя математические преобразования с формулой (1.1). Данная зависимость может быть достаточно простой (например, в случае с чувствительностью ртутного барометра, где входной величиной является атмосферное давление, а выходной – высота столбика ртути[2]) или сложной (например, в случае с чувствительностью анеморумбометра М63-М1, где входными величинами являются скорость и направление ветра, а выходной – сигнал в цифровой форме (импульсы)[2]). В случае с актинометром и балансомером входной

величиной выступает прямая солнечная радиации и радиационный баланс соответственно, а выходной – ток, текущий через гальванометр [3,4,5].

В случае если прибор состоит из нескольких блоков (рисунок 1.1), то чувствительность прибора становится равной произведению чувствительности каждого из блоков.

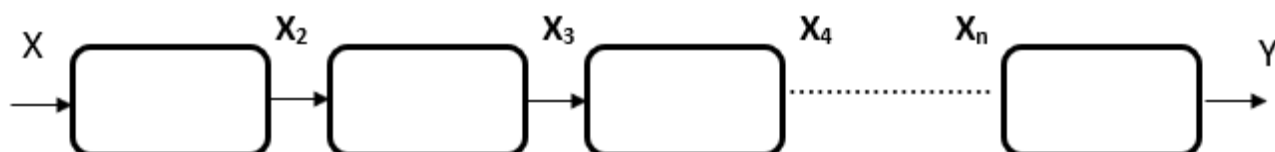


Рисунок 1.1– Блок-схема сложного измерительного прибора

$$Y = f(X) = f(X_n(X_{n-1}(X_{n-2} \dots (X))) \quad (1.2)$$

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dY}{dX_n} * \frac{dX_n}{dX_{n-1}} * \frac{dX_{n-1}}{dX_{n-2}} * \dots * \frac{dX_2}{dX} \quad (1.3)$$

Такое представление дает возможность исследовать чувствительность прибора путем исследования чувствительности отдельных его блоков. Можно рассматривать чувствительность одного блока независимо от других и дать рекомендации по увеличению чувствительности прибора в целом.

Существует также понятие относительной чувствительности прибора. Она представляет собой отношение абсолютной чувствительности к значению выходной величины $Y[2]$:

$$S = \frac{1}{Y} \frac{dY}{dX} \quad (1.4)$$

Относительная чувствительность показывает, на какую часть от самой себя изменяется выходная величина при изменении входной величины на единицу. Особенность относительной чувствительности в том, что она имеет одну и ту же размерность для всех однотипных приборов (например, анемометров). Следовательно, мы можем производить сравнение приборов по их относительной чувствительности.

Еще одной важной характеристикой прибора является погрешность измерения. Обычно она выражается как $\pm\Delta X$, где X – входная величина прибора (т.е. измеряемая величина). Погрешность измерения напрямую связана с чувствительностью. Очевидно, что чем больше чувствительность прибора, тем меньше будут значения погрешности. Математически это можно выразить так:

$$\Delta X = \frac{\Delta Y}{S}, \quad (1.5)$$

где S – чувствительность прибора;

ΔY – погрешность измерения выходной величины.

ΔY для стрелочных приборов как правило составляет половину деления шкалы. Для цифровых приборов эта величина определяется, исходя из физической природы выходной величины.

При определении погрешности прибора помимо величин, входящих в уравнение (1.5) следует учитывать погрешности, обусловленные влиянием на работу прибора других физических величин.

Инерция прибора – третья важнейшая характеристика. Под инерцией прибора имеется в виду то обстоятельство, что прибор реагирует на изменение измеряемой величины не мгновенно, а с некоторой задержкой во времени [2].

Каждый прибор обладает паспортом, в котором содержится информация об инерции прибора. В качестве численной характеристики

инерции можно использовать понятие коэффициента инерции. Коэффициент инерции – это время, в течение которого разность между установившимися и текущими показаниями прибора уменьшается в e раз [3, 4]. Иногда коэффициент инерции называют постоянной времени прибора. У некоторых приборов невозможно точно указать коэффициент инерции, так как он зависит от внешних факторов.

В случае сложного измерительного прибора, состоящего из нескольких измерительных блоков (рисунок 1.1), общая инерция будет равна сумме инерций всех отдельных блоков.

Также нужно отметить зависимость между чувствительностью прибора и его инерцией. Если наша цель уменьшить инерцию, то в большинстве случаев и чувствительность прибора неизбежно уменьшится. Если наша цель повысить чувствительность, то и инерция прибора увеличится. Иными словами, улучшая одну характеристику, мы, как правило, неизбежно ухудшаем другую.

2 Общие сведения об актинометрических измерениях

Актинометрия – раздел геофизики, изучающий энергию солнечного излучения и излучения земной поверхности, а также преобразования этой энергии. Актинометрические наблюдения выполняются для изучения радиационного режима той или иной местности, поскольку радиационный режим определяет климат, а климат, в свою очередь – условия для жизнедеятельности человека [6].

Солнце – это основной источник энергии, поступающей на поверхность Земли. На пути к земной поверхности солнечное излучение частично поглощается атмосферой, частично – самой земной поверхностью, а часть излучения уходит в пространство. Отсюда можно сделать вывод, что солнечное излучение может быть двух видов: прямое – приходящее непосредственно от Солнца и рассеянное – приходящее из любой точки небесной сферы.

Когда солнечное излучение достигает земной поверхности, часть его поглощается деятельным слоем (подстилающей поверхностью) и преобразуется в тепловую энергию, а часть – отражается. Таким образом, деятельный слой земной поверхности является источником теплового излучения, направленного в атмосферу. Атмосфера в свою очередь поглощает тепловое и солнечное излучение и также является источником теплового излучения, которое направлено и к земной поверхности, и в пространство.

В актинометрии существует понятие радиации. Радиация – плотность потока излучения, приходящего от Солнца, земной поверхности и атмосферы на перпендикулярную лучу плоскость. Радиация подразделяется в зависимости от источника излучения и спектрального состава на солнечную, земную и атмосферную (рисунок 2.1). Солнечная радиация в актинометрии именуется коротковолновой радиацией, поскольку она сосредоточена в

интервале длин волн 0,3-0,4 мкм. Земная и атмосферная радиация – это длинноволновый вид радиации, так как она занимает спектральную область 4-100 мкм. Измеренная по всей спектральной области от 0,3 до 100 мкм радиация называется интегральной, или суммарной радиацией.



Рисунок 2.1 – Радиационные потоки в атмосфере [6]

Также радиация подразделяется на невидимую ультрафиолетовую (диапазон длин волн 0,003-0,4 мкм), видимый свет (диапазон длин волн 0,4-0,75 мкм), инфракрасное излучение (диапазон длин волн более 0,75 мкм).

Солнечная радиация (коротковолновая) делится на прямую S , поступающую непосредственно от диска Солнца, рассеянную D , поступающую от небесной сферы и отраженную коротковолновую R_k , поступающую от подстилающей поверхности.

Земная радиация (длинноволновая) E_3 создается тепловым излучением земной поверхности, которое близко к излучению абсолютно черного тела.

Атмосферная радиация E_A – энергетическая освещенность, которую создает тепловое излучение атмосферы.

Отраженная радиация R_D создается тепловым излучением атмосферы, отраженным от деятельного слоя. Значения отраженной радиации малы по сравнению со значениями земной радиации, поэтому ими можно пренебречь.

Актинометрические наблюдения заключают в себе определение комплекса характеристик солнечного излучения, приходящего на земную поверхность, теплового излучения атмосферы, а также других естественных земных объектов и ряда дополнительных параметров, влияющих на солнечное излучение, процессы его трансформации и условия наблюдений. Пять основных видов радиации (прямая солнечная, рассеянная коротковолновая, суммарная, отраженная, радиационный баланс) определяются по результатам непосредственных измерений и с помощью них вычисляются дополнительные параметры (коротковолновое альbedo подстилающей поверхности, балансы коротковолновой и длинноволновой радиаций) [6].

Прямая солнечная радиация S – энергетическая освещенность, которую создает излучение, поступающее в виде параллельного потока лучей непосредственно от диска Солнца и лучей от околосолнечной зоны в телесном угле, не превышающим 5° , на поверхности, перпендикулярной направлению солнечных лучей. Существует также понятие солнечной постоянной ($S_0 = 1,367$ кВт/м²). Это величина прямой солнечной радиации за пределами атмосферы земли на расстоянии, равном среднему расстоянию между Солнцем и Землей. Зная значения прямой солнечной радиации S можно вычислить прямую солнечную радиацию на горизонтальной поверхности S' по формуле:

$$S' = S \sin h , \quad (2.1)$$

где h – высота Солнца в момент наблюдения.

Прямая солнечная радиация измеряется актинометром.

Рассеянная солнечная радиация D – энергетическая освещенность, которую создает в атмосфере рассеянное солнечное излучение, поступающее на горизонтальную поверхность от всей небесной сферы, исключая диск Солнца и околосолнечную зону размером 5° . Рассеянная солнечная радиация измеряется пиранометром, затененным от прямой солнечной радиации.

Суммарная солнечная радиация Q – совокупность прямой и рассеянной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность. Исходя из этого, Q можно вычислить по формуле:

$$Q = D + S' \quad (2.2)$$

В пасмурную погоду суммарная радиация состоит только из рассеянной радиации. Измеряется незатененным пиранометром, также может быть вычислена по показаниям актинометра и затененного пиранометра.

Отраженная коротковолновая радиация R_K представляет собой отраженное от деятельного слоя коротковолновое излучение. Измеряется пиранометром или альбедометром. Отношение отраженной коротковолновой радиации к суммарной представляет собой коротковолновое альbedo A_K и является характеристикой деятельного слоя земли.

$$A_K = \frac{R_K}{Q} \quad (2.3)$$

Максимальным альbedo обладает свежавыпавший снег, минимальным – глубокий чистый водоем при большой высоте Солнца.

Радиационный баланс B – разность между энергетической освещенностью приходящего к деятельному слою излучения и

энергетической освещенностью уходящего от деятельного слоя излучения. Приходящее излучение, то есть приход радиации, складывается из прямой солнечной радиации S' , рассеянной радиации D и атмосферной радиации E_A . Уходящее излучение складывается из отраженной коротковолновой радиации R_K , отраженной длинноволновой радиации R_D и излучения земной поверхности E_3 . Таким образом, радиационный баланс связан с другими видами радиации следующим образом:

$$B = D + S' + E_A - R_K - R_D - E_3 \quad (2.4)$$

Также величина B может быть представлена как сумма баланса коротковолновой и длинноволновой радиации:

$$B = B_K + B_D, \quad (2.5)$$

где B_K – баланс коротковолновой радиации, который характеризует поглощение коротковолновой радиации деятельным слоем. Может быть представлен как разность между суммарной радиацией и отраженной радиацией:

$$B_K = Q - R_K = D + S' - R_K = Q(1 - A_K) \quad (2.6)$$

B_D – баланс длинноволновой радиации, представляет собой разность между атмосферной радиацией, земной радиацией и отраженной длинноволновой радиацией:

$$B_D = E_A - E_3 - R_D \quad (2.7)$$

Величина радиационного баланса определяется путем измерений с помощью балансомера или вычисляется по формуле:

$$B = (B - S') + S' \quad (2.8)$$

Здесь величина в скобках – радиационный баланс без учета прямой солнечной радиации, измеряемый по затененному балансомеру. Коротковолновый радиационный баланс измеряется пиранометром и вычисляют по формуле [6]:

$$B_K = Q - R_K \quad (2.9)$$

Длинноволновый радиационный баланс вычисляется по формуле:

$$B_D = B - B_K = B - Q + R_K \quad (2.10)$$

В качестве единицы измерения радиации принят кВт/м², суммы радиации выражают в МДж/м².

2.1 Приборы для измерения прямой солнечной радиации

Существует два прибора, с помощью которых можно выполнить измерение прямой солнечной радиации – это компенсационный пиргелиометр и термоэлектрический актинометр. На метеорологической сети пиргелиометр используется для калибровки, а основным прибором для измерения прямой солнечной радиации является термоэлектрический актинометр (рисунок 2.2).

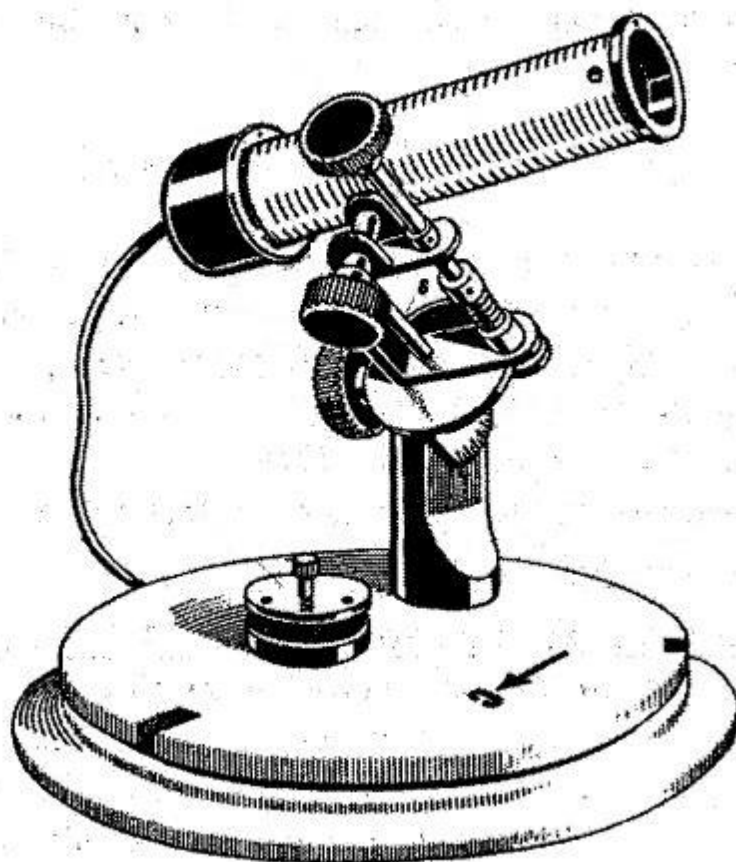


Рисунок 2.2– Актинометр термоэлектрический М-3 (АТ-50)

Принцип его действия заключается в поглощении прямой солнечной радиации зачерненным диском, соединенным с нечетными спаями термобатареи (рисунок 2.3). Четные же спаи в свою очередь соединены с медным кольцом, которое находится в тени. Очевидно, что медное кольцо будет иметь температуру окружающей среды, а черный диск нагреется больше, поскольку на него попадает прямая солнечная радиация. Таким образом, значение прямой солнечной радиации определяется разностью температур спаев термобатареи. Термобатарея преобразует эту разность в электрический ток, который измеряется гальванометром.

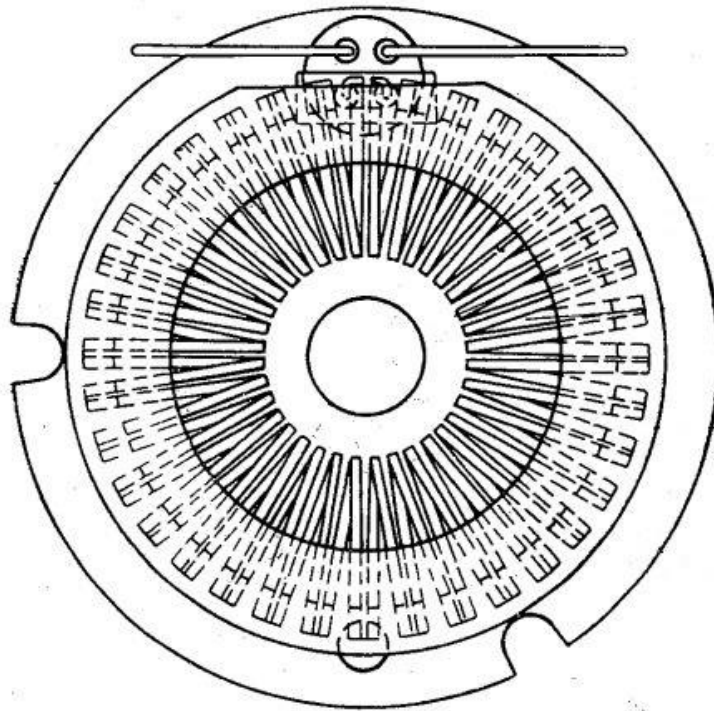


Рисунок 2.3 – Приемный элемент термоэлектрического актинометра М-3 (АТ-50). В центре – серебряный диск, по периметру – медное кольцо, пространство между ними заполнено спаями термобатареи

Градировка актинометра проводится как с гальванометром, так и без него. В первом случае прямая солнечная радиация рассчитывается по формуле [6]:

$$S = k \cdot (N - N_0), \quad (2.11)$$

где N – показания гальванометра в делениях при измерении;

N_0 – место нуля прибора;

K – переводной множитель размерностью кВт/м² · дел.

Переводной множитель зависит от типа прибора и температуры прибора. При градуировке актинометра без гальванометра температурная зависимость не учитывается, а при градуировке с гальванометром вводится поправка на температуру.

Правила установки на пунктах наблюдения всех актинометрических приборов детально описаны в работе [6].

2.2 Приборы для измерения суммарной, рассеянной и отраженной солнечной радиации

Пиранометр (рисунок 2.4) – прибор, с помощью которого измеряется суммарная радиация Q , рассеянная радиация D (при использовании теневого экрана) и отраженная коротковолновая радиация R_K .

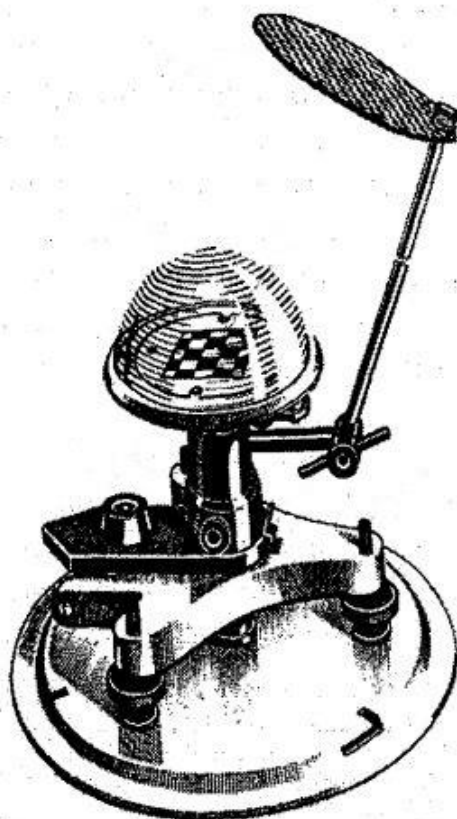


Рисунок 2.4 – Термоэлектрический пиранометр М-8-М

Пиранометр снабжен приемником с квадратной термобатареей, которая раскрашена наподобие шахматной доски (рисунок 2.5).

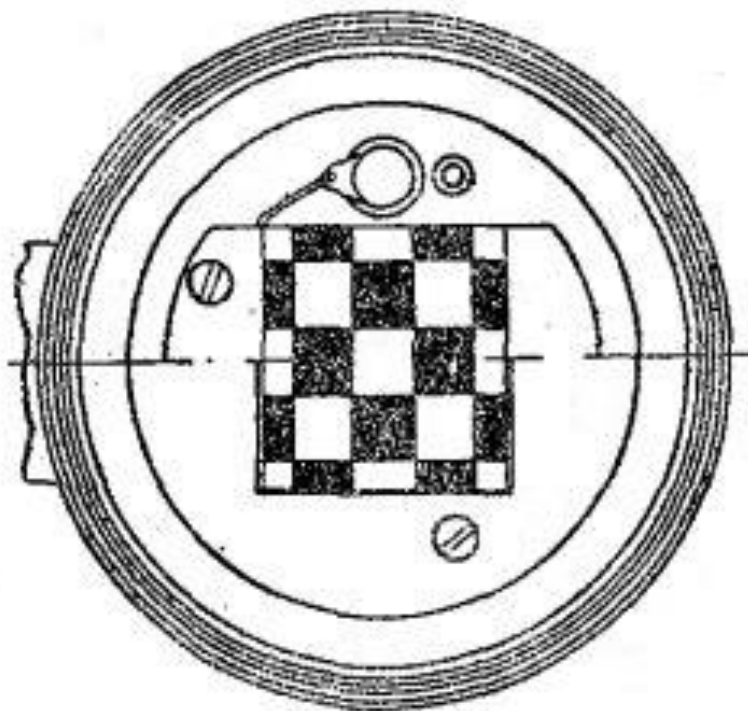


Рисунок 2.4 – Приемный элемент термоэлектрического пиранометра М-8-М.

В центре – площадка с черными и белыми полями, покрытыми сажой и магнезией соответственно. Датчик закрыт стеклянной крышкой для исключения ветровой погрешности.

Черные поля покрыты сажой, которая поглощает коротковолновую и длинноволновую радиацию, а белые – магнезией, которая поглощает только длинноволновую радиацию. Таким образом между белыми и черными полями появляется разность температур, которая пропорциональна суммарной радиации при незатененном пиранометре, а при затененном – пропорциональна рассеянной радиации.

Однако, поглощательные свойства сажи и магнезии по отношению к длинноволновой радиации различны, а магнезия поглощает коротковолновую радиацию, хотя и хуже, чем сажа. Для выравнивания поглощательных свойств по отношению к длинноволновой радиации белые поля пропитывают парафином.

Чтобы исключить влияние ветра и температуры пиранометр закрыт полусферическим стеклянным колпаком, пропускающим радиацию.

Чтобы измерить рассеянную радиацию необходимо изолировать пиранометр от прямой солнечной радиации с помощью теневого экрана.

Суммарная радиация измеряется так же, как и рассеянная, только без применения теневого экрана. Однако, на практике суммарную радиацию определяют сложением прямой радиации, измеренной по актинометру, и рассеянной радиации, измеренной по пиранометру. Это делается для того, чтобы исключить погрешности, возникающие при переносе тепла с черных на белые поля.

Для измерения отраженной радиации пиранометр опрокидывается приемником вниз. При помощи пиранометра возможно также измерить альбедо деятельного слоя. Оно вычисляется как отношение суммарной радиации с верхней и нижней полусферы.

Градуировка пиранометра производится путем сравнения его показаний с актинометром или пиргелиометром. Результатом сравнения является переводной множитель. Если он известен, то рассеянная радиация вычисляется по формуле:

$$D = k \cdot (N - N_0), \quad (2.12)$$

где N – показания гальванометра в делениях при измерении;

N_0 – место нуля прибора;

k – переводной множитель размерностью кВт/м² · дел [6].

2.3 Приборы для измерения радиационного баланса

Для измерения радиационного баланса используют балансомер (рисунок 2.6) в комплекте с гальванометром. Так же с помощью балансомера возможно вычислить радиационный баланс без учета прямой солнечной радиации (с использованием теневого экрана).

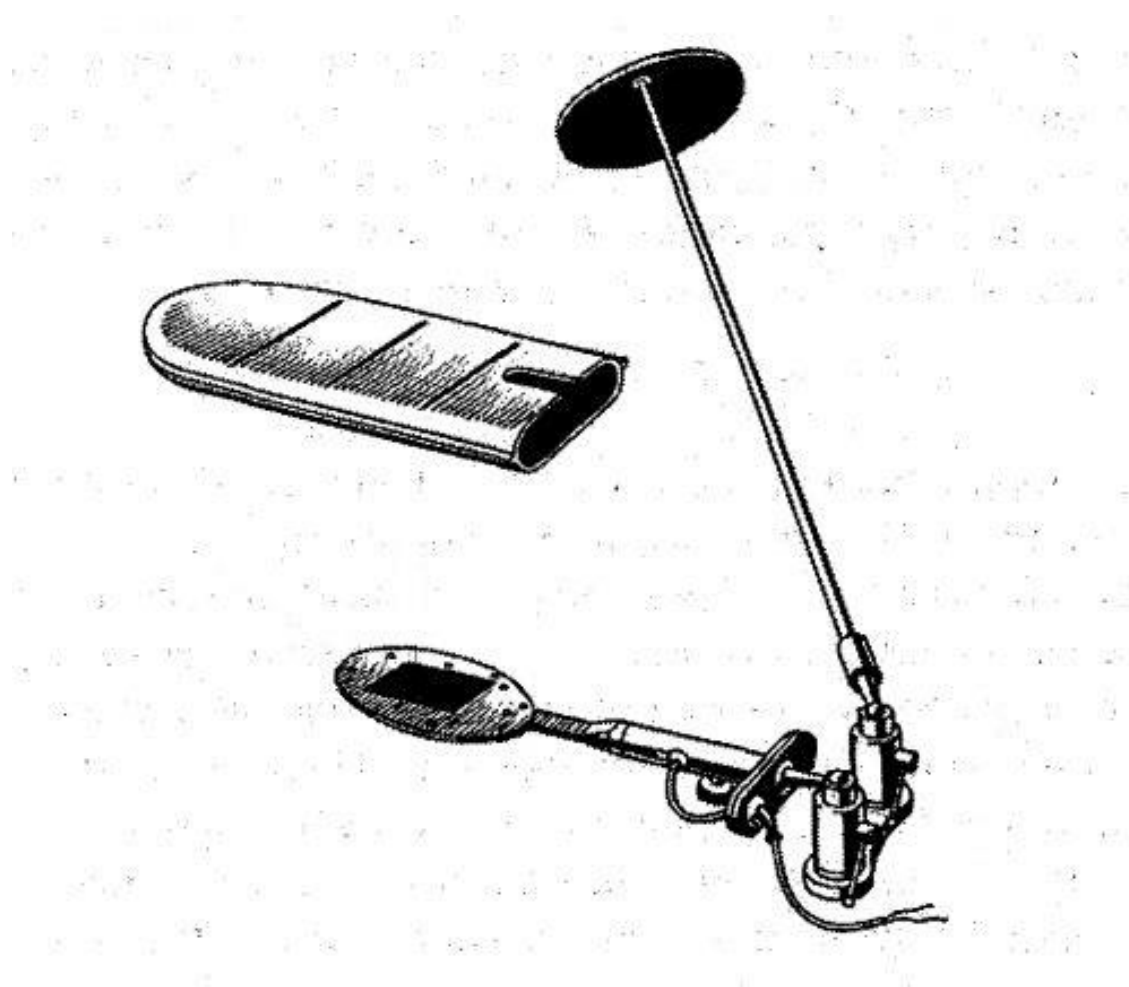


Рисунок 2.6 – Термоэлектрический балансомер М-10М

Датчик балансомера состоит из термобатарей, закрепленной между двумя медными пластинами, зачерненными сажей (рисунок 2.7). Пластины устанавливаются горизонтально, одна из них обращена вниз, к действующему

слою земли, и на нее поступает коротковолновый поток отраженной солнечной радиации R_K и земное излучение E_3 вместе с отраженной частью длинноволнового R_D излучения атмосферы E_A и окружающих предметов. Вторая пластина обращена вверх, и на нее поступает суммарная солнечная радиация Q и излучение атмосферы E_A . Отсюда следует вывод, что балансомер измеряет разность потоков с верхней и нижней полусферы:

$$B = (S' + D + E_A) - (R_K + R_D + E_3) \quad (2.13)$$

Обе пластины балансомера обмениваются теплом с окружающей средой в результате конвективного теплообмена и излучения. Кроме того, тепло переходит от более нагретой пластины к менее нагретой. Влияние ветра на показания балансомера учитывается с помощью введения поправочного множителя Φ_V .



Рисунок 2.7 – Приемный элемент термоэлектрического балансомера М-10М. В центре – пластина, покрытая сажей, с нижней стороны – такая же пластина.

Термобатарея балансомера представляет собой ленту константана, намотанную на медный брусок. Половина витков покрыта тонким слоем серебра, а вторая половина – зачернена. Места окончания серебряного слоя – термоспаи, располагаются поочередно на верхней и нижней стороне бруска. Внутренняя полость балансомера герметизирована [6].

3 Вывод рабочих формул для определения тепловой инерции и чувствительности балансомера в случае стационарного состояния системы

Рассмотрим случай установившегося (стационарного) состояния. То есть значение баланса постоянное во времени, а балансомер воспринимает его, начиная от нулевого значения.

Для определения чувствительности и инерции балансомера выведем уравнение, связывающее разность температур верхней T_1 и нижней T_2 пластин и время τ . Предположим, что в начальный момент времени ($\tau = 0$) балансомер был закрыт, т.е. $T_1 = T_2$; $T_1 - T_2 = \Delta T = 0$. Допустим, что при открытии балансомера приток радиации на верхнюю пластину B_1 больше притока на нижнюю пластину B_2 , т.е. $B_1 > B_2$. Тогда уравнение притока тепла для верхней пластины запишется в виде:

$$\frac{dQ_1}{d\tau} = -\alpha S(T_1 - \Theta) + B_1 S - \frac{\gamma S}{z}(T_1 - T_2), \quad (3.1)$$

где α – коэффициент конвективного теплообмена пластины с воздухом;

S – площадь пластины;

Θ – температура окружающего воздуха;

γ – коэффициент теплопроводности вещества, заполняющего пространство между пластинами;

z – толщина балансомера [3,4].

Очевидно, что первое слагаемое в уравнении (3.1) должно быть учтено со знаком «минус», поскольку балансомер теплее окружающего воздуха. При $T_1 > T_2$ последнее слагаемое в уравнении (3.1) является уходящим потоком тепла к нижней пластине и также должно быть учтено со знаком «минус».

Для нижней пластины уравнение выглядит так же, но поскольку приток тепла с верхней пластины нагревает нижнюю пластину, знак последнего слагаемого меняется на «плюс»:

$$\frac{dQ_2}{d\tau} = -\alpha S(T_2 - \theta) + B_2 S + \frac{\gamma S}{z}(T_1 - T_2) \quad (3.2)$$

Вычитая почленно из уравнения (3.1) уравнение (3.2) имеем:

$$\frac{d}{d\tau}(Q_2 - Q_1) = -S\alpha(T_1 - T_2) + S(B_1 - B_2) - \frac{2\gamma S}{z}(T_1 - T_2), \quad (3.3)$$

где $B = B_1 - B_2$ – радиационный баланс.

Учтем известное соотношение:

$$dQ = mcdT, \quad (3.4)$$

где m – масса балансомера;

c – удельная теплоемкость вещества, заполняющего балансомер.

Тогда имеем:

$$mc \frac{d(T_1 - T_2)}{d\tau} = -S \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z} \right) (T_1 - T_2) + BS \quad (3.5)$$

или:

$$\frac{mc}{S \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z} \right)} \frac{d(\Delta T)}{d\tau} = -\Delta T + \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (3.6)$$

Для решения этого дифференциального уравнения введем обозначения:

$$\begin{cases} \Delta T = y; \tau = x; \\ \frac{mc}{S(\alpha + \frac{2\gamma}{z})} = A; \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} = D \end{cases} \quad (3.7)$$

Учтем, что нестационарное состояние длится очень недолгое время (не более 2-3 минут). В течение этого времени можно считать радиационный баланс $B=const$; $\alpha=const$. Остальные величины, входящие в «А» и «D» являются также константами для данного балансомера. Тогда $A=const$; $D=const$.

С учетом этих обозначений перепишем уравнение (3.6):

$$A \frac{dy}{dx} = -y + D \quad (3.8)$$

Это уравнение является неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка. Решение этого уравнения ищем в виде:

$$y = F \cdot e^{-\frac{x}{A}} + D, \quad (3.9)$$

где F – некоторая константа, значение которой должно быть определено из начальных и конечных условий.

Для проверки правильности решения этого уравнения возьмем производную от предполагаемого решения (3.9):

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{F}{A} \cdot e^{-\frac{x}{A}} \quad (3.10)$$

Подставим выражение (3.10) в уравнение (3.8), переписав его в виде:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{y}{A} + \frac{D}{A} \quad (3.11)$$

Тогда:

$$-\frac{F}{A} e^{-\frac{x}{A}} = -\frac{F}{A} e^{-\frac{x}{A}} + \frac{D}{A} - \frac{D}{A} \quad (3.12)$$

Полученное уравнение представляет собой тождество, следовательно, решение найдено правильно. Решение уравнения (3.8) с учетом обозначений (3.7) тогда принимает вид:

$$T_1 - T_2 = \Delta T = F \cdot e^{-\frac{\tau(\alpha + \frac{2\gamma}{z}) \cdot s}{mc}} + \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (3.13)$$

Учтем начальные условия: при $\tau=0$; $T_1-T_2=0$:

$$0 = F + \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (3.14)$$

Откуда:

$$F = -\frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (3.15)$$

Конечное условие при $\tau \rightarrow \infty$:

$$\Delta T_{max} = \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (3.16)$$

Тогда окончательное решение будет выглядеть следующим образом:

$$T_1 - T_2 = \Delta T = -\frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \cdot e^{-\frac{\tau S}{mc}(\alpha + \frac{2\gamma}{z})} + \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (3.17)$$

или:

$$\Delta T = \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \left(1 - e^{-\frac{\tau(\alpha + \frac{2\gamma}{z}) \cdot S}{mc}} \right) \quad (3.18)$$

Уравнение (3.18) дает возможность ввести понятие *коэффициента тепловой инерции балансомера*. Перепишем уравнение в виде:

$$\Delta T = \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\frac{mc}{(\alpha + \frac{2\gamma}{z}) \cdot S}}} \right) \quad (3.19)$$

Заметим, что выражение, стоящее в знаменателе показателя экспоненты в формуле (3.19), имеет размерность времени. Определим коэффициент тепловой инерции балансомера как время, в течение которого разность между максимальной разностью температур и ее текущим значением уменьшается в e раз [3,4]. Следовательно, согласно введенному определению, коэффициент тепловой инерции балансомера:

$$\lambda = \frac{mc}{\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right) \cdot S} \quad (3.20)$$

Таким образом, коэффициент тепловой инерции балансомера(λ) – это время, в течение которого разность между максимальным и текущим значением показаний балансомера уменьшается в e раз (рисунок 3.1).

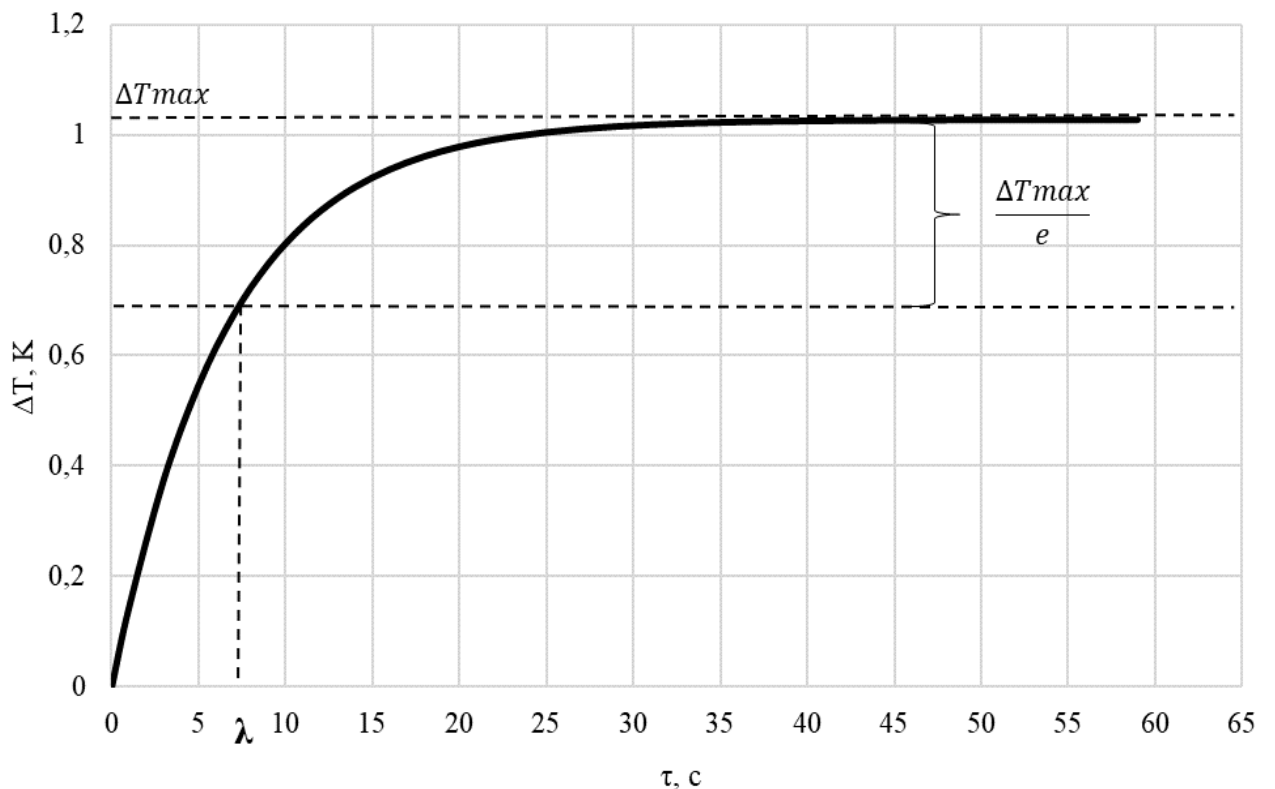


Рисунок 3.1 –К определению коэффициента тепловой инерции балансомера (λ)

Уравнение (3.16) дает возможность определить чувствительность балансомера, взяв в качестве выходной величины разность температур ΔT , а в качестве входной – радиационный баланс B . Тогда согласно определению чувствительности прибора:

$$S_6 = \frac{d(\Delta T)}{dB} = \frac{1}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (3.21)$$

3.1 Анализ размерностей

Для того, чтобы убедиться в правильности выведенных уравнений и понятий, проведем анализ размерностей. Коэффициент инерции, согласно определению, должен иметь размерность времени. Проверим это. Размерности всех величин (таблица 3.1), входящих в формулу для определения коэффициента инерции и разности температур между пластинами балансомера (3.20 и 3.19):

Таблица 3.1

Размерности величин, входящих в уравнение коэффициента тепловой инерции балансомера и разности температур пластин балансомера

Величина	Размерность
m	кг
α	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
ΔT	К
c	$\frac{\text{Вт}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
γ	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
B	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$
S	м^2
z	м
τ	с

Тогда размерность коэффициента инерции λ :

$$[\lambda] = \left[\frac{mc}{\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right) \cdot S} \right] = \left[\frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{К}}}{\text{М}^2 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{М}^2 \cdot \text{К}} + \frac{\text{Вт}}{\text{М} \cdot \text{К} \cdot \text{М}} \right)} \right] = \text{с}$$

При делении времени на коэффициент инерции в показателе экспоненты формулы 3.19 показатель оказывается безразмерным. Таким образом, требования безразмерности показателя, вытекающие из правил математики, соблюдены.

Разность температур (формула 3.19) должна иметь размерность «Кельвин»:

$$[\Delta T] = \left[\frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right) \cdot S}} \right) \right] = \frac{\frac{\text{Вт}}{\text{М}^2}}{\left(\frac{\text{Вт}}{\text{М}^2 \cdot \text{К}} + \frac{\text{Вт}}{\text{М} \cdot \text{К} \cdot \text{М}} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{\text{К}}} = \text{К}$$

Таким образом, анализ размерностей подтверждает справедливость проведенных математических рассуждений.

4. Расчет чувствительности и инерции балансомера в зависимости от различных параметров при стационарном состоянии системы

Для того, чтобы рассчитать инерцию и чувствительность балансомера, необходимо определить значения величин, входящих в уравнения (3.19) и (3.21).

4.1 Определение коэффициента внутренней теплопроводности балансомера

Балансомер состоит из следующих слоев: серебряно-константановая термопара, обернутая вокруг медных брусков, эпоксидная смола и бумага [7]. Толщина медного бруска z_1 составляет $1,5 \cdot 10^{-3}$, толщина слоя эпоксидной смолы z_2 равна $4,6 \cdot 10^{-4}$ м, толщина бумажного слоя $z_3 = 4 \cdot 10^{-5}$ м (при этом учтено, что бумага и эпоксидная смола находятся как в верхней, так и в нижней части балансомера). Коэффициенты теплопроводности составляют: для меди - $\gamma_1 = 384 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, для эпоксидной смолы - $\gamma_2 = 0,17 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, для бумаги $\gamma_3 = 0,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$. Все эти слои следуют один за другим. Это значит, что в данном случае должны складываться величины, обратные их теплопроводности (тепловое сопротивление). Таким образом, величина общего коэффициента теплопроводности балансомера $\frac{\gamma}{z}$ должна вычисляться по формуле:

$$\frac{\gamma}{z} = \frac{1}{\frac{z_1}{\gamma_1} + \frac{z_2}{\gamma_2} + \frac{z_3}{\gamma_3}} = 333,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (4.1)$$

4.2 Определение ветрового множителя балансомера Φ_v

Для установившегося состояния формула (3.19) преобразуется к виду:

$$\Delta T = \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (4.2)$$

С другой стороны, ток, текущий по термобатарее, определяется по формуле [2]:

$$i = \frac{e \cdot n \cdot \Delta T}{R + r}, \quad (4.3)$$

где e – термоЭДС серебряно-константановой термопары,

$$e = 2,78 \cdot 10^{-5} \frac{\text{В}}{\text{К}} [8];$$

n – количество термопар, $n = 330$ [7];

R – сопротивление гальванометра, $R = 41,9$ Ом [7];

r – сопротивление термобатареи, $r = 47,9$ Ом [7].

Из уравнения (4.3) получаем:

$$\Delta T = \frac{i(R + r)}{e \cdot n} \quad (4.4)$$

Приравнивая выражения (4.2) и (4.4), получаем:

$$\frac{i(R + r)}{e \cdot n} = \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (4.5)$$

Отсюда уравнение для тока будет иметь вид:

$$i = \frac{B \cdot e \cdot n}{(R + r)\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right)} \quad (4.6)$$

Соответственно, для чувствительности балансомера получаем:

$$S = \frac{di}{dB} = \frac{e \cdot n}{(R + r)\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right)} \quad (4.7)$$

При актинометрических наблюдениях учитывается ветровой множитель Φ_v , представляющий собой отношение чувствительности балансомера при штиле к чувствительности его при ветре.[7]Из формулы (4.7) видно, что от ветра зависит только конвективного теплообмена α . Тогда, составляя указанное отношение для Φ_v , имеем:

$$\Phi_v = \frac{\alpha + \frac{2\gamma}{z}}{\alpha_0 + \frac{2\gamma}{z}} \quad (4.8)$$

где α_0 – значение коэффициента конвективного теплообмена при штиле ($V=0$ м/с).

4.3 Определение коэффициента конвективного теплообмена α

В работе [9] дано значение коэффициента конвективного теплообмена пластины термографа с окружающим воздухом:

$$\alpha = 11,28 + 23,38 V^{0.8} \quad (4.9)$$

Значения Φ_v при разных скоростях ветра возьмем из паспорта прибора [10]. Расчет, проведенный по формуле (4.8) с учетом значений α , определенных по формуле (4.9), показал, что рассчитанные значения Φ_v выше приведенных в паспорте прибора.

Для приведения в соответствие результатов расчета и паспортных данных формулу (4.9) необходимо изменить, так как условия обдува балансомера и изогнутой пластины термографа несколько отличаются. Измененная формула имеет вид:

$$\alpha = 11,28 + 13.0 V^{0.8} \quad (4.10)$$

Тогда расчетные и паспортные данные для Φ_v практически совпадают (рисунок 4.1).

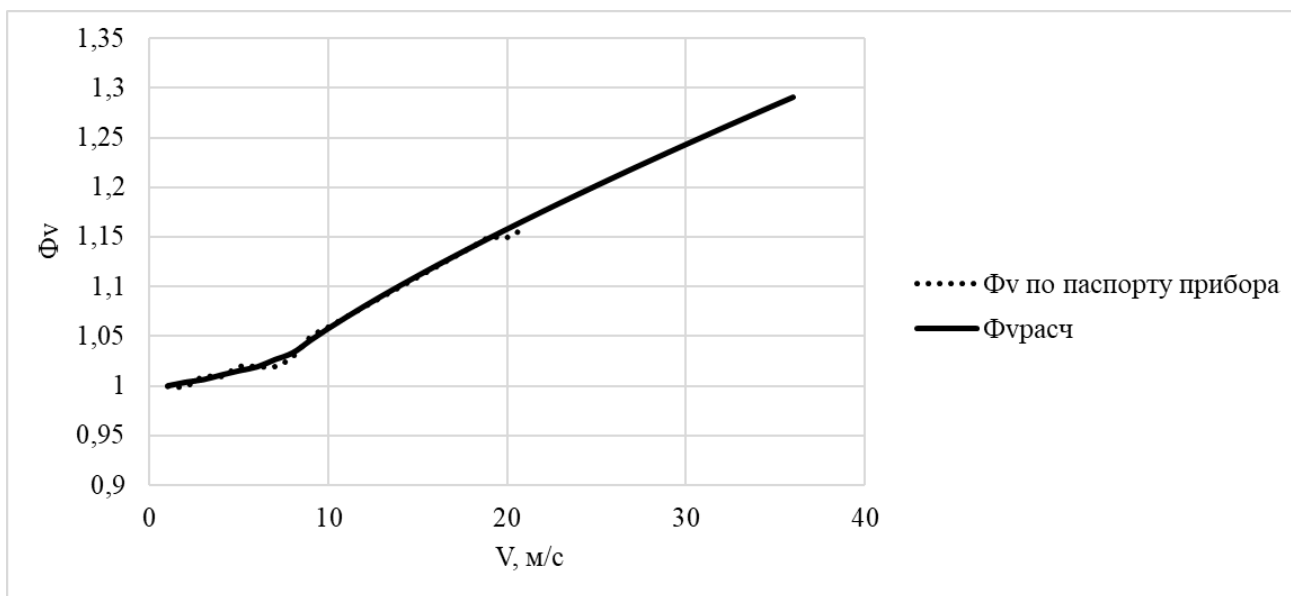


Рисунок 4.1 – Зависимость ветрового множителя Φ_v от скорости ветра V .

Сравнение расчетных значений с приведенными в паспорте

Все дальнейшие расчеты проводились с учетом формулы (4.10).

4.4 Расчет чувствительности балансомера в зависимости от скорости ветра

Для расчета чувствительности балансомера прежде всего была рассчитана зависимость коэффициента конвективного теплообмена от скорости ветра (формула 4.10). Здесь и далее в расчетах использовались константы технических характеристик балансомера М-10М. Площадь каждой из пластин балансомера равна 22см^2 , толщина балансомера составляет 3 мм.

Затем чувствительность балансомера рассчитывалась по формуле (4.7). В расчете использовались константы из уравнения (4.3). Результаты расчета сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Фрагмент таблицы расчетных значений чувствительности балансомера S при различных значениях скорости ветра

V, м/с	S, А/м²*Вт
0	1,46E-07
0,125	1,46E-07
0,25	1,45E-07
0,5	1,45E-07
0,75	1,44E-07
1	1,44E-07
1,5	1,43E-07
2	1,42E-07
3	1,40E-07
4	1,38E-07
5	1,37E-07
6	1,35E-07
7	1,34E-07
8	1,33E-07
9	1,32E-07
10	1,31E-07

Анализ результатов показал, что с увеличением скорости ветра чувствительность балансомера уменьшается (см. рисунок 4.2). Физически это объясняется тем, что ветер увеличивает конвективный теплообмен (см. рисунок 4.3, таблицу 4.2) между обеими пластинами балансомера и окружающим воздухом, тем самым выравнивая разность температур и уменьшая чувствительность.

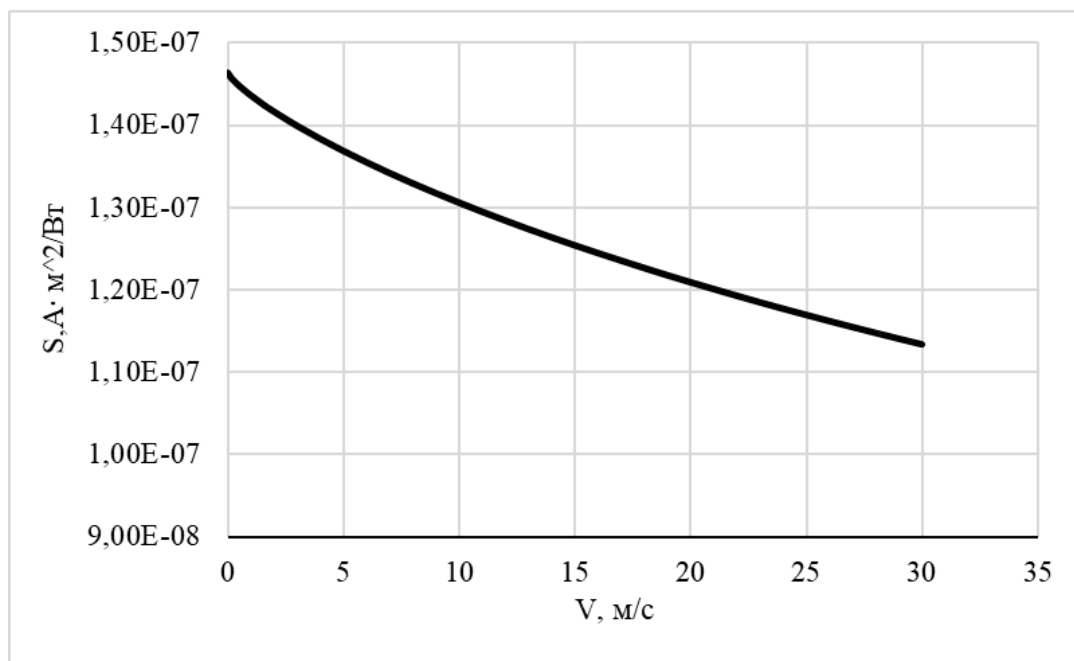


Рисунок 4.2 – Графическое представление зависимости чувствительности балансомера от скорости ветра

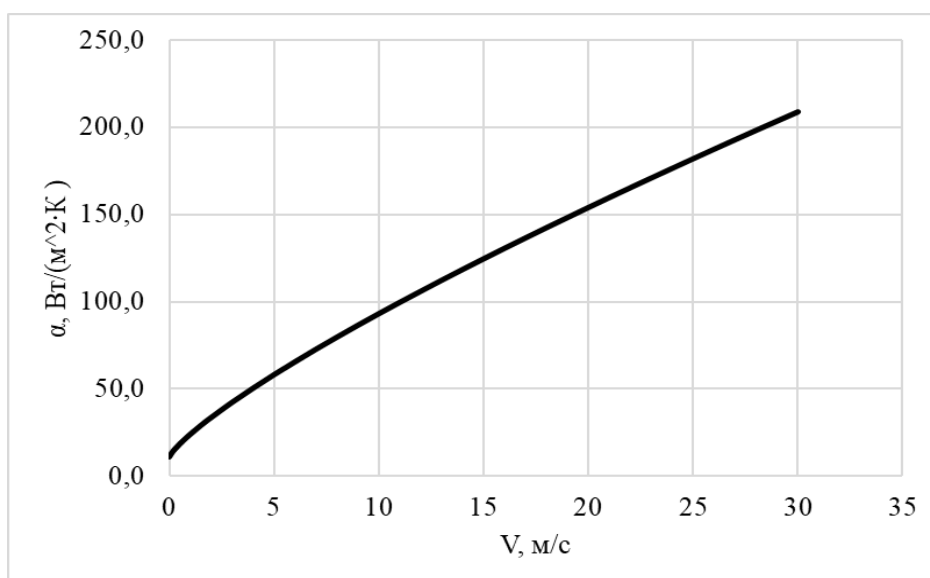


Рисунок 4.3 – Графическое представление зависимости коэффициента конвективного теплообмена α от скорости ветра

Таблица 4.2

Фрагмент таблицы расчетных значений коэффициента конвективного теплообмена α при различных значениях скорости ветра

V, м/с	α, Вт/м²*К
0	11,3
0,125	13,7
0,25	15,6
0,5	18,7
0,75	21,6
1	24,3
1,5	29,3
2	33,9
3	42,6
4	50,7
5	58,4
6	65,8
7	72,9
8	79,9
9	86,7
10	93,3

В ходе данного исследования были проведены сравнения полученных при расчетах результатов с реальными значениями чувствительности балансомера М-10М.

В результате эксперимента, проведенного автором в работе [3] было получено, что в летнее время в Северном полушарии на широте 60° в ночное время суток в безветренную погоду радиационный баланс составляет $0,02$ кВт/м². При этом стрелка гальванометра ГСА-1 отклонялась на 2-3 деления. Учитывая цену деления шкалы гальванометра ($0,9 \cdot 10^{-6}$ А), получаем чувствительность около $1,4 \cdot 10^{-7}$ А · м²/Вт, что соответствует расчету по формуле (4.7).

Таким образом, данные, полученные при расчете по формуле (4.7), соответствуют реальным данным, полученным в ходе измерений.

4.5 Расчет коэффициента тепловой инерции балансомера в зависимости от скорости ветра

Расчет коэффициента инерции был произведен по формуле (3.20). Так как основную часть массы составляют медные бруски в количестве 10 штук с размерами 2,5 мм · 5,5 мм · 55 мм [7], то массу балансомера можно принять равной массе брусков. С учетом плотности меди, равной $8,9 \cdot 10^4$ кг/м³ [11], получаем массу 10 медных брусков равной 0,066 кг. Также необходимо учесть удельную теплоемкость меди, равную 385 Дж/кг · К [11]. Площадь пластины равна $2,2 \cdot 10^{-3}$ м².

Анализируя рисунок 4.4 и таблицу 4. 3, можно сказать, что с увеличением скорости ветра значения коэффициента инерции уменьшаются. Это объясняется тем, что с увеличением скорости ветра увеличивается

значение коэффициента конвективного теплообмена между балансомером и окружающей средой.

Таблица 4.3

Фрагмент таблицы расчетных значений коэффициента тепловой инерции балансомера при различных значениях скорости ветра

V, м/с	λ
0	16,99
0,125	16,92
0,25	16,88
0,5	16,80
0,75	16,73
1	16,67
1,5	16,55
2	16,44
3	16,24
4	16,05
5	15,88
6	15,72
7	15,57
8	15,42
9	15,29
10	15,15

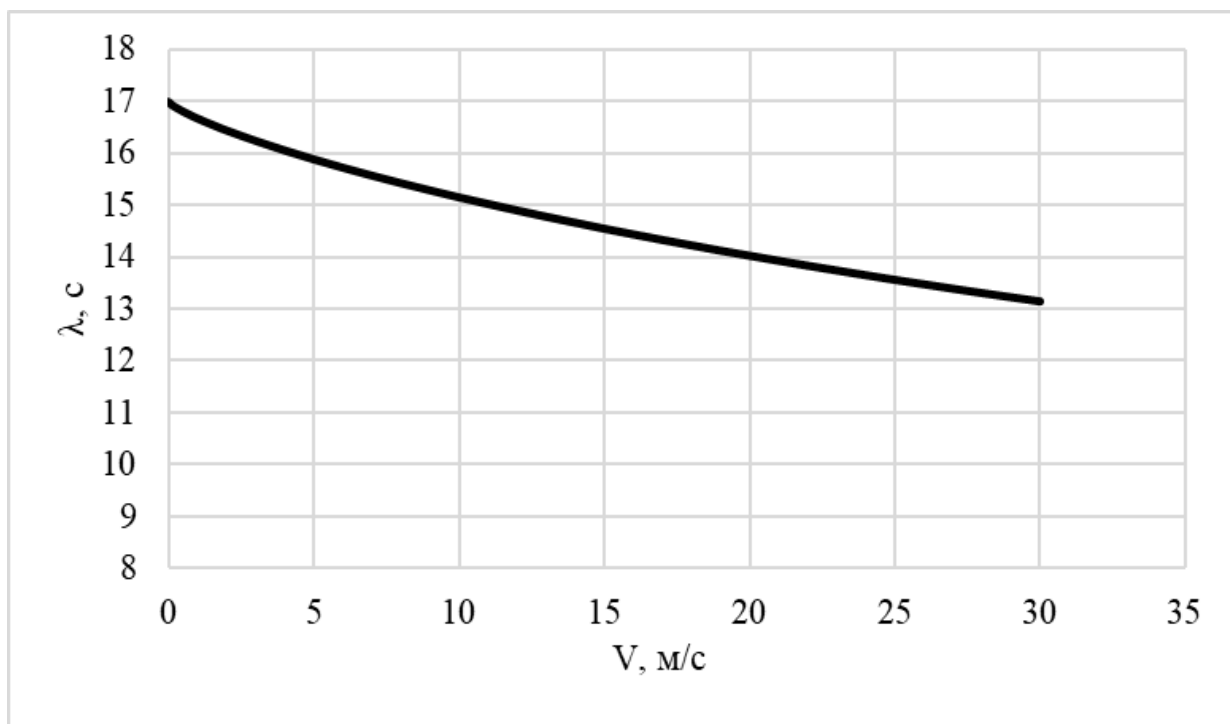


Рисунок 4.4 – Графическое представление зависимости коэффициента инерции балансомера от скорости ветра

Представляет интерес сравнить расчетные значение коэффициента инерции балансомера при нулевой скорости ветра с значением инерции балансомера, приведенным в паспорте прибора М-10М[10], определенным опытным путем.

К сожалению, в паспорте не указано что конкретно представляет собой инерция прибора. Значение, указанное в паспорте прибора, составляет 15 с, что практически совпадает с расчетным значением, равным 17 с. Таким образом, справедливость результатов этой части расчета также подтверждается.

4.6 Расчет временного хода разности температур пластин балансомера при разных значениях скорости ветра

Расчет разности температур между верхней и нижней пластинами балансомера был проведен с использованием формулы (3.19). При учитывалась зависимость коэффициента конвективного теплообмена α от скорости ветра. Значение радиационного баланса было взято равным 900 Вт/м^2 , поскольку это значение близко к реальному значению радиационного баланса летом в ясную погоду в дневное время суток, остальные константы сохранились прежними. Результаты расчета демонстрируют графики на рисунке 4.5 и значения в таблице 4.4.

Таблица 4.4

Фрагмент таблицы расчетных значений разности температур пластин балансомера при различных значениях скорости ветра

$\tau, \text{ с}$	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	ΔT
	$V = 0, \text{ м/с}$	$V = 5, \text{ м/с}$	$V = 10, \text{ м/с}$	$V = 20, \text{ м/с}$	$V = 30, \text{ м/с}$
0	0	0	0	0	0
1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
11	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
13	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
15	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
17	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7
19	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
21	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
23	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8
25	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
27	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
29	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9
31	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9

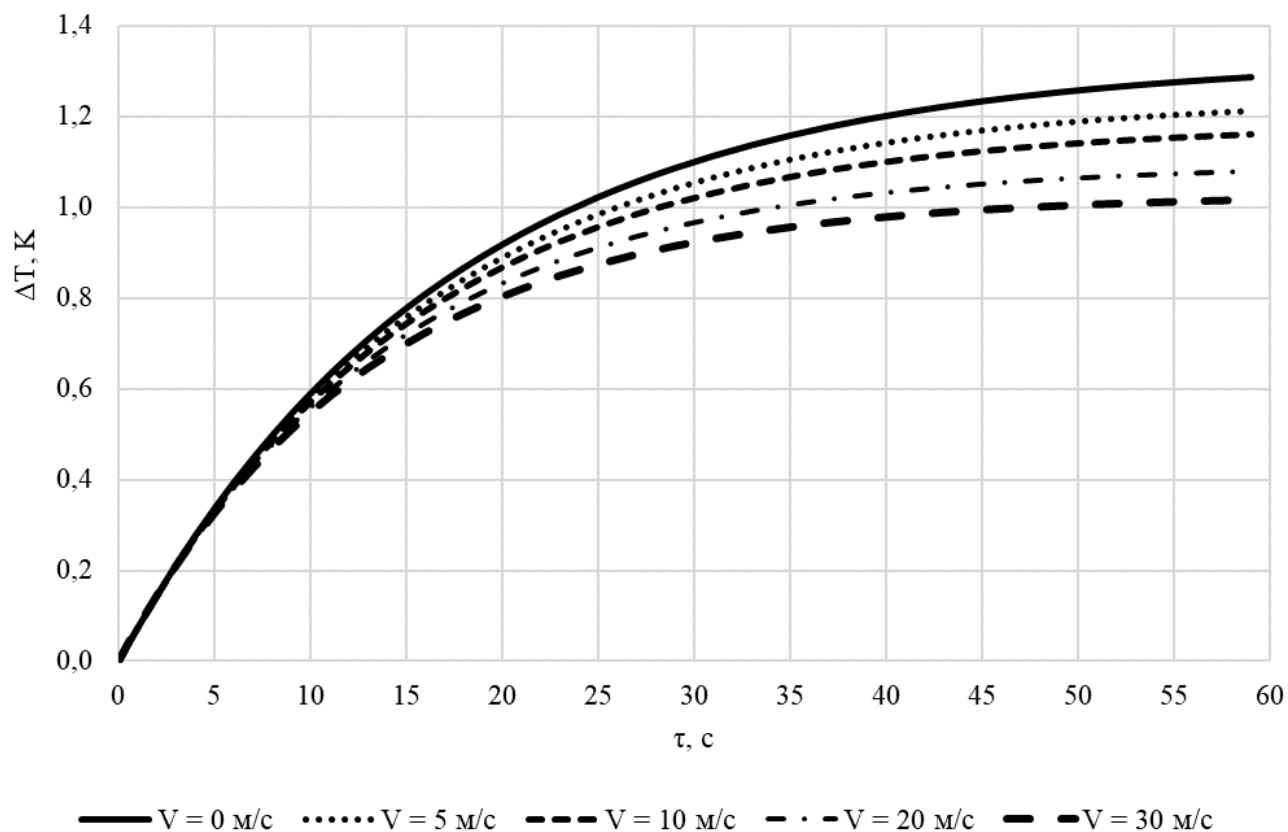


Рисунок 4.5 – Графическое представление зависимости разности температур пластин балансомера от времени при различных значениях скорости ветра

Анализируя полученные графики, можно отметить, что все кривые имеют экспоненциальный ход, причем каждая из них стремится к определенному значению, зависящему от величины радиационного баланса. Заметим, что постоянное значение, к которому стремится каждая кривая, достигается по истечении по крайней мере одной минуты. Следовательно, снятие показаний гальванометра нужно производить не ранее, чем через минуту. Графики позволяют определить момент измерения более точно, исходя из допустимой погрешности.

Также заметим, что с увеличением скорости ветра уменьшается разность температур между пластинами балансомера, поскольку, как уже было сказано ранее, увеличивается коэффициент конвективного теплообмена

α . Так, при возрастании скорости ветра до 30 м/с погрешность измерения разницы температур между пластинами уменьшается до 0,3 К, что составляет в среднем 207,7 Вт/м² или 23%. Таким образом, ветер занижает показания балансомера. Это приводит к уменьшению чувствительности (см. рисунок 4.3), что может быть компенсировано введением ветрового множителя Φ_v (см. рисунок 4.1).

4.7 Расчет чувствительности и коэффициента инерции балансомера при разных значениях толщины балансомера

Расчеты были произведены для трех значений толщины балансомера $z=1,5$ мм, $z=2$ мм, $z=2,5$ мм. Было замечено, что значения чувствительности практически не изменяется при изменении толщины балансомера. Это объясняется тем, что слагаемое $(\alpha + \frac{2\gamma}{z})$ изменяется очень слабо, так как значение γ , складываемое из трех значений (см. формулу (4.1)), практически не меняется.

Коэффициент инерции был рассчитан для тех же самых значений толщины. Так как в формулу для коэффициента инерции (3.20) входит масса, которая увеличивается с увеличением толщины, то и коэффициент инерции увеличивается практически пропорционально толщине.

4.8 Расчет чувствительности и коэффициента инерции балансомера при применении разных материалов для брусков балансомера

Расчет чувствительности и коэффициента инерции балансомера производился по формулам (3.20) и (4.7). Величины, входящие в указанные формулы, были взяты из источника [11]. Было обнаружено, что при изменении материала для брусков чувствительность практически не изменяется, однако коэффициент инерции существенно различается (рисунок

4.6, таблица 4.5). В обоих случаях это объясняется тем, что коэффициент конвективного теплообмена α принимает значение, гораздо большее по величине, чем зависящая от материала брусков величина отношения $\frac{\gamma}{z}$ (см. формулу 4.1).

В расчетах были использованы следующие материалы: медь, алюминий, олово, свинец, чугун, золото. Анализ графиков (рисунок 4.6) показывает, что наименьший коэффициент инерции будет иметь балансомер с брусками из свинца, олова и алюминия. Однако, медные бруски использовать целесообразно, так как теплопроводность меди гораздо больше, чем у прочих материалов. Это позволяет увеличить чувствительность балансомера, но его инерция в этом случае также увеличивается. Таким образом, как уже было подмечено в главе 1 данной работы, улучшая одну характеристику, мы неизбежно ухудшаем другую.

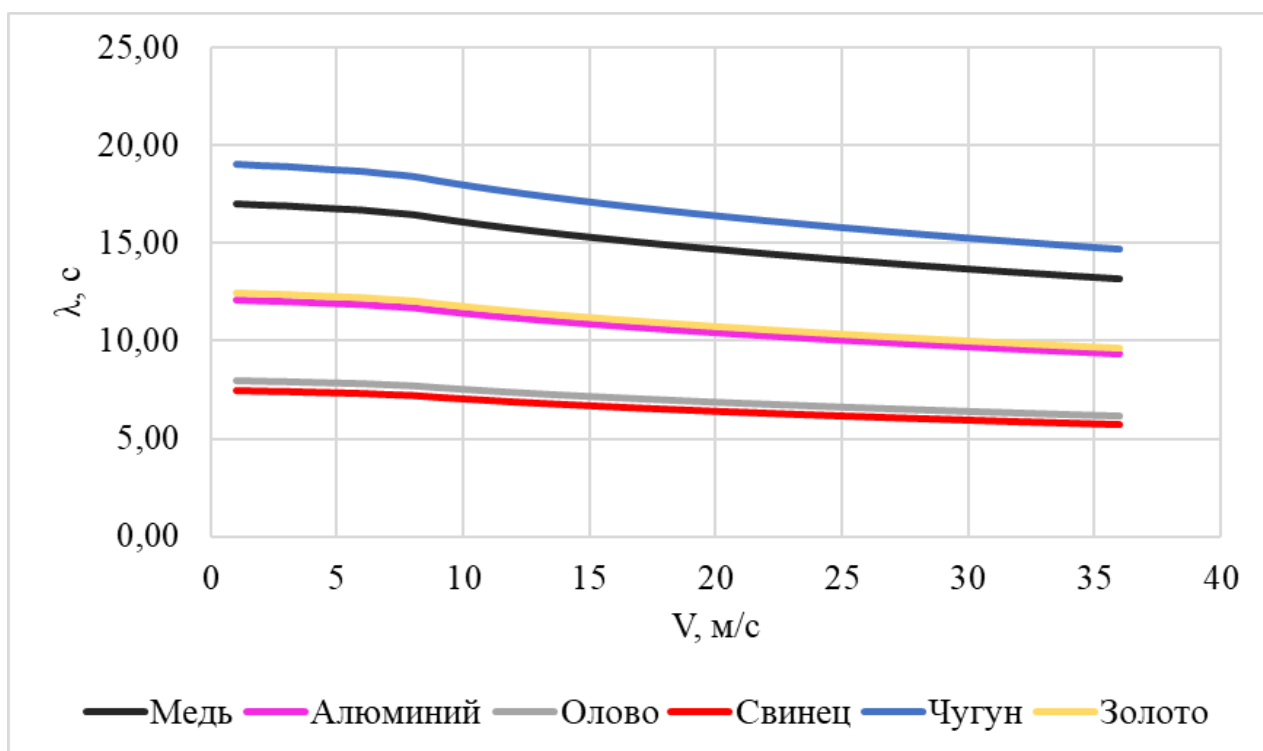


Рисунок 4.6 – Графическое представление зависимости коэффициента инерции балансомера от скорости ветра при использовании различных материалов для брусков

Таблица 4.5

Фрагмент таблицы расчетных значений коэффициента тепловой инерции балансомера при разных гипотетических материалах брусков балансомера

V, м/с	Медь	Алюминий	Олово	Свинец	Чугун	Золото
0	16,99	12,06	7,99	7,47	19,06	12,45
0,125	16,92	12,02	7,96	7,44	18,99	12,40
0,25	16,88	11,99	7,94	7,42	18,94	12,37
0,5	16,80	11,93	7,90	7,38	18,85	12,31
0,75	16,73	11,88	7,87	7,35	18,77	12,26
1	16,67	11,83	7,84	7,32	18,69	12,21
1,5	16,55	11,75	7,78	7,27	18,56	12,12
2	16,44	11,67	7,73	7,22	18,43	12,04
3	16,24	11,53	7,63	7,13	18,20	11,90
4	16,05	11,40	7,54	7,05	17,99	11,76
5	15,88	11,28	7,46	6,97	17,80	11,64
6	15,72	11,16	7,39	6,90	17,62	11,52
7	15,57	11,05	7,31	6,83	17,44	11,41
8	15,42	10,95	7,25	6,77	17,28	11,30
9	15,29	10,85	7,18	6,70	17,12	11,20
10	15,15	10,76	7,12	6,64	16,97	11,10

5. Вывод рабочих формул для расчета тепловой инерции и чувствительности балансомера для случая нестационарного состояния

В предыдущей главе был проведен вывод уравнений балансомера для стационарного состояния, то есть при постоянном значении радиационного баланса. В этом случае по прошествии достаточно большого времени после начала измерений (порядка 1 минуты) балансомер показывает постоянное значение и инерционная погрешность в данном случае равна 0. Однако, в природе радиационный баланс постоянно меняется и в этом случае балансомер показывает правильное значение с запаздыванием во времени. С этим связано появление отличной от нуля инерционной погрешности [4].

Для вычисления инерционной погрешности необходимо вывести уравнения балансомера для нестационарного состояния, то есть при изменяющемся радиационном балансе.

Прежде всего предположим, что радиационный баланс изменяется по линейному закону:

$$B_{\text{ист}} = B_0 + k\tau, \quad (5.1)$$

где $B_{\text{ист}}$ – радиационный баланс;

B_0 – радиационный баланс в начальный момент времени;

k – скорость изменения радиационного баланса;

τ – время.

Воспользуемся уравнением (3.5) из главы 3.

$$mc \frac{d(T_1 - T_2)}{d\tau} = -S \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z} \right) (T_1 - T_2) + B_{\text{ист}} S, \quad (5.2)$$

где m – масса балансомера;
 c – удельная теплоемкость вещества, из которого состоит балансомер;
 T_1, T_2 – температура верхней и нижней пластин балансомера соответственно (далее $T_1 - T_2 = \Delta T$);
 S – площадь пластины балансомера;
 α – коэффициент конвективного теплообмена между балансомером и окружающим воздухом;
 γ – коэффициент внутреннего теплообмена между верхней и нижней пластинами балансомера;
 z – толщина балансомера.

Разделим уравнение (5.2) на величину $S\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right)$. В результате получаем:

$$\frac{mc}{S\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right)} \frac{d\Delta T}{d\tau} = -\Delta T + \frac{B_{\text{ист}}}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (5.3)$$

Заметим, что дробный множитель в левой части уравнения является константой, зависящей только от скорости ветра. Обозначив его через A , с учетом линейного изменения радиационного баланса (5.1), приходим к выражению:

$$A \frac{d\Delta T}{d\tau} = -\Delta T + \frac{B_0}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} + \frac{\kappa\tau}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (5.4)$$

Далее для удобства проведения преобразований выделим в уравнении (5.4) следующие постоянные величины:

$$\frac{B_0}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} = D = const$$

$$\frac{\kappa}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} = G = const$$

С учетом введенных обозначений перепишем уравнение (5.4):

$$A \frac{d\Delta T}{d\tau} = -\Delta T + D + G\tau \quad (5.5)$$

или:

$$A \frac{d\Delta T}{d\tau} = (G\tau - \Delta T) + D \quad (5.6)$$

Для того, чтобы проинтегрировать уравнение (5.6), введем новую переменную $x = (G\tau - \Delta T)$. Тогда:

$$\frac{dx}{d\tau} = G - \frac{d\Delta T}{d\tau}$$

Откуда получаем:

$$\frac{d\Delta T}{d\tau} = G - \frac{dx}{d\tau}$$

Подставив новую переменную в уравнение (5.6), имеем:

$$A \left(G - \frac{dx}{d\tau} \right) = x + D \quad (5.7)$$

или:

$$A \left(\frac{dx}{d\tau} - G \right) = -x - D \quad (5.8)$$

Раскрывая скобки в левой части и уединяя производную $\frac{dx}{d\tau}$ имеем:

$$A \frac{dx}{d\tau} = -x + AG - D \quad (5.9)$$

или, разделяя переменные:

$$A \frac{dx}{x - AG + D} = -d\tau \quad (5.10)$$

Замечая, что в знаменателе левой части содержатся константы, можем внести их под дифференциал:

$$\frac{d(x - AG + D)}{x - AG + D} = -\frac{d\tau}{A} \quad (5.11)$$

Проведем интегрирование от нулевого момента времени τ_0 до текущего момента τ . Соответственно в левой части – от x_0 до x :

$$\int_{x_0}^x \frac{d(x - AG + D)}{x - AG + D} = -\int_0^\tau \frac{d\tau}{A} \quad (5.12)$$

Интегрируя, получаем:

$$\ln \frac{x - AG + D}{x_0 - AG + D} = -\frac{\tau}{A} \quad (5.13)$$

После очевидных преобразований получаем:

$$\frac{x - AG + D}{x_0 - AG + D} = e^{-\frac{\tau}{A}} \quad (5.14)$$

или:

$$x - AG + D = (x_0 - AG + D)e^{-\frac{\tau}{A}} \quad (5.15)$$

Заметим, что в момент времени $\tau=0$ (то есть в момент начала изменения радиационного баланса):

$$x_0 = (G\tau - \Delta T) = G \cdot 0 - \Delta T_0 = -\Delta T_0 \quad (5.16)$$

С учетом этого, возвращаясь от x к прежним переменным τ и ΔT , получаем:

$$G\tau - \Delta T - AG + D = (D - AG - \Delta T_0)e^{-\frac{\tau}{A}} \quad (5.17)$$

или:

$$-\Delta T = (D - AG - \Delta T_0)e^{-\frac{\tau}{A}} + AG - D - G\tau \quad (5.18)$$

Изменяя знак, получаем:

$$\Delta T = (\Delta T_0 + AG - D)e^{-\frac{\tau}{A}} - AG + D + G\tau \quad (5.19)$$

Учитывая, что:

$$D + G\tau = \frac{B_0}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} + \frac{\kappa\tau}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} = \frac{B_0 + \kappa\tau}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} = \frac{B_{ист}}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}}, \quad (5.20)$$

где $B_{ист}$ следует понимать, как изменяющееся по линейному закону значение радиационного баланса.

Таким образом:

$$\Delta T = (\Delta T_0 + AG - D)e^{-\frac{\tau}{A}} - AG + \frac{B_{ист}}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (5.21)$$

Возвращаясь к первоначальному виду введенных констант A , G , D , получаем:

$$\Delta T = \left(\Delta T_0 + \frac{m\kappa c}{S \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z} \right)^2} - \frac{B_0}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \right) e^{-\frac{\tau}{S \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z} \right)}} - \frac{m\kappa c}{S \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z} \right)^2} + \frac{B_{ист}}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (5.22)$$

Проанализируем полученное выражение. Для стационарного состояния, то есть при $B=B_0=const$, $\kappa=0$ имеем:

$$\Delta T = \left(\Delta T_0 - \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \right) e^{-\frac{\tau}{S \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z} \right)}} + \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (5.23)$$

Данное уравнение представляет собой связь разности температур между верхней и нижней пластинами балансомера со временем при нестационарном состоянии системы.

Для того, чтобы сравнить проведенный вывод со сделанным в главе 3, примем нулевой момент времени за момент открытия балансомера, то есть $\Delta T_0=0$. Тогда приходим к выражению:

$$\Delta T = -\frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} e^{-\frac{\tau}{\frac{mc}{s(\alpha + \frac{2\gamma}{z})}}} + \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} = \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\frac{mc}{s(\alpha + \frac{2\gamma}{z})}}} \right) \quad (5.24)$$

Полученное выражение в точности совпадает с выражением (3.19) из главы 3. Это свидетельствует в пользу достоверности проведенных преобразований.

Заметим, что, как и в случае стационарной модели (см. главу 3, формулу (3.19)), знаменатель экспоненты формулы (5.24) имеет размерность времени и представляет собой коэффициент тепловой инерции балансомера λ :

$$\lambda = \frac{mc}{\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right) \cdot S} \quad (5.25)$$

Это выражение полностью совпадает с выражением для коэффициента тепловой инерции, полученным при рассмотрении стационарной модели в предыдущей глав. Подставив в формулу (5.24) выражение для λ , получаем:

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-\frac{\tau}{\lambda}} + \left(\frac{\kappa\lambda}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} - \frac{B_0}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \right) e^{-\frac{\tau}{\tau}} - \left(\frac{\kappa\lambda}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} - \frac{B_0}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \right) \quad (5.26)$$

или:

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-\frac{\tau}{\lambda}} + \left(\frac{\kappa \lambda}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} - \frac{B_0}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \right) (e^{-\frac{\tau}{\lambda}} - 1) \quad (5.27)$$

Полученное выражение (5.27) позволяет проанализировать как чувствительность, так и инерционную погрешность балансомера.

5.1 Исследование чувствительности балансомера при нестационарном состоянии системы

Для вывода формулы чувствительности балансомера было сделано предположение, что показания прибора стабилизировались, т.е. $B = const$ ($\kappa = 0$), а $\tau \rightarrow \infty$. Тогда из формулы (5.27) получаем:

$$\Delta T = \frac{B_0}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (5.28)$$

Опуская индекс при B_0 (т. к. $B = const$), имеем:

$$\Delta T = \frac{B}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (5.29)$$

Как и в случае стационарной модели, под чувствительностью балансомера понималось изменение разности температур между пластинами ΔT при изменении теплового баланса на единицу, т.е.:

$$S_{\delta} = \frac{d(\Delta T)}{dB} = \frac{1}{\alpha + \frac{2\gamma}{z}} \quad (5.30)$$

Данное выражение полностью совпадает с выражением (3.21), описывающим чувствительность балансомера при стационарном состоянии системы (при постоянном неизменяющемся значении радиационного баланса B). Следовательно, анализ чувствительности балансомера, приведенный в главе 4 данной работы, можно полностью идентично провести также и для нестационарной модели.

5.2 Исследование инерционной погрешности балансомера

Для исследования инерционной погрешности балансомера необходимо обратиться к формуле (5.22). Принимая во внимание, что:

$\Delta T \cdot \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right) = B_{\delta}$, то есть показания балансомера

$\Delta T_0 \cdot \left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right) = B_0$, то есть радиационный баланс в начальный момент времени.

Умножив обе части формулы (5.22) на сумму $\left(\alpha + \frac{2\gamma}{z}\right)$, получаем, с учетом формулы (5.29):

$$B_{\delta} = (B_0 + \kappa\lambda - B_0)e^{-\frac{\tau}{\lambda}} - \kappa\lambda + B_{\text{ист}}, \quad (5.31)$$

где B_{δ} следует понимать как показания балансомера, рассчитанные на основе разности температур между пластинами ΔT . В случае нестационарной

модели значения B_6 и $B_{ист}$ не совпадают. Разность между ними следует понимать, как инерционную погрешность балансомера.

Перепишем формулу (5.31) в виде:

$$B_6 = \kappa\lambda \cdot e^{-\frac{\tau}{\lambda}} - \kappa\lambda + B_{ист} \quad (5.32)$$

Откуда получаем:

$$B_{ист} - B_6 = \kappa\lambda \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\lambda}}) \quad (5.33)$$

Из формулы (5.33) видно, что в левой части стоит выражение, представляющее собой инерционную погрешность балансомера, т.е. разность между истинным значением радиационного баланса и показаниями прибора. При $\tau \rightarrow \infty$ эта разность равна произведению $\kappa\lambda$ [4]:

$$B_{ист} - B_6 = \kappa\lambda \quad (5.34)$$

Для наглядности представим эскиз графика зависимости радиационного баланса и показаний балансомера от времени (рисунок 5.1).

Следует отметить, что ситуация, представленная на рисунке 5.1, соответствует увеличению истинного радиационного баланса. В этом случае наблюдается отставание показаний балансомера от реальных значений.

При уменьшении истинного радиационного баланса показания балансомера будут превышать реальные значения, таким образом будет также наблюдаться отставание показаний балансомера от реальных значений радиационного баланса.

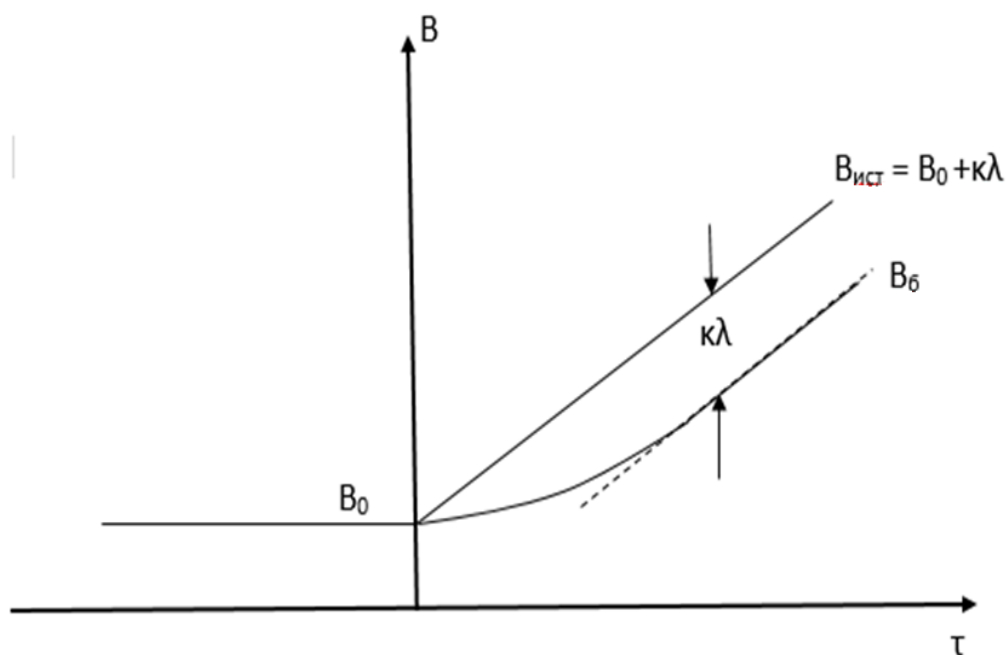


Рисунок 5.1 – Эскиз графического представления зависимости истинного радиационного баланса $B_{ист}$ и показаний балансомера $B_б$ от времени

Таким образом, инерционная погрешность балансомера становится равной постоянной величине $k\lambda$ по прошествии достаточно большого времени с момента начала изменения истинного радиационного баланса.

Полученные выводы и формулы позволяют провести коррекцию показаний балансомера при автоматической обработке результатов измерения. Если известны показания балансомера, а также его константы, входящие в формулы (5.31 – 5.34), то представляется возможным вычислить истинный радиационный баланс $B_{ист}$ по приведенным в данной работе формулам.

Процесс может быть автоматизирован путем составления соответствующей программы для ЭВМ, встроенной в электронный блок, сопряженный с балансомером. Сигнал с балансомера подается аналого-цифровой преобразователь, где происходит конвертация сигнала в цифровую

форму. Далее встроенный цифровой блок с записанной программой производит учет инерционной погрешности с выдачей правильного значения радиационного баланса на цифровом индикаторе.

6. Вывод рабочих формул для расчета тепловой инерции актинометра

Для определения тепловой инерции актинометра было выведено уравнение, связывающее разность температур серебряного диска T и окружающей среды Θ (медного кольца) со временем τ . Было сделано предположение, что в начальный момент времени разность температур была равна нулю, т. е. диск был закрыт от прямой солнечной радиации. Далее, после открытия прибора, температура диска установилась больше температуры медного кольца. Тогда уравнение притока тепла Q для серебряного зачернённого диска запишется в виде:

$$\frac{dQ}{d\tau} = Ss - \alpha s(T - \Theta) - \left(\lambda_1 \frac{T - \Theta}{z} + \lambda_2 \frac{T - \Theta}{z} \right) \cdot \eta \cdot n, \quad (6.1)$$

где S – прямая солнечная радиация;

s – площадь серебряного диска;

α – коэффициент конвективного теплообмена диска с окружающим воздухом;

T – температура диска;

Θ – температура окружающей среды;

λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности металлических перемычек между диском и кольцом;

z – длина перемычек;

n – количество термопар в термобатарее;

η – площадь поперечного сечения металлических перемычек.

Учтем соотношение:

$$dQ = mcdT, \quad (6.2)$$

где m – масса диска;

c – удельная теплоёмкость материала диска (серебро).

С учётом (6.2) перепишем формулу (6.1) в следующем виде:

$$\frac{mcdT}{d\tau} = Ss - (T - \Theta) \left(\alpha s + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{z} \cdot \eta \cdot n \right) \quad (6.3)$$

Обозначив $\left(\alpha s + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{z} \cdot \eta \cdot n \right) = B$, получаем:

$$\frac{mc}{B} \cdot \frac{dT}{d\tau} = \frac{Ss}{B} - (T - \Theta) \quad (6.4)$$

Далее, разделяя переменные, приходим к выражению:

$$\frac{dT}{\left(T - \Theta - \frac{Ss}{B} \right)} = - \frac{B}{mc} \cdot d\tau \quad (6.5)$$

Интегрируя правую часть уравнения (6.4) в пределах от T_0 до T , где T_0 – температура диска в начальный момент времени, а левую – от Θ до τ , получаем следующее выражение:

$$\ln \frac{\left(T - \Theta - \frac{Ss}{B} \right)}{\left(T_0 - \Theta - \frac{Ss}{B} \right)} = - \frac{B\tau}{mc} \quad (6.6)$$

$$e^{-\frac{B\tau}{mc}} = \frac{\left(T - \Theta - \frac{Ss}{B} \right)}{\left(T_0 - \Theta - \frac{Ss}{B} \right)} \quad (6.7)$$

Далее выражаем значение температуры серебряного диска из выражения 6.5 и получаем:

$$T = \Theta + \frac{Ss}{B} + \left(T_0 - \Theta - \frac{Ss}{B}\right) \cdot e^{-\frac{B\tau}{mc}} \quad (6.8)$$

Полученное выражение, по аналогии с выражением (3.19) из главы 3 и выражением (5.27) из главы 5, является уравнением, связывающим разность температур окружающего воздуха и серебряного диска актинометра со временем.

Полученное выражение (6.8) предоставляет возможность ввести понятие коэффициента тепловой инерции актинометра как времени, в течение которого разность между максимальной разностью температур диска актинометра и окружающей среды (медного кольца) и её текущим значением уменьшается в e раз [5].

Перепишем формулу (6.8) в виде:

$$T = \Theta + \frac{Ss}{B} + \left(T_0 - \Theta - \frac{Ss}{B}\right) \cdot e^{-\frac{\tau}{\delta}} \quad (6.9)$$

Из выражения (6.9) следует, что величина, стоящая в знаменателе показателя экспоненты, имеет размерность времени. Из приведённого выше определения коэффициента инерции ясно, что эта величина и является коэффициентом инерции актинометра δ :

$$\delta = \frac{mc}{B} = \frac{mc}{\alpha s + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{z} \cdot \eta \cdot n} \quad (6.10)$$

Для расчета коэффициента инерции актинометра были использованы следующие характерные величины для актинометра М-3 (АТ-50), приведённые в книге [7] (см. таблицу 6.1).

Таблица 6.1

Значения характерных величин для актинометра М-3 (АТ-50)

Величина	Значение	Размерность
m	0,01	кг
c	234	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
α	11,28	
s	$8,54 \cdot 10^{-5}$	м^2
λ_1	22	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
λ_2	21	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
z	$6 \cdot 10^{-8}$	м
η	$1,2 \cdot 10^{-8}$	м^2
n	30	—

В результате расчетов коэффициент инерции актинометра δ оказался равным 0,3 с. Такая малая величина свидетельствует о том, что актинометр обладает ничтожной инерцией и соответственно, обладает очень малой инерционной погрешностью, которой в ходе производства актинометрических измерений можно пренебречь.

Для визуализации сделанного вывода был построен график зависимости изменения разности температур между серебряным диском и окружающей средой от времени (см. рисунок 6.1). Предполагалось, что в нулевой момент времени $T_0 = \theta$, то есть актинометр был закрыт крышкой.

Значение прямой солнечной радиации S было выбрано равным 1000 Вт/м^2 , что соответствует истинному значению в дневное время суток при безоблачном небе летом на широте 60° . Остальные значения сохранены прежними. Для коэффициента тепловой инерции актинометра было использовано рассчитанное ранее значение $0,3 \text{ с}$.

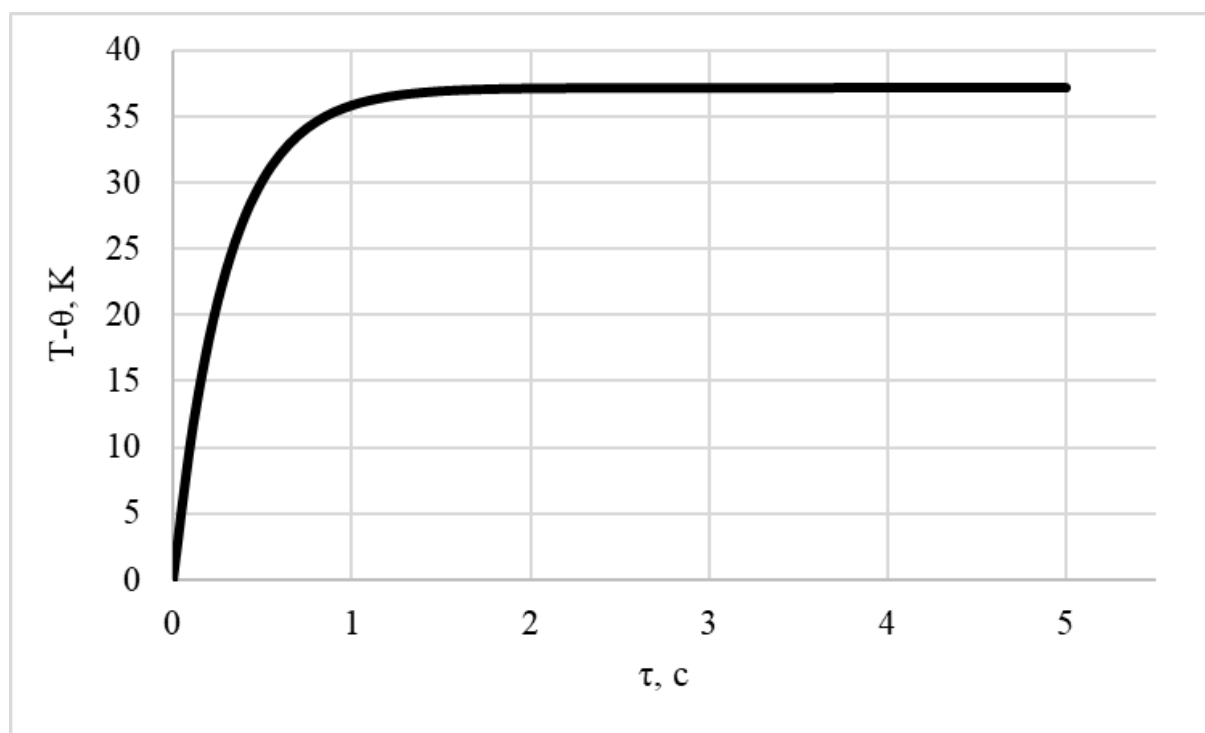


Рисунок 6.1 – Графическое представление изменения разности температур между серебряным диском актинометра и окружающей средой

Из приведенных выше иллюстраций видно, что актинометр воспринимает значение солнечной радиации очень быстро – его тепловая инерция ничтожна. Запоздывание по времени может быть обусловлено лишь инерцией измерительного прибора – гальванометра. Поэтому можно дать рекомендацию использовать современные быстродействующие цифровые измерительные приборы.

Фрагмент таблицы расчетных значений разности температур между серебряным диском актинометра и окружающей средой в зависимости от времени

τ	$T-\theta$
0	0
0,1	10,5
0,2	18,1
0,3	23,5
0,4	27,3
0,5	30,1
0,6	32,1
0,7	33,5
0,8	34,5
0,9	35,3
1	35,8
1,1	36,2
1,2	36,4
1,3	36,6
1,4	36,8
1,5	36,9
1,6	36,9
1,7	37,0
1,8	37,0
1,9	37,0
2	37,1

Следует отметить, что в данном случае отсутствует влияние ветра (конвективного теплообмена), поскольку чувствительный элемент актинометра находится внутри зеркальной трубки с диафрагмами и таким образом защищен от ветрового воздействия.

6.1 Анализ размерностей

Для доказательства справедливости представленных выше выражений 6.9 и 6.10 был проведен анализ размерностей. Очевидно, что левая часть уравнения (6.8) имеет размерность Кельвинов. Отметим размерности всех величин, входящих в правую часть уравнения:

Таблица 6.3

Размерности величин, входящих в уравнение разности температур серебряного диска актинометра и окружающей среды

Величина	Размерность
θ	К
B	$\frac{Вт}{К}$
τ	с
S	$\frac{Вт}{м^2}$
T_0	К
c	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$
s	$м^2$
m	кг

Тогда:

$$[T] = \left[K + \frac{\frac{\text{Вт}}{\text{М}^2}}{\frac{\text{Вт}}{\text{К}}} + \left(K - K - \frac{\frac{\text{Вт}}{\text{М}^2}}{\frac{\text{Вт}}{\text{К}}} \right) \cdot e^{-\frac{\frac{\text{Вт}}{\text{К}} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{К}}} \right] = \text{К}$$

Обращает на себя внимание тот факт, что показатель экспоненты в выражении, представленном выше, не имеет размерности.

Согласно определению коэффициента инерции, левая часть уравнения 6.10 должна иметь размерность времени.

$$[\delta] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}}{\frac{\text{Вт}}{\text{М}^2 \cdot \text{К}} \cdot \text{М}^2 + \frac{\frac{\text{Вт}}{\text{М} \cdot \text{К}}}{\text{М}} \cdot \text{М}^2} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{Вт}} \right] = \text{с}$$

Таким образом, анализ размерностей также подтверждает справедливость проведенных математических рассуждений в данной части работы.

Заключение

Проведенное исследование затрагивает очень актуальную и одну из важнейших тем не только в области метеорологии, но и во многих областях деятельности человека. Потребителями информации об актинометрических величинах является сельское хозяйство, поскольку от данных показателей зависят сроки высаживания различных видов сельскохозяйственных культур. Сведения об актинометрических величинах также важны для экономической и хозяйственной деятельности в полярных районах, поскольку солнечная радиация вызывает таяние льдов и вечной мерзлоты. В своевременном обеспечении сведениями о солнечной радиации нуждается также медицина и курортная индустрия, поскольку длительное (или недостаточное) нахождение человека под солнечным излучением пагубно сказывается на здоровье организма.

Для оперативного обеспечения всех отраслей народного хозяйства сведениями об актинометрических величинах необходимо достаточно точное и малоинерционное оборудование. Следовательно, приборы для измерения актинометрических величин должны обладать возможно больше чувствительностью и малой инерцией.

Поставленные исследовательские задачи выполнены в полном объеме:

- выведены формулы для расчета чувствительности и тепловой инерции балансомера и актинометра;
- даны рекомендации по уменьшению инерции балансомера и увеличению его чувствительности;
- инерция актинометра оказалась столь малой, что ее можно не принимать во внимание при производстве измерений.

Результаты проделанной работы можно резюмировать в виде следующих выводов:

1. Выведено уравнение, описывающее связь между разностью температур пластин балансомера со временем как в случае стационарного состояния системы (при постоянном радиационном балансе), так и в случае нестационарного состояния системы (при линейно изменяющемся радиационном балансе).
2. Выведено уравнение, описывающее зависимость выходного тока балансомера от радиационного баланса и от времени с момента открытия балансомера.
3. Определено понятие коэффициента тепловой инерции балансомера как времени, в течение которого разность между максимальным и текущим значением показаний балансомера уменьшается в e раз.
4. Рассчитаны значения чувствительности балансомера стандартной толщины 3 мм в зависимости от скорости ветра. Замечено, что с увеличением скорости ветра чувствительность балансомера уменьшается.
5. Рассчитаны значения коэффициента инерции балансомера в зависимости от скорости ветра. Замечено, что с увеличением скорости ветра коэффициент инерции уменьшается.
6. Рассчитан временной ход разности температур между пластинами балансомера при разных значениях скорости ветра, причём данные графики позволяют определить минимальное время, прошедшее от момента открытия балансомера, до начала измерений, исходя из допустимой погрешности.
7. Рассчитаны значения чувствительности и коэффициента инерции балансомера при разных гипотетических значениях толщины балансомера. Установлено, что при увеличении толщины балансомера, его чувствительность практически не изменяется, а коэффициент инерции увеличивается пропорционально толщине.
8. Был произведён расчёт чувствительности и коэффициента инерции балансомера при разных материалах для брусков. Показано, что

чувствительность практически не зависит от использованного материала, а коэффициент инерции изменяется. Наименьшим коэффициентам инерции из опробованных материалов обладает свинец, а наибольшим – чугун.

9. Было проведено сравнение данных о тепловой инерции балансомера, полученных путём расчёта при нулевой скорости ветра, с экспериментальными данными. Разница в результатах не превышает нескольких процентов, что свидетельствует о достаточно высокой степени надёжности полученных результатов.
10. Выведено уравнение, определяющее инерционную погрешность балансомера как разницу между истинным значением радиационного баланса и значением баланса, полученным по прибору.
11. Даны рекомендации по автоматизации процесса учета инерционной погрешности при производстве измерений.
12. Выведено уравнение, описывающее связь между разностью температур окружающего воздуха и серебряного диска актинометра со временем.
13. Определено понятие коэффициента тепловой инерции актинометра как времени, в течение которого разность между максимальной разностью температур диска актинометра и окружающей среды (медного кольца) и её текущим значением уменьшается в e раз.
14. Произведен расчет коэффициента тепловой инерции актинометра, замечено, что его значение достаточно мало, чтобы утверждать о наличии пренебрежимо малой инерционной погрешности прибора.

Полученные в результате исследования данные позволяют дать рекомендации для цифровой обработки сигналов, поступающих с чувствительного элемента прибора.

Список использованных источников

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып.3, ч.1. Метеорологические измерения на станциях. Л., Гидрометеоиздат, 1985 г. – 300 с.
2. Григоров Н.О., Саенко А.Г., Восканян К.Л. Методы и средства гидрометеорологических измерений. Метеорологические приборы. РГГМУ, С-Пб, 2012 г. – 306 с.
3. Григоров Н. О., Никитина В. С. Теоретическое исследование чувствительности и инерции балансомера. Известия Географического общества Узбекистана. Том 56, Ташкент, 2019 г. – с. 141-147.
4. Никитина В. С., Григоров Н. О. Инерционные погрешности балансомера (нестационарная модель). Труды IV Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития / MGO 2020», имени Л. Н. Карлина. 16-17.12.2020 г. Санкт-Петербург, –с. 97-100.
5. Никитина В. С. Исследование инерции актинометра. Труды V Юбилейной Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л. Н. Карлина / MGO-2021». 14-15.12.2021 г. Санкт-Петербург, –с. 309-314.
6. Саенко А. Г., Восканян К. Л. Актинометрические наблюдения. Пособие для учебной практики. РГГМУ, С-Пб, 2010. – 54 с.
7. Янишевский Ю. Д. Актинометрические приборы и методы наблюдений. Гидрометеорологическое издательство, Ленинград, 1957. – 416 с.
8. Григоров Н. О., Симакина Т. Е. Задачник по дисциплине «Методы и средства гидрометеорологических измерений». РГГМУ, С-Пб, 2006 г. – 41 с.

9. Григоров Н.О., Савченко, Г. А. Тепловая инерция чувствительного элемента термометров и исследование его теплообмена с окружающей средой/ Заочный доклад на III Международном молодежном научном форуме «Молодая наука – 2015», посвященного 70-летию Победы в Великой Отечественной войне, Туапсе, март, 2015г.
10. Поверочное свидетельство балансомера М-10м №178802Д/39, 1982 г.
11. Х. Кухлинг. Справочник по физике. Москва, 1983. – 519 с.