

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ  
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ПРОВЕРЕНО  
1961 г.

Проверено  
1962

06:551.5  
Т 78

Т Р У Д Ы  
ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ  
ОБСЕРВАТОРИИ  
им. А. И. Воейкова

ВЫПУСК 21(83)

МЕТОДИКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Под редакцией  
В. Н. КЕДРОЛИВАНСКОГО

Б И Б Л И О Т Е К А  
ЛЕНИНГРАДСКОГО  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО  
ИНСТИТУТА



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1950

Редактор *В. Н. Кедроливанский.*

Техн. редактор *М. С. Рулева.*

---

Сдано в набор 18/V 1950 г. Подписано к печати 26/VIII 1950 г. Изд. № 37.  
Индекс М-Л-37. Тираж 800 экз. Печ. л. 9,1. Уч.-изд. л. 10,01. Бум.  $70 \times 105^{1/16}$   
Печ. зн. в 1 бум. л. 114 293. Бум. л. 3,5. М-29105. Зак. № 990. Цена 6 руб.  
г. Ленинград. Гидрометеиздат. 1950 г.

---

2-я типо-литография Гидрометеиздата. Ленинград, Прачечный пер., 6

## О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие . . . . .	4
Г. А. Покровская. Погрешности измерения температуры воздуха биметаллическим термографом . . . . .	5
<u>Г. В. Смирнова.</u> Исследование точности метода измерения температуры почвы вытяжными термометрами . . . . .	38
<u>Г. В. Смирнова.</u> Исследование труб из разного материала к вытяжным почвенным термометрам . . . . .	53
С. Яковлева. Исследование различных методов определения глубины промерзания почвы . . . . .	71
Г. М. Митина. К вопросу о введении металлических установок на метеорологических площадках сети гидрометеорологических станций . . . . .	78
И. Каменева. О точности поверки ручных анемометров . . . . .	84
Г. М. Клестова. Погрешности поверки ртутных барометров . . . . .	99
Г. А. Луговская. О точности поправок метеорологических термометров . . .	106

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Вопросам точности определения метеорологических элементов, несмотря на длительный период сетевых метеорологических наблюдений, уделялось до настоящего времени совершенно недостаточное внимание.

Как это ни странно, но почти неизвестна точность, с которой работают на сети давно принятые приборы; к сожалению, не лучше обстоит дело и с вновь конструируемыми метеорологическими приборами. Очень часто конструкторы обращают почти все свое внимание только на удачное решение конструкции прибора между тем вопрос как инструментальной, так и эксплуатационной точности нового прибора остается совершенно не исследованным и прибор пускается в эксплуатацию без данных о его точности. То же самое можно сказать и о методах, применяемых при метеорологических наблюдениях.

В силу этого обстоятельства зачастую предъявляют необоснованно завышенные требования как к приборам, так и к обработке получаемых при помощи их материалов, что влечет за собой при громадных масштабах метеорологической сети СССР нерациональную затрату больших средств.

Вопрос о точности метеорологических наблюдений является весьма важным и существенным как в научном, так и в практическом отношении, поэтому вполне естественно, что в тематике научно-исследовательских работ методического отдела ГГО главное место занимают темы точности определения метеорологических элементов в сетевых условиях.

Выпускаемый сборник представляет первые результаты некоторых работ сотрудников методического отдела о точности метеорологических наблюдений.

В числе статей имеются также и работы по точности поверки метеорологических приборов. Следует отметить, что в них разбирается вопрос точности поверки метеорологических приборов исключительно методами, принятыми в ГГО.

Публикуемые в данном сборнике работы имеют конкретные практические выводы которые вполне очевидно будут широко использованы в метеорологической практике

## ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕРМОГРАФОМ

Биметаллический термограф широко применяется для непрерывной регистрации температуры воздуха на сети метеорологических станций. Термограф — относительный прибор и его показания при обработке приводят к показаниям психрометрического термометра.

Обработку записей термографа производят с точностью до  $0,1^\circ$ . Точность эта настоящего времени не обоснована, так как совершенно нет данных о том, какой погрешностью регистрируется термографом температура воздуха.

Автором статьи проведена работа по исследованию термографа и оценены возможные значения погрешностей при регистрации температуры воздуха в условиях станции. При анализе погрешностей значений температуры воздуха по данным термографа за „истинную“ температуру воздуха в данный момент принимались показания психрометрического термометра, как это принято при наблюдениях на станции.

Погрешности измерения температуры воздуха термографом складываются из инструментальных погрешностей, погрешностей, зависящих от условий, при которых производилось измерение, и погрешностей, обусловленных методом обработки записей термографа. Исследование и оценка части погрешностей термографа были произведены аналитическим путем на основании технической документации на термограф и данных, имеющих в литературе. Другая часть погрешностей была оценена на основании специально поставленных экспериментов. Для проведения экспериментальной части работы были взяты 10 стандартных термографов, изготовленных в разное время заводами „Метприбор“ № 224 и № 304. На основании результатов исследования термографов в лабораторных условиях проанализированы погрешности, связанные с условиями работы прибора и методом обработки его записей. Для подтверждения выводов, полученных при этом, были использованы наблюдения над температурой воздуха на метстанциях Ленинградского, Московского и Куйбышевского УГМС.

Прежде чем перейти к рассмотрению погрешностей термографа, проанализируем работу прибора и установим функциональную связь между изменениями показаний прибора и изменением температуры, выразив ее через параметры прибора.

### Анализ работы термографа

Схема термографа представлена на рис. 1. Приемником температуры служит биметаллическая пластина 1, согнутая по огибающей цилиндра и закрепленная в одном конце. Перемещение свободного конца биметалла, вызванное изменением изгибности биметалла с изменением температуры, передается стрелке с пером 5 посредством рычага 2, тяги 3 и движка 4. Перо чертит кривую на ленте, надетой на барабан часового механизма. Изменение температуры за какой-нибудь промежуток времени определяется по разности ординат кривой, полученной на ленте, выраженной в равномерных делениях ленты.

Найдем зависимость между изменением ординаты пера и изменением температуры приемника.

**Расчет перемещения свободного конца рычага приемника термографа.** При расчете изменения кривизны биметалла обычно применяют следующую формулу:

$$\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} = 1,5 \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)(T_1 - T_0)}{h}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  и  $\rho$  — радиусы кривизны биметалла при температурах  $T_0$  и  $T_1$ ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты расширения составляющих биметалла;  $h$  — толщина биметалла.

Рассмотрим перемещение свободного конца рычага, скрепленного с термопластиной, обусловленное деформацией ее с изменением температуры. Расположим термо-

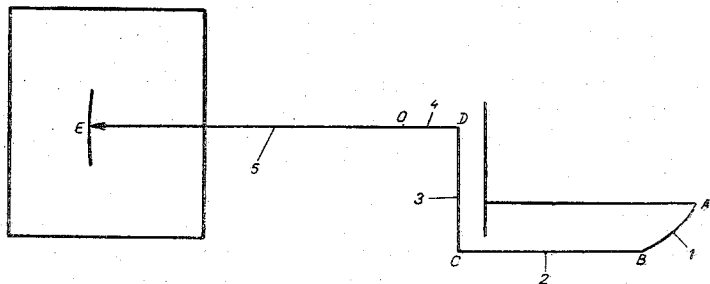


Рис. 1.

пластину относительно осей координат так, чтобы закрепленный конец ее совпал с началом координат, а радиус кривизны в закрепленной точке был бы направлен по оси ординат (рис. 2).

Введем следующие обозначения:

$AO$  — длина термопластины,

$AB = L$  — длина рычага,

$\rho_0$  — радиус термопластины при температуре  $T_0$ ,

$\psi_0$  — угол между рычагом и касательной к термопластине в точке соединения ее с рычагом.

При изменении температуры от  $T_0$  до  $T_1$  кривизна пластины изменится (в случае  $T_1 > T_0$  кривизна пластины уменьшится, так как термопластина согнута внутрь). Тогда конец термопластины из точки  $A$  переместится в точку  $A_1$  а конец рычага из точки  $B$  переместится в точку  $B_1$ .

Будем считать, что с изменением кривизны термопластины угол  $\psi_0$  остается постоянным.

Найдем координаты точки  $B(x_0, y_0)$  и точки  $B_1(x, y)$ . Из рис. 2 следует:

$$\angle AOC = \frac{\varphi_0}{2}; \quad AO = 2\rho_0 \sin \frac{\varphi_0}{2};$$

$$OC = AO \cdot \cos \frac{\varphi_0}{2} = 2\rho_0 \sin \frac{\varphi_0}{2} \cos \frac{\varphi_0}{2} = \rho_0 \sin \varphi_0;$$

$$AC = AO \cdot \sin \frac{\varphi_0}{2} = 2\rho_0 \sin^2 \frac{\varphi_0}{2} = \rho_0 (1 - \cos \varphi_0).$$

Соответственно:

$$OC_1 = \rho \sin \varphi; \quad A_1C_1 = \rho (1 - \cos \varphi),$$

кроме того:

$$CD = L \cos(\varphi_0 + \psi_0); \quad BK = L \sin(\varphi_0 + \psi_0);$$

$$C_1D_1 = L \cos(\varphi + \psi_0); \quad B_1K_1 = L \sin(\varphi + \psi_0).$$

Следовательно, координаты точки  $B$ :

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= -\rho_0 \sin \varphi_0 - L \cos(\varphi_0 + \psi_0); \\ y_0 &= \rho(1 - \cos \varphi_0) + L \sin(\varphi_0 + \psi_0); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

координаты точки  $B_1$ :

$$\left. \begin{aligned} x &= -\rho \sin \varphi - L \cos(\varphi + \psi_0), \\ y &= \rho(1 - \cos \varphi) + L \sin(\varphi + \psi_0). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В дальнейшем, при рассмотрении всего передаточного механизма термографа удобно будет рассматривать перемещение конца рычага гермопластины, располагая ось абсцисс по направлению начального положения рычага. Ввиду этого найдем координаты точек  $B$  и  $B_1$  относительно осей  $XOY$ , начало которых находится в точке  $B$ , а ось абсцисс направлена вдоль начального положения рычага. Для перехода от старых осей координат к новым нужно оси координат повернуть на угол  $-(\varphi_0 + \psi_0)$  и начало координат перенести в точку  $B_1$ , координаты которой относительно старых осей равны  $(-x_0, y_0)$ .

Обозначая координаты точек  $B$  и  $B_1$  относительно новых осей соответственно через  $(X_0, Y_0)$  и  $(X, Y)$  и пользуясь формулой для преобразования координат, получим:

$$\left. \begin{aligned} X &= (x - x_0) \cos(\varphi_0 + \psi_0) - (y - y_0) \sin(\varphi_0 + \psi_0), \\ Y &= (x - x_0) \sin(\varphi_0 + \psi_0) + (y - y_0) \cos(\varphi_0 + \psi_0). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Подставляя в выражения (4) значения  $x_0, y_0, x$  и  $y$  из выражений (2) и (3), получим:

$$\left. \begin{aligned} X &= -\rho [\sin(\varphi_0 + \psi_0) + \sin(\varphi - \varphi_0 - \psi_0)] + \\ &+ \rho_0 [\sin(\varphi_0 + \psi_0) - \sin \psi_0] + L [1 - \cos(\varphi - \varphi_0)], \\ Y &= \rho [\cos(\varphi_0 + \psi_0) - \cos(\varphi - \varphi_0 - \psi_0)] - \\ &- \rho_0 [\cos(\varphi_0 + \psi_0) - \cos \psi_0] + L \sin(\varphi - \varphi_0). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Пользуясь формулой (1), связывающей изменение кривизны биметалла с изменением температуры, найдем зависимость, связывающую перемещение конца рычага термопластины с изменением температуры.

Напишем формулу (1) в виде:

$$\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} = aT, \quad (6)$$

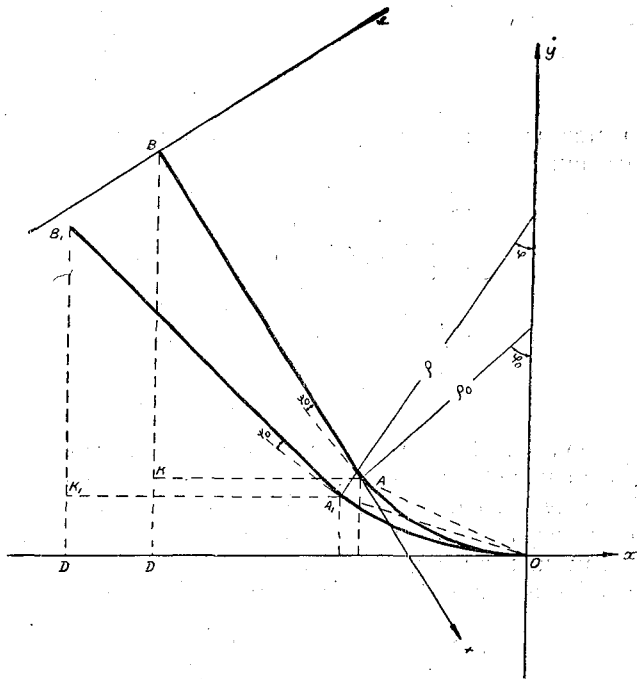


Рис. 2.

где

$$a = \frac{k(\alpha_2 - \alpha_1)}{h} \quad \text{и} \quad T = T_1 - T_0.$$

Из выражения (6) получим:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - a\rho_0 T}. \quad (7)$$

Так как длина термопластины

$$l = \rho_0 \varphi_0 = \rho \varphi,$$

то

$$\varphi_0 = \frac{l}{\rho_0} \quad (8)$$

и

$$\varphi = \varphi_0 - a l T. \quad (9)$$

Подставляя значения  $\rho$ ,  $\varphi_0$  и  $\varphi$  из выражений (7), (8) и (9) в выражения (5), получим:

$$\left. \begin{aligned} X &= -\frac{\rho_0}{1 - a\rho_0 T} \left[ \sin\left(\frac{l}{\rho_0} + \psi_0\right) - \sin(alT + \psi_0) \right] + \\ &+ \rho_0 \left[ \sin\left(\frac{l}{\rho_0} + \psi_0\right) - \sin\psi_0 \right] + L [1 - \cos(alT)], \\ Y &= \frac{\rho_0}{1 - a\rho_0 T} \left[ \cos\left(\frac{l}{\rho_0} + \psi_0\right) - \cos(alT + \psi_0) \right] - \\ &- \rho_0 \left[ \cos\left(\frac{l}{\rho_0} + \psi_0\right) - \cos\psi_0 \right] - L \sin(alT). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Формулы (10) выражают зависимость между изменением температуры и перемещением конца рычага приемника относительно выбранной нами системы координат.

Ввиду того что в условиях работы термографа значения величин  $X$  и  $Y$  малы, то уравнения (10) могут быть преобразованы следующим образом.

Так как выражение  $a\rho_0 T$  мало по сравнению с единицей, а выражение  $alT$  мало по абсолютной величине, то можно принять:

$$\frac{1}{1 - a\rho_0 T} = 1 + a\rho_0 T; \quad \sin(alT) = alT; \quad \cos(alT) = 1.$$

Подставляя принятые приближенные значения в уравнения (10) и пренебрегая членами, содержащими  $T^2$ , получим:

$$\left. \begin{aligned} X &= a \left[ l\rho_0 \cos\psi_0 - \rho_0^2 \sin\left(\frac{l}{\rho_0} + \psi_0\right) + \rho_0^2 \sin\psi_0 \right] T, \\ Y &= a \left[ l\rho_0 \sin\psi_0 + \rho_0^2 \cos\left(\frac{l}{\rho_0} + \psi_0\right) + \rho_0^2 \cos\psi_0 - lL \right] T. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из выражений (11) следует, что  $X$  и  $Y$  являются линейными функциями  $T$ . Следовательно, перемещение конца рычага приемника с точностью до малых первого порядка пропорционально изменению температуры.

Обозначая:

$$a = \left[ l\rho_0 \cos\psi_0 - \rho_0^2 \sin\left(\frac{l}{\rho_0} + \psi_0\right) + \rho_0^2 \sin\psi_0 \right] = A,$$

$$a = \left[ l\rho_0 \sin\psi_0 + \rho_0^2 \cos\left(\frac{l}{\rho_0} + \psi_0\right) - \rho_0^2 \cos\psi_0 - lL \right] = B,$$

получим:

$$\left. \begin{aligned} X &= AT, \\ Y &= BT. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Для данного прибора  $A$  и  $B$  — величины постоянные.



**Анализ кинематики передаточного механизма термографа.** Схема передаточного механизма термографа представлена на рис. 3. Найдем зависимость между вертикальной проекцией перемещения пера и перемещением конца рычага приемника.

Введем следующие обозначения частей передаточного механизма:  $b = CD$  — длина тяги;  $r = OD$  — длина движка (рабочей части);  $R = OE$  — длина стрелки.

Обозначим  $x$  и  $y$  горизонтальную и вертикальную проекции перемещения конца рычага и  $H$  — вертикальную проекцию перемещения пера с изменением температуры.

За начальное примем положение механизма, при котором стрелка горизонтальна (перо на середине шкалы). Предположим, что при этом тяга составляет с горизонтальной осью угол  $\beta_0$ , а рычаг — угол  $\gamma_0$ . (Считаем, что движок параллелен стрелке, как это должно быть при правильной сборке прибора.) Предположим, что с изме-

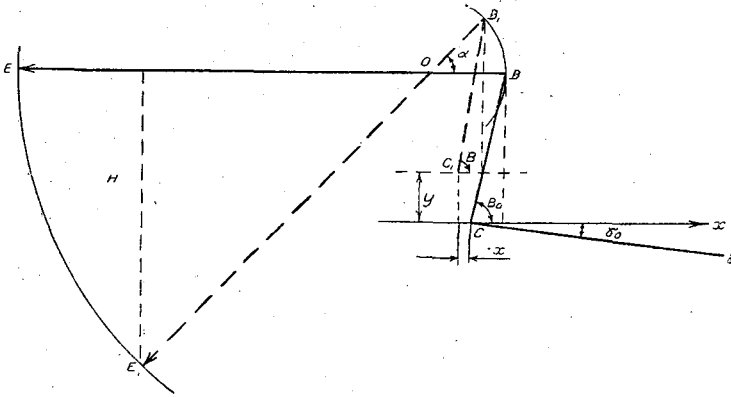


Рис. 3.

нением температуры конец рычага сместился так, что точка  $C$  перешла в точку  $C_1$  (рис. 3). В этом случае тяга займет положение  $C_1D_1$  и образует с горизонтальной осью угол  $\beta$ . Движок образует с этой осью угол  $\alpha$ , а перо из точки  $E$  перейдет в точку  $E_1$ .

Проектируя перемещение механизма на горизонтальную и вертикальную оси, получим:

$$r \cos \alpha + b \cos \beta_0 - b \cos \beta - x = r, \quad (13)$$

$$y + b \sin \beta = b \sin \beta_0 + r \sin \alpha. \quad (14)$$

Так как

$$H = -R \sin \alpha,$$

то, подставляя значение  $\sin \alpha$  из выражения (14), получим:

$$H = -\frac{R}{r} [y + b (\sin \beta - \sin \beta_0)]. \quad (15)$$

В частном случае, когда  $\beta_0 = \frac{\pi}{2}$ , получим:

$$H = -\frac{R}{r} [y + b (\sin \beta - 1)]. \quad (16)$$

Передаточное отношение механизма

$$K = \frac{\partial H}{\partial y} = -\frac{R}{r} \left[ 1 + b \cos \beta \frac{\partial \beta}{\partial y} \right]. \quad (17)$$

Угол  $\beta$ , входящий в выражения (13) и (14), при заданных  $b$ ,  $r$  и  $\beta_0$  является функцией  $x$  и  $y$ . Решив совместно уравнения (13) и (14) относительно  $\beta$ , получим:

$$\beta = \beta_0 + \frac{x^2 + y^2 + 2rx}{2br \sin \beta_0 - 2b(y \cos \beta_0 - x \sin \beta_0)} \quad (18)$$

Для частного случая  $\beta_0 = \frac{\pi}{2}$ :

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \frac{x^2 + y^2 + 2rx}{2b(r-x)} \quad (19)$$

Дифференцируя выражение (18) по  $y$ , найдем:

$$\frac{\partial \beta}{\partial y} = \frac{\left(2x \frac{\partial x}{\partial y} + 2y + 2r \frac{\partial x}{\partial y}\right) [2br \sin \beta_0 - 2b(y \cos \beta_0 - x \sin \beta_0)]}{[2br \sin \beta_0 - 2b(y \cos \beta_0 - x \sin \beta_0)]^2} - \frac{(x^2 + y^2 + 2rx) \left[-2b \left(\cos \beta_0 - \sin \beta_0 \frac{\partial x}{\partial y}\right)\right]}{[2br \sin \beta_0 - 2b(y \cos \beta_0 - x \sin \beta_0)]^2} \quad (20)$$

Значение  $\frac{\partial \beta}{\partial y}$  в начальном положении механизма получим, подставив в выражение (20) значения  $x = 0$ ,  $y = 0$ :

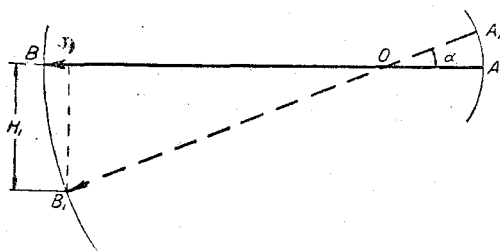


Рис. 4.

$$\left(\frac{\partial \beta}{\partial y}\right)_{\substack{x=0 \\ y=0}} = \frac{\partial x}{b \sin \beta_0} \quad (21)$$

Найдем передаточное отношение в начальном положении механизма. Для этого в выражение (17) подставим значение  $\frac{\partial \beta}{\partial y}$  из (21). Принимая во внимание, что в начальном положении механизма  $\beta = \beta_0$ , получим:

$$K_0 = -\frac{R}{r} \left[1 + \frac{\partial x}{\partial y} \operatorname{ctg} \beta_0\right] \quad (22)$$

Ввиду того что изменение  $x$  примерно в 10 раз меньше изменения  $y$ , можно приближенно считать, что  $\frac{\partial x}{\partial y}$  имеет значение порядка 0,1 и при значениях  $\beta_0$ , близких к  $\frac{\pi}{2}$ , вторым членом скобки можно пренебрегать.

Если в начальном положении передаточного механизма рычаг приемника составляет с горизонтальной осью угол  $\gamma_0$ , то горизонтальная и вертикальная проекции перемещения конца рычага должны быть подсчитаны по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x &= X \cos \gamma_0 - Y \sin \gamma_0, \\ y &= X \sin \gamma_0 + Y \cos \gamma_0, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где  $X$  и  $Y$  — перемещения конца рычага, определяемые из уравнений (11).

Подставляя в формулу (15) значение  $\beta$  из (18) и значения  $x$  и  $y$ , найденные из формул (23) и (11), получим зависимость между изменением показаний термографа и изменением температуры приемника, выражаемую через параметры прибора.

При выводе формулы (15), выражающей зависимость между перемещением конца рычага приемника и вертикальной проекцией перемещения пера, мы считали, что

стрелка прибора параллельна движку. Как увидим в дальнейшем, для уменьшения инструментальных погрешностей прибора в некоторых случаях целесообразно располагать стрелку и движок не параллельно друг другу.

Найдем разницу между вертикальными проекциями перемещения пера при повороте движка на один и тот же угол в случаях, когда: 1) стрелка параллельна движку и 2) стрелка составляет с движком угол  $\alpha_0$ .

Если стрелка параллельна движку (рис. 4), то при повороте движка на угол  $\alpha$  вертикальная проекция перемещения пера:

$$H_1 = -R \sin \alpha.$$

Если стрелка составляет с движком угол  $\alpha_0$  (рис. 5), то при повороте движка на угол  $\alpha$  вертикальная проекция перемещения пера:

$$H_2 = -R [\sin(\alpha + \alpha_0) - \sin \alpha_0].$$

Разность проекций перемещений в том и в другом случае:

$$H_2 - H_1 = -R [\sin(\alpha + \alpha_0) - (\sin \alpha + \sin \alpha_0)]. \quad (24)$$

### Инструментальные погрешности термографа

Регистрация показаний термографа производится на стандартных лентах, температурная шкала которых равномерна. Вследствие этого чувствительность термографа во всех участках шкалы должна быть одинаковой и соответствовать масштабу шкалы ленты. В действительности это выполняется только приближенно вследствие инструментальных погрешностей прибора.

Причинами этих погрешностей термографа являются: 1) непостоянство коэффициента расширения инвара, 2) упругий гистерезис в приемнике термографа, 3) непостоянство передаточного отношения механизма, 4) неточности при изготовлении и регулировке прибора, 5) трение в подвижной системе.

Рассмотрим указанные инструментальные погрешности термографа.

**Погрешности, обусловленные непостоянством коэффициента расширения инвара.** По литературным данным [1] известно, что коэффициент расширения инвара меняется с температурой. В диапазоне температур, при которых работает термограф, коэффициент расширения инвара может быть принят постоянным только при положительных температурах ( $1,5 \cdot 10^{-6}$ ). При отрицательных температурах значение его уменьшается. При температуре  $-20^\circ$  коэффициент расширения инвара меньше значения его при положительных температурах на  $1,06 \cdot 10^{-6}$ . Чувствительность термографа пропорциональна разности коэффициентов расширения составляющих биметалла. Следовательно, если чувствительность термографа при положительной температуре соответствует масштабу ленты, то при температуре  $-20^\circ$  она будет превосходить нужное значение на  $6\%$ .

**Погрешности вследствие гистерезиса.** Погрешности в показаниях термографа, являющиеся следствием упругого гистерезиса в приемнике термографа, исследовались экспериментально. Для исследования гистерезиса была сконструирована установка, схема которой представлена на рис. 6. Приводим ее краткое описание.

Биметаллический приемник термографа 1 вместе с кронштейном 2, на котором он крепится к корпусу прибора, посредством фарфорового стержня 3 и соединительной муфты, укреплен неподвижно на кронштейне 4, вделанном в стене здания. К концу рычага биметаллической пластины припаян стальной заостренный штифтик 5. Конец штифтика упирается в латунную пластинку с зеркальцем 6. Пластинка с зеркальцем укреплена на оси 7. Рычаг термопластины при помощи регулируемого винта 8 устанавливался в такое положение, чтобы на протяжении всего эксперимента тяжесть пластинки с зеркальцем прижимала ее к штифтику. При изменении кривизны биметаллической пластины зеркальце поворачивается на оси.

На расстоянии 130 см от зеркала, также на кронштейне, вделанном в стену здания, укреплены вертикальная миллиметровая шкала 9 и осветитель, состоящий из лампочки от карманного фонарика 10 с S-образной нитью и двояковыпуклой линзы 11. На шкале при помощи линзы и зеркала получалось изображение прямолинейного участка нити лампочки, которое располагалось параллельно делениям шкалы. При повороте зеркала изображение нити лампочки перемещается по шкале.

Приемник термографа погружался в водяную ванну с теплоизоляцией и при постепенном повышении, а затем понижении температуры отсчитывались температуры ванны и соответствующее ей положение нити на шкале. Температура ванны измерялась ртутным термометром, имеющим шкалу, разделенную на  $0,1^{\circ}$ . Перемещение изображения нити по шкале на 1 мм соответствовало изменению температуры ванны приблизительно на  $0,05^{\circ}$ .

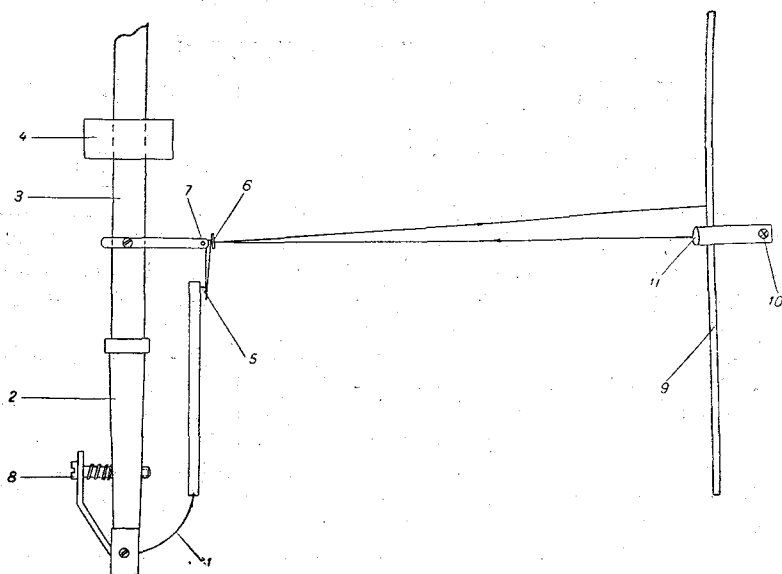


Рис. 6.

Температура ванны изменялась ступенями, для чего доливалась и перемешивалась теплая или холодная вода. Вода доливалась с таким расчетом, чтобы температура ванны поднялась на  $5^{\circ}$  приблизительно за 5 мин. После того как температура воды поднималась на  $5^{\circ}$ , приемник выдерживался при данной температуре в течение 2 мин. и затем производились отсчеты температуры ванны и положения изображения на шкале. Такие отсчеты через каждые  $5^{\circ}$  производились до высшей, выбранной для данного эксперимента точки, после чего температура ванны понижалась так же ступенями через  $5^{\circ}$  и так же производились отсчеты температуры ванны по термометру и положения изображения на шкале.

Всего было исследовано 10 приемников термографа. Три приемника исследовались при амплитудах температуры ванны 10, 20, 25, 30 и  $35^{\circ}$  и семь приемников — только при амплитудах 20 и  $30^{\circ}$ . Каждый эксперимент повторялся три раза. В тех случаях, когда испытания велись при амплитуде  $10^{\circ}$ , сравнительные отсчеты по термометру и шкале производились не через  $5^{\circ}$ , а через  $2,5^{\circ}$ . Все испытания велись в диапазоне температур от  $+5$  до  $+45^{\circ}$ .

Полученные при эксперименте отсчеты температур ванны и отсчеты положения изображения на шкале наносились на график. По оси абсцисс откладывался отсчет по шкале в масштабе 1 мм шкалы равен 1 мм, а по оси ординат — отсчет по термометру в масштабе  $1^{\circ} = 20$  мм. Нанесенные точки соединялись плавной кривой. Рисунки 7 представляет одну из кривых, полученных при испытании термоприем-

ника № 1 при амплитуде температуры ванны 35° (от +5 до +40°). Кружками обозначены экспериментальные точки, соответствующие отсчетам, произведенным при повышении температуры, а крестиками — точки, соответствующие отсчетам при понижении температуры. Как видно из рис. 7, кривые, соответствующие повышению и понижению температуры, образуют замкнутую петлю упругого гистерезиса.

Разность ординат кривых, соответствующих одной и той же абсциссе, представляет собой разность температур ванн, соответствующих одинаковым отсчетам по шкале при повышении и понижении температуры. Максимальная разность ординат кривых наблюдается на середине петли. Для каждого из графиков по разности ординат в середине петли была определена ширина петли гистерезиса и среднее значение ширины петли для данной амплитуды температур. Максимальная разность ординат соответствует максимальной погрешности в показаниях термографа, являющейся следствием гистерезиса (при данной амплитуде колебания температуры).

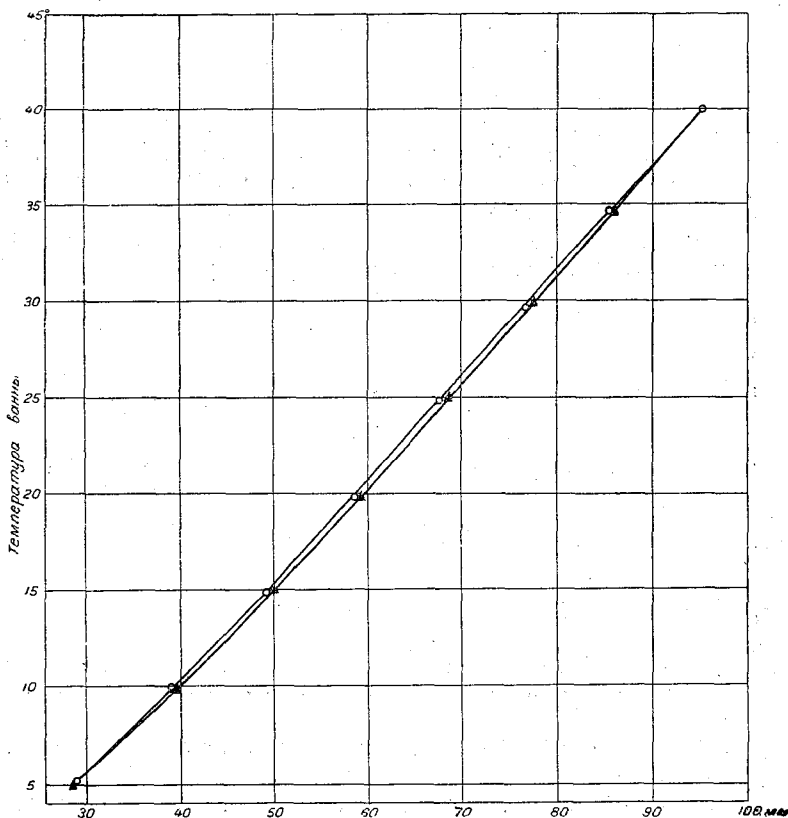


Рис. 7.

Графики, полученные при обработке результатов испытаний приемников во всех случаях, за исключением испытаний при амплитуде температуры 10°, представляют собой замкнутую петлю. При амплитуде температуры 10° (а иногда и 20°) гистерезиса не наблюдалось. В табл. 1 приведены средние (для каждой амплитуды температур) значения ширины петли гистерезиса в градусах, полученные при испытании приемников № 1, 2 и 3.

Из табл. 1 видно, что ширина петли гистерезиса растет с увеличением амплитуды.

Графически зависимость ширины петли гистерезиса от амплитуды колебания температуры, при которой производилось испытание приемников, представлена

на рис. 8. По оси абсцисс отложены амплитуды колебания температуры, а по оси ординат — ширина петель гистерезиса в градусах. Кривые продолжены до начала координат, так как ширина петли гистерезиса теоретически равна нулю при амплитуде температуры, равной нулю.

**Таблица 1**  
Средние значения ширины петли гистерезиса (в градусах), полученные при испытании приемников № 1, 2 и 3

№ приемников	Ширина петли гистерезиса при амплитудах			
	20°	25°	30°	35°
1	0,11	0,16	0,22	0,29
2	0,06	0,10	0,13	0,21
3	0,08	0,11	0,16	0,27

Из кривых, представленных на рис. 8, видно, что ширина петли гистерезиса при амплитуде температуры 10° должна быть порядка 0,02—0,03°. Естественно, что гистерезис при амплитуде колебания температуры в 10° не мог быть обнаружен экспериментом, так как величина 0,02—0,03° находится в пределах точности эксперимента и вследствие этого экспериментальные данные, полученные при повышении и понижении температуры, укладываются на одну кривую.

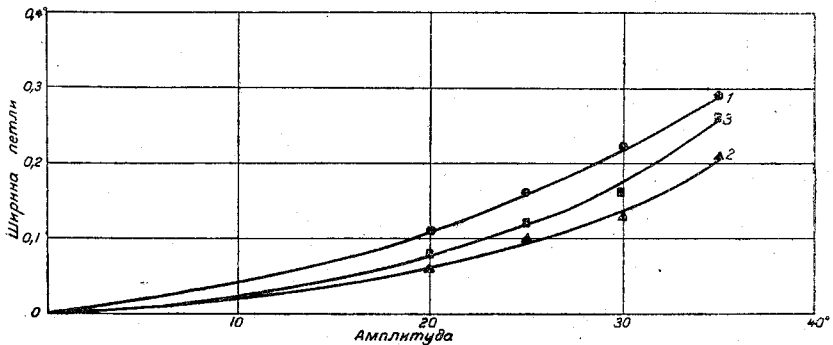


Рис. 8. График зависимости ширины петли гистерезиса от амплитуды колебания температуры для приемников № 1, № 2, № 3.

В табл. 2 приведены средние значения ширины петли гистерезиса для всех десяти приемников, которые испытывались при амплитуде температуры 20 и 30°. В последней графе таблицы приведены также значения толщин термопластин, измеренные с точностью до 0,05 мм.

Результаты испытаний приемников термографов, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о неоднородности применяющихся биметаллических приемников. Это является результатом того, что технологический процесс изготовления приемников не стандартизован. Как известно, упругие свойства биметаллического приемника зависят как от процесса изготовления самого биметалла, так и от процесса изготовления приемника и, в частности, от его термической обработки.

Для оценки точности, с которой в каждом данном случае определялась ширина петли гистерезиса, была определена средняя квадратичная погрешность измерения по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum p^2}{(k-1)n}}$$

где  $\rho$  — отклонение отдельных измерений от арифметического среднего,  $n$  — число объектов измерения,  $k$  — число повторных измерений. Ошибка измерения  $\sigma = \pm 0,04^\circ$ , что указывает на достаточную точность эксперимента.

Приемник № 1 испытывался дополнительно по тому же методу, но с выдержкой 30 мин. на каждой точке. Ширина петли гистерезиса, в пределах точности эксперимента, оказалась той же, что и при выдержке 2 мин. Экспериментов с более быстрой сменой температур не производилось, так как в условиях работы термографа на метстанции изменение температуры со скоростью большей, чем  $1^\circ$  в минуту, мало вероятно.

Таблица 2  
Средние значения ширины петли гистерезиса (в градусах)

№ приемников	Ширина петли гистерезиса при амплитудах		Толщина термопластины, в мм
	20°	30°	
1	0,11	0,22	0,6
2	0,06	0,13	0,6
3	0,08	0,16	0,6
4	0,08	0,21	0,65
681	0,08	0,16	0,6
126927	0,07	0,17	0,6
809	0,21	0,34	0,85
3459	0,00	0,00	0,6
34617	0,00	0,11	0,65
204946	0,00	0,00	0,55

Исследование приемников термографов показало, что максимальная ошибка в показаниях термографа вследствие гистерезиса при амплитуде колебания температуры  $20^\circ$  не превосходит  $0,1^\circ$ , а при амплитуде в  $30^\circ$  не превосходит  $0,2^\circ$ . Исключение составляет приемник термографа № 809 (табл. 2), который должен быть забракован вследствие того, что толщина термопластины значительно превышает размеры, предусмотренные техническими условиями на термограф. (По техническим условиям толщина термопластины  $h = 0,6$  мм —  $0,06$  мм.)

**Погрешности передаточного механизма термографа.** Из теории ошибок механизмов [2] известно, что положение ведомого звена реального механизма определяется уравнением:

$$\varphi = \varphi(q_s + \Delta q_s),$$

где  $q_s$  — заданные независимые между собой параметры, определяющие положения ведущих звеньев и размеры всех звеньев, а  $\Delta q_s$  — ошибки размеров и положений звеньев.

Ошибка положения ведомого звена механизма равна:

$$\Delta\varphi = \varphi_0' - \varphi_0 + \sum_s \left( \frac{\partial\varphi}{\partial q_s} \right) \Delta q_s, \quad (25)$$

где  $\varphi_0' - \varphi_0$  — ошибка положения ведомого звена механизма, вызванная отступлением от правильной схемы механизма при условии, что механизм выполнен идеально точно.

Погрешности передаточного механизма термографа являются следствием непостоянства передаточного отношения механизма и неточностей в размерах его звеньев.

Погрешности, обусловленные непостоянством передаточного отношения механизма. Ввиду того что перемещение конца рычага приемника пропорционально изменению температуры и запись производится на равномерной шкале, назначение передаточного механизма должно сводиться к передаче

движения от конца рычага к перу, с постоянным передаточным отношением. В действительности передаточное отношение переменное. Поэтому регулировка чувствительности прибора сводится к тому, что подбирается соответствующее передаточное отношение для какого-то одного положения стрелки на шкале.

Во всех остальных участках шкалы увеличение передаточного механизма будет отличаться от нужного значения и тем самым в показаниях термографа будет вноситься систематическая погрешность.

Найдем погрешности в показаниях термографа, являющиеся следствием непостоянства передаточного отношения, для случая, если стрелка расположена параллельно движку.

Предположим, что прибор отрегулирован так, что величина передаточного отношения соответствует нужному значению, когда перо находится посередине шкалы (т. е. при положении передаточного механизма, которое нами выбрано за начальное). Согласно выражению (22), передаточное отношение в этом случае равно:

$$K_0 = -\frac{R}{r} \left[ 1 + \frac{\partial x}{\partial y} \operatorname{ctg} \beta_0 \right].$$

В случае передаточного механизма с постоянным передаточным отношением при изменении температуры на  $T^\circ$  изменение показания термографа было бы равно:

$$H_1 = K_0 y = -\frac{R}{r} \left[ 1 + \frac{\partial x}{\partial y} \operatorname{ctg} \beta_0 \right] y.$$

В действительности же оно определяется выражением (15).

Следовательно, погрешность в показаниях термографа, являющаяся следствием непостоянства передаточного отношения, равна:

$$\Delta H = H - H_1 = -\frac{R}{r} \left[ b (\sin \beta - \sin \beta_0) - \frac{\partial x}{\partial y} \operatorname{ctg} \beta_0 y \right]. \quad (26)$$

Значение  $\beta$  определяется из выражения (18). Так как  $\beta$  близко к  $\frac{\pi}{2}$  и  $\frac{\partial x}{\partial y}$  величина порядка  $10^{-1}$ , то второй член скобки выражения (26) мал по сравнению с первым, поэтому порядок величины и знак погрешности определяются первым слагаемым, т. е. выражением:

$$\Delta H_1 = -\frac{R}{r} b (\sin \beta - \sin \beta_0). \quad (27)$$

Анализ выражений (27) и (26) дает следующее: 1) абсолютное значение погрешности  $\Delta H_1$  растет с увеличением абсолютных значений  $x$  и  $y$ , т. е. с увеличением абсолютного значения  $T$ ; 2) знак погрешности определяется значением  $\beta_0$ .

Так как  $\beta$  всегда больше  $\beta_0$ , то при  $\beta_0 < \frac{\pi}{2}$   $\Delta H_1$  имеет отрицательное значение.

При  $\beta_0 \geq \frac{\pi}{2}$  значение  $\Delta H_1$  — положительное; 3) погрешности имеют наименьшее значение при  $\beta_0 = \frac{\pi}{2}$ .

По мере увеличения абсолютных значений разности  $\left| \beta - \frac{\pi}{2} \right|$  погрешность будет расти, так как при заданном значении разности  $(\beta - \beta_0)$  абсолютная величина  $|\sin \beta - \sin \beta_0|$  будет расти с увеличением абсолютного значения  $\left| \beta_0 - \frac{\pi}{2} \right|$ .

Следовательно, для получения оптимальных условий работы передаточного механизма чувствительность приемника должна быть такова, чтобы соответствующая ей длина движка обеспечивала угол наклона тяги в начальном положении механизма  $\beta_0 = \frac{\pi}{2}$ .

Таким образом, величина и знак погрешности, обусловленной непостоянством передаточного механизма, существенно зависят от  $\beta_0$ , т. е. от наклона тяги,



который, в свою очередь, определяется чувствительностью приемника, а также правильностью сборки прибора в целом.

В табл. 3 приведены значения погрешностей в показаниях термографа, обусловленных непостоянством передаточного отношения механизма при разных углах наклона тяги ( $\beta_0$ ). Погрешности подсчитаны для максимально возможного изменения температуры  $\pm 40^\circ$  (при изменении показаний термографа от середины до края шкалы). При подсчете предполагалось, что величина передаточного отношения соответствует нужному значению, когда перо находится на середине шкалы. Вычисленные значения погрешностей округлены до десятых долей градуса.

Таблица 3

Значения погрешностей в показаниях термографа (в градусах), обусловленных непостоянством передаточного отношения механизма при разных  $\beta_0$

Значения $T$	Значения $\beta_0$ , в градусах				
	85°	87,5°	90°	92,5°	95°
+40	-0,4	-0,2	+0,1	+0,4	+0,6
-40	-0,6	-0,3	0,0	+0,2	+0,5

Из табл. 3 видно, что при данном значении  $\beta_0$  ошибка имеет один знак по всей шкале термографа. Так как показания термографа отсчитываются от нулевого деления шкалы вверх со знаком плюс, а вниз со знаком минус, то погрешности будут в одном случае увеличивать абсолютную величину показаний термографа, а в другом — уменьшать ее. Таким образом, из-за непостоянства передаточного отношения механизма при  $\beta_0 < \frac{\pi}{2}$  положительные отсчеты показаний термографа будут заниженными, а отрицательные завышенными, а при  $\beta_0 \geq \frac{\pi}{2}$  — наоборот. Величина погрешности не пропорциональна смещению пера, а зависит от того, в каком участке шкалы находится перо. В табл. 4 приведены значения погрешностей из-за непостоянства передаточного отношения механизма, в зависимости от изменения температуры, для  $\beta_0 = 95^\circ$ . За начальную опять принята температура, при которой перо находится на середине шкалы.

Таблица 4

Значения погрешностей в показаниях термографа, обусловленных непостоянством передаточного отношения механизма, для  $\beta_0 = 95^\circ$

Изменение $T^\circ$ . . . . .	10	20	30	40
Значение погрешности, в град.	+0,06	+0,12	+0,28	+0,60

Из табл. 4 видно, что погрешность растет значительно быстрее на крайних участках шкалы. Поэтому, если установочным винтом сместить стрелку по шкале, как это принято в тех случаях, когда измеряемые значения температуры выходят за пределы шкалы, то ошибка на крайних участках шкалы увеличится.

Значения погрешностей, приведенные в табл. 3 и 4, вычислены в предположении, что при  $T = 0^\circ$  рычаг приемника расположен горизонтально. В случае наклонного положения рычага, при той же чувствительности приемника, значения вертикальной и горизонтальной проекций перемещения конца рычага приемника несколько изменяются. Результатом может оказаться более несимметричное распределение погрешностей относительно середины шкалы, чем это следует из табл. 3. Так, например, если при  $T = 0^\circ$  рычаг приемника составляет с горизонтальной осью угол  $\gamma_0 = 5^\circ$ , то погрешности из-за непостоянства передаточного отношения

**БИБЛИОТЕКА**  
 А. И. ГОРБАТОВА  
 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО  
 ИНСТИТУТА

для  $\beta_0 = 95^\circ$  равны:  $+0,9^\circ$  для  $T = +40^\circ$  и  $+0,2$  для  $T = -40^\circ$  (вместо  $+0,6^\circ$  и  $+0,5^\circ$ , приведенных в таблице).

Погрешности в показаниях термографа, обусловленные непостоянством передаточного отношения, могут быть отчасти скомпенсированы путем поворота стрелки на оси так, чтобы она составляла с движком некоторый угол.

Разница в перемещении пера при одном и том же перемещении рычага приемника в случае, если стрелка параллельна движку и если она составляет с движком угол  $\alpha_0$ , определяется выражением (24):

$$\Delta H_2 = -R[\sin(\alpha + \alpha_0) - (\sin \alpha + \sin \alpha_0)].$$

Следовательно, если передаточный механизм обеспечивает точные показания прибора при стрелке, параллельной движку, то при сдвиге стрелки относительно движка на угол  $\alpha_0$  в показания прибора будет внесена систематическая погрешность, величина и знак которой определяются выражением (24). Рассмотрим, чем определяется знак  $\Delta H_2$ . Так как  $\sin \alpha + \sin \alpha_0 > \sin(\alpha + \alpha_0)$ , если  $\alpha$  и  $\alpha_0$  имеют одинаковые знаки, и  $\sin \alpha + \sin \alpha_0 < \sin(\alpha + \alpha_0)$ , если  $\alpha$  и  $\alpha_0$  имеют разные знаки, то

при положительном значении  $\alpha_0$  значение  $\Delta H_2$  положительно при всех значениях  $\alpha$  за исключением случаев  $|\alpha| < |\alpha_0|$  при отрицательных значениях  $\alpha$ ;

при отрицательном значении  $\alpha_0$  значение  $\Delta H_2$  отрицательно при всех значениях  $\alpha$  за исключением случаев  $|\alpha| < |\alpha_0|$  при положительных значениях  $\alpha$ .

При заданном значении  $\alpha_0$  абсолютное значение  $\Delta H_2$  растет с увеличением абсолютного значения  $\alpha$  (т. е. с увеличением абсолютного значения  $T$ ).

Выбирая значение  $\alpha_0$  в соответствии со знаком и величиной  $\Delta H_1$  [см. выражение (26)], можно уменьшить погрешности в показаниях прибора. Полностью скомпенсировать погрешности нельзя, так как  $\Delta H_1$  при заданном значении  $\beta_0$  имеет один знак по всей шкале, в то время как знак  $\Delta H_2$  меняется. Таким образом, при уменьшении погрешностей в одном участке шкалы погрешности в другой части шкалы увеличиваются. Такое перераспределение погрешностей имеет смысл в случае несимметричного их расположения относительно середины шкалы.

При подсчете погрешностей из-за непостоянства передаточного механизма мы считали, что заданные размеры звеньев передаточного механизма выполнены совершенно точно. Перейдем к рассмотрению погрешностей в показаниях термографа, являющихся следствием неточностей в размерах звеньев механизма.

Погрешности, обусловленные отклонениями размеров деталей передаточного механизма от заданных значений. Перемещение пера с изменением температуры соответствует шкале, нанесенной на ленте, только при определенном (для каждого приемника) соотношении между размерами звеньев передаточного механизма. Поэтому погрешности в размерах передаточного механизма влекут за собой погрешности в показаниях прибора.

Рассмотрим погрешности в показаниях термографа, обусловленные погрешностями в размерах звеньев передаточного механизма для случая, если угол наклона тяги в начальном положении механизма равен  $\frac{\pi}{2}$ . В этом случае вертикальная проекция перемещения пера определяется выражением (16), т. е.

$$H = -\frac{R}{r} [y + b(\sin \beta - 1)],$$

где

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \frac{x^2 + y^2 + 2rx}{2b(r-x)}.$$

Погрешности в показаниях термографа, обусловленные погрешностями в размерах деталей, можно определить, пользуясь формулой (25), если положить  $\varphi_0' = \varphi_0$ , т. е. считать, что схема механизма правильная.

Если при начальном положении передаточного механизма (перо находится на середине шкалы), ошибка в показаниях термографа равна нулю, то погрешность

в перемещении пера  $\Delta H$ , вызванная отклонением размеров звеньев передаточного механизма от заданных значений, равна:

$$\Delta H = \frac{\partial H}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial H}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial H}{\partial R} \Delta R, \quad (28)$$

где  $\Delta b$ ,  $\Delta r$  и  $\Delta R$  — погрешности размеров  $b$ ,  $r$  и  $R$ .

Определяя значения соответствующих частных производных, найдем погрешности в показаниях термографа, обусловленные неточностью в размерах каждого из звеньев. Погрешность в показаниях термографа, вызванная погрешностью в длине движка, равна:

$$\Delta H_r = \frac{\partial H}{\partial r} \Delta r = \frac{R}{r^2} \left[ y + b \left( \sin \beta - 1 - r \cos \beta \frac{\partial \beta}{\partial r} \right) \right] \Delta r.$$

Значение  $\beta$  близко к  $\frac{\pi}{2}$ , поэтому второй член квадратной скобки мал по сравнению с первым и с погрешностью, не превосходящей 0,3%, им можно пренебречь. Получим:

$$\Delta H_r = \frac{R}{r^2} y \Delta r. \quad (29)$$

Длина движка подбирается экспериментально для каждого прибора при его регулировке. Вследствие этого величина погрешности  $\Delta r$  индивидуальна для каждого прибора и зависит от качества регулировки. Если ошибка в длине движка  $\Delta r = 0,1$  мм, то вызванная этим погрешность в показаниях термографа составляет 0,8% от величины измеряемого изменения температуры.

Погрешность в показаниях термографа, обусловленная погрешностью в длине стрелки, равна:

$$\Delta H_R = \frac{\partial H}{\partial R} \Delta R = - \frac{1}{r} [y + b (\sin \beta - 1)] \Delta R.$$

Пренебрегая вторым членом квадратной скобки, получим:

$$\Delta H_R = - \frac{1}{r} y \Delta R. \quad (30)$$

Под длиной стрелки подразумевается расстояние от оси до конца пера. В процессе работы термографа перья меняются, а также снимаются для чистки. При каждой новой установке пера возможны новые значения погрешностей в длине стрелки. Если ошибка в длине стрелки равна 1 мм, то вызванная этим погрешность в показаниях термографа составляет 0,7% от величины измеряемого изменения температуры.

Погрешность в показаниях термографа, обусловленная неточностью в длине тяги, мала и практически может не приниматься во внимание.

Для того чтобы для данного термографа найти погрешности в его показаниях, являющиеся следствием погрешностей передаточного механизма, нужно суммировать погрешности от непостоянства передаточного отношения и неточностей в размерах деталей. При суммировании следует учитывать знаки ошибок.

Погрешности от неточностей в размерах движка и стрелки в случаях, если они имеют разные знаки, могут взаимно компенсироваться, так как значения и  $\Delta H_r$  и  $\Delta H_R$  изменяются по шкале линейно, и знаки их меняются при переходе стрелки через середину шкалы. Погрешности от непостоянства передаточного отношения механизма не могут быть компенсированы погрешностями в размерах деталей ввиду того, что погрешности, обусловленные непостоянством передаточного отношения, изменяются по шкале нелинейно и имеют по всей шкале один знак. При рассмотрении погрешностей передаточного механизма мы полагали, что погрешность в показаниях термографа равна нулю, когда стрелка находится на середине шкалы.

В случае, если она (из-за неправильной установки стрелки) не равна нулю, то значение погрешности в средней точке шкалы войдет слагаемым в погрешность

каждого показания термографа. Так как обычно термограф используется как относительный прибор, то существенна не абсолютная величина погрешности, а ее изменение по шкале.

Максимальное изменение погрешности ограничивается допусками, предусмотренными техническими условиями на термограф, согласно которым допускается изменение поправки от  $0^\circ$  до крайних точек шкалы на  $\pm 1^\circ$ , причем изменение поправки на каждые  $10^\circ$  шкалы не должны превышать  $\pm 0,5^\circ$ . Этот допуск на изменение поправки по шкале включает в себя не только погрешности передаточного механизма, но также и погрешности из-за непостоянства коэффициента расширения инвара.

Рассматривая погрешности в показаниях термографа, являющиеся следствием ошибок передаточного механизма, мы полагали, что запись показаний производится на плоской, правильно установленной относительно передаточного механизма шкале с точными миллиметровыми делениями. Так как в действительности шкала и положение ее относительно передаточного механизма не вполне точны, то при записи показаний термографа возникает ряд дополнительных погрешностей.

При анализе погрешностей передаточного механизма мы не учитывали также погрешностей, происходящих от зазоров в соединениях и погрешностей трения. Стрелка передаточного механизма не уравновешена и в результате действия ее момента силы тяжести люфты в соединениях передаточного механизма всегда выбраны в одну сторону. Причиной неполной выборки люфта могут оказаться силы трения, возникающие при перемещении деталей. Ввиду этого влияние люфтов на точность показаний термографа мы будем исследовать совместно с исследованием погрешностей трения.

**Погрешности при записи показаний термографа.** Запись показаний термографа производится на ленте, надетой на барабан, который вращается часовым механизмом вокруг вертикальной оси.

Предполагая, что деления ленты абсолютно точны, рассмотрим погрешности, которые могут возникнуть при записи показаний термографа.

Эти погрешности при записи на вращающемся барабане возникают вследствие следующих причин:

- 1) ось барабана не вертикальна;
- 2) геометрическая ось барабана не совпадает с осью вращения.

Погрешность в показаниях термографа, вследствие отклонения оси барабана от вертикали на угол  $\delta$ , равна:

$$\Delta H = H(\cos \delta - 1).$$

Величина погрешности пропорциональна смещению пера и не меняется при повороте барабана. Так как угол  $\delta$  практически мал, то  $\cos \delta$  близок к единице и ошибка

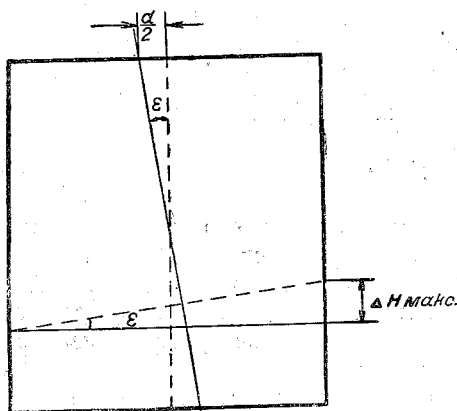


Рис. 9.

мала. Так, например, при  $\delta = 3^\circ$  максимальная погрешность в показаниях термографа (для  $T = \pm 40^\circ$ ) составляет  $0,06^\circ$ .

Рассмотрим погрешности в показаниях термографа, возникающие в случае, если геометрическая ось барабана составляет с осью вращения угол  $\epsilon$  (рис. 9). Максимальная величина угла  $\epsilon$ , по техническим условиям на часовые механизмы, определяется допуском на биение (горизонтальное). Пусть перо находится в точке А. Так как деления шкалы расположены в плоскостях, наклонных к горизонтальной плоскости под углом  $\epsilon$ , а барабан вращается вокруг вертикальной оси, то при вращении барабана положение шкалы относительно пера будет меняться. Изменение отсчета положения пера (при неизменной температуре) равно:

$$\Delta H = \frac{D}{2}(1 - \cos \alpha) \operatorname{tg} \epsilon, \quad (31)$$

где  $D$  — диаметр барабана;  $\alpha$  — угол поворота барабана, отсчитываемый от плоскости, проходящей через обе оси;  $\epsilon$  — угол между осью вращения и геометрической осью барабана.

Обозначим  $h$  — высоту барабана и  $d$  — допуск на биение.

Так как угол  $\epsilon$  практически мал, то можно принять, что

$$\operatorname{tg} \epsilon = \frac{d}{h}.$$

Подставляя это значение в выражение (31), получим:

$$\Delta H = \frac{Dd}{2h} (1 - \cos \alpha). \quad (32)$$

Максимальное изменение отсчета при вращении барабана соответствует  $\alpha = 2\pi$  и равно:

$$\Delta H_{\text{макс}} = \frac{Dd}{h}. \quad (33)$$

Подставив в выражение (33) соответствующие числовые значения, найдем, что максимальная погрешность в показаниях термографа из-за несовпадения геометрической оси барабана с осью вращения равна  $0,2^\circ$ .

Погрешности показаний термографа зависят также от точности шкалы ленты и точности наложения ленты на барабан. Погрешности шкалы ленты термографа обуславливаются неточностью ее нанесения, а также изменением размеров ленты в зависимости от влажности воздуха. Максимальная погрешность определяется техническими условиями на ленты и стандартом на бумагу и равна  $0,2^\circ$  на  $10^\circ$  шкалы.

Погрешности от неправильного наложения ленты на барабан будут меняться с каждой новой лентой и зависят от правильности среза ленты и аккуратности наблюдателя.

Погрешности регистрации температуры во времени. Погрешность регистрации температуры во времени (помимо погрешности хода часов) возникает в том случае, если при перемещении стрелки вдоль неподвижного барабана перо перемещается не концентрично часовой дуге ленты. Причины этого следующие: 1) длина стрелки не соответствует радиусу часовых дуг, нанесенных на ленте; 2) середина шкалы ленты расположена не на одной высоте с осью стрелки. Величина погрешности меняется по шкале.

Максимальная погрешность при регистрации температуры в диапазоне  $10^\circ$  (рассчитанная на основании допусков) равна  $\pm 1,5$  мин. для суточного и  $\pm 9$  мин. для недельного термографа.

Максимальная ошибка на ход часов составляет  $\pm 5$  мин. за сутки для суточного и  $\pm 30$  мин. за 7 суток для недельного термографа.

**Погрешности трения.** Трение в передаточном механизме термографа складывается из трения в шарнирах и оси, величина которого обуславливается весом деталей, и из трения пера о бумагу, величина которого зависит от степени прижатия пера к бумаге. Влияние сил трения на показания термографа выражается в том, что при монотонном изменении температуры наблюдается отставание в перемещении пера. При перемене направления движения силы трения меняют знак, в результате чего будет иметь место мертвый ход, который может дать значительную погрешность в отсчете. Кроме того, вследствие наличия трения люфты в соединениях могут выбираться не полностью, что приводит к увеличению мертвого хода и, следовательно, к увеличению погрешности в отсчете.

Расчет сил трения в механизмах, работающих при малых скоростях перемещения и переменном режиме движения, может быть сделан только приближенно, вследствие непостоянства при этих условиях коэффициентов трения. Ввиду этого погрешности трения определялись экспериментально. При экспериментах сравнивались записи термографа при одной и той же температуре среды в случаях изменения показаний

термографа один раз в сторону повышения, а второй — в сторону понижения температуры.

Трение пера о ленту в значительной степени зависит от того, насколько сильно прижато перо. Перед экспериментами нажим пера регулировался (согласно „Наставлению гидростанциям и постам“) так, чтобы при наклоне прибора на угол  $30\text{--}40^\circ$  перо отходило от барабана.

Эксперимент, поставленный для определения погрешности трения, сводился к следующему. В воздушном термостате, оборудованном электрическим подогревом и вентилятором для перемешивания воздуха, устанавливалась постоянная температура на  $2\text{--}3^\circ$  выше комнатной. Термограф с суточным часовым механизмом, предварительно выдержанный в комнатной температуре, устанавливался в термостате и выдерживался там в течение  $20\text{--}25$  мин. После этого термограф вынимался и приемник его нагревался в воздушной среде так, чтобы перо записывало температуру на  $6\text{--}8^\circ$  выше температуры, установленной в термостате. Потом термограф снова ставился в термостат и выдерживался там в течение  $20\text{--}25$  мин. Погрешность в регистрации температуры термографа, обусловленная трением, определялась как разность его показаний в первом и во втором случаях при одной и той же температуре. Ввиду того что температура в термостате при первой и второй записи могла быть несколько отличной (на  $0,1\text{--}0,2^\circ$ ), то сравнивались не сами записи, а поправки к записям термографа по отношению к психрометрическому термометру.

Температура в термостате измерялась посредством психрометрического термометра и в то время, когда в термостате находился термограф, поддерживалась постоянной с точностью до  $0,05^\circ$ . Одновременно с помощью термобатареи контролировалось постоянство температуры в термостате. Воздух в термостате непрерывно перемешивался вентилятором.

Влияние сил трения на показания термографа может быть не одинаковым в различных участках шкалы, так как при перемещении передаточного механизма происходят некоторые изменения величин давлений в элементах кинематических пар. Кроме того, при изменении положения механизмов изменяется величина момента, выбирающего люфты, а также из-за наклона оси и нажим пера может оказаться непостоянным. Вследствие этого определение погрешностей трения производилось при трех различных положениях передаточного механизма. При помощи регулировочного винта стрелка термографа устанавливалась так, чтобы показания ее в термостате соответствовали примерно  $+5^\circ$  по ленте (что соответствует положению стрелки на середине шкалы). После этого стрелка переводилась на  $25^\circ$  вверх и вниз по ленте, т. е. показания термографа в термостате соответствовали  $+30$  и  $-20^\circ$  по ленте. При каждом из трех положений передаточного механизма разность в показаниях термографа при понижении и повышении температуры определялась по пять раз.

Температура в термостате всегда устанавливалась на  $2\text{--}3^\circ$  выше комнатной, так как только при небольшой разности температур в термостате и в комнате удавалось удерживать температуру в термостате постоянной с требуемой точностью ( $\pm 0,05^\circ$ ).

Для выявления влияния трения на точность показаний испытывались по изложенному выше методу 10 термографов и для каждого из них было произведено по пять наблюдений для каждого из трех положений передаточного механизма.

В табл. 5 приведены средние значения погрешностей в показаниях термографов, полученных при повышении и понижении температуры для трех различных положений передаточного механизма.

Погрешности в показаниях термографа, приведенные в табл. 5, могут быть целиком отнесены за счет влияния трения, так как при проведении эксперимента термограф работал в диапазоне температур, не превышающих  $10^\circ$ , и, следовательно, ошибки от гистерезиса не превышали  $0,02\text{--}0,03^\circ$ . С другой стороны, время выдержки в термостате  $20\text{--}25$  мин. являлось достаточным для исключения инерционных ошибок с точностью до  $0,01^\circ$ .

Как видно из табл. 5, средние значения погрешностей трения одинаковы при различных положениях передаточного механизма термографа.

Таблица 5  
Средние значения погрешностей трения (в градусах) при трех положениях передаточного механизма термографа

№ приборов	Значения погрешностей при установке пера на		
	-20°	+5°	+30°
3459	0,2	0,2	0,2
2465	0,3	0,2	0,2
204946	0,3	0,2	0,3
34717	0,3	0,3	0,4
800	0,5	0,4	0,3
809	0,3	0,4	0,2
126927	0,2	0,2	0,2
681	0,2	0,3	0,3
372568	0,3	0,3	0,2
372584	0,3	0,3	0,2
Среднее	0,3	0,3	0,3

Средняя квадратичная погрешность трения  $\sigma$ , вычисленная для всего ряда измерений, равна  $0,3^\circ$ . Так как появление погрешности, превышающей  $3\sigma$ , мало вероятно, то можно принять, что максимальная погрешность в показаниях термографа, обусловленная трением, равна  $0,9^\circ$ . (В полученном нами ряде значения отдельных погрешностей не превышают  $2\sigma$ .)

### Инерционные погрешности термографа

Термическая инерция термографа и психрометрического термометра различна, вследствие этого в условиях непрерывно меняющейся температуры воздуха их одновременные показания будут различаться между собой. При метеорологических наблюдениях за температуру воздуха в данный момент принимают показания психрометрического термометра, поэтому разность между показаниями термографа и психрометрического термометра, обусловленная различием их инерции, представляет собой инерционные погрешности термографа. Для того чтобы иметь возможность оценить эти погрешности термографа, было проведено экспериментальное исследование термической инерции термографа и психрометрического термометра.

**Экспериментальное исследование инерции термографа и психрометрического термометра.** При исследовании термической инерции обычно исходят из закона Ньютона и считают, что скорость изменения температуры термометра пропорциональна разности температур термометра и среды, т. е.

$$d\theta = -\frac{1}{k}(\theta - T) dt, \quad (34)$$

где  $T$  — температура среды;  $\theta$  — средняя температура термометра в момент  $t$ ;  $t$  — время;  $k$  — коэффициент, характеризующий инерцию термометра.

Решение уравнения (34) для случая  $T = \text{const}$  дает соотношение:

$$\ln(\theta - T) = -\frac{1}{k}(t - t_0) + \ln(\theta_0 - T), \quad (35)$$

где  $\theta_0$  — температура термометра в начальный момент времени  $t_0$ .

Решение уравнения (34) для случая линейного изменения температуры среды дает соотношение:

$$\theta - T = -\beta k + (\theta_0 - T_0 + \beta k) e^{-\frac{1}{k}(t-t_0)},$$

где  $\beta$  — постоянная, характеризующая скорость изменения температуры среды.

Для  $t - t_0$  достаточно большого по сравнению с  $k$  получим:

$$\theta - T = -\beta k. \quad (36)$$

На основании соотношений (35) и (36) экспериментально были определены коэффициенты инерции термографа в спокойном воздухе и при различных скоростях вентиляции приемников двумя методами: в условиях постоянной температуры среды и в условиях среды, температура которой менялась линейно. Кроме того, исследовалось влияние направления вентилирующего воздушного потока на инерцию термографа. Для выявления влияния корпуса прибора исследовалась инерция приемника, отделенного от корпуса. Так же были определены коэффициенты инерции психрометрического термометра.

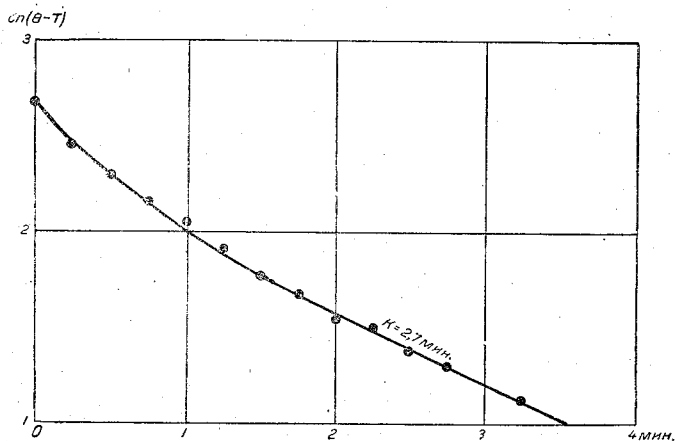


Рис. 10. Кривая охлаждения термографа № 681 при скорости воздушного потока 1 м/сек.  $K = 2,7$  мин.

Исследование инерции термографов в воздушной среде с постоянной температурой. Инерция двух термографов исследовалась в воздушном потоке аэродинамической трубы. Скорость потока измерялась пито-статической трубкой с микроанометром. Температура воздушного потока измерялась ртутным термометром.

Для определения коэффициента инерции термограф нагревался в воздушной камере до температуры, примерно на  $15^\circ$  превышающей температуру воздушного потока, и затем быстро устанавливался в воздушном потоке, где выдерживался в течение 8—9 мин. Термограф устанавливался в трубе поперек потока, так что воздушный поток был параллелен поверхности приемника.

С записи, полученной на ленте термографа, при охлаждении его в воздушном потоке снимались значения температуры и по полученным данным строилась кривая охлаждения термографа. По оси абсцисс откладывалось время в минутах, а по оси ординат — натуральные логарифмы разностей между показаниями термографа и температурой воздушного потока, которая во время охлаждения термографа в потоке держалась постоянной с точностью до  $0,1^\circ$ .

Рисунок 10 представляет собой кривую охлаждения термографа № 681, полученную при скорости потока 1 м/сек. Как видно из рисунка, график вначале представляет собой кривую линию, впоследствии переходящую в прямую. Коэффи-



коэффициент инерции определялся по прямолинейному участку кривой и принимался равным тангенсу угла наклона прямолинейного участка.

Тем же методом были получены кривые охлаждения термографов № 372584 и № 681 при скоростях потока 0,5, 1, 2 и 3 м/сек. Кривые охлаждения термографа № 681 приведены на рис. 11.

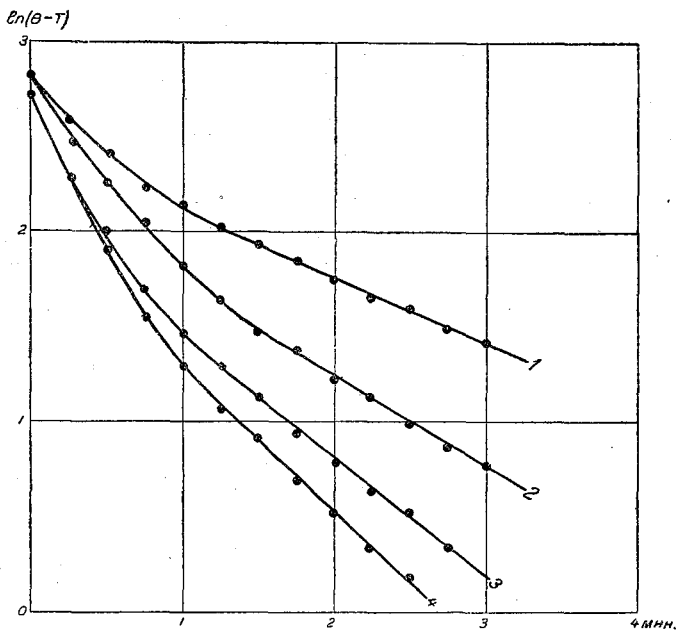


Рис. 11. Кривые охлаждения термографа № 372584 при различных скоростях воздушного потока.

1 —  $K = 2,9$  мин.,  $V = 0,5$  м/сек.; 2 —  $K = 2,1$  мин.,  $V = 1$  м/сек.;  
3 —  $K = 1,6$  мин.,  $V = 2$  м/сек.; 4 —  $K = 1,3$  мин.,  $V = 3$  м/сек.

Для тех же термографов определялись коэффициенты инерции в спокойном воздухе.

Значения коэффициентов инерции термографов № 372584 и № 681, полученные в условиях спокойного воздуха и при различных скоростях воздушного потока,

Таблица 6

Значения коэффициентов инерции при различных скоростях потока  $v$ , направленного параллельно поверхности приемника

№ приборов	Значения коэффициентов инерции при $v$				
	0	0,5	1	2	3
372584	8,8	2,9	2,1	1,6	1,3
681	9,0	3,7	2,7	1,7	1,4

приведены в табл. 6. Значения коэффициентов инерции выражены в минутах, а скорости воздушного потока в м/сек.

Результаты экспериментов показывают, что зависимость коэффициентов инерции биметаллических термографов от скорости воздушного потока в интервале скоростей 0,5—3 м/сек. может быть выражена формулой

$$k = k_1 \sqrt{\frac{v_1}{v}},$$

полученной экспериментально для аэрологических термографов.

Средние для данного типа прибора характеристики термической инерции были получены на основании исследования 10 термографов. Для каждого из них были определены коэффициенты инерции при охлаждении их в спокойном воздухе и в воздушном потоке при скорости 1 м/сек. Воздушный поток создавался вентилятором и направлялся параллельно поверхности приемника. Скорость потока измерялась с помощью ручного анемометра. Полученные значения коэффициентов инерции приведены в табл. 7.

Таблица 7  
Значения коэффициентов инерции (в мин.), полученные  
в условиях спокойного  
воздуха и в воздушном потоке, созданном вентилятором

№ п/п	№ приборов	Значения коэффициентов инерции при $v$	
		0	1
1	800	9,8	2,7
2	809	10,5	2,7
3	681	9,0	2,8
4	204946	10,1	2,5
5	34617	11,3	3,0
6	126927	8,5	2,7
7	2465	10,2	2,9
8	3459	10,3	2,7
9	372568	10,1	3,0
10	372584	8,8	2,6
	Среднее	9,9	2,8

Для оценки неоднородности термографов в отношении термической инерции были вычислены средние квадратичные отклонения. Таким образом, в результате испытаний получены следующие средние значения коэффициентов инерции: в спокойном воздухе  $k = 9,9$  мин.  $\pm 0,8$  мин.; в потоке воздуха при скорости потока 1 м/сек.  $k = 2,8$  мин.  $\pm 0,2$  мин.

Сравнивая значения коэффициентов инерции термографов № 372584 и № 681, полученные при охлаждении термографов в потоке при скорости 1 м/сек. в аэродинамической трубе и в потоке, полученном посредством вентилятора (табл. 6 и 7), видим, что эти коэффициенты имеют большее значение в том случае, когда воздушный поток получен посредством вентилятора (для термографа № 372584—2,1 и 2,6 мин. и для термографа № 681—2,7 и 2,8 мин.). Это расхождение можно объяснить тем, что в аэродинамической трубе мы имеем направленный поток, параллельный поверхности термопластины, в то время как поток, создаваемый вентилятором, рассеивается и встречается с термопластиной под некоторым углом.

Исследование влияния направления воздушного потока на инерцию термографа. Для выявления влияния направления воздушного потока на инерцию термографа определились величины коэффициентов инерции при различной ориентировке термографов в воздушном потоке. Как и следовало ожидать, при данной скорости потока коэффициент инерции оказывается наименьшим

в том случае, когда термограф ориентирован поперек потока (поток параллелен поверхности термопластины).

В табл. 8 приведены результаты, полученные при определении коэффициентов инерции термографов № 372584 и № 681 при скоростях потока 1, 2 и 3 м/сек. для случаев, когда поток направлен поперек и вдоль термографа.

Таблица 8

Значения коэффициентов инерции (в мин.) при потоке, направленном поперек и вдоль термографа

Скорость, потока, м/сек.	№ 372584		№ 681	
	поперек термографа	вдоль термографа	поперек термографа	вдоль термографа
1	2,1	3,2	2,7	3,4
2	1,6	2,2	1,7	2,2
3	1,3	1,6	1,4	1,7

Исследование влияния корпуса термографа на его инерцию. Для выявления влияния корпуса термографа на его инерцию были определены для трех приборов коэффициенты инерции приемников, отделенных от корпуса. Это определение производилось с помощью установки, служившей для исследования гистерезиса. Воздушный поток создавался вентилятором и направлялся параллельно поверхности термопластины. Скорость потока измерялась ручным анемометром. Коэффициенты инерции приемников определялись при обдувании их воздушным потоком при скорости 1 м/сек.

Для предварительного нагревания приемник помещался в воздушную камеру с электрическим подогревом. После того как температура приемника становилась на 15—20° выше температуры потока воздуха, камера убиралась и по положению изображения нити лампочки на шкале наблюдалось изменение температуры приемника.

Значения коэффициентов инерции отдельно для приемников и для приборов в целом, полученные при скорости потока 1 м/сек., приведены в табл. 9.

Таблица 9

Значения коэффициентов инерции (в мин.) приемников и приборов в целом при скорости потока 1 м/сек.

№ приборов	Значение коэффициента инерции		$\frac{k_1 - k}{k}$ 0/0
	отдельно приемник $k$	прибор в целом $k_1$	
681	2,2	2,8	27
126927	2,2	2,7	23
34617	2,3	3,0	30

Приведенные в табл. 9 значения показывают, что коэффициент инерции прибора в целом больше коэффициента инерции одного приемника на 23—30%.

Определение коэффициентов инерции термографов в среде, температура которой изменяется по линейному закону. В случае,

если термометр находится в среде, температура которой изменяется линейно; показания термометра будут отставать от температуры среды.

Из соотношения (36) имеем:

$$k = \frac{T - \theta}{\beta}.$$

Эта зависимость и была использована для определения коэффициентов инерции термографов с помощью воздушного термостата, оборудованного электрическим нагревателем и вентилятором для перемешивания воздуха. Скорость вращения вентилятора регулировалась так, чтобы при установке термографа в термостат скорость воздушного потока у приемника термографа, была бы около 1 м/сек. Температура в термостате измерялась с помощью предварительно отградуированной термобатарей, которая была подобрана так, чтобы одно деление гальванометра соответствовало 0,2°. Такая чувствительность обеспечивала отсчет температуры в термостате с точностью до 0,05°.

„Холодный“ спай выводился из термостата и вместе с ртутным термометром помещался в сосуд с термоизоляцией. Коэффициент инерции термобатарей в спокойном воздухе равен 9 сек., а в потоке воздуха, при скорости потока 1 м/сек. — 5 сек. Ввиду того что инерция термобатарей достаточно мала по сравнению с инерцией термографа, ею можно было пренебречь и показания термобатарей считать за истинную температуру воздуха в термостате,

Температура воздуха в термостате определялась по отсчетам гальванометра и температуре „холодного“ спая, отсчитываемой по ртутному термометру, которая была достаточно постоянной и менялась на 0,1—0,2° за час.

Для определения коэффициента инерции термограф устанавливался в термостат, спай термобатарей располагались вокруг приемника термографа и нагрев термостата регулировался так, чтобы температура равномерно повышалась. Технически наиболее удобным оказалось поддерживать скорость изменения температуры, равной 0,2° в минуту. Отсчеты показаний гальванометра производились через каждую минуту в течение 40—45 мин.

После этого нагрев термостата регулировался так, чтобы температура равномерно понижалась с той же скоростью и опять через каждую минуту (в течение 40—45 мин.) отсчитывались показания гальванометра.

Запись показаний термографа при повышении и понижении температуры производилась на одной и той же ленте.

По окончании эксперимента на записи на ленте снимались показания термографа (также через одну минуту) и вычислялись разности между температурой воздуха в термостате и показаниями термографа в один и тот же момент времени. Из полученных разностей вычислялось среднее значение.

Коэффициент инерции термографа определялся как частное от деления среднего значения разности между температурой воздуха в термостате и показаниями термографа на скорость изменения температуры.

В целях исключения систематических погрешностей, происходящих от неточностей градуировки термобатарей, отсчеты при повышении и понижении температуры велись в одном и том же диапазоне температур, и количество отсчетов было одинаковым.

Для исключения систематических погрешностей, происходящих от неточностей установки пера на ленте, несовпадения геометрической оси и оси вращения барабана часового механизма и шкаловых погрешностей, записи на ленте, соответствующие повышению и понижению температуры, обрабатывались на одних и тех же делениях ленты (по времени).

Определение коэффициентов инерции по описанному выше методу было произведено для десяти термографов. Для каждого было сделано по два определения при скорости изменения температуры в термостате 0,2° в минуту. Кроме того, для двух термографов были определены коэффициенты инерции при скорости изменения температуры 0,4° в минуту.

Эксперименты показали, что отставание показаний термографа пропорционально скорости изменения температуры среды и что значения коэффициентов инерции получаются одинаковыми, независимо от того, при какой скорости изменения температуры среды они определялись.

В табл. 10 приведены значения (средние из двух определений) коэффициентов инерции термографов, полученные в воздушной среде, температура которой изменялась линейно.

Таблица 10

Значения коэффициентов инерции при скорости вентиляции  
1 м/сек., полученные  
в среде с линейно меняющейся температурой

№ прибора	Коэффициенты инерции, в мин.	№ прибора	Коэффициенты инерции, в мин.
800	3,4	126927	2,8
809	3,0	2465	3,4
681	3,5	3459	3,3
204946	3,0	372568	3,1
34617	3,2	372584	3,2

Среднее значение коэффициента инерции, вычисленное из данных табл. 10, равно 3,2 мин. при среднем квадратичном отклонении  $\pm 0,2$  мин. Сравнивая между собой величины коэффициентов инерции, полученные разными методами при скорости вентилирующего потока 1 м/сек. (табл. 8 и 10), видим, что значения, полученные в среде с линейно меняющейся температурой (табл. 10), совпадают со значениями, полученными при охлаждении термографов в потоке аэродинамической трубы, направленной вдоль прибора со стороны приемника (табл. 8). Из способов вентиляции приемников термографов, применявшихся при экспериментах, наиболее близко к условиям вентиляции в будке подходят условия в термостате. Поэтому значения коэффициентов инерции, приведенные в табл. 10, наиболее близко характеризуют инерцию термографа (при скорости вентиляции 1 м/сек.) в условиях его работы на метстанции.

Определение коэффициентов инерции психрометрического термометра. Коэффициенты инерции стандартного психрометрического термометра определялись при охлаждении его в спокойном воздухе и в воздушном потоке при скорости его 1 м/сек. Кривые охлаждения психрометрического термометра приведены на рис. 12.

Получены следующие значения: в спокойном воздухе коэффициент инерции термометра равен 3,6 мин., а при скорости воздушного потока 1 м/сек. — 1,5 мин.

**Инерционные погрешности термографа.** Значение инерционных погрешностей меняется в зависимости от характера изменения температуры воздуха и скорости воздушного потока, обтекающего приемники термографа и термометра. Температура воздуха, а также и вентиляция в будках при измерении температуры на метстанции подвержены беспорядочным пульсациям вследствие турбулентного состояния атмосферы, поэтому подсчет инерционных погрешностей в реальных условиях работы термографа представляет значительные трудности. Чтобы иметь возможность оценить инерционные погрешности термографа, приводим данные, характеризующие расхождения между показаниями термографа и психрометрического термометра, вычисленные для случаев линейного изменения температуры воздуха. При вычислениях использовалось соотношение (36) и значения коэффициентов инерции термографа и термометра, полученные экспериментально в спокойном воздухе и в воздушном потоке, при скорости его 1 м/сек. При расчетах были приняты следующие значения коэффициентов инерции: 10 и 3 мин. — для термографа и 3,5 и 1,5 мин. — для психрометрического термометра.

В табл. 11 и 12 приведены значения отставаний показаний термографа и психрометрического термометра от температуры воздуха для случаев линейного изменения температуры в спокойном воздухе и при скорости вентиляции 1 м/сек.

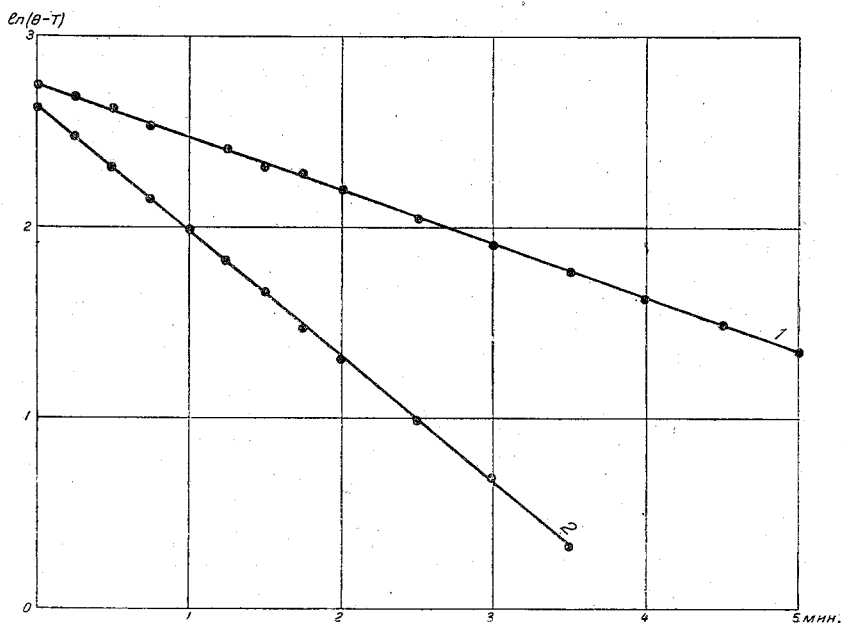


Рис. 12. Кривая охлаждения психрометрического термометра № 93 в спокойном воздухе и при скорости воздушного потока 1 м/сек.  
1 —  $K = 3,6$  мин.,  $V = 0$ ; 2 —  $K = 1,5$  мин.,  $V = 1$  м/сек.

Из данных табл. 11 и 12 видно, что при значительной скорости изменения температуры и слабой вентиляции разность показаний термографа и психрометрического термометра может выражаться целыми градусами. При увеличении скорости обдувающего потока инерция термометров уменьшается, а следовательно,

Таблица 11

Значения отставаний показаний термографа и психрометрического термометра (в град.) в спокойном воздухе при линейном изменении температуры

Скорость изменения температуры, град/мин.	Термограф	Психрометрический термометр
0,01	0,1	0,04
0,05	0,5	0,2
0,1	1,0	0,4
0,5	5,0	1,8

Таблица 12

Значения отставаний показаний термографа и психрометрического термометра (в град.) при скорости вентиляции 1 м/сек. при линейном изменении температуры

Скорость измерения температуры, град/мин.	Термограф	Психрометрический термометр
0,01	0,03	0,02
0,05	0,2	0,1
0,1	0,3	0,2
0,5	1,5	0,8
1	3,0	1,5

уменьшается и отставание их показаний от температуры воздуха и разности между показаниями термографа и психрометрического термометра.

Для оценки погрешностей показаний термографа при колебаниях температуры воздуха, рассмотрим изменения показаний термографа и психрометрического термо-

метра в среде, температура которой меняется по закону простого гармонического колебания, т. е. температура среды:

$$T = T_{cp} + A \cos \frac{2\pi t}{\tau},$$

где  $T_{cp}$  — средняя температура среды;  $\tau$  — период полного колебания;  $A$  — амплитуда колебания разности  $T - T_{cp}$ .

Для этого случая решение уравнения (34) дает соотношение:

$$\theta - T_{cp} = A \cos \varphi \cdot \cos \left( \frac{2\pi t}{\tau} - \varphi \right), \quad (37)$$

где

$$\cos \varphi = \frac{\tau}{k \sqrt{\frac{\tau^2}{k^2} + 4\pi^2}}.$$

В табл. 13 приведены значения, характеризующие чувствительность термографа и психрометрического термометра к гармоническим колебаниям температуры различных периодов, а именно: отношение амплитуды колебаний термографа и термометра к амплитуде колебаний температуры воздуха  $\frac{A_1}{A}$  и сдвиг колебаний по фазе  $\varphi$  в спокойном воздухе и при скорости вентиляции 1 м/сек.

Таблица 13

Отношение амплитуды колебаний показаний термографа и психрометрического термометра к амплитуде колебаний температуры воздуха и сдвиг колебаний по фазе

Период колебания, $\tau$	Скорость вентиляции $v$ , м/сек.	$\frac{A_1}{A}$		$\varphi$ , град.	
		термограф	психрометрический термометр	термограф	психрометрический термометр
$\tau = 10$ сек.	0	0,003	0,008	89,9	89,6
	1	0,009	0,018	89,5	89,0
$\tau = 1$ мин.	0	0,016	0,045	89,1	87,4
	1	0,059	0,106	86,6	83,9
$\tau = 5$ мин.	0	0,079	0,222	85,3	77,2
	1	0,256	0,470	75,2	62,0
$\tau = 10$ мин.	0	0,157	0,413	81,0	55,6
	1	0,469	0,730	62,0	43,2

Из данных табл. 13 видно, что и термограф и психрометрический термометр значительно сглаживают колебания температуры, причем чувствительность их к колебаниям температуры уменьшается с уменьшением периода колебаний. Так, при колебаниях температуры в спокойном воздухе с периодом в 10 сек. температура термографа колеблется с амплитудой приблизительно в 330 раз, а температура психрометрического термометра — с амплитудой в 120 раз меньшей, чем температура воздуха, т. е. практически приборы не реагируют на эти колебания. Вследствие различия в инерции колебания показаний термографа и термометра различны по амплитуде и, кроме того, сдвинуты по фазе, что приводит к расхождению в их показаниях. Для большей наглядности, исходя из данных, приведенных в табл. 13, построен график (рис. 13), иллюстрирующий колебания показаний термографа и психрометрического термометра при скорости вентиляции 1 м/сек. и при колебаниях температуры воздуха с периодом в 10 мин. На графике по оси абсцисс отложено время в минутах, а по оси ординат — отклонения температуры воздуха и показаний термографа и термометра от среднего значения. Сплошной

линией нанесены показания психрометрического термометра, прерывистой — показания термографа и пунктиром — температура воздуха.

Если амплитуда колебания температуры воздуха при  $\tau = 10$  мин. равна  $1^\circ$ , то максимальное расхождение между показаниями термографа и термометра при скорости вентиляции 1 м/сек. составляет  $\pm 0,3^\circ$ . С увеличением амплитуды колебания температуры, расхождение между показаниями термографа и термометра увеличиваются пропорционально увеличению амплитуды.

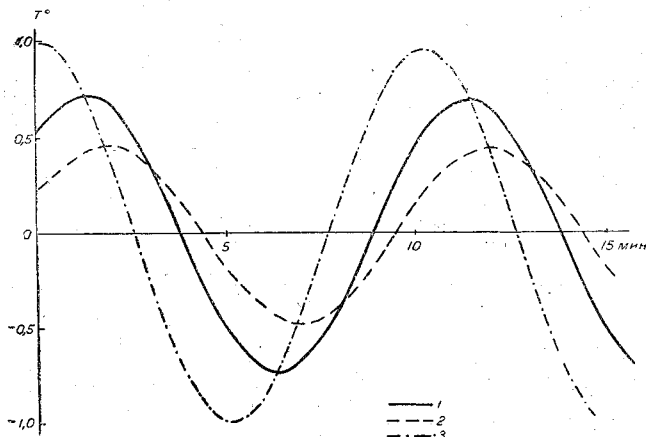


Рис. 13.

1 — показания психрометрического термометра; 2 — показания термографа; 3 — температура воздуха.

Рассматривая расхождение между показаниями термографа и психрометрического термометра, мы учитывали только различия в их инерции. В действительности при колебании температуры кривая записи показаний термографа будет еще более сглаженной вследствие погрешностей трения.

Для подсчета значений инерционных погрешностей в каждом данном случае надо знать значения скоростей вентиляции приемников термографа и психрометрического термометра и характер изменения температуры. Приведенные нами расчеты показывают, что в отдельных случаях при быстрых изменениях температуры и слабой вентиляции инерционные погрешности термографа могут достигать значений, больших одного градуса. В целях уменьшения инерционных погрешностей термографа целесообразно уменьшить его инерцию, приблизив ее к инерции психрометрического термометра.

Для подсчета значений инерционных погрешностей в каждом данном случае надо знать значения скоростей вентиляции приемников термографа и психрометрического термометра и характер

изменения температуры. Приведенные нами расчеты показывают, что в отдельных случаях при быстрых изменениях температуры и слабой вентиляции инерционные погрешности термографа могут достигать значений, больших одного градуса. В целях уменьшения инерционных погрешностей термографа целесообразно уменьшить его инерцию, приблизив ее к инерции психрометрического термометра.

### Погрешности обработки записей термографа и суммарная погрешность значений температуры воздуха по данным термографа

Исключение погрешностей термографа и приведение его показаний к показаниям психрометрического термометра по методу, принятому на метеорологической сети Гидрометслужбы, осуществляется введением поправок к записям термографа, определяемых по отношению к термометру, в сроки наблюдений (четыре раза в сутки).

За температуру воздуха в часы между сроками наблюдений принимают значения, снятые по записям термографа и исправленные соответствующими интерполированными поправками.

В действительности эти значения будут отличаться от истинной температуры воздуха (показаний психрометрического термометра) по следующим причинам: 1) поправки к записям термографа, определяемые в сроки наблюдений, имеют ряд погрешностей случайного характера; 2) изменение погрешностей термографа от срока к сроку не следует линейному закону, в то время как значения поправок принимаются меняющимися линейно; 3) значения температуры, полученные при обработке записей термографа, вследствие инструментальных погрешностей прибора и погрешностей обработки относятся не к тому моменту времени, которому они соответствуют в действительности.

**Погрешность поправок, определяемых в сроки наблюдений.** Разность между показаниями термографа и термометра в каждый данный момент обуславливается двумя видами погрешностей: 1) инструментальными погрешностями термографа, систематическими для данного экземпляра прибора, и 2) случайными погрешностями, зависящими от условий, при которых определялась поправка. В соответ-



твии с этим и поправка, определяемая в срок наблюдений, состоит из двух частей: первая часть поправки есть инструментальная поправка термографа в данной точке шкалы и при данном положении барабана, а вторая часть, по существу, является погрешностью определения инструментальной поправки.

Погрешность поправки термографа, полученной в срок наблюдения, складывается из следующих погрешностей: 1) погрешности трения, 2) инерционной погрешности, 3) погрешности, вызванной тем, что термограф и термометр измеряют температуру в разных точках пространства, 4) погрешности из-за неодновременности отсчета термометра и метки на записи термографа, 5) погрешности отсчета сихрометрического термометра, 6) погрешности отсчета показания термографа по ленте.

В условиях непрерывно меняющейся температуры воздуха все перечисленные погрешности имеют характер случайных. Величина и знак их зависят от условий, при которых определялась поправка. Знак инерционных погрешностей совпадает со знаком погрешностей трения, поэтому величина поправок определяемых в сроки наблюдений, зависит от того, повышалась или понижалась температура в момент определения поправки.

**Погрешности показаний термографа, не исключаются введением интерполированных поправок.** Как уже упоминалось, при обработке записей термографа отсчеты температуры, снятые по ленте, исправляются интерполированными значениями поправок, определенных в сроки наблюдений. Рассмотрим, в какой мере введение интерполированных поправок исключает погрешности в записях термографа. Для этого проанализируем законность линейной интерполяции поправок между сроками наблюдений.

При исследовании погрешностей термографа мы установили, что большинство инструментальных погрешностей меняется в зависимости от перемещения пера по шкале, т. е. в зависимости от изменения температуры. К такого рода инструментальным погрешностям относятся: погрешности передаточного механизма; погрешности вследствие гистерезиса; погрешности, обусловленные непостоянством коэффициента расширения инвара, погрешности шкалы ленты. При небольших изменениях температуры можно принять, что эти погрешности меняются по шкале линейно. Как изменение температуры от срока к сроку обычно не превышает  $10^\circ$ , то можно принять, что перечисленные погрешности меняются линейно с изменением температуры, а погрешность вследствие гистерезиса не принимать во внимание. Принять же их меняющимися линейно от срока к сроку можно лишь в том случае, если температура за данный промежуток времени изменялась монотонно. В случае немонотонного изменения температуры нет основания считать, что погрешности изменяются линейно во времени и, следовательно, они не исключаются интерполированными поправками или исключаются только частично.

К погрешностям, изменяющимся в зависимости от поворота барабана часового механизма, а следовательно, и от времени (независимо от хода температуры) относятся: погрешности, обусловленные несовпадением геометрической оси барабана осью вращения, а также погрешности из-за неправильного среза ленты или ее перекоса.

Изменение погрешности, обусловленной несовпадением геометрической оси барабана с осью вращения, определяется выражением (32) и, следовательно, не пропорционально обороту барабана. Но, ввиду того что изменение погрешности от срока к сроку не превосходит  $0,1^\circ$ , можно принять ее линейно меняющейся со временем. Максимальная погрешность, которая (при этом допущении) остается не исключенной введением интерполированной инструментальной поправки, равна  $0,03^\circ$ .

При неправильном срезе ленты (или ее перекосе) градусные деления ленты расположатся по винтовой линии и накопление связанных с этим погрешностей будет пропорционально повороту барабана и, следовательно, они исключаются введением интерполированных поправок.

Погрешность из-за неправильной установки стрелки по шкале будет постоянной для данной ленты и она также исключается введением поправок.

Таким образом, введение интерполированных поправок целиком исключает только следующие инструментальные погрешности: из-за неправильной установки пера по шкале, из-за неправильного среза ленты и вследствие несовпадения геометрической оси барабана с осью вращения.

Погрешности, обусловленные непостоянством коэффициента расширения инвара, и погрешности передаточного механизма термографа (суммарное значение которых не превышает  $0,5^\circ$  на  $10^\circ$  шкалы) введением интерполированных поправок исключаются только частично, вследствие нелинейного изменения погрешностей во времени.

Погрешности трения и инерционные погрешности являются случайными и поэтому не исключаются введением поправок.

Кроме того, при интерполировании поправок, определенных в сроки наблюдений, фактически линейно интерполируются и значение инструментальных поправок и их погрешности, и, следовательно, каждое значение интерполированной поправки содержит случайные погрешности. Случайные погрешности записи термографа будут суммироваться с погрешностями интерполированных поправок. Так как знаки их могут и совпадать и быть противоположными, то введение интерполированных поправок в одних случаях будет уменьшать случайные погрешности записей термографа, а в других — увеличивать их.

**Погрешности значений температуры по термографу, вызванные погрешностями в определении времени.** Погрешности, вызванные тем, что значения температуры относятся не к тому моменту времени, которому они действительно соответствуют, зависят от инструментальных погрешностей прибора и погрешностей обработки, а также и от изменчивости температуры.

Рассматривая инструментальные погрешности регистрации температуры во времени, мы установили, что для суточного термографа при изменении температуры в диапазоне  $10^\circ$  погрешности не превосходят 1,5 мин. Погрешности во времени, зависящие от точности обработки, связаны тем, что при неточном ходе часов расстояние между срочными метками разбивается на часовые промежутки на глаз, с учетом сетки, нанесенной на ленте. При достаточном навыке вряд ли возможна ошибка, превосходящая четверть деления, что составляет 4 мин. для суточного термографа. Таким образом, при изменении температуры в диапазоне  $10^\circ$  максимальная ошибка во времени равна 5,5 мин. Связанные с этим погрешности в значениях температуры зависят от того, насколько быстро изменяются за данный промежуток времени показания термографа. При мало меняющейся температуре погрешность ничтожна (меньше  $0,1^\circ$ ), при резком изменении температуры она может достигать нескольких десятых и даже целого градуса.

Для недельного термографа при изменении температуры в диапазоне  $10^\circ$  погрешности во времени могут достигать 9 мин.; в связи с этим увеличиваются и возможные значения погрешностей в данных о температуре воздуха.

**Суммарная погрешность измерения температуры воздуха термографом.** В результате анализа погрешностей измерения температуры воздуха термографом в условиях метстанции приходим к выводу, что суммарная погрешность измерения складывается из следующих погрешностей: 1) инструментальных (не исключенных введением поправок), 2) инерционных, 3) погрешностей инструментальных поправок, 4) погрешностей записи во времени и 5) погрешностей снятия значения температуры с ленты.

Перечисленные погрешности зависят от режима измеряемой температуры и поэтому оценить суммарную погрешность измерения температуры воздуха можно только при учете конкретных условий, при которых производилась регистрация температуры.

Найдем максимальную погрешность при измерении температуры воздуха в наиболее благоприятных условиях режима температуры: 1) изменение температуры от срока к сроку монотонно и, следовательно, инструментальные погрешности (кроме погрешностей трения) можно считать исключенными введением поправок; 2) изменение температуры настолько медленно, что можно пренебречь инерционными погреш-

ностями и погрешностями записи во времени (считаем, что они меньше  $0,1^\circ$ ). В этом случае максимальная погрешность измерения температуры воздуха складывается из следующих величин:

1) погрешности трения, максимальное значение которой, согласно экспериментальным данным, равно  $0,9^\circ$ ;

2) погрешности снятия температуры по записи на ленте, максимальное значение которой можно принять равным  $0,2^\circ$  (эту погрешность мы должны учитывать два раза, так как она входит при снятии определяемой температуры и при снятии температуры для определения инструментальной поправки в срок наблюдения);

3) погрешности отсчета психрометрического термометра, входящей в погрешность определения поправки, максимальное значение которой можно принять равным  $0,1^\circ$ .

Перечисленные погрешности являются случайными. Суммируя их, получим, что при выбранных нами условиях максимальная погрешность измерения температуры воздуха равна:

$$\sqrt{0,9^2 + 0,2^2 + 0,2^2 + 0,1^2} = 0,95^\circ.$$

Принимая среднюю погрешность равной трети максимальной, получим, что среднее значение погрешности при тех же условиях равно  $0,3^\circ$ .

Таким образом, даже при исключительно благоприятных условиях термограф не может обеспечить измерение температуры воздуха с точностью до  $0,1^\circ$ . В случаях же быстрого изменения и резкого колебания температуры погрешности могут достигать значительно больших величин.

Ввиду того что погрешности зависят от режима температуры воздуха, о максимально возможной величине их можно судить только на основании большого ряда наблюдений в различных условиях. Для оценки максимальной погрешности при измерении температуры воздуха посредством термографа были использованы данные об изменении поправок термографов от срока к сроку по девяти метеорологическим станциям Ленинградского, Московского и Куйбышевского УГМС для января, апреля и июля 1947 г.

Величину изменения поправки от срока к сроку можно рассматривать как погрешность показания термографа в момент наблюдений (с обратным знаком), которую мы получили бы, если бы исправили показание термографа поправкой, полученной в предыдущий срок наблюдения. Эта погрешность, в общем случае, должна быть больше погрешности любого из значений температуры, полученных между сроками наблюдений, поскольку составляющие ее погрешности, имеющие случайный характер, остаются теми же, а систематические инструментальные погрешности (точнее, их изменение от срока к сроку) остаются не исключенными. Поэтому можно считать, что максимальная погрешность измерения температуры воздуха термографом не превосходит максимального изменения поправки от срока к сроку.

В табл. 14 даны повторяемости величин изменения поправок от срока к сроку в процентах (из 3170 случаев) от общего числа наблюдений, так как никакой закономерности в изменениях поправок в зависимости от времени года установить не удалось.

Таблица 14

Повторяемость величин изменения поправок от срока к сроку (в процентах)

Изменение поправок, град.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6--2,0
Повторяемость, %	11,2	20,0	18,9	14,6	11,8	8,4	5,5	3,6	1,8	1,5	1,0	0,6	0,5	0,2	0,1	0,1	0,2

Из данных табл. 14 видно, что изменение поправок на  $0,5^\circ$  и меньше составляет  $84,9\%$ , а на  $1,0^\circ$  и меньше  $98,3\%$  от числа всех случаев. Таким образом,

изменение поправок на величину большую  $1,0^\circ$  составляет всего  $1,7\%$ , откуда можно сделать вывод, что и погрешности значений температуры воздуха, полученные по обработанным записям термографа, превышают  $1,0^\circ$  лишь в отдельных случаях.

Следовательно, максимальная погрешность измерения температуры воздуха может быть принята равной  $1^\circ$ .

Для подтверждения выводов, полученных при исследовании погрешностей термографа, были обработаны наблюдения над температурой воздуха на метстанции Ленинград-город за январь, июнь и июль 1948 г. При определении погрешностей были использованы наблюдения по психрометрическому термометру в дополнительные сроки, а именно: в 2, 5, 8, 11, 15—30, 17, 20 и 23 часа.

Для сравнения погрешностей в зимних и летних условиях были обработаны данные января и июня. Июль был взят потому, что с 1 июля на станции был установлен новый термограф и это дало возможность сравнить погрешности двух разных приборов в приблизительно одинаковых условиях (в июне и июле).

Записи термографа обрабатывались принятым на метстанции методом и значения температуры, полученные при обработке, сравнивались с показаниями психрометрического термометра, которые принимались за истинную температуру воздуха.

В табл. 15 приведены повторяемости (в процентах) погрешностей в значениях температуры воздуха по данным термографа, полученных при обработке наблюдений на метстанции Ленинград-город за январь, июнь и июль.

Таблица 15

Повторяемость погрешностей в значениях температуры воздуха по данным термографа (в процентах)

Месяцы	Значения погрешностей, град.																		Всего случаев	
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7		1,8
I	25,5	34,7	16,3	10,5	3,8	3,8	2,9	0,4	1,3	—	0,8	—	—	—	—	—	—	—	—	239
VI	12,6	25,3	18,3	12,6	9,1	9,1	3,9	2,2	2,6	1,8	1,3	—	0,4	—	0,4	—	—	—	0,4	230
VII	13,8	25,2	18,3	14,3	7,7	8,1	5,3	3,3	1,6	0,4	0,8	0,4	0,4	—	0,4	—	—	—	—	246

Как видно из этой таблицы, в летние месяцы количество больших погрешностей несколько увеличивается, что может быть отнесено за счет увеличения суточной амплитуды температуры и более резко выраженных микроколебаний. В январе погрешности, не превышающие по величине  $0,5^\circ$ , составляют  $94,6\%$ , а погрешностей, превышающих  $1,0^\circ$ , вовсе нет. В июне и июле погрешности, не превышающие  $0,5^\circ$ , составляют  $87\%$  ( $87,0\%$  в июне и  $87,4\%$  в июле), а погрешности, превышающие  $1,0^\circ$ , составляют только  $1,2\%$ .

Из той же таблицы видно, что смена термографа (с 1 июля) никак не отразилась на характере распределения погрешностей.

Для распределения погрешностей, приведенного в табл. 15, среднее квадратичное значение равно  $\pm 0,3^\circ$  для января и  $\pm 0,4^\circ$  для июня и июля.

Таким образом, для условий Ленинграда средняя квадратичная погрешность значений температуры для января совпадает со средним значением погрешности, полученной расчетным путем для наиболее благоприятных условий режима температуры, а средняя квадратичная погрешность для летних месяцев превышает ее лишь на  $0,1^\circ$ . Незначительное увеличение погрешности в летние месяцы указывает на то, что случайные погрешности, связанные с неравномерным ходом температуры и резкими ее изменениями в летних условиях, в значительной степени компенсируют друг друга. В климате с более резкими сменами температуры возможно увеличение

значений погрешностей. Однако, учитывая незначительное увеличение погрешностей при переходе от зимних к летним условиям в Ленинграде, вряд ли можно ожидать их значительного увеличения и в других климатических условиях.

Данные, полученные при обработке наблюдений над температурой воздуха на метеостанции Ленинград-город, подтверждают, что максимальная погрешность измерения температуры воздуха термографом может быть принята равной  $1^{\circ}$ .

Исследование погрешностей измерения температуры воздуха биметаллическим термографом показало, что погрешности значительно превосходят  $0,1^{\circ}$ , поэтому нет смысла обрабатывать записи термографа с точностью до  $0,1^{\circ}$ , как это принято в настоящее время. Погрешности, превышающие  $0,5^{\circ}$ , составляют небольшой процент, ввиду чего целесообразно обрабатывать записи термографа с точностью  $0,5^{\circ}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Е. Миллер. Термобиметаллы. Ж. „Цветные металлы“ № 2, 1944.
2. Н. Г. Бруевич. Точность механизмов. М.—Л. Гостехиздат, 1946.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ ВЫТЯЖНЫМИ ТЕРМОМЕТРАМИ

На гидрометсети единственным пока методом измерения температуры почвы на глубине в течение круглого года является метод вытяжных термометров.

Электрические методы измерения температуры почвы не нашли еще на гидрометсети применения. Между тем, существующая конструкция вытяжных термометров стандартного типа с латунной оправой, в которую заделан ртутный глубинный термометр, не рассчитана для измерения температуры почвы на малых глубинах. В руководствах метстанциям, впервые (изд. 1887 и 1889 гг.) описывающих вытяжные термометры, и в указаниях по их применению было сказано, что они предназначаются для измерения температуры почвы с глубины 0,4 м.

Позднее для измерения температуры почвы на малых глубинах были предложены коленчатые термометры Савинова и термометры Шукевича. Однако невозможность пользования термометрами Савинова в зимнее время при наличии снежного покрова и отсутствие других простых способов измерения температуры почвы на малой глубине привели к применению вытяжных термометров стандартного типа для измерения температуры почвы на малых глубинах (0,1 и 0,2 м).

Погрешность в оценке температуры почвы на малой глубине при использовании для этой цели вытяжных термометров с латунной оправой не раз определялась из сравнительных наблюдений над температурой почвы по вытяжным термометрам и термометрам Савинова. Впервые эти погрешности были определены С. И. Савиновым в Павловской обсерватории в 1901—1906 гг., но результаты исследования не были опубликованы. В 1931/32 г. Геймтор из сравнительных наблюдений над температурой почвы на агрометстанции Кеши по вытяжным термометрам, термометрам Савинова и немецким термометрам Фусса получил характеристику погрешностей вытяжных термометров и показал на материале наблюдений возможность и рациональность замены латунной оправы оправой из плохо проводящего тепло материала.

В Главной геофизической обсерватории проведено исследование точности метода измерения температуры почвы вытяжными термометрами путем сравнительных наблюдений над температурой почвы по вытяжным и термоэлектрическим термометрам. Для этой цели были изготовлены почвенные термоэлектрические термометры (термопара константан—медь) и вытяжные термометры в эбонитовых трубах. Спаи термоэлектрических термометров, предназначенные для установки в почву, были герметически заделаны в отверстиях, просверленных в латунной пластинке размером  $20 \times 10 \times 4$  мм<sup>3</sup>, и электрически изолированы от нее бакелитовым лаком. Вторые, „холодные“, спаи каждых трех термоэлектрических термометров были укреплены на резервуаре термометра от психрометра Ассмана большой модели и помещены в „термостат“, представляющий собой металлический цилиндр, заполненный теплоизолирующим материалом (стеклянной ватой). Распределительная коробка с тремя парами гнезд от трех термометров укреплена на „термостате“.

Всего было изготовлено 9 термоэлектрических термометров, смонтированных в три установки по три термометра в каждой. Они были проградуированы со средочным гальванометром при трех температурах:  $+20^{\circ}$ ,  $0^{\circ}$  и  $-20^{\circ}$ , что дало возможность при обработке результатов наблюдений учитывать температуру „холодного“ спая. Цена деления гальванометра оказалась близкой к  $0,4^{\circ}$  (от  $0,35$  до  $0,38^{\circ}$ ). Малый разброс точек на градуировочных кривых, возможность вводить поправку на температуру „холодного“ спая и надежность отсчета с точностью до  $0,1^{\circ}$  по гальванометру позволяют считать точность измерения температуры почвы термоэлектрическим термометром в  $\pm 0,2^{\circ}$ .

Вытяжные термометры были взяты стандартного типа (с латунной оправой) и видоизмененные, у которых латунная оправка была заменена пластмассовой (гегинаксовой), с небольшим металлическим наконечником внизу.

Вытяжные и термоэлектрические термометры были установлены на метплощадке при Главной геофизической обсерватории в Лесном, в Ленинграде. Почвенная площадка размером  $4 \times 2$  м<sup>2</sup> была очищена от растительного покрова и в таком состоянии поддерживалась в летний период.

Вытяжные термометры в эбонитовых трубах были установлены в ряд с востока на запад на стандартных глубинах до 0,8 м включительно на расстоянии 40 см один от другого.

На глубине 0,2 и 0,4 м были установлены по три вытяжных термометра, из которых два были с латунной и один с пластмассовой оправой. На глубине 0,8 м находились только два вытяжных термометра и оба с латунной оправой.

Между вытяжными термометрами, на расстоянии не более 10 см от них и на одной с ними глубине, были размещены почвенные спай термоэлектрических термометров.

Сравнительные наблюдения над температурой почвы по вытяжным и термоэлектрическим термометрам охватывают период с сентября 1947 г. по ноябрь 1948 г.

Наблюдения проводились ежедневно в 8, 12 и 16 час. среднего солнечного времени, если в это время не было выпадения осадков. В отдельные дни наблюдения проводились 5 раз: в 8, 10, 12, 14 и 16 час. За период исследования про-

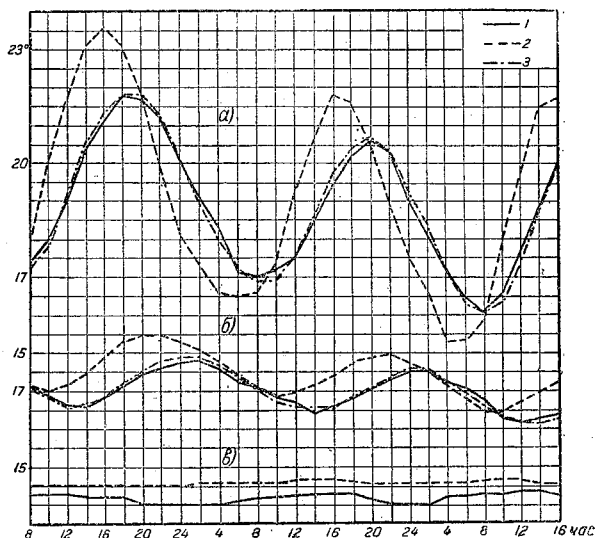


Рис. 1. Температура почвы на глубине 5—7 июля 1948 г. а) Глубина 0,2 м. б) Глубина 0,4 м. в) Глубина 0,8 м. 1 — термоэлектрический термометр; 2 — вытяжной термометр с пластмассовой оправой; 3 — вытяжной с латунной оправой.

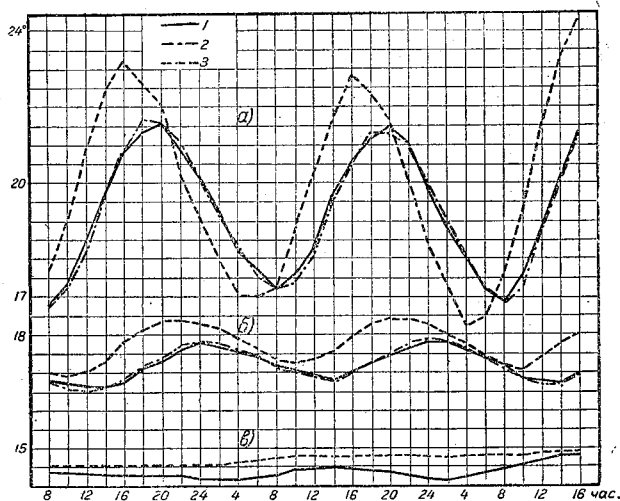


Рис. 2. Температура почвы на глубине 8—10 июля 1948 г. а) Глубина 0,2 м. б) Глубина 0,4 м. в) Глубина 0,8 м. 1 — термоэлектрический термометр; 2 — вытяжной термометр; 3 — вытяжной с латунной оправой.

ведено восемь круглосуточных наблюдений (через каждые два часа). Материалы сравнительных наблюдений позволяют видеть приводимые ниже особенности оценки температуры почвы вытяжными термометрами.

На материале круглосуточных наблюдений в летний период построены рис. 1 и 2, на которых изображен суточный ход температуры почвы на глубине по показаниям вытяжных и термоэлектрических термометров за 5 и 7/VII (переменная облачность) и 8—10/VII 1948 г. (ясная, безоблачная погода).

На рисунках отчетливо видно, что суточный ход температуры почвы на глубине 0,2 и 0,4 м по показаниям вытяжных термометров с латунной оправой имеет большую амплитуду и более раннее наступление максимума и минимума за сутки по сравнению с суточным ходом по показаниям термоэлектрических термометров. На глубине 0,2 м вытяжной термометр с латунной оправой отмечает днем более высокую (до 3°), а ночью — более низкую (до 2°) температуру, чем термоэлектрический термометр.

На глубине 0,4 и 0,8 м показания вытяжных термометров с латунной оправой в июле выше показаний термоэлектрических термометров. Эта разность показаний достигает на глубине 0,4 м 2°, а на глубине 0,8 м — 0,5°.

Смещение времени наступления суточного максимума и минимума на кривой суточного хода температуры почвы по показаниям вытяжного термометра с латунной оправой достигает, как это можно видеть из рисунков, 2—4 час. Так, максимум температуры почвы на глубине 0,2 м по показаниям термоэлектрического термометра приходится на 20 час., а по показаниям вытяжного термометра, с латунной оправой — на 16 час.; на глубине 0,4 м — соответственно на 2 и на 22 часа. Минимум температуры почвы за сутки термоэлектрические термометры отмечают на глубине 0,2 м в 8 час., а на глубине 0,4 м в 14 час., тогда как вытяжные термометры с латунной оправой дают минимум температуры в 4 часа на глубине 0,2 м и в 10 час. на глубине 0,4 м.

На глубине 0,8 м термоэлектрические термометры отмечают суточный ход температуры почвы с максимумом в 12—14 час., минимумом в 0—2 часа и амплитудой всего в 0,5°, вытяжные термометры этого не обнаруживают.

Кривые суточного хода температуры почвы по показаниям вытяжных термометров с пластмассовой оправой (рис. 1 и 2) почти совпадают с соответствующими кривыми по показаниям термоэлектрических термометров. Максимальные расхождения кривых не превышают  $\pm 0,3^\circ$  и не носят систематического характера.

Сравнительные наблюдения, проведенные только в дневные часы в ясную погоду летом 1948 г., показали, что погрешность в оценке температуры почвы вытяжным термометром с латунной оправой может достигать летом на глубине 0,2 м почти 5°, а на глубине 0,4 м — 1,5°. Так, 27/VII в 16 час. вытяжные и термоэлектрические термометры отметили следующую температуру почвы на глубинах 0,2 м и 0,4 м:

	При глубине, м	
	0,2	0,4
Термоэлектрический термометр . . . . .	21,8°	17,0°
Вытяжной термометр с латунной оправой . . . . .	26,4	18,4
"                    "                    с пластмассовой оправой	22,1	17,1

Летом в пасмурную погоду при сплошной нижней облачности разность показаний вытяжного термометра с латунной оправой и термоэлектрического термометра даже на глубине 0,2 м не превышает 0,5°.

Результаты круглосуточных сравнительных наблюдений, проведенных в осенний период, представлены на рис. 3 и 4, где изображен суточный ход температуры почвы на глубине 0,2, 0,4 и 0,8 м за 27—28/IX 1948 г. (рис. 3) и 10—11/X 1947 г. (рис. 4). На этих рисунках взаимное расположение кривых суточного хода температуры почвы на одной и той же глубине по показаниям термоэлектрических и вытяжных термометров иное, чем в июле. Вытяжные термометры с латунной оправой отмечают в сентябре на глубине 0,2 и 0,4 м большую часть суток, а на



глубине 0,8 м — в течение всех суток более низкую температуру почвы, чем термоэлектрические термометры. В октябре показания вытяжных термометров с латунной оправой все время ниже показаний термоэлектрических термометров не только на глубине 0,8 м, но и на глубине 0,4 м. На глубине 0,2 м в октябре только в после-полуденные часы (с 13 до 16 час.) показания вытяжного термометра выше показаний термоэлектрического термометра.

Показания вытяжного термометра с пластмассовой оправой (рис. 3 и 4), как и летом, близки к показаниям термоэлектрического термометра.

В зимний период сравнительные наблюдения проводились только в дневные часы, причем до 23/II на почвенной площадке сохранялся снежный покров, а с 23/II площадка систематически очищалась от него.

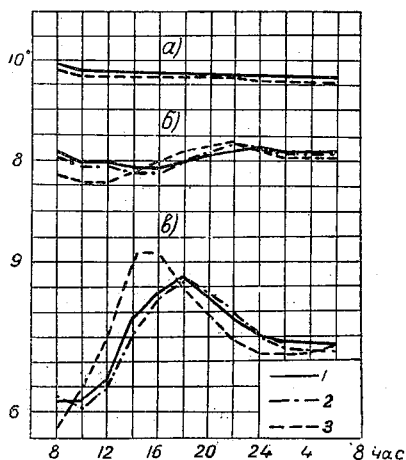


Рис. 3. Температура почвы на глубине 27—28 сентября 1948 г. а) Глубина 0,8 м. б) Глубина 0,4 м. в) Глубина 0,2 м.

1 — термоэлектрический термометр; 2 — вытяжной термометр в пластмассовой оправе; 3 — вытяжной в латунной оправе.

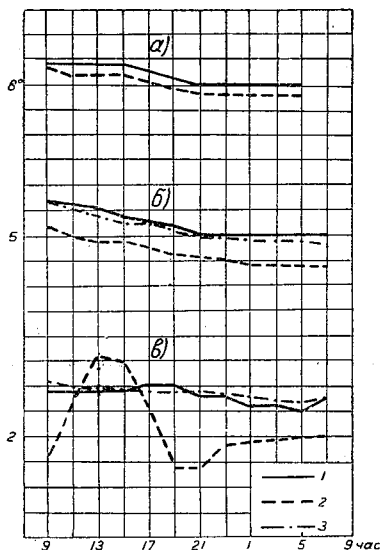


Рис. 4. Температура почвы на глубине 10—11 октября 1947 г. а) Глубина 0,8 м. б) Глубина 0,4 м. в) Глубина 0,2 м.

1 — термоэлектрический термометр; 2 — вытяжной термометр с латунной оправой; 3 — вытяжной с пластмассовой оправой.

При наличии снежного покрова вытяжные термометры с латунной оправой отмечают на глубине 0,2 м и глубже более низкую температуру почвы, чем термоэлектрические термометры (от 0,1 до 0,3°).

При отсутствии снежного покрова, в ясную погоду зимой показания вытяжных термометров с латунной оправой на глубине 0,2 м только в околополуденные часы близки к показаниям термоэлектрических термометров, в остальное время дня они до 2° ниже их. При этих же условиях показания вытяжных термометров с латунной оправой ниже показаний термоэлектрических термометров до 1° на глубине 0,4 м и до 0,5° — на глубине 0,8 м.

В ночные часы зимой при отсутствии снежного покрова, повидимому, разности показаний термометров на глубине 0,4 м будут превышать приведенные данные.

В табл. 1 приведена температура почвы на глубине 0,2 и 0,4 м в сроки наблюдений за два ясных дня в марте 1948 г.

Вытяжные термометры с пластмассовой оправой, как это видно из табл. 1, отмечают температуру почвы, отличающуюся не более 0,3° от температуры по показаниям термоэлектрических термометров.

Источником приведенных выше погрешностей в оценке температуры почвы вытяжным термометром с латунной оправой является, как известно, его оправка.

Благодаря хорошей теплопроводности латунной оправы, вытяжной термометр стандартного типа отмечает осредненную температуру выше лежащего слоя почвы, рав-

Таблица 1

Температура почвы (град.) по показаниям вытяжных и термоэлектрических термометров

Время наблюдения (час.)	Глубина 0,2 м			Глубина 0,4 м		
	Термоэлектрические термометры	Вытяжные термометры, с оправой		Термоэлектрические термометры	Вытяжные, термометры, с оправой	
		латунной	пластмассовой		латунной	пластмассовой
16/III 1948 г.						
8	-6,6	-8,0	-6,7	-2,0	-2,8	-2,1
12	-5,4	-5,7	-5,6	-2,2	-2,7	-2,5
16	-3,6	-3,9	-3,5	-2,2	-2,6	-2,5
17/III 1948 г.						
8	-8,8	-10,3	-8,9	-3,4	-4,5	-3,6
12	-7,1	-7,5	-7,4	-3,5	-4,5	-3,6
16	-4,4	-4,5	-4,4	-3,3	-3,7	-3,4

ного по высоте длине латунной оправы термометра (43 см), а не температуру почвы на глубине его установки. Показания вытяжного термометра с латунной

оправой, установленного на глубине 0,2 м, будут зависеть не только от температуры выше лежащего слоя почвы, но и от температуры прилегающего к почве слоя воздуха, так как его оправа на 23 см выступает над поверхностью почвы.

На температуру выступающей над почвой части латунной оправы, а значит, и на показания вытяжного термометра влияет также и солнечная радиация, для которой эбонит является достаточно прозрачным телом. В качестве иллюстрации к сказанному на рис. 5 приведен ход температуры почвы на глубине 0,2 м по показаниям вытяжного термометра с латунной оправой и термоэлектрического термометра, температура латунной оправы термометра в верхней выступающей над почвой части ее и температура воздуха по термометру в психометрической будке за 8—10/VII 1948 г.

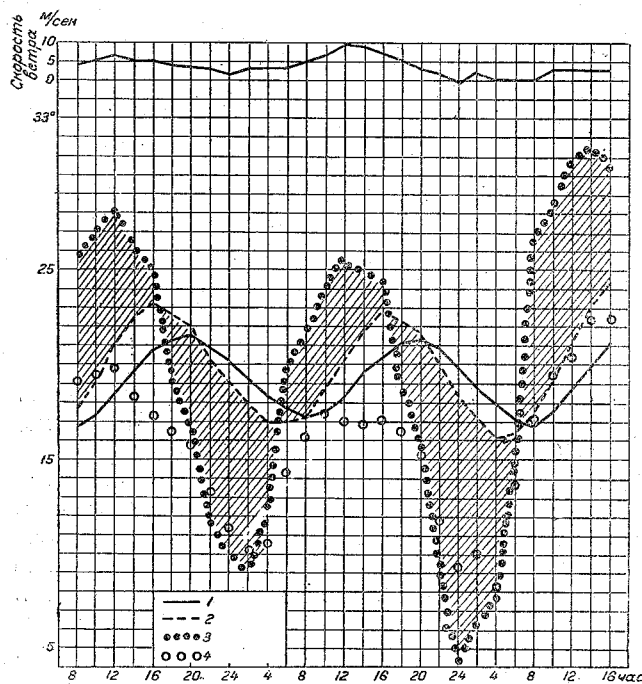


Рис. 5. Температура почвы на глубине 0,2 м и температура оправы вытяжного термометра 8—10 июля 1948 г. 1 — термоэлектрический термометр; 2 — вытяжной термометр; 3 — оправа термометра; 4 — термометр в будке.

глубине 0,2 м измерялась в ее верхней и нижней частях с помощью укрепленных на оправе термоэлектрических термометров. Термоэлектрический термометр, укреп-

ленный внизу оправы, показывал все время температуру оправы, отличающуюся от температуры по вытяжному термометру не более чем на  $\pm 0,1^\circ$ .

Показания термоэлектрического термометра, укрепленного сверху оправы, подвержены значительным изменениям в течение суток. Из рис. 5 видно, что температура верхней части латунной оправы вытяжного термометра, установленного на глубине 0,2 м, следуя, в основном, за температурой воздуха в будке, имеет значительно бóльшую суточную амплитуду, свойственную суточному ходу температуры приземного слоя воздуха. Летом в ясную и тихую погоду латунная оправа у вытяжного термометра на глубине 0,2 м имеет днем температуру верхней части оправы до  $10^\circ$  выше, а ночью до  $14^\circ$  ниже температуры нижней части оправы.

На рис. 5 видна также качественная (прямая) зависимость разности показаний вытяжного термометра с латунной оправой и термоэлектрического термометра на глубине 0,2 м от температурного градиента вдоль латунной оправы термометра. С увеличением разности показаний термоэлектрических термометров на оправе термометра возрастает (с некоторым отставанием) и разность показаний вытяжного и термоэлектрического термометров на глубине 0,2 м.

У вытяжных термометров с латунной оправой, установленных на большей, чем 0,2 м, глубине, изменение температуры оправы на всем ее протяжении будет определяться вертикальным температурным градиентом в том слое почвы, в котором находится оправа термометра. Если температура почвы с глубиной убывает (радиационный тип распределения температуры почвы по вертикали), показания вытяжного термометра с латунной оправой будут завышены за счет оправы; при обратном распределении температуры почвы по вертикали (тип излучения) они будут занижены. Зависимость величины погрешности вытяжного термометра с латунной оправой от величины вертикального температурного градиента в почве прямая: с возрастанием градиента растет и ошибка в оценке температуры почвы вытяжным термометром. Как известно, вертикальный температурный градиент в почве с глубиной уменьшается, поэтому с увеличением глубины установки вытяжного термометра с латунной оправой будет уменьшаться его погрешность за счет оправы.

Используя фактический материал сравнительных наблюдений над температурой почвы по вытяжным термометрам с латунной оправой и термоэлектрическим термометрам, установленным на глубине 0,2 м, 0,4 м и 0,8 м, были построены графики поправок к показаниям вытяжных термометров с латунной оправой.

Поправки этих графиков исключают ошибки вытяжных термометров, зависящие от искажающего влияния латунной оправы на показания термометров.

При построении графиков поправок для характеристики вертикального температурного градиента в почве использована разность показаний двух смежных вытяжных термометров с латунной оправой. Поправки к показаниям вытяжных термометров выведены из сопоставления показаний вытяжного термометра с показаниями термоэлектрических термометров, установленных на одной с ними глубине.

Для вытяжного термометра на глубине 0,2 м графика поправок построить не удалось, так как из-за отсутствия установки вытяжного термометра на меньшей глубине (например 0,1 м) не доставало данных для расчета вертикального температурного градиента в почве до глубины 0,2 м.

Для вытяжного термометра с латунной оправой, установленного на глубине 0,4 м, понадобилось построить три кривых поправок (рис. 6 и 7), отнесенных к наблюдениям в разное время суток. На рис. 6 по оси ординат отложены разности показаний вытяжных термометров в эбонитовых трубах с латунной оправой в сроки наблюдений на глубине 0,2 м и 0,4 м ( $T_{0,2} - T_{0,4}$ ), а по оси абсцисс — соответствующие им поправки вытяжного термометра на глубине 0,4 м ( $\Delta t$ ) и нанесены две системы точек, отнесенных к наблюдениям в разное время суток.

Построенные по этим данным две кривые поправок представляют собой прямые, смещенные относительно начала координат, влево I и несколько вправо II. Кривая I служит для нахождения поправок к показаниям вытяжного термометра при наблюдениях над температурой почвы в ночное время (с 20 до 4 час. включительно),

кривая II—при наблюдениях в околополуденные часы (с 10 до 14 час. включительно). Для определения поправок к показаниям вытяжного термометра на глубине 0,4 м при наблюдениях над температурой почвы в остальное время суток (с 4 до 10 час. и с 14 до 20 час.) служит рис. 7.

В табл. 2 приведены снятые с кривых на рис. 6 и 7 поправки к показаниям вытяжного термометра с латунной оправой на глубине 0,4 м для разного времени суток.

Если разность показаний вытяжных термометров с латунной оправой на глубине  $0,2$  и  $0,4$  м в срок наблюдений ( $T_{0,2} - T_{0,4}$ ) составит  $+5^\circ$ , то поправка

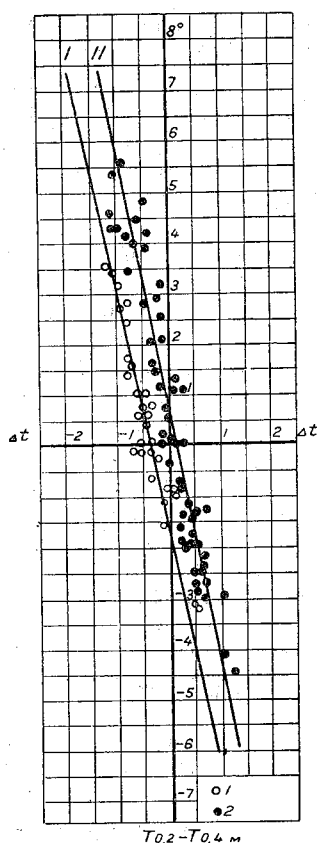


Рис. 6. Поправки к показаниям вытяжного термометра на глубине 0,4 м.

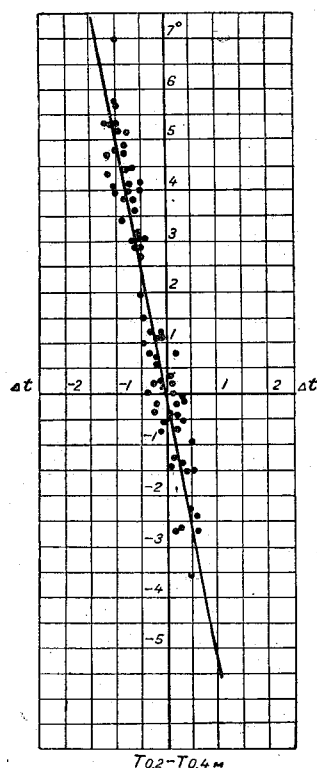


Рис. 7. Поправки к показаниям вытяжного термометра на глубине 0,4 м.

к вытяжному термометру на глубине 0,4 м будет  $-1,5^\circ$  при наблюдениях над температурой почвы в ночные часы,  $-0,8^\circ$ — в околополуденные часы и  $-1,0^\circ$ — в остальное время суток.

При разности  $T_{0,2} - T_{0,4} = -3^\circ$  поправка будет ночью  $+0,3^\circ$ , в околополуденные часы  $+0,5^\circ$  и в остальное время суток  $+0,8^\circ$ . График поправок к показаниям вытяжного термометра с латунной оправой, установленного на глубине 0,8 м, построен так же, как и предыдущие графики, но использована только разность показаний вытяжных термометров на глубине 0,4 м ( $T_{0,4}$ ) и 0,8 м ( $T_{0,8}$ ).

Так как суточный ход температуры почвы на глубине 0,8 м имеет незначительную амплитуду и выражен только показаниями термоэлектрических термометров

ов, то оказалась пригодной для исправления показаний вытяжного термометра  
ми наблюдениях температуры почвы в любое время суток одна кривая поправок.

Таблица 2

Поправки к показаниям вытяжного термометра с латунной  
оправой в эбонитовой трубе на глубине 0,4 м

Разность показаний вытяжного термометра 0,2—0,4 м	Поправки в разное время суток		
	с 20 до 4 час. включ.	после 4 до 10 час. и после 14 до 20 час.	с 10 до 14 час. включ.
-5°	+0,7	+0,9	+1,2
-4	+0,5	+0,7	+1,0
-3	+0,3	+0,5	+0,8
-2	0,0	+0,3	+0,6
-1	-0,2	+0,1	+0,3
0	-0,4	-0,1	+0,1
+1	-0,6	-0,3	-0,1
2	-0,8	-0,5	-0,3
3	-1,0	-0,7	-0,5
4	-1,3	-0,8	-0,6
5	-1,5	-1,0	-0,8
6	-1,7	-1,2	-1,0
7	-1,9	-1,4	-1,1

В табл. 3 приведены поправки к показаниям вытяжного термометра с латунной  
правой, установленного на глубине 0,8 м.

Таблица 3

$3,4 - T_{0,8}$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
$t$	+0,4	+0,3	+0,2	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7

Как видно из табл. 3, у вытяжного термометра с латунной оправой, установ-  
енного на глубине 0,8 м, поправки за счет оправы заметно меньше, чем для  
вытяжного термометра на глубине 0,4 м.

Для вытяжных термометров с латунной оправой, установленных на глубине 1,6 м  
3,2 м, эти поправки практически будут отсутствовать.

Результаты применения поправок из графиков к показаниям вытяжных термо-  
етров с латунной оправой при измерении температуры почвы на глубине 0,4 и  
,8 м можно видеть в табл. 4 и на графике, представленном на рис. 8, где при-  
еден суточный ход температуры почвы за несколько дней по показаниям вытяж-  
ых и термоэлектрических термометров. Для вытяжных термометров на глубине 0,4  
0,8 м приведены как неисправленные, так и исправленные поправками из гра-  
иков показания термометра в сроки наблюдений.

Как видно из табл. 4 и рис. 8, исправленные поправками из графиков пока-  
ания вытяжного термометра с латунной оправой близко подходят к соответствую-  
им показаниям термоэлектрического термометра: расхождение между ними, как  
равило, не превышает  $\pm 0,2^\circ$ .

У вытяжного термометра на глубине 0,4 м иногда несколько выскакивают  
справленные показания термометра в 6- и 18-часовые сроки наблюдений. На эти  
роки как раз падает переход от поправок, принимаемых для одного времени  
уток, к поправкам для другого времени суток. Повидимому, выскакивания в эти  
асы объясняются невозможностью строго фиксировать один и тот же час при  
азных условиях погоды для перехода от одних поправок к другим.

Температура почвы по показаниям вытяжных

Глубина, м	Тип термометра	Ц										
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	
<b>5—7/VII 1948 г.</b>												
0,2	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	17,8	20,2	21,7	23,1	23,6	23,0	21,8	20,0	18,2	17,4	1
	Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .	17,2	17,8	19,1	20,5	21,3	21,8	21,8	21,3	20,2	19,1	1
	Термоэлектрический . . . . .	17,4	18,0	19,1	20,4	21,1	21,8	21,7	21,2	20,0	19,0	1
0,4	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	17,1	17,0	17,2	17,5	17,9	18,3	18,5	18,5	18,3	18,1	1
	Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .	17,0	16,8	16,6	16,7	16,8	17,2	17,6	17,8	17,9	17,9	1
	Термоэлектрический . . . . .	17,1	16,9	16,6	16,6	16,8	17,2	17,4	17,6	17,7	17,8	1
0,8	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	16,9	16,5	16,5	16,6	16,8	17,4	17,4	17,8	17,9	17,8	1
	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,6	1
	Термоэлектрический . . . . .	14,3	14,3	14,3	14,2	14,2	14,2	14,0	14,0	14,0	14,0	1
0,2	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	14,2	14,2	14,1	14,1	14,1	14,0	14,0	14,0	14,0	14,1	1
	<b>8—10/VII 1948 г.</b>											
	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	17,6	19,0	21,0	22,4	23,2	22,6	22,0	20,2	19,0	18,0	1
0,2	Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .	16,7	17,2	18,2	19,7	20,8	21,7	21,6	21,1	20,2	19,3	1
	Термоэлектрический . . . . .	16,8	17,3	18,5	19,7	20,8	21,4	21,6	20,8	20,3	19,2	1
	0,4	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	17,0	16,9	17,1	17,4	17,9	18,2	18,4	18,4	18,3	18,2
Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .		16,8	16,6	16,5	16,6	16,9	17,2	17,4	17,7	17,8	17,8	1
Термоэлектрический . . . . .		16,8	16,7	16,7	16,6	16,7	17,2	17,3	17,6	17,8	17,7	1
0,8	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	16,8	16,6	16,5	16,6	16,8	17,3	17,2	17,6	17,8	17,8	1
	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	1
	Термоэлектрический . . . . .	14,4	14,4	14,4	14,3	14,3	14,3	14,3	14,2	14,2	14,2	1
0,2	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	14,3	14,3	14,3	14,2	14,2	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1	1
	<b>30—31/VII 1948 г.</b>											
	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	16,6	18,0	19,5	22,0	22,4	22,0	20,8	19,6	18,8	18,4	1
0,2	Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .	16,1	16,4	17,3	18,9	20,2	20,8	20,8	20,3	19,5	18,8	1
	Термоэлектрический . . . . .	16,2	16,7	17,4	19,0	20,4	20,8	20,8	20,1	19,4	18,8	1
	0,4	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	17,0	16,9	16,9	17,2	17,6	17,9	18,1	18,2	18,2	18,0
Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .		17,0	16,8	16,6	16,6	16,7	17,0	17,3	17,6	17,7	17,7	1

Таблица 4

и термоэлектрических термометров

ы

6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	4	6	8	10	12	14	16
6,5	16,6	17,4	19,2	20,6	21,8	21,6	20,7	19,0	17,6	16,7	15,3	14,4	15,9	18,0	19,8	21,5	21,7
7,3	16,9	16,9	17,6	18,6	19,7	20,4	20,7	20,3	19,3	18,3	17,2	16,3	16,1	16,4	17,5	18,8	19,9
7,1	17,0	17,2	17,5	18,4	19,5	20,2	20,6	20,3	19,0	18,0	17,2	16,4	16,1	16,6	17,6	18,8	19,9
7,4	17,0	16,9	17,0	17,2	17,5	17,7	17,9	18,0	17,8	17,5	17,2	16,8	16,6	16,5	16,7	17,0	17,3
7,4	17,1	16,7	16,6	16,6	16,6	16,8	17,1	17,4	17,5	17,4	17,2	17,0	16,5	16,4	16,2	16,2	16,3
7,2	17,1	16,8	16,7	16,4	16,6	16,8	17,1	17,4	17,5	17,5	17,2	17,0	16,8	16,4	16,2	16,3	16,4
7,5	17,0	16,9	16,7	16,7	16,8	16,9	16,9	17,3	17,4	17,3	17,2	17,0	16,7	16,3	16,2	16,3	16,4
4,6	14,6	14,6	14,7	14,7	14,7	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6	14,7	14,7	14,7	14,6	14,6
4,0	14,2	14,2	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,0	14,0	14,2	14,2	14,3	14,3	14,4	14,4	14,3	14,3
4,2	14,3	14,3	14,4	14,4	14,3	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,3	14,4	14,5	14,4	14,3	14,2
7,0	17,2	18,9	20,2	21,7	22,8	22,3	21,6	20,0	18,3	17,2	16,2	16,4	17,5	19,2	21,4	23,2	24,4
7,6	17,3	17,4	18,1	19,5	20,5	21,3	21,3	20,9	20,0	19,0	18,1	17,3	16,8	17,2	18,6	19,9	21,1
7,7	17,2	17,6	18,2	19,6	20,5	21,2	21,4	21,0	19,8	18,8	18,0	17,2	16,8	17,5	18,8	20,0	21,2
7,6	17,4	17,3	17,4	17,6	18,0	18,3	18,4	18,4	18,3	18,0	17,8	17,4	17,2	17,1	17,4	17,8	18,0
7,5	17,2	17,0	16,9	16,8	17,0	17,3	17,5	17,8	17,9	17,8	17,7	17,4	17,1	16,8	16,7	16,7	16,9
7,5	17,2	17,0	16,9	16,8	17,0	17,3	17,4	17,6	17,8	17,8	17,6	17,4	17,2	16,9	16,8	16,7	16,9
7,6	17,3	17,1	16,9	17,0	17,0	17,5	17,4	17,7	17,9	17,8	17,7	17,5	17,1	16,8	16,8	16,9	16,7
4,7	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,9	14,9	14,9
4,3	14,3	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,4	14,4	14,3	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,8
4,3	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,3	14,3	14,3	14,4	14,4	14,4	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
17,9	18,6	20,1	—	20,6	20,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,0	17,7	18,1	—	19,5	19,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18,0	17,8	18,1	—	19,2	19,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17,7	17,5	17,5	—	17,7	18,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17,5	17,3	17,2	—	17,2	17,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Глубина, м	Тип термометра	Ч а										
		8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	4
0,4	Термоэлектрический . . . . .	17,2	17,1	16,8	16,7	16,8	16,9	17,2	17,4	17,6	17,6	17,5
	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	17,0	16,8	16,5	16,4	16,6	17,1	17,2	17,5	17,7	17,5	17,5
0,8	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	15,1	15,1	15,1	15,1	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
	Термоэлектрический . . . . .	14,8	14,9	14,9	14,9	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,7	14,7
<b>14—15/IX 1948 г.</b>												
0,2	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	13,6	14,5	16,3	17,8	18,1		16,8		15,4	15,0	
	Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .	13,5	13,5	14,1	15,1	16,1		16,5		15,5	15,1	
0,4	Термоэлектрический . . . . .	13,5	13,6	14,4	15,4	16,3		16,4		15,6	15,2	
	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	13,3	13,4	13,5	13,6	14,0		14,4		14,4	14,4	
0,4	Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .	13,2	13,1	13,1	13,1	13,2		13,7		14,0	14,0	
	Термоэлектрический . . . . .	13,2	13,2	13,1	13,1	13,3	Дождь	13,6	Дождь	14,0	14,0	Дождь
0,4	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	13,2	13,3	13,0	13,0	13,2	Дождь	13,4	Дождь	13,8	13,9	Дождь
	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	12,4	12,4	12,4	12,4	12,4		12,4		12,4	12,4	
0,8	Термоэлектрический . . . . .	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2		12,2		12,3	12,3	
	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	12,2	12,3	12,2	12,2	12,1		12,1		12,1	12,1	
<b>27—28/IX 1948 г.</b>												
0,2	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	5,5	6,4	7,6	9,2	9,2	8,4	8,0	7,4	7,2		7,2
	Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .	6,3	6,1	6,5	7,6	8,3	8,7	8,4	8,0	7,6		7,3
0,4	Термоэлектрический . . . . .	6,2	6,2	6,6	7,8	8,5	8,7	8,3	7,9	7,6		7,4
	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	7,8	7,7	7,6	7,8	8,0	8,2	8,3	8,4	8,3		8,1
0,4	Вытяжной, с пластмассовой оправой . . . . .	8,0	7,9	7,9	7,8	7,8	8,0	8,2	8,3	8,2		8,2
	Термоэлектрический . . . . .	8,2	8,1	8,0	7,9	7,9	8,0	8,1	8,2	8,3	Дождь	8,2
0,4	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	8,1	8,0	7,7	7,6	7,7	8,1	7,9	8,2	8,1		7,9
	Вытяжной, с латунной оправой . . . . .	9,8	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,6	9,6	9,6		9,6
0,8	Термоэлектрический . . . . .	10,0	9,8	9,8	9,7	9,8	9,8	9,8	9,7	9,7		9,7
	Вытяжной, с латунной оправой (исправленные показания) . . . . .	10,0	9,9	9,9	9,9	9,8	9,8	9,6	9,6	9,6		9,7



	8	10	12	14	16	18	20	22	24	2	4	6	8	10	12	14	16	
5	17,4	17,2		17,0	17,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	17,2	17,1		17,2	17,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0	15,1	15,1		15,1	15,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	14,7	14,8		14,7	14,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	14,8	14,8		14,7	14,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2	14,4	14,8		16,0	16,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5	14,2	14,2		15,2	15,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	14,2	14,3		15,3	15,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
2	14,1	14,0		14,1	14,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0	13,8	13,8		13,7	13,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
9	13,9	13,8		13,7	13,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
1	14,0	13,9	Дождь	13,8	13,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
6	12,6	12,7		12,7	12,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	12,4	12,4		12,4	12,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	12,3	12,5		12,5	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

При проведении только срочных (1, 7, 13 и 19 час.) наблюдений над температурой почвы, как это принято на гидрометсети, исправление показаний вытяжных термометров с латунной оправой поправками из графиков также значительно улучшает результаты наблюдений.

В табл. 5 помещены результаты наблюдений над температурой почвы по термоэлектрическим и вытяжным (до и после исправления) термометрам на глубине 0,4 м и 0,8 м в срочные часы (за 6 и 9/VII 1948 г.), взятые из круглосуточных наблюдений.

Из таблицы видно, что средняя суточная температура почвы на глубине 0,4 м за 6/VII 1948 г. из наблюдений по термоэлектрическому термометру  $17,1^{\circ}$ , а по вытяжному термометру с латунной оправой  $17,6^{\circ}$ .

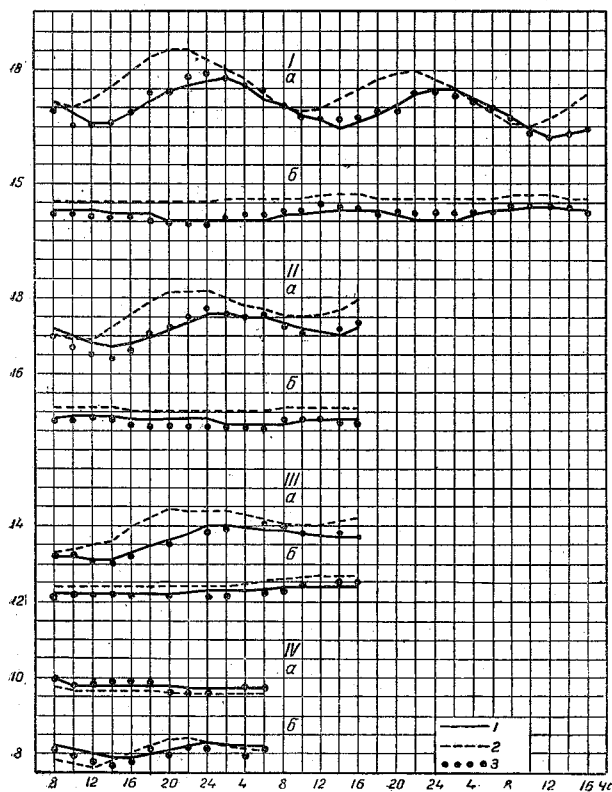


Рис. 8. Температура почвы на глубине 0,4 м (а) и 0,8 м (б).

1 — термоэлектрический термометр; 2 — вытяжной термометр с латунной оправой; 3 — вытяжной с введением поправки из графиков: I — 5—7 июля 1948 г.; II — 30—31 июля; III — 14—15 сентября; 27—28 сентября.

введении поправок к показаниям вытяжного термометра с латунной оправой. Как 6/VII, так и 9/VII введение поправок к показаниям вытяжного термометра в сроки наблюдений уменьшает разность в оценке средней суточной температуры почвы вытяжным и термоэлектрическим термометром с  $0,4-0,3^{\circ}$  до  $0,1^{\circ}$ .

В табл. 6 приведены результаты применения поправок из графиков к показаниям вытяжного термометра с латунной оправой при измерении температуры почвы на глубине 0,4 м в зимний период. Взяты несколько ясных дней в марте 1948 г., когда почвенная площадка поддерживалась оголенной от снежного покрова и когда вертикальные температурные градиенты в почве, а значит и погрешности вытяжных термометров, значительные.

После введения поправок из графиков рис. 6 и 7 к показаниям вытяжного термометра в срочные часы средняя суточная температура по вытяжному термометру  $17,2^{\circ}$  только на  $0,1^{\circ}$  отличается от средней суточной температуры по термоэлектрическому термометру. Такой же результат имеем и для 9/VII 1948 г., когда неисправленная поправками из графиков средняя суточная температура почвы на глубине 0,4 м, по вытяжному термометру, равная  $17,9^{\circ}$ , уменьшается до  $17,5^{\circ}$  при введении поправок к показаниям вытяжного термометра в сроки наблюдений. Средняя суточная температура почвы по показаниям термоэлектрического термометра в это время составляла  $17,4^{\circ}$ .

Температура почвы на глубине 0,8 м, как известно, на гидрометсети измеряется раз в сутки — в 13 час., поэтому в табл. 5 показано, как изменяется средняя суточная температура почвы на глубине 0,8 м из четырех срочных наблюдений и отдельно в 13-часовой срок наблюдений при

Из табл. 6 видно, что применение поправок из графиков на рис. 6 и 7 к показаниям вытяжного термометра с латунной оправой, измеряющего температуру почвы на глубине 0,4 м, уменьшает погрешность последнего в зимний период с 0,7—1,0° до 0,1—0,2° и только в редких случаях до 0,3°.

Таблица 5  
Температура почвы на глубинах 0,4 и 0,8 м  
(из срочных наблюдений)

	Глубина 0,4 м					Глубина 0,8 м				
	1 ч.	7 ч.	13 ч.	19 ч.	Средн.	1 ч.	7 ч.	13 ч.	19 ч.	Средн.
3/VII Вытяжные термометры с латунной оправой . . . . .	18,2	17,2	17,1	17,8	17,6	14,6	14,6	14,7	14,6	14,6
То же	-0,4	-0,7	+2,8	+3,5	—	3,6	2,6	2,4	2,4	—
Поправка из графика . . . . .	-0,3	+0,1	-0,5	-0,7	—	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	—
Исправленные показания Термоэлектрический термометр . . . . .	17,9	17,3	16,6	17,1	17,2	14,1	14,2	14,4	14,3	14,2
3/VII Вытяжные термометры с латунной оправой . . . . .	17,8	17,1	16,5	17,0	17,1	14,0	14,1	14,3	14,3	14,2
То же	18,3	17,5	17,5	18,3	17,9	14,6	14,7	14,8	14,8	14,7
Поправка из графика . . . . .	0,3	-0,4	3,5	3,7	—	3,7	2,8	2,7	3,6	—
Исправленные показания Термоэлектрический термометр . . . . .	-0,4	0,0	-0,5	-0,7	—	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	—
Исправленные показания Термоэлектрический термометр . . . . .	17,9	17,5	17,0	17,6	17,5	14,1	14,3	14,4	14,3	14,3
Термоэлектрический термометр . . . . .	17,8	17,4	16,9	17,4	17,4	14,2	14,3	14,5	14,5	14,4

Таблица 6  
Температура почвы (град.) на глубине 0,4 м

	Сроки наблюдений											
	12/III 1948 г.			15/III 1948 г.			16/III 1948 г.			17/III 1948 г.		
	8 ч.	12 ч.	16 ч.	8 ч.	12 ч.	16 ч.	8 ч.	12 ч.	16 ч.	8 ч.	12 ч.	16 ч.
Вытяжной термометр с латунной оправой . . . . .	-2,9	-3,0	-2,3	-0,9	-1,0	-0,9	-2,8	-2,7	-2,6	-4,5	-4,5	-3,7
Разные показания вытяжных термометров на глубине 0,2 и 0,4 м	-4,4	-1,7	-0,4	-1,4	-1,1	-0,9	-5,2	-3,0	-1,3	-5,8	-3,0	-0,8
Поправка из графика . . . . .	+0,8	+0,5	0,0	+0,2	+0,3	+0,1	+0,9	+0,8	+0,2	+1,1	+0,8	+0,1
Исправленные показания вытяжного термометра	-2,1	-2,5	-2,3	-0,7	-0,7	-0,8	-1,9	-1,9	-2,4	-3,4	-3,7	-3,6
Термоэлектрический термометр	-1,9	-2,3	-2,0	-0,6	-0,8	-0,9	-2,0	-2,2	-2,2	-3,4	-3,5	-3,3
Температура воздуха в будке . . . . .	-11,9	-7,2	-5,0	-7,4	-8,3	-7,7	-13,0	-11,2	-11,3	-15,2	-10,3	-8,3

### Выводы

1. Применение вытяжных термометров с латунной оправой (стандартный тип) для измерения температуры почвы на глубинах 0,2, 0,4 и 0,8 м влечет значительные погрешности в оценке температуры почвы на этих глубинах.

2. Погрешности вытяжных термометров с латунной оправой, установленных на глубинах 0,2 и 0,4 м, выражаются в неправильной до (4—5° — на глубине 0,2 м и до 2° — на глубине 0,4 м) оценке температуры почвы в срок наблюдений и в искажении суточного хода температуры почвы. Вытяжные термометры с латунной оправой отмечают время наступления максимума и минимума температуры почвы за сутки на 4 часа раньше фактического.

3. Погрешность вытяжного термометра с латунной оправой, установленного на глубине 0,8 м, выражается в неправильной (до 0,5°) оценке температуры почвы в срок наблюдений и в сглаживании существующего на этой глубине суточного хода.

4. Основным источником погрешностей вытяжных термометров с латунной оправой, как известно, является хорошая теплопроводность его оправы, вследствие чего вытяжной термометр отмечает среднюю температуру слоя почвы толщиной 43 см (длина латунной оправы), а не температуру почвы на глубине его установки.

5. Величина и знак погрешности за счет оправы вытяжного термометра связаны прямой количественной зависимостью с вертикальным температурным градиентом в почве: чем больше градиент в почве, тем больше погрешность вытяжного термометра. При положительном температурном градиенте в почве (температура с глубиной убывает) вытяжной термометр с латунной оправой отмечает более высокую, а при отрицательном градиенте (температура почвы с глубиной возрастает) — более низкую температуру, чем фактическая.

6. Путем использования для характеристики вертикального температурного градиента в почве показаний тех же вытяжных термометров с латунной оправой на двух смежных стандартных глубинах, построены графики поправок, исключающих искажающее влияние латунной оправы на показания термометров.

7. По разности показаний вытяжных термометров с латунной оправой, установленных на глубинах 0,2 и 0,4 м ( $T_{0,2} - T_{0,4}$ ) в сроки наблюдений вычислены поправки  $\Delta t$  к показаниям вытяжного термометра на глубинах 0,4 м. По разности показаний вытяжных термометров с латунной оправой, установленных на глубинах 0,4 и 0,8 м ( $T_{0,4} - T_{0,8}$ ) в сроки наблюдений определены поправки к показаниям вытяжного термометра на глубине 0,8 м.

8. Применение полученных поправок к показаниям вытяжных термометров с латунной оправой, установленных в эбонитовых трубах, при производстве наблюдений над температурой почвы на глубине, а также при использовании материалов наблюдений над температурой почвы по вытяжным термометрам с латунной оправой за прежние годы значительно повысит качество результатов наблюдений над температурой почвы на глубине.

9. У вытяжных термометров с латунной оправой, установленных на глубинах 1,6 и 3,2 м, погрешность в оценке температуры почвы мала, так как вертикальный температурный градиент в почве на этих глубинах мал.

10. Вытяжные термометры с пластмассовой оправой, установленные на стандартных для гидрометсети глубинах, начиная с 0,2 м, отмечают температуру почвы с достаточной точностью.

11. Для повышения качества наблюдений над температурой почвы на глубине вытяжными термометрами необходимо латунную оправу термометров заменить на пластмассовую оправу или оправу из другого проводящего плохо тепло материала.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРУБ ИЗ РАЗНОГО МАТЕРИАЛА К ВЫТЯЖНЫМ ПОЧВЕННЫМ ТЕРМОМЕТРАМ

Вытяжные термометры, применяемые для измерения температуры почвы на глине, как известно, имеют эбонитовые трубы. Дефицитность эбонита являлась до последнего времени основной причиной прекращения изготовления вытяжных термометров, поэтому вопрос о замене эбонитовых труб на трубы из другого материала ставал не раз. Некоторые ведомственные организации из-за отсутствия эбонитовых труб применяли для вытяжных термометров изготовляемые ими на месте деревянные и железные трубы. С развитием гидрометсети и расширением наблюдений ад температурой почвы на глубине вопрос о замене эбонитовых труб у вытяжных термометров на трубы из другого, недефицитного материала приобрел особую остроту, и с этой целью в 1946 г. в Главной геофизической обсерватории были проведены исследования труб из разного материала. Учитывая результаты ранее проведенных испытаний, Главная геофизическая обсерватория наметила провести исследование деревянных и пластмассовых труб к вытяжным термометрам, обладающих теплопроводностью, близкой к теплопроводности эбонитовых, и доступных для широкого применения.

Из многочисленных видов пластмассы по рекомендации Ленинградского научно-исследовательского института пластмассы были взяты для исследования только экстолит (бакелизированная ткань) и гетинакс (бакелизированная бумага).

Почти все изготовленные для исследования трубы к вытяжным термометрам были сделаны составными из отрезков разной длины (от 45 до 100 см), соединенных надетыми снаружи металлическими муфтами. Отрезки деревянных труб длиной в 45 см были выточены на станке и затем проварены в олифе. Соединенные из отрезков деревянные трубы снаружи были плотно обмотаны хлопчатобумажной санью, нарезанной полосками в 8—10 см ширины и пропитанной олифой.

Все изготовленные трубы к вытяжным термометрам по размерам подходили эбонитовым и снаружи были окрашены в верхней части в белый цвет, а в нижней — в зеленый.

Размеры исследуемых и стандартных эбонитовых труб к вытяжным термометрам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры исследуемых труб к вытяжным термометрам

Трубы	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки труб, мм
Эбонитовые . . . . .	25	5
Деревянные . . . . .	24	10
Гетинаксовые . . . . .	25	5
Текстолитовые . . . . .	25	6

Исследование труб проводилось в полевых условиях путем систематических параллельных наблюдений (в основные сроки) над температурой почвы на глубине по вытяжным термометрам, установленным в стандартных эбонитовых трубах и в трубах из других материалов на методической площадке базы Обсерватории в Воейково (вблизи Ленинграда). На почвенной площадке размером  $8 \times 4^2$  термометры были установлены с помощью бура на глубину 0,2; 0,4; 0,8 и 1,6 м и расположены в ряд с запада на восток, на расстоянии 25 см один от другого. На глубину 3,2 м установить их не удалось по техническим причинам.

Почва на месте установки вытяжных термометров: легкий суглинок на глубину до 20—30 см, а далее песок. Почвенная площадка в летний период поддерживалась лишенной растительного покрова, зимой снежный покров сохранялся в естественном состоянии. Исключением являлся март 1948 г, когда с 3/III почвенная площадка была очищена от снежного покрова, достигшего к этому времени высоты 80 см и сгладившего влияние материала труб на показания вытяжных термометров.

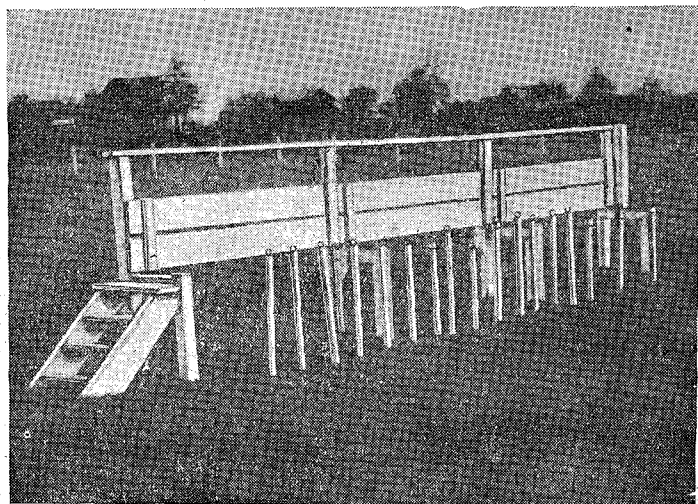


Рис. 1. Общий вид установки термометров в исследуемых и эбонитовых трубах.

Общий вид установки вытяжных термометров в исследуемых и эбонитовых трубах показан на рис. 1. Наблюдения проводились работниками аэрометстанции Воейково под общим руководством научного сотрудника станции М. М. Митиной. Параллельные наблюдения над температурой почвы по вытяжным термометрам в деревянных и эбонитовых трубах продолжались с сентября 1946 г. по декабрь 1948 г., а по термометрам в гетинаксовых, текстолитовых и эбонитовых трубах — с октября 1947 г. также по декабрь 1948 г.

Ниже приведены результаты сравнительных наблюдений над температурой почвы на глубине по вытяжным термометрам в трубах из разного материала, показывающие, как сказывается материал труб на показаниях вытяжных термометров, а отсюда — и на основных характеристиках температуры почвы.

### Деревянные трубы к вытяжным термометрам

1. Вытяжные термометры в деревянных, специально обработанных трубах отмечают, в среднем за месяц, в теплое полугодие более высокую, а в холодную — более низкую температуру почвы, чем термометры в эбонитовых трубах (рис. 2 табл. 1 приложения).

На рис. 1 хорошо виден годовой ход разности среднемесячной температуры почвы на глубине по показаниям вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых

вых (дерево—эбонит) трубах за 1947 и 1948 гг. с амплитудой, уменьшающейся от 0,5—0,6 на глубине 0,2 м до 0,05—0,06 на глубине 1,6 м.

2. Наибольшие среднемесячные разности показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах за 1947 и 1948 гг. показаны в табл. 2.

Таблица 2

Наибольшие среднемесячные разности показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах (дерево—эбонит)

Глубина, м	Разность показаний и месяцы		Разность показаний и месяцы	
	1947 г.		1948 г.	
0,2	+0,13° (V, VI)	-0,42° (II)	+0,19° (VI)	-0,18° (XI)
0,4	+0,27 (V)	-0,20 (I)	+0,17 (VI)	-0,17 (XII)
0,8	+0,12 (VI)	-0,05 (XII)	+0,06 (VIII)	-0,05 (XII)
1,6	+0,03 (VII)	-0,04 (X)	+0,03 (V)	-0,04 (XI)

Наибольшие среднемесячные отрицательные разности, достигающие  $-0,42^\circ$  на глубине 0,2 м и  $-0,20^\circ$  на глубине 0,4 м, наблюдались в малоснежную зиму 1946/47 г. Наибольшие положительные среднемесячные разности показаний отмечены в теплое полугодие и за два года исследования не превысили  $0,19^\circ$  на глубине 0,2 м и  $0,27^\circ$  на глубине 0,4 м.

Наибольшие среднемесячные разности (дерево—эбонит) по абсолютной величине не превысили  $0,12^\circ$  на глубине 0,8 м и  $0,04^\circ$  на глубине 1,6 м.

3. Разности показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах в основные сроки наблюдений (1, 7, 13 и 19 час.) в среднем за месяц на глубине 0,2 и 0,4 м имеют суточный ход с максимумом в ночные и минимумом в дневные сроки наблюдений в холодное полугодие. В теплое полугодие максимум в суточном ходе падает на дневные, а минимум на ночные сроки наблюдений (табл. 2 приложения). Амплитуда суточного хода разности показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах в сроки наблюдений в среднем за месяц зимой невелика и за период исследования не превысила (март 1948 г.)  $0,3^\circ$  на глубине 0,2 м и  $0,1^\circ$  на глубине 0,4 м. В летние месяцы амплитуда суточного хода разности (дерево—эбонит) в сроки наблюдений достигала на глубине 0,2 м  $1^\circ$  (июль 1948 г.) и  $0,2^\circ$  (июнь 1948 г.) на глубине 0,4 м.

4. В отдельные ясные дни за период исследования амплитуда суточного хода разности показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах в сроки наблюдений доходила на глубине 0,2 м до  $1,5^\circ$  (8/VII и 1/VIII 1948 г.) летом и до  $1^\circ$  (12/II 1947 г., 12/III 1948 г.) зимой, а на глубине 0,4 м—до  $0,3-0,4^\circ$  (14/II, 21 и 28/VI, 20/VIII 1948 г.).

5. Наибольшие по абсолютной величине разности показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах в срок наблюдений достигали, как

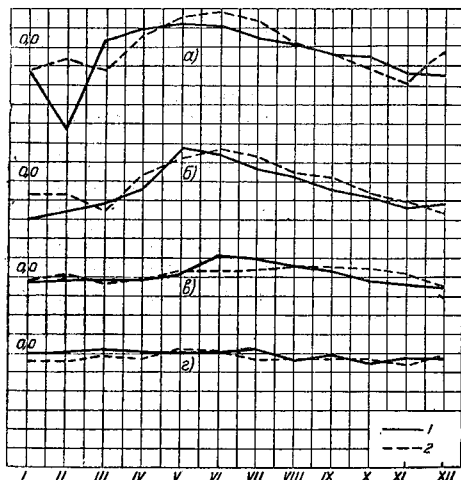


Рис. 2. Годовой ход разности показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах в среднем за месяц за 1947 и 1948 гг.

1— за 1947 г.; 2— за 1948 г. а) Глубина 0,2 м, б) Глубина 0,4 м. в) Глубина 0,8 м.

видно из табл. 3, почти 2° на глубине 0,2 м, почти 1° на глубине 0,4 м, 0,3° на глубине 0,8 м и 0,2° на глубине 1,6 м.

Таблица 3

Наибольшие разности показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах в срок наблюдений

Глубина, м	Разность показаний		Разность показаний	
	1947 г.		1948 г.	
0,2	+0,6° (IV, VII)	-1,8° (II)	+1,7° (VIII)	-1,5° (III)
0,4	+0,6 (V)	-0,7 (II)	+0,5 (IV, V, VI, VII)	-0,5 (III, IV, X)
0,8	+0,3	-0,2	+0,2	-0,2
1,6	+0,1	-0,2	+0,2	-0,2

Все значительные расхождения в показаниях вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах наблюдались при значительных же изменениях температуры почвы между сроками наблюдений.

6. Пределы изменения температуры почвы за год на глубине от 0,2 до 0,8 м включительно по показаниям вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах различны, как это можно видеть из табл. 4.

Таблица 4

Пределы изменения температуры почвы за год по показаниям вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах (град.)

Глубина, м	Абсолютный максимум			Абсолютный минимум			Амплитуда		
	трубы		раз- ность	трубы		раз- ность	трубы		раз- ность
	деревян- ные	эбони- товые		деревян- ные	эбони- товые		деревян- ные	эбони- товые	
1947 г.									
0,2	23,1	22,8	0,3	-15,0	-13,5	-1,5	38,1	36,3	1,8
0,4	18,9	18,6	0,3	-10,4	-10,2	-0,2	29,3	28,8	0,5
0,8	14,3	14,2	0,1	-4,1	-4,1	0,0	18,4	18,3	0,1
1,6	10,6	10,6	0,0	0,4	0,4	0,0	10,2	10,2	0,0
1948 г.									
0,2	24,5	23,3	1,2	-9,2	-9,1	-0,1	33,7	32,4	1,3
0,4	18,7	18,3	0,4	-3,5	-3,3	-0,2	22,2	21,6	0,6
0,8	14,2	14,1	0,1	0,1	0,2	-0,1	14,1	13,9	0,2
1,6	11,2	11,2	0,0	1,5	1,5	0,0	9,7	9,7	0,0

Годовая амплитуда изменения температуры почвы на глубине от 0,2 до 0,8 м включительно по показаниям вытяжных термометров в деревянных трубах больше, чем по показаниям в эбонитовых трубах: до 1,8° на глубине 0,2 м, 0,6° на глубине 0,4 м и до 0,2° на глубине 0,8 м. Большая разница в годовой амплитуде изменения температуры почвы на глубине 0,2 м по показаниям вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах за 1947 и 1948 гг. явилась следствием значительного расхождения в величине абсолютного минимума (-1,5°) в 1947 г. и абсолютного максимума (1,2°) в 1948 г., отмеченных в периоды разного изме-



нения температуры почвы на этой глубине. На глубине 0,2 м абсолютный минимум за 1947 г. отмечен термометрами в феврале при интенсивном понижении температуры почвы, а абсолютный максимум за 1948 г. оба термометра отметили в июне при интенсивном повышении температуры почвы.

Переход температуры почвы через 0° при замерзании ее термометры в деревянных трубах отмечают на малой глубине немного раньше (до двух суток на глубине 0,2 м), чем термометры в эбонитовых трубах. При оттаивании же почвы даты перехода температуры почвы через 0° совпадают, что можно видеть из табл. 5.

Таблица 5

Переход температуры почвы через 0° по показаниям вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах

Глубина, м	При замерзании почвы			При оттаивании почвы		
	трубы		разность в часах	трубы		разность в часах
	деревянные	эбонитовые		деревянные	эбонитовые	
1946/47 г.						
0,2	15/XI 1 ч.	15/XI 19 ч.	-18	20/IV 13 ч.	20/IV 13 ч.	0
0,4	20/XI 7 ч.	21/XI 1 ч.	-18	20/IV 13 ч.	20/IV 13 ч.	0
0,8	4/I 13 ч.	4/I 13 ч.	0	8/V 13 ч.	8/V 13 ч.	0
1947/48 г.						
0,2	10/II 7 ч.	12/II 7 ч.	-48	2/IV 13 ч.	2/IV 13 ч.	0
0,4	11/III 13 ч.	12/III 12 ч.	-12	2/IV 19 ч.	2/IV 19 ч.	0

Вытяжные термометры в деревянных трубах отметили на глубине 0,2 м переход температуры почвы через 0° при замерзании почвы в зиму 1946/47 г. на 18 час., а в зиму 1947/48 г. на 48 час. раньше, чем термометры в эбонитовых трубах. В зиму 1947/48 г. снег выпал на талую почву и на глубине 0,2 м температура почвы долгое время держалась около 0°. Возможно, что этими особенностями начала зимы и трудностью при этих условиях надежно определить момент перехода температуры почвы через 0° и объясняется значительное расхождение в датах перехода через 0° на глубине 0,2 м по показаниям термометров в деревянных и эбонитовых трубах. За счет лучшей теплопроводности дерева температура вышележащих слоев почвы и приземного слоя воздуха будет оказывать большее влияние на показания вытяжных термометров, установленных в деревянных трубах, нежели на показания этих термометров в эбонитовых трубах. И это искажающее влияние будет тем больше, чем больше вертикальный градиент в почве и в приземном слое воздуха, где находится труба вытяжного термометра. Так как с глубиной в почве вертикальный температурный градиент уменьшается, то уменьшается и влияние теплопроводности трубы вытяжного термометра на его показания, что и подтверждается сближением показаний термометров в деревянных и эбонитовых трубах с увеличением глубины установки их в почву.

### Гетинаксовые трубы к вытяжным термометрам

1. Вытяжные термометры в гетинаксовых трубах отмечают в среднем за месяц более высокие температуры почвы, чем те же термометры в эбонитовых трубах, в VI—VIII на глубине 0,2 м, с VIII по IX на глубине 0,4 м и с X по V на глубине 0,8 м. В остальные месяцы средняя месячная температура почвы по показани-

ниям термометров в гетинаксовых трубах ниже, чем по показаниям термометров в эбонитовых трубах (рис. 3 и табл. 3 приложения).

В течение года средняя месячная разность показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах изменяется в небольших пределах: от  $0,2^\circ$  на глубине  $0,2$  м до  $0,1^\circ$  на глубине  $1,6$  м.

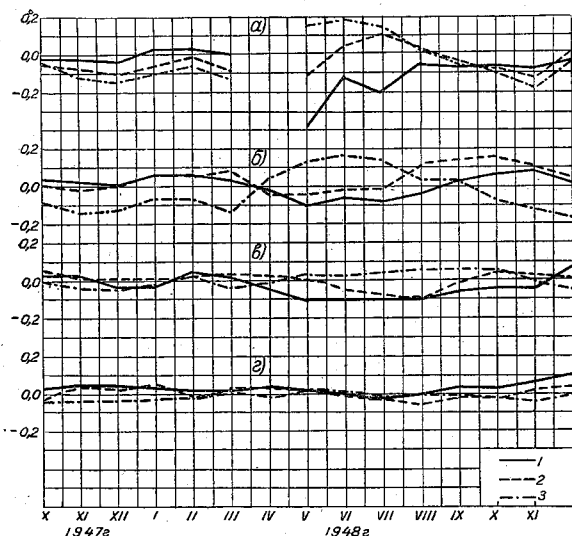


Рис. 3. Разность показаний вытяжных термометров в трубах из разного материала и эбонитовых трубах с октября 1947 г. по ноябрь 1948 г. 1—гетинакс—эбонит; 2—гетинакс—эбонит; 3—дерево—эбонит. а) Глубина  $0,4$  м, б) Глубина  $0,8$  м, в) Глубина  $1,6$  м.

Суточная амплитуда изменения разности показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах в сроки наблюдений в среднем за месяц зимой не превышает  $0,2^\circ$  (март 1948 г.) на глубине  $0,2$  м и  $0,1^\circ$  на глубине  $0,4$  м, а летом достигает на глубине  $0,2$  м  $0,4^\circ$  (июль 1948 г.) и  $0,2^\circ$  (июль 1948 г.) на глубине  $0,4$  м.

Таблица 6

Наибольшие средние месячные разности показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах за время с октября 1947 г. по декабрь 1948 г. (гетинакс—эбонит)

Глубина, м	Разности показаний	
0,2	$+0,11^\circ$ (VII)	$-0,11^\circ$ (V, XI)
0,4	$+0,15$ (X)	$-0,05$ (V)
0,8	$+0,05$ (X)	$-0,09$ (VIII)
1,6	$+0,06$ (I)	$-0,06$ (VIII)

Таблица 7

Наибольшие разности показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах в сроки наблюдений с октября 1947 г. по декабрь 1948 г.

Глубина, м	Разности показаний	
0,2	$+0,7^\circ$ (VI)	$-0,7^\circ$ (III)
0,4	$+0,4$ (III, VIII, IX)	$-0,7$ (V)
0,8	$+0,2$	$-0,2$
1,6	$+0,2$	$-0,2$

4. В отдельные ясные дни суточная амплитуда изменения разности показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах в сроки наблюдений (гетинакс—эбонит) достигает  $0,7-0,8^\circ$  (11 и 12/III, 7/VI и 1/VIII 1948 г.)— на глубине  $0,2$  м и  $0,4-0,5^\circ$  (5—7/VI 1948 г.)— на глубине  $0,4$  м.

5. Наибольшие разности показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах в сроки наблюдений с октября 1947 г. по декабрь 1948 г. приведены в табл. 7.

Из табл. 7 видно, что наибольшая разность показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах в срок наблюдений за период исследований не достигала 1° даже на глубине 0,2 м.

6. Предельные значения температуры почвы на глубине по показаниям вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах отличаются мало, как это можно видеть из табл. 8.

Таблица 8.

Пределы изменения температуры почвы за 1948 г. по показаниям вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах

Глубина, м	Абсолютный максимум			Абсолютный минимум			Амплитуда		
	трубы		раз- ность	трубы		раз- ность	трубы		раз- ность
	гетинак- совые	эбони- товые		гетинак- совые	эбони- товые		гетинак- совые	эбони- товые	
0,2	23,3	23,3	0,0	-9,5	-9,1	-0,4	32,8	32,4	0,4
0,4	18,3	18,3	0,0	-3,1	-3,3	0,2	21,4	21,6	-0,2
0,8	14,0	14,1	-0,1	0,2	0,2	0,0	13,8	13,9	-0,1
1,6	11,2	11,2	0,0	1,5	1,5	0,0	9,7	9,7	0,0

Годовая амплитуда изменения температуры почвы по показаниям вытяжных термометров в гетинаксовых трубах больше на 0,4° на глубине 0,2 м и меньше на 0,2 и 0,1° на глубине 0,4 и 0,8 м, чем по показаниям вытяжных термометров в эбонитовых трубах.

7. Даты перехода температуры почвы через 0° по показаниям вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах, как это видно из табл. 9, при оттаивании почвы весной совпадают, а при замерзании ее отличаются только на глубине 0,2 м, где эта разница составляет 72 часа (трое суток): вытяжной термометр в гетинаксовой трубе отметил переход температуры почвы через 0° на трое суток раньше, чем вытяжной термометр в эбонитовой трубе.

Таблица 9.

Переход температуры почвы через 0° в 1947/48 г. по показаниям вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах

Глубина, м	При замерзании почвы			При оттаивании почвы		
	трубы		разность в часах	трубы		разность в часах
	гетинаксо- вые	эбонито- вые		гетинаксо- вые	эбонито- вые	
0,2	9/II 7 ч.	12/II 7 ч.	72	2/IV 13 ч.	2/IV 13 ч.	0
0,4	12/III 1 ч.	12/III 1 ч.	0	2/IV 19 ч.	2/IV 19 ч.	0
0,8	—	—	—	—	—	—

Характер и величина разностей показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах позволяют считать теплопроводность гетинакса близкой к теплопроводности эбонита. Этим объясняются незначительные (не более 0,7°) разности показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах в сроки наблюдений и практически одна и та же годовая амплитуда изменения температуры почвы на всех глубинах. Разнице в датах перехода температуры почвы через 0° на глубине 0,2 м до трех суток нельзя придавать особого значения как

по указанным выше особенностям начала зимы 1947/48 г., так и по хорошо известным температурным различиям, существующим нередко в верхних слоях почвы на небольших расстояниях по горизонтали.

### Вытяжные термометры в текстолитовых трубах

1. Показания вытяжных термометров в текстолитовых трубах в среднем за месяц выше соответствующих показаний вытяжных термометров в эбонитовых тру-

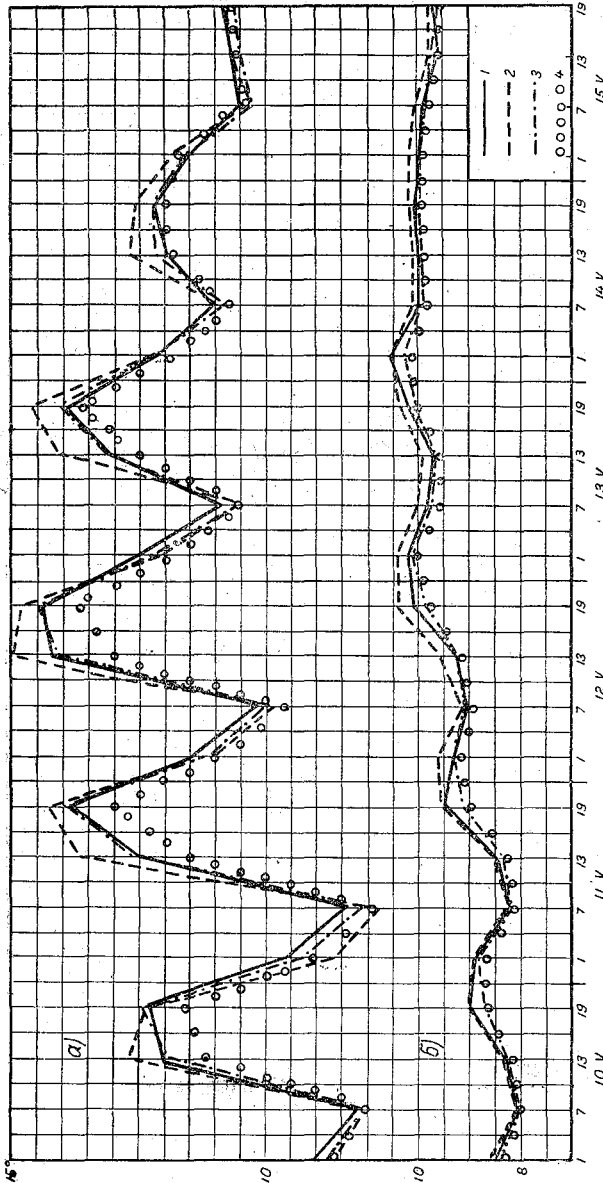


Рис. 4. Температура почвы под оголенной поверхностью на глубине 0,2 м (а) и 0,4 м по вытяжным термометрам в разных трубах из разного материала. С 10 мая по 15 мая 1948 г.  
1 — вытяжной термометр в эбонитовой трубе; 2 — вытяжной в деревянной трубе; 3 — вытяжной в текстолитовой трубе; 4 — в текстолитовой трубе.

бах: на глубине 0,2 м с января по март; на глубине 0,4 м во все месяцы холодного полугодия; на глубине 0,8 м в зимние месяцы с февраля по март и на глубине 1,6 м с сентября по май. Остальные среднемесячные показания вытяжных термометров в текстолитовых трубах ниже, чем эти же показания вытяжных термометров в эбонитовых трубах (рис. 4 и табл. 3 приложения). Амплитуда изме-

нения за год средней месячной разности показаний вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах (текстолит—эбонит) составляет  $0,4^{\circ}$  на глубине 0,2 м,  $0,2^{\circ}$  на глубине 0,4 м и 0,8 м и  $0,1^{\circ}$  на глубине 1,6 м.

2. Наибольшие среднемесячные разности показаний вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах за период исследования (с октября 1947 г. по декабрь 1948 г.) приведены в табл. 10.

Таблица 10

Наибольшие среднемесячные разности показаний вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах с октября 1947 г. по декабрь 1948 г.

Глубина, м	Разности показаний	
0,2	+0,04 (II)	-0,39 (V)
0,4	+0,08 (XI)	-0,10 (V)
0,8	+0,05 (II)	-0,10 (VII, VIII)
1,6	+0,09 (XII)	-0,02 (VII)

Наибольшие положительные разности, не превысившие за период исследования  $0,1^{\circ}$ , отмечены на всех глубинах в месяцы холодного полугодия. Наибольшие отрицательные среднемесячные разности также не более  $0,1^{\circ}$  на всех глубинах, кроме глубины 0,1 м, приходится на месяцы теплого полугодия. Большая отрицательная разность  $-0,39^{\circ}$  на глубине 0,2 м за май 1948 г. объясняется интенсивным повышением температуры почвы во второй и третьей

декадах мая, когда нарастание температуры почвы на глубине 0,2 м от 7-часового к 13-часовому сроку наблюдений нередко достигало  $4-6^{\circ}$ . Все эти случаи сопровождались значительными расхождениями (до  $1^{\circ}$ ) в показаниях термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах в дневной срок наблюдений.

3. Среднемесячные разности показаний вытяжных термометров имеют суточный ход с максимумом в дневной или вечерний сроки наблюдений в месяцы теплого полугодия и в ночной или утренний сроки наблюдений — в месяцы холодного полугодия (табл. 5 приложения).

Таблица 11

Наибольшие разности показаний вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах в срок наблюдений с октября 1947 г. по декабрь 1948 г.

Глубина, м	Разности показаний	
0,2	+0,7 (III)	-1,2 (V)
0,4	+0,5 (III)	-0,6 (VIII)
0,8	+0,2	-0,2
1,6	+0,2	-0,2

Амплитуда суточного хода зимой невелика и составляет несколько сотых градуса, к лету (июль) она возрастает до  $0,4^{\circ}$  на глубине 0,2 м и до  $0,2^{\circ}$  на глубине 0,4 м.

4. В отдельные ясные дни летом амплитуда изменения за сутки разности показаний вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах в сроки наблюдений достигает  $1^{\circ}$  (6 и 8/VI, 10 и 20/VII

1948 г.) на глубине 0,2 м и  $0,3-0,4^{\circ}$  (5 и 6/VI 1948 г.) на глубине 0,4 м.

5. Наибольшие разности показаний вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах в отдельные сроки наблюдений с октября 1947 г. по декабрь 1948 г. достигали, как видно из табл. 11, на глубине 0,2 м: летом  $-1,2^{\circ}$ , зимой  $+0,7^{\circ}$ ; на глубине 0,4 м: летом  $-0,6^{\circ}$ , зимой  $+0,5^{\circ}$ ; на глубине 0,8 м и 1,6 м  $\pm 0,2^{\circ}$ .

Все значительные расхождения в показаниях вытяжных термометров в сроки наблюдений отмечены при значительных же изменениях температуры почвы между этими сроками.

6. Пределы изменения температуры почвы за год (табл. 12) на глубине 0,2 м и 0,4 м по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых трубах меньше, чем по показаниям термометров в эбонитовых, на  $0,5-0,6^{\circ}$ .

Амплитуда уменьшена за счет более низкого абсолютного максимума за год по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых трубах. На глубине 0,8 м

1,6 м годовая амплитуда изменения температуры почвы по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах одинакова.

Таблица 12

Пределы изменения температуры почвы за 1948 г. по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах

Глубина, м	Абсолютный максимум			Абсолютный минимум			Амплитуда		
	трубы		раз- ность	трубы		раз- ность	трубы		раз- ность
	тексто- литовые	эбони- товые		тексто- литовые	эбони- товые		тексто- литовые	эбони- товые	
0,2	22,8	23,3	-0,5	-9,1	-9,1	0,0	32,9	32,4	-0,5
0,4	18,0	18,3	-0,3	-3,0	-3,3	0,3	21,0	21,6	-0,6
0,8	14,1	14,1	0,0	0,2	0,2	0,0	13,9	13,9	0,0
1,6	11,2	11,2	0,0	1,5	1,5	0,0	9,7	9,7	0,0

7. Даты перехода температуры почвы через 0°, отмеченные термометрами в текстолитовых и эбонитовых трубах, приведены в табл. 13. Из нее видно, что на глубине 0,2 м вытяжной термометр в текстолитовой трубе отметил момент перехода температуры почвы через 0° при замерзании почвы на трое суток позже, чем термометр в эбонитовой трубе, и одновременно — при ее оттаивании. На глубине 0,4 м переход температуры через 0° по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых трубах приходится одновременно с показаниями термометров в эбонитовых трубах при замерзании почвы и с опозданием на 18 час. — при ее оттаивании.

Таблица 13

Переход температуры почвы через 0° в 1947/48 г. по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах

Глубина, м	При замерзании почвы			При оттаивании почвы		
	трубы		разность в часах	трубы		разность в часах
	текстоли- товые	эбонито- вые		текстоли- товые	эбонито- вые	
0,2	15/II 13 ч.	12/II 7 ч.	78	2/IV 13 ч.	2/IV 13 ч.	0
0,4	12/III 1 ч.	12/III 1 ч.	0	3/IV 13 ч.	2/IV 19 ч.	18
0,8	—	—		—	—	

Приведенные выше особенности температурного режима почвы по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых трубах указывают на меньшую теплопроводность текстолита по сравнению с теплопроводностью эбонита. По этой причине абсолютный максимум температуры почвы за год по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых трубах ниже, а абсолютный минимум выше, чем у вытяжных термометров в эбонитовых трубах, или одинаков с ним.

Годовая и суточная амплитуда изменения температуры почвы меньше по показаниям вытяжных термометров в текстолитовых трубах, чем по показаниям термометров в эбонитовых трубах.

При рассмотрении материалов сравнительных наблюдений над температурой почвы по показаниям вытяжных термометров в исследуемых и стандартных эбонитовых трубах обращает на себя внимание хорошая согласованность дат перехода температуры почвы через 0° при оттаивании почвы весной.

Термометры во всех трубах, кроме термометра в текстолитовой трубе на глубине 0,4 м, отмечают переход температуры почвы через 0° весной одновременно.

Процесс оттаивания почвы на глубине, как известно, протекает не только за счет притока тепла в почву теплопроводностью, но и за счет тепла, приносимого просачивающейся в почву талой воды.

На почвенной площадке, где были установлены термометры в исследуемых и эбонитовых трубах, последний фактор, повидимому, имел преимущественное значение, сглаживая тем влияние различной теплопроводности труб на показания вытяжных термометров.

Общим также для вытяжных термометров во всех исследуемых трубах является увеличение расхождений в показаниях вытяжных термометров при увеличении изменений температуры почвы от одного срока наблюдений к другому. Иллюстрацией к сказанному служит рис. 4, на котором изображен ход температуры почвы по показаниям вытяжных термометров в трубах из разного материала за период с 10 по 15/V 1948 г. На рисунке можно видеть увеличение расхождений в показаниях вытяжных термометров в трубах из разного материала в 13-часовой срок наблюдений на глубине 0,2 м и в 19-часовой срок наблюдений на глубине 0,4 м, в связи со значительным нарастанием температуры почвы от 7 к 13 час., особенно в дни с резко выраженным суточным ходом температуры почвы, и сближение показаний этих же термометров в утренний срок наблюдений.

В почве с большой теплоемкостью и хорошей теплопроводностью нельзя ждать значительных изменений температуры между сроками и больших вертикальных температурных градиентов даже в верхних слоях почвы (глубина 0,2 и 0,4 м). В таких почвах, повидимому, различная теплопроводность материала труб к вытяжным термометрам будет мало сказываться на показаниях термометров, которые будут сближены между собой.

Для проверки приведенных выше заключений о теплопроводности труб к вытяжным термометрам, сделанных на основании анализа результатов сравнительных наблюдений над температурой почвы по вытяжным термометрам в трубах из разного материала, было проведено определение относительной теплопроводности этих труб в лабораторных условиях. Для этой цели были взяты одинаковой длины (43—45 см) отрезки: деревянной, гетинаксовой, текстолитовой и эбонитовой труб. Каждая из исследуемых труб в паре с эбонитовой погружалась одним концом в песчаную ванну, нагретую до 100—150°С. На другом конце опущенных в ванну труб в специально сделанных для этой цели надрезах, укреплялись спаи одной и той же термопары (константан—медь), присоединенной к гальванометру. По смещению стрелки гальванометра в ту или другую сторону по шкале за 20—25-минутный промежуток времени определялась качественно теплопроводность исследуемой трубы относительно теплопроводности эбонитовой. Полученные этим путем качественные данные об относительной теплопроводности труб к вытяжным термометрам позволяют расположить трубы по убыванию их теплопроводности в следующем порядке: 1—деревянные, 2—эбонитовые, 3—гетинаксовые, 4—текстолитовые.

Таким образом, лабораторное качественное определение относительной теплопроводности исследуемых и эбонитовых труб подтвердили заключения о теплопроводности труб, сделанные ранее по материалам сравнительных наблюдений над температурой почвы по термометрам в трубах из разного материала.

## В ы в о д ы

1. Проведенным исследованием деревянных, гетинаксовых и текстолитовых труб к вытяжным термометрам установлена возможность замены дефицитных эбонитовых труб трубами из другого, недефицитного материала.

2. Исследования показали, что расхождения показаний вытяжных термометров в специально обработанных деревянных, гетинаксовых и текстолитовых трубах с показаниями вытяжных термометров в стандартных эбонитовых трубах в основные сроки наблюдений не превышают по абсолютной величине 2° на глубине 0,2 м, 1°—на глубине 0,4 м, 0,3°—на глубине 0,8 м и 0,2°—на глубине 1,6 м.

3. Расхождения в среднемесячных значениях температуры почвы по показаниям термометров в исследуемых и эбонитовых трубах по абсолютной величине меньше  $0,5^{\circ}$  на глубине 0,2 м и не более  $0,3^{\circ}$  — на глубине 0,4 м,  $0,2^{\circ}$  — на глубине 0,8 м и  $0,1^{\circ}$  — на глубине 1,6 м.

4. Расхождения в показаниях вытяжных термометров в исследуемых и эбонитовых трубах убывают с глубиной, поэтому, не имея параллельных наблюдений над температурой почвы по вытяжным термометрам в трубах из разного материала, установленным на глубине 3,2 м, можно утверждать, что расхождения термометров на этой глубине будут меньше, чем на глубине 1,6 м, т. е. меньше  $0,2^{\circ}$  в сроки наблюдений и не превысят  $0,1^{\circ}$  в среднем за месяц.

5. Расхождения в показаниях вытяжных термометров, установленных в трубах из разного материала, возрастают с увеличением вертикального температурного градиента в почве, а с уменьшением градиента показания термометров сближаются.

6. Причиной расхождений в показаниях вытяжных термометров в трубах из разного материала является различие в их теплопроводности: чем больше теплопроводность труб, тем больше искажающее влияние температуры вышележащих слоев почвы и приземного слоя воздуха на показания вытяжных термометров.

7. Можно считать установленным, что в условиях песчаной почвы различие в теплопроводности материала труб практически не сказывается на показаниях вытяжных термометров, начиная с глубины 1,6 м и ниже.

8. Из исследуемых труб к вытяжным термометрам теплопроводность, наиболее близкую к теплопроводности эбонитовых труб, имеют гетинаксовые трубы, чем и объясняются незначительные расхождения в показаниях термометров в этих трубах. Наибольшую теплопроводность из исследуемых труб имеют деревянные и наименьшую — текстолитовые трубы.

9. В качестве заменителя эбонита для труб к вытяжным термометрам наиболее целесообразно использовать текстолит, обладающий меньшей теплопроводностью, чем эбонит. С применением текстолитовых труб, вместо эбонитовых, у вытяжных термометров уменьшается погрешность в определении температуры почвы на глубине за счет теплопроводности труб.



ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица I

Разность показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах  
в среднем за месяц

(Дерево — эбонит)

Месяц	Глубина, м				Месяц	Глубина, м			
	0,2	0,4	0,8	1,6		0,2	0,4	0,8	1,6
1946 г.					X	-0,04	0,02	-0,01	-0,04
IX	-0,02	0,02	0,01	0,00	XI	-0,12	-0,04	-0,04	-0,03
X	-0,08	-0,04	-0,01	-0,03	XII	-0,14	-0,03	-0,05	-0,03
XI	-0,07	-0,09	-0,06	-0,02	1948 г.				
XII	-0,06	-0,17	-0,09	-0,01	I	-0,10	-0,06	-0,02	-0,03
1947 г.					II	-0,05	-0,06	-0,02	-0,03
I	-0,11	-0,20	-0,02	0,01	III	-0,11	-0,14	-0,04	0,00
II	-0,42	-0,16	-0,01	0,01	IV	—	0,04	-0,01	-0,01
III	0,03	-0,02	-0,01	0,02	V	0,16	0,13	0,04	0,03
IV	0,10	0,06	0,03	0,01	VI	0,19	0,17	0,03	0,02
V	0,13	0,27	-0,02	0,00	VII	0,16	0,14	0,04	-0,02
VI	0,13	0,24	0,12	0,00	VIII	0,03	0,04	0,06	-0,02
VII	0,06	0,16	0,10	0,03	IX	-0,03	0,03	0,05	-0,01
VIII	0,02	0,11	0,06	-0,03	X	-0,10	-0,07	0,05	-0,03
IX	-0,04	0,05	0,05	0,00	XI	-0,18	-0,11	-0,01	-0,04
					XII	-0,02	-0,17	-0,05	0,00

Таблица 2

Разность показаний вытяжных термометров в деревянных и эбонитовых трубах  
по срокам наблюдений  
(Дерево — эбонит)

Месяцы	Значение	Глубина, м									
		0,2				0,4				0,8	1,6
		1	7	13	19	1	7	13	19	13	13
1946 г.											
IX	Средн.	-0,09° 0,1	-0,07° 0,1	0,11° 0,4	-0,04° 0,1	0,03° 0,1	0,00° 0,1	0,03° 0,1	0,02° 0,2	0,01° 0,1	0,00° 0,1
	Наиб.	-0,5	-0,4	—	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	—	-0,1
X	Средн.	-0,16 0,2	-0,15 0,1	0,07 0,5	-0,10 0,1	-0,04 0,1	-0,04 0,2	-0,02 0,1	-0,04 0,1	-0,01 0,1	-0,03 0,1
	Наиб.	-0,7	-0,4	-0,1	-0,4	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1
XI	Средн.	-0,10 0,3	-0,10 0,2	0,01 0,3	-0,10 0,3	-0,09 0,1	-0,10 0,1	-0,10 0,1	-0,07 0,1	—	-0,02
	Наиб.	-0,7	-0,6	-0,3	-0,5	-0,3	-0,3	-0,4	-0,2	-0,1	-0,1
XII	Средн.	-0,10 0,1	-0,09 0,2	0,00 0,2	-0,05 0,2	-0,18 —	-0,16 —	-0,16 —	-0,17 —	-0,09 —	-0,01 0,1
	Наиб.	-0,6	-0,6	-0,3	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,4	-0,2	-0,1
1947 г.											
I	Средн.	-0,17 0,3	-0,12 0,3	-0,04 0,3	-0,11 0,3	-0,21 0,1	-0,21 —	-0,16 —	-0,20 —	-0,02 0,1	0,01 0,1
	Наиб.	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,5	-0,2	-0,1
II	Средн.	-0,50 —	-0,50 0,1	-0,25 0,2	-0,41 0,1	-0,20 —	-0,19 —	-0,10 —	-0,15 —	-0,01 0,1	0,01 0,1
	Наиб.	-1,4	-1,8	-1,2	-1,5	-0,5	-0,7	-0,4	-0,4	-0,1	—
III	Средн.	0,04 0,5	0,04 0,2	0,02 0,2	0,04 0,2	-0,02 0,1	-0,04 0,1	-0,01 0,1	-0,02 0,1	-0,01 0,1	0,02 0,1
	Наиб.	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1
IV	Средн.	0,04 0,2	0,02 0,3	0,18 0,6	0,14 0,5	0,04 0,3	0,05 0,3	0,06 0,3	0,08 0,3	0,03 0,1	0,01 0,1
	Наиб.	-0,1	-0,2	—	-0,1	-0,1	—	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1
V	Средн.	0,04 0,4	0,04 0,3	0,23 0,5	0,22 0,5	0,27 0,4	0,25 0,5	0,27 0,5	0,30 0,6	0,02 0,2	0,00 0,1
	Наиб.	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	—	-0,1	—	—	-0,2	-0,1
VI	Средн.	0,05 0,2	0,04 0,2	0,15 0,5	0,28 0,5	0,21 0,5	0,20 0,4	0,26 0,4	0,29 0,4	0,12 0,2	0,00 0,1
	Наиб.	-0,2	-0,1	-0,1	—	—	—	—	—	-0,2	-0,1
VII	Средн.	0,03 0,3	-0,04 0,1	0,03 0,4	0,24 0,6	0,15 0,5	0,12 0,2	0,18 0,3	0,17 0,4	0,10 0,3	0,03 0,1
	Наиб.	-0,2	-0,3	-0,2	-0,1	—	—	—	—	—	-0,1
VIII	Средн.	0,02 0,2	-0,04 0,2	-0,02 0,2	0,12 0,4	0,07 0,3	0,07 0,2	0,14 0,3	0,16 0,3	0,06 0,2	-0,0 0,1
	Наиб.	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
IX	Средн.	-0,03 0,2	-0,04 0,2	-0,04 0,2	0,07 0,2	0,05 0,2	0,03 0,1	0,07 0,2	0,06 0,2	0,05 0,2	0,00 0,1
	Наиб.	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	—	—
X	Средн.	-0,06 0,2	-0,06 0,2	0,04 0,4	-0,06 0,2	0,02 0,2	-0,01 0,2	0,05 0,3	0,04 0,2	-0,01 0,1	-0,0 —
	Наиб.	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2

Месяца	Значение	Глубина, м									
		0,2				0,4				0,8	1,6
		1	7	13	19	1	7	13	19	13	13
XI	Средн.	-0,12	-0,10	-0,08	-0,17	-0,03	-0,05	-0,04	-0,03	-0,04	-0,03
	Наиб.	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	—	0,1
XII	Средн.	-0,15	-0,14	-0,12	-0,16	-0,03	-0,02	-0,02	-0,06	-0,05	-0,03
	Наиб.	—	—	0,2	—	0,1	0,1	—	—	0,2	0,1
		-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1

1948 г.

I	Средн.	-0,10	-0,10	-0,09	-0,10	-0,07	-0,07	-0,05	-0,05	-0,02	-0,03
	Наиб.	—	—	—	—	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
II	Средн.	-0,03	-0,05	-0,06	-0,07	-0,05	-0,08	-0,03	-0,07	-0,02	0,03
	Наиб.	0,2	—	—	—	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
III	Средн.	-0,24	-0,20	0,10	-0,10	-0,20	-0,16	-0,08	-0,12	-0,04	0,00
	Наиб.	0,3	0,4	0,6	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
IV	Средн.	—	—	—	—	-0,02	0,01	-0,05	0,10	-0,01	-0,01
	Наиб.	—	—	—	—	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	0,1
V	Средн.	-0,34	-0,23	0,55	0,33	0,10	0,07	0,17	0,16	0,04	0,03
	Наиб.	1,0	0,9	1,2	1,3	0,4	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2
VI	Средн.	-0,27	-0,02	0,60	0,45	0,17	0,08	0,14	0,28	0,03	0,02
	Наиб.	0,5	0,7	1,3	0,9	0,5	0,3	0,4	0,5	0,2	0,1
VII	Средн.	-0,35	-0,24	0,70	0,53	0,09	0,15	0,13	0,21	0,04	-0,02
	Наиб.	0,4	0,2	1,2	1,1	0,3	0,5	0,3	0,4	0,1	0,1
VIII	Средн.	-0,29	-0,31	0,49	0,23	-0,04	0,02	0,07	0,09	0,06	-0,02
	Наиб.	0,2	0,3	1,7	1,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,1
IX	Средн.	-0,21	-0,19	0,26	0,02	-0,06	0,00	0,07	0,10	0,05	-0,01
	Наиб.	0,1	0,5	0,7	0,6	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1
X	Средн.	-0,19	-0,18	0,09	-0,11	-0,07	-0,10	-0,06	-0,05	0,05	-0,03
	Наиб.	0,3	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
XI	Средн.	-0,21	-0,21	-0,14	-0,17	-0,12	-0,11	-0,10	-0,10	-0,01	-0,04
	Наиб.	0,1	0,4	0,3	0,3	0,1	—	0,2	0,1	0,1	0,1
XII	Средн.	-0,02	-0,02	0,01	-0,03	-0,17	-0,17	-0,18	-0,17	-0,05	0,00
	Наиб.	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	—	0,1	0,1	0,1	0,1
		-0,2	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,2	-0,1

Разность показаний вытяжных термометров в пластмассовых и эбонитовых трубах в среднем за месяц

Месяц	Гетинакс — эбонит				Текстолит — эбонит			
	глубина, м				глубина, м			
	0,2	0,4	0,8	1,6	0,2	0,4	0,8	1,6

1947 г.

X	-0,05	0,01	0,05	-0,03	-0,02	0,04	0,03	0,03
XI	-0,07	-0,02	0,01	0,04	-0,02	0,03	0,02	0,04
XII	-0,10	-0,01	0,01	0,03	-0,04	0,01	-0,03	0,04

1948 г.

I	-0,06	0,07	0,02	0,06	0,03	0,06	-0,03	0,03
II	-0,01	0,05	0,02	-0,01	0,04	0,07	0,05	0,01
III	-0,07	0,08	0,04	0,03	0,01	0,04	0,02	0,01
IV	—	-0,04	0,03	0,03	—	-0,01	-0,05	0,04
V	-0,11	-0,05	0,01	0,01	-0,39	-0,10	-0,09	0,02
VI	0,05	-0,02	-0,04	-0,02	-0,12	-0,06	-0,09	0,01
VII	0,11	-0,02	-0,08	-0,03	-0,19	-0,08	-0,10	-0,02
VIII	0,04	0,11	-0,09	-0,06	-0,05	-0,05	-0,10	-0,01
IX	-0,06	0,14	0,01	-0,02	-0,07	0,02	-0,05	0,03
X	-0,08	0,15	0,05	-0,02	-0,06	0,06	-0,04	0,02
XI	-0,11	0,11	0,03	0,01	-0,07	0,08	-0,05	0,06
XII	0,01	0,05	0,02	0,04	-0,03	0,01	0,03	0,09

Таблица 4

Разность показаний вытяжных термометров в гетинаксовых и эбонитовых трубах  
по срокам наблюдений  
(Гетинакс — эбонит)

Месяц	Значение	Глубина, м									
		0,2				0,4				0,8	1,6
		1	7	13	19	1	7	13	19	13	13
1947 г.											
X	Средн.	-0,12 0,1	-0,10 0,1	0,05 0,3	-0,04 0,2	0,02 0,2	-0,01 0,1	0,01 0,2	0,03 0,3	0,05 0,2	-0,03 0,2
	Наиб.	-0,4	-0,3	-0,2	-0,3	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1
XI	Средн.	-0,08 0,1	-0,06 0,2	0,06 0,1	-0,07 0,1	-0,02 0,1	-0,03 0,2	-0,03 0,1	-0,02 0,2	0,01 0,1	0,04 0,1
	Наиб.	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1
XII	Средн.	-0,10	-0,10	-0,10	-0,11	0,00	0,00	-0,01	-0,03	0,01	0,03
	Наиб.	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1
1948 г.											
I	Средн.	-0,07	-0,05	-0,05	-0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,03	0,06
	Наиб.	-	0,1	0,1	-	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1
II	Средн.	-0,01 0,1	-0,02 0,1	-0,01 0,1	-0,01 0,1	0,05 0,1	0,05 0,1	0,05 0,1	0,04 0,1	0,02 0,1	0,00 0,1
	Наиб.	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2
III	Средн.	-0,14 0,3	-0,11 0,2	0,08 0,5	-0,08 0,3	0,08 0,4	0,11 0,4	0,10 0,4	0,04 0,3	0,04 0,2	0,03 0,1
	Наиб.	-0,7	-0,7	-0,4	-0,5	-0,1	-0,1	0,2	-0,1	-0,1	-0,1
IV	Средн.	-	-	-	-	-0,04 0,1	-0,02 0,3	-0,04 0,1	-0,05 0,2	0,03 0,2	0,03 0,2
	Наиб.	-	-	-	-	-0,5	-0,3	-0,5	-0,3	-0,1	-0,1
V	Средн.	-0,23	-0,23	-0,11	0,12	-0,08	0,01	0,00	-0,13	0,01	0,01
	Наиб.	-0,3	-0,4	-0,5	-0,2	-0,5	-0,6	-0,3	-0,7	-0,1	-0,1
VI	Средн.	-0,08 0,1	-0,04 0,1	0,06 0,5	0,25 0,7	0,01 0,2	0,02 0,1	-0,03 0,2	-0,07 0,2	-0,04 0,1	0,02 0,1
	Наиб.	-0,3	-0,3	-0,5	-0,3	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1
VII	Средн.	-0,04 0,1	-0,04 0,2	0,17 0,4	0,35 0,6	-0,05 0,1	0,07 0,2	-0,02 0,1	-0,08 -	-0,08 0,1	-0,03 0,1
	Наиб.	-0,3	-0,3	-0,1	-	-0,2	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2
VIII	Средн.	-0,07 0,1	-0,03 0,3	0,07 0,4	0,17 0,6	0,10 0,3	0,16 0,4	0,11 0,4	0,06 0,4	-0,09 -	-0,06 -
	Наиб.	-0,2	-0,2	-0,4	-0,3	-0,2	-	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1
IX	Средн.	-0,04	-0,03	-0,13	-0,04	0,15	0,18	0,14	0,11	0,01	-0,02
	Наиб.	-	0,2	-	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,1	0,1
X	Средн.	-0,04 0,1	-0,07 0,1	-0,12 0,1	-0,08 0,1	0,15 0,3	0,14 0,3	0,17 0,2	0,14 0,3	0,05 0,2	-0,02 -
	Наиб.	-0,2	-0,2	-0,4	-0,2	-0,2	-0,2	-0,4	-	-0,1	-0,1
XI	Средн.	-0,11 0,1	-0,12 -	-0,10 0,1	-0,11 0,1	0,11 0,2	0,07 0,2	0,13 0,2	0,12 0,2	0,03 0,1	0,01 0,1
	Наиб.	-0,5	-0,3	-0,3	0,4	-	-0,1	-	-	-0,1	-0,1
XII	Средн.	0,02 0,2	0,01 0,3	0,00 0,3	0,00 0,2	0,04 0,2	0,06 0,2	0,04 0,2	0,04 0,2	0,02 0,1	0,04 0,2
	Наиб.	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1

Таблица 5

**Разность показаний вытяжных термометров в текстолитовых и эбонитовых трубах  
в сроки наблюдений  
(Текстолит — эбонит)**

Месяц	Значение	Глубина, м									
		0,2				0,4				0,8	1,6
		1	7	13	19	1	7	13	19	13	13
1947 г.											
X	Средн.	0,01	0,00	0,11	0,00	-0,06	0,06	0,09	0,07	0,03	0,03
	Наиб.	0,5	0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
XI	Средн.	-0,03	-0,01	-0,01	-0,02	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04
	Наиб.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
XII	Средн.	-0,04	-0,03	-0,03	-0,06	0,02	0,01	0,01	0,00	-0,03	0,04
	Наиб.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	—	0,2
1948 г.											
I	Средн.	0,03	0,03	0,04	0,02	0,06	0,07	0,07	-0,07	-0,03	0,03
	Наиб.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	—	0,1
II	Средн.	0,05	0,04	0,04	0,04	0,07	0,08	0,07	0,07	-0,05	0,01
	Наиб.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1
III	Средн.	0,02	-0,01	0,06	-0,01	0,01	0,06	0,08	0,01	-0,08	0,01
	Наиб.	0,7	0,4	0,4	0,5	0,3	0,3	0,5	0,3	0,1	0,1
IV	Средн.	—	—	—	—	-0,02	0,01	0,00	-0,03	0,00	0,04
	Наиб.	—	—	—	—	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
V	Средн.	-0,25	-0,27	-0,58	-0,47	-0,14	-0,06	-0,03	-0,18	-0,09	0,02
	Наиб.	0,4	0,3	0,2	—	0,3	0,3	0,1	0,1	—	0,2
VI	Средн.	-0,04	-0,06	-0,22	-0,14	-0,05	-0,03	-0,07	-0,09	-0,09	0,01
	Наиб.	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1
VII	Средн.	0,01	-0,04	-0,38	-0,16	-0,08	0,05	-0,09	-0,20	-0,10	-0,02
	Наиб.	0,2	0,2	—	—	0,1	0,3	0,1	0,2	—	0,1
VIII	Средн.	0,06	0,02	-0,21	-0,07	-0,06	0,00	-0,04	-0,11	-0,10	-0,01
	Наиб.	0,4	0,6	0,3	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
IX	Средн.	0,02	-0,01	-0,24	-0,06	-0,01	0,05	0,06	0,00	-0,05	0,03
	Наиб.	0,2	0,2	—	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1
X	Средн.	-0,02	-0,07	-0,11	-0,06	-0,09	-0,10	0,13	0,11	-0,04	0,02
	Наиб.	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,3	0,1	0,1
XI	Средн.	-0,07	-0,06	-0,06	-0,08	0,09	0,06	0,08	0,10	-0,05	0,06
	Наиб.	0,2	0,1	0,1	0,1	-0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2
XII	Средн.	-0,03	-0,04	-0,02	-0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,03	0,09
	Наиб.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ПОЧВЫ

Понятие „мерзлая“ почва охватывает целый ряд стадий промерзания, начиная от нулевой температуры и кончая каменисто-замерзшим состоянием почвы. Соответственно этому существуют различные критерии для определения перехода почвы из талого состояния в мерзлое и обратно. Можно назвать два основных критерия, охватывающих крайние фазы промерзания: это критерий проф. Сумгина, который предложил считать почву мерзлой, если ее температура ниже нуля, независимо от того, имеется ли в почве вода и в каком количестве, и второй, наиболее часто практически применимый критерий, это — состояние каменисто-замерзшей почвы. Промежуточным критерием является определение мерзлого состояния по появлению в почве мелких кристалликов льда. Соответственно различным определениям понятия „мерзлая“ почва вообще возможно применение самых различных методов определения глубины промерзания, основанных на различных принципах.

Проще всего обстоит дело с метрикой для первого типа определения промерзания, так как в этом случае прибор должен показывать глубину нулевой изотермы, для чего могут быть использованы термометрические методы. Для определения же различных стадий перехода почвенной влаги из жидкого состояния в твердое принципиально возможно использование ряда методов, основанных на происходящем при этом изменении физических констант почвы.

### Экспериментальное исследование различных методов.

С целью выяснения специфики различных методов определения глубины промерзания и степени применимости их для метеорологической метрики, было произведено экспериментальное исследование ряда следующих методов в естественных условиях на опытной площадке ГГО в Лесном.

Метод нулевой изотермы, соответствующий одному из основных критериев определения промерзания почвы. Для этого исследования был сконструирован и изготовлен специальный измерительный прибор, позволяющий определять глубину нулевой изотермы в почве с точностью  $\pm 5$  см по глубине и  $\pm 0,1^\circ$  по температуре. Прибор этот представляет секционированный термометр сопротивления с приемниками температуры, расположенными по одной вертикали на расстоянии 10 см друг от друга. Фотография приемной части прибора приведена на рис. 1. Прибор может иметь две модификации.

Первая модификация — это прибор для непосредственной индикации нуля градусов на различных глубинах почвы. В этом случае на шкале прибора вместо обычных делений имеется в середине шкалы только узкий сектор, положение стрелки в пределах которого означает, что температура на глубине данной катушки приемника равна  $0^\circ$ , положение же стрелки вправо или влево от сектора означает, что температура больше или меньше нуля. Точность определения нуля зависит от ширины нулевого сектора, которую мы, исходя из соображений о точности и чувствительности прибора, выбрали равной  $\pm 0,2^\circ$ .

Вторая модификация — это специализированный почвенный термометр, позволяющий измерять распределение по одной вертикали температур, близких к  $0^{\circ}$ . Шкала прибора имеет нормальные деления и в данном случае была градуирована в пределах  $\pm 3,5^{\circ}$ .

Метод непосредственного измерения сопротивления почвы переменному току. По литературным данным этот метод давал неплохие

практические результаты, технически же он является достаточно простым и удобным в эксплуатации. При изготовлении прибора нами была в основном использована конструкция, предложенная А. И. Зильберманом и др.<sup>1</sup>, с сохранением основных размеров электродов. Приемная часть прибора представляет собою полую штангу из изолирующего материала, на которой через каждые 10 см расположены пары плоскопараллельных электродов из нержавеющей стали. Измерения сопротивления почвы между каждой парой электродов производятся мостом Кольрауша, питаемым от зуммера с трансформаторной схемой включения. Фотография штанги с электродами дана на рис. 2. Ножевидные электроды размером  $30 \times 10$  мм, при расстоянии между ними 20 мм, расположены вертикально, что увеличивает надежность контакта с почвой и уменьшает возможность деформации электродов в процессе промерзания почвы.

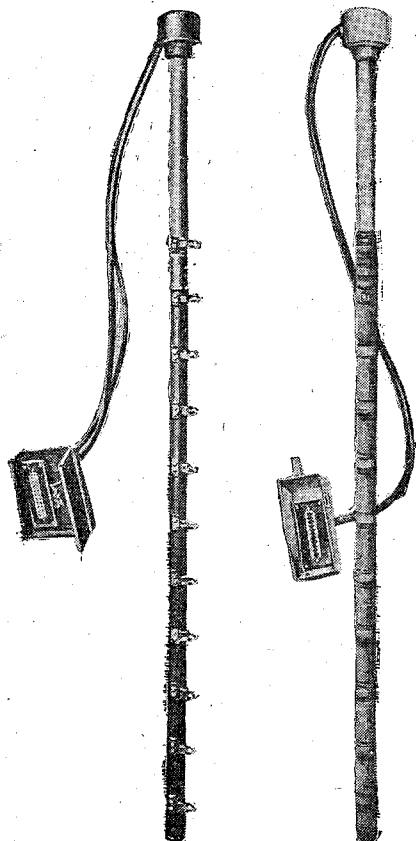


Рис. 1. Приемная часть измерительного прибора.

Рис. 2. Мост Кольрауша. Штанга с электродами.

Мерзлотсмер Данилина. Кроме указанных методов, было произведено исследование мерзлотомера Данилина, ввиду важности выяснения вопроса о возможности применения его для сети метстанций. Прибор этот состоит из полрой наружной трубы из теплоизолирующего материала (типа труб для вытяжных термометров), внутри которой помещена тонкая резиновая трубочка, закрытая по концам и наполненная водой. Прибор устанавливается в почве таким образом, чтобы верхний конец резиновой трубочки совпадал с поверхностью почвы. Глубина

промерзания почвы измеряется длиной участка замерзшей воды в этой трубочке, определяемого прощупыванием пальцами.

Все описанные приборы были установлены в песчаной почве на опытной площадке ГГО; измерения производились ежедневно утром в течение всего периода промерзания — оттаивания 1947—1948 гг.

### Анализ экспериментальных материалов

Исследование прибора для определения глубины нулевой изо-термы дало материал, который интерпретировался двояким образом: во-первых, как данные нуль-индикатора и, во-вторых, как измерения специализированным почвенным термометром. В первом случае для любой исследуемой глубины прибор показывает больше, меньше или равна нулю температура почвы. Соответственно

<sup>1</sup> Зильберман, Любов, Баженов, Наблюдения замерзания и оттаивания почвы методом электропроводности. „Геофизика“, 1, 5, 1935.



выбранной нами ширине нулевого сектора эти три категории температур определялись с точностью  $0,2^\circ$ . Процесс измерения чрезвычайно прост, а применение нулевого метода увеличивает надежность прибора за счет отсутствия дефектов, связанных с возможными изменениями градуировки в процессе эксплуатации.

Использование прибора в качестве специализированного почвенного термометра дало возможность определять величину температуры на различных глубинах. После элементарной обработки полученных данных, заключающейся в построении кривых изменения температуры со временем для различных глубин почвы и определения для каждой глубины момента перехода температуры через нуль градусов, можно было получить определение нулевой изотермы в почве с точностью  $\pm 0,1^\circ$ . Построенная по таким данным термоизоплета почвы для  $T = 0^\circ$  показана на рис. 3.

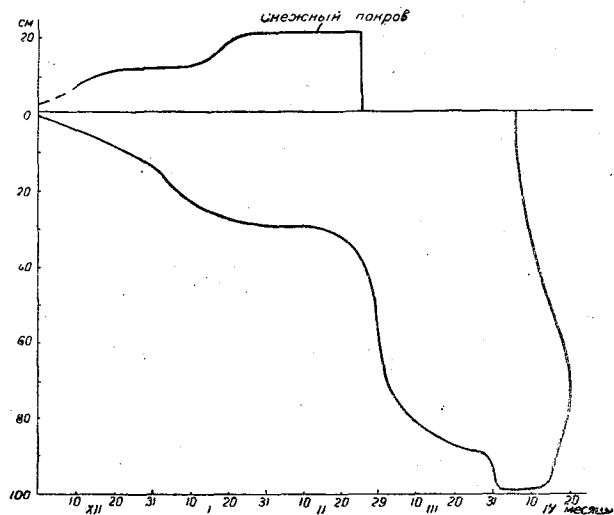


Рис. 3. Термоизоплета почвы  $T = 0^\circ$ .

В качестве иллюстрации возможности дополнительного использования специализированного почвенного термометра на рис. 3 и 4 приводим кривые изменения

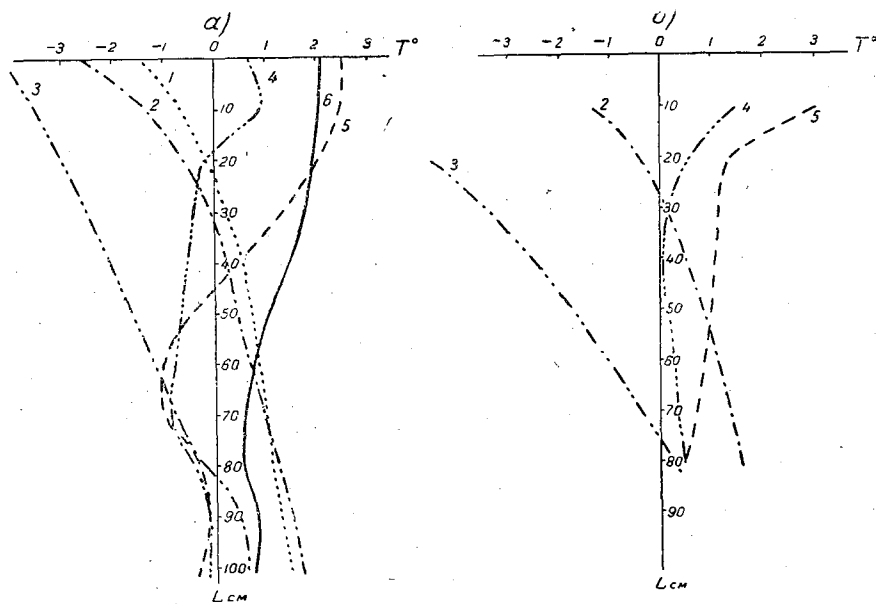


Рис. 4.  $T = f(L)$ .

№	Дата	№	Дата
1	20/I	4	5/IV
2	17/II	5	10/IV
3	20/III	6	15/IV

температуры почвы с глубиной для различных моментов периода промерзания — оттаивание.

На рис. 4 даны два семейства кривых зависимости температуры почвы от глу-

бины. Кривые *a* получены по электрическому термометру, а кривые *b* — по вытяжным термометрам, установленным на той же площадке, но на расстоянии около 2 м от электрического термометра. Между этими семействами кривых имеется принципиальная разница, так как кривые *a* представляют изменение температуры с глубиной по одной вертикали, а кривые *b* построены по данным измерений при разности точек промера для разных глубин по горизонтали на десятки сантиметров. Кроме того, интервалы по вертикали между точками измерений на кривых *a* значительно меньше по величине, а количество точек значительно больше, чем на кривых *b*. Все это приводит к тому, что картина изменения температуры почвы с глубиной, получаемая с помощью специализированного почвенного термометра, имеет значительно более точный и реальный характер, чем картина, полученная по вытяжным термометрам.

Результаты испытаний мерзлотомера Данилина, производившихся в ГГО в Лесном и в Сельцах, а также материалы по испытаниям этого прибора в ряде местных обсерваторий и на метеостанциях показывают, что глубина промерзания почвы, определенная по мерзлотомеру, совпадает с глубиной границы каменисто-замерзшей почвы по данным бурения и рытья ям с точностью до 2—5 см, т. е. в пределах точности контрольных измерений. Однако надо отметить, что такое хорошее и многократное совпадение не имеет принципиального характера. Теоретически глубина промерзания воды в трубочке должна совпадать с глубиной нулевой изотермы в почве, но, повидимому, наличие ряда физических факторов, как, например, циркуляция воздуха в наружной трубе, воды в резиновой трубке и т. п., приводит к нарушению соответствия между распределением температуры в почве и в приборе. Поэтому только при условии строгой стандартизации всех конструктивных данных прибора можно ожидать однозначности его показаний. Неоднородность естественных условий, как, например, резкое различие в типе и характеристиках почвы, вообще говоря, тоже может вызвать несоответствие между показаниями прибора и границей каменисто-замерзшей почвы.

Однако, судя по результатам испытаний в различных местностях, эти расхождения не выходят за пределы точности контрольных измерений.

С началом процесса оттаивания почвы было замечено появление погрешностей в определении глубины промерзания и оттаивания, повидимому связанное с возможностью всплывания льда в резиновой трубочке. Так как испытания прибора были начаты в середине зимы, т. е. в феврале, то трудно сказать, какие результаты может давать мерзлотомер при малых глубинах промерзания (для этой цели нужны еще дополнительные испытания). Вообще же можно ожидать, что встретившиеся при испытаниях дефекты могут быть легко уничтожены при небольшой конструктивной доработке прибора, после чего мерзлотомер Данилина по предельной простоте своей конструкции и процесса измерений, без сомнения, сможет найти широкое применение на сети метеостанций.

Измерение электросопротивления почвы на различных глубинах дало несколько неожиданную картину изменения его в течение периода промерзания — оттаивания. При лабораторных измерениях сопротивления почвы и в наших работах и по литературным данным всегда получалось резко выраженное изменение электросопротивления при переходе почвы из области отрицательных температур в положительные и обратно. Эти изменения выражены настолько резко, что рядом авторов было предложено использовать величины электросопротивления в качестве показателя мерзлого состояния почвы. Так, А. И. Зильберман для своего прибора дает в качестве критерия мерзлого состояния почвы величину сопротивления, превышающую значение 7000 ом. Реальная же картина изменения электросопротивления почвы в естественных условиях показана на рис. 5. На графике по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — величины сопротивления в логарифмическом масштабе. Прежде всего обращает на себя внимание резкое различие в величине сопротивления на разных глубинах от значений  $10^3$  до  $10^5$  ом в начале процесса исследования, т. е. до начала промерзания почвы. (Возможность влияния плохого электрического контакта между почвой и поверхностью электродов на

величину сопротивления в данном случае была исключена поверочными измерениями: специальным контрольным прибором.) Затем форма кривых далеко не соответствует ожидаемому ходу изменения сопротивления в процессе промерзания. За период ноябрь — март кривые сопротивления неоднократно проходят через максимум и минимум. Сопоставляя эти кривые с кривой изменения температуры воздуха, замечаем некоторый синхронизм между периодами положительной температуры воздуха (т. е. сильного таяния) и минимумами электросопротивления с небольшим сдвигом во времени в сторону запаздывания минимума для более глубоких слоев почвы. Повидимому, в данном случае фактором, оказывающим наиболее явное, общее для всех глубин и закономерное влияние, является изменение влажности почвы, в верхних слоях — за счет влаги, поступающей с поверхности, а в нижних — за счет колебания уровня грунтовых вод. Изменения же сопротивления под влиянием про-

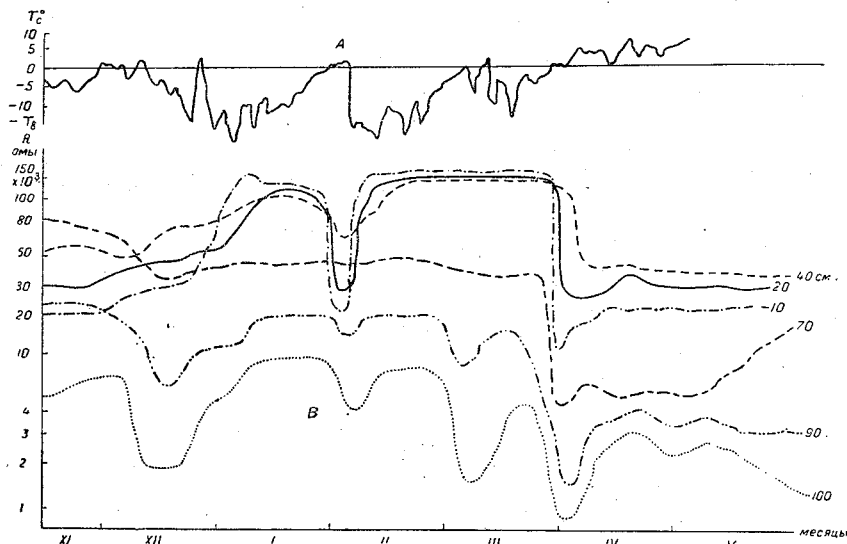


Рис. 5.  $T_{\text{возд}} = f(t)$ ;  $R = f(t)$ .

мерзания и оттаивания, без сомнения, также имеют место, но они имеют менее определенный характер, благодаря усложняющему влиянию дополнительных факторов и, в первую очередь, — влажности.

Большой разброс по величине сопротивлений почвы в талом состоянии (от 1000 до 150 000 ом) не дает возможности выбора критерия промерзания по абсолютной величине сопротивления. Выбор же в качестве критерия относительной величины изменения сопротивления затрудняется тем, что эти изменения в различных слоях почвы очень различны, меняясь от пятикратного значения начального сопротивления до незначительного изменения на 50—60%.

Полученные экспериментальные материалы свидетельствуют о чрезвычайно сложной картине изменения электросопротивления почвы в естественных условиях, в значительной степени отличающейся от картины, получаемой в лабораторной обстановке. Все исследования сопротивления почвы при ее промерзании или оттаивании в лабораторной обстановке обычно производились при некоторой постоянной увлажненности. При этом получается вполне определенная для данного типа почвы и для данных условий измерения зависимость сопротивления от фазы почвенной влаги, которая, в свою очередь, при фиксированных условиях является функцией только температуры. В естественных же условиях почва находится в режиме переменной влажности, определяемом поступлением влаги с поверхности почвы и уровнем грунтовых вод. Этот режим может вносить значительные изменения в нормальный ход температуры на различных глубинах, нарушая этим нормальный процесс замерзания и связанные с ним изменения электросопротивления почвы. Кроме косвенного

влияния через изменение температуры, изменения влажности непосредственно влияют на величину электросопротивления почвы. Таким образом, электросопротивление почвы в естественных условиях является функцией нескольких переменных, причем разграничить влияние этих переменных во многих случаях весьма затруднительно. Поэтому метод электросопротивления для определения глубины промерзания почвы может применяться только в тех случаях, когда при условиях измерений можно пренебречь переменными факторами, имеющими место параллельно процессу промерзания, как, например, при исследовании мощных слоев почвы при измерении вечной мерзлоты. Для метеорологических же наблюдений, объектом которых являются верхние слои почвы, применение метода электросопротивления нецелесообразно.

Возможно, что характер почвы, в которой производились исследования и, с другой стороны, особенности зимы 1947/48 г. с обильными снегопадами и периодами значительного таяния снега создали благоприятные условия для значительных изменений влагосодержания почвы. Поэтому влияние влажности на величину электросопротивления почвы могло оказаться несколько утрированным по сравнению с влиянием процесса промерзания и оттаивания. Возможно, что в условиях другого грунта и другой погоды картина получилась бы более благоприятной для характеристики метода электросопротивления, однако эти обстоятельства никаких принципиальных изменений не вносят.

### Сравнение методов

Для сопоставления исследованных методов основные полученные результаты совмещены на одном общем графике рис. 6. Здесь показаны термоизоплеты для  $0^\circ$  и  $-0,6^\circ$ , полученные по

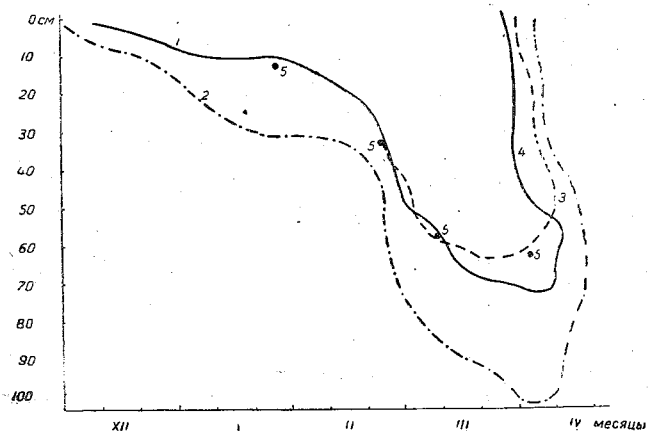


Рис. 6.

1 — термоизоплета  $T=0^\circ$ ; 2 — термоизоплета  $T=-0,6^\circ$ ; 3 — глубина промерзания по мерзлотометру Данилина; 4 — глубина оттаивания по мерзлотометру Данилина; 5 — граница каменисто-замерзшего грунта по данным бурения.

специализированному почвенному термометру, кривые глубины промерзания и оттаивания по мерзлотометру Данилина и отдельными точками указана граница каменисто-замерзшего грунта по данным бурения. Приводимые кривые показывают, что граница каменисто-замерзшего грунта довольно точно совпадает с глубиной промерзания по мерзлотометру Данилина и лежит на 20—40 см ниже нулевой изотермы; кроме того, показания мерзлотометра близки к глубине изотермы почвы для  $-0,6^\circ$ . С началом интенсивного таяния на поверхности почвы в апреле, когда процесс промерзания почвы на глубинах 60—80 см еще продолжается, что показывает ход термоизоплет для  $0^\circ$  и  $-0,6^\circ$ , мерзлотометр Данилина начинает показывать уменьшение глубины промерзания, и кривая глубины промерзания по мерзлотометру значительно расходится с термоизоплетой для  $-0,6^\circ$ . Появление расхождений совпадает с началом оттаивания льда в резиновой трубке и возможным всплыванием его кверху.

Материалы по методу электросопротивления при построении графика рис. 6 вообще не были использованы, ввиду выяснившейся невозможности выбора конкретного критерия для определения границы промерзания этим методом.

## Выводы

На основании проделанного экспериментального исследования в естественных условиях различных методов определения глубины промерзания почвы можно сделать следующий общий вывод.

Повидимому, наиболее „однозначно“ указывающими процесс промерзания и оттаивания почвы являются методы „температурного“ типа, которые могут быть применены не только к определению перехода температуры почвы через нуль градусов, но и на базе соответствующих экспериментальных исследований для определения любой другой стадии промерзания.

Использование же изменения физических констант почвы в большинстве случаев будет приводить к неоднозначному решению вопроса, так как эти изменения могут быть связаны не только с качественными (переход из одной фазы в другую), но и с количественными изменениями почвенной влаги.

## К ВОПРОСУ О ВВЕДЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЛОЩАДКАХ СЕТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

На метплощадках гидрометсети для установки приборов употребляются деревянные столбы и подставки, между тем в районах, где отсутствует лес (полярные, степные, пустынные, высокогорные районы), целесообразнее применять металлические установки. Эти установки к тому же долговечны и не требуют периодической смены; прочность их позволяет значительно уменьшить размеры диаметров столбов, ножек, подставок, лесенок, столбов ограды и т. п. и ввести в их конструкцию большую легкость (ажурность). Это приведет к меньшему искажению ветрового режима на метплощадке, а в зимнее время — и к меньшему нарушению равномерности в залегании на ней снежного покрова. При массовом заводском изготовлении стоимость металлических установок будет меньше деревянных.

Отсюда следует, что металлические установки можно предпочесть деревянным также и в районах, где дерево не является дефицитом.

Конструкторским бюро ГГО были разработаны и установлены в 1948 г. для испытания на аэрометстанции Воейково опытные образцы металлических установок: мачты для установки флюгера, подставки под психрометрическую будку и будку для самописцев, лесенки к ним, подставки под дождемер, столбик для нефоскопа.<sup>1</sup>

Испытание металлических установок вообще сводилось к проверке удобства их эксплуатации в летнее и зимнее время; испытание же металлической подставки и лесенки для психрометрической будки требовало особого внимания, так как необходимо было проверить, не будет ли наблюдаться влияние их на температуру внутри будки, имея в виду различие радиационных и теплопроводных свойств металлической и деревянной подставок.

С этой целью летом 1948 г. (июль и до 10 августа) проводились одновременные наблюдения по трем психрометрическим будкам, из которых две (основная и запасная) были на деревянных подставках и с деревянными лесенками, а третья — на металлической подставке и с металлической лесенкой. Все три будки стояли рядом: запасная — в 5 м к западу от основной, будка на металлической подставке — в 5 м к западу от запасной.

Металлические подставка и лесенка в основных частях были изготовлены из круглого железа (водопроводные трубы с внешним диаметром  $3\frac{1}{2}$  см) по образцу деревянных, принятых на сети.

Испытание было ограничено дневным временем, проводилось в промежутке от 10—11 час. (в некоторых случаях от 7 час.) и до 15—16 час. и заключалось в основном в производстве одновременных отсчетов температуры по сухим и максимальным термометрам трех будок. В солнечные дни отсчеты производились ежедневно, в другие дни — большей частью через два часа.

<sup>1</sup> Несколько ранее металлические подставки под будки и металлические мачты для флюгеров были применены на ряде станций сети Азербайджанского УГМС.

Для решения вопроса о различии в наступлении времени максимума температуры имелись суточные термографы в трех будках для самописцев, из которых одна была с металлической подставкой и лесенкой.

Кроме отсчетов термометров, производились еще наблюдения над скоростью ветра по ветромеру Третьякова (установленному на высоте 2 м на основной площадке), отмечались количество общей и нижней облачности и знак солнечного сияния. Для характеристики дня в отношении солнечного сияния использовалась и запись гелиографа.

При испытании были созданы однородные условия установки будок: перед испытанием все будки и деревянные подставки к ним были вновь покрашены белой масляной краской, поверхность почвы под будками была покрыта достаточно однородным травяным покровом (молодые всходы газона). Хотя отсчеты производились лишь по сухим и максимальным термометрам, запасная будка и будка на металлической подставке были снабжены тем же полным набором приборов, какой имела основная будка, что обеспечивало одну и ту же термическую инерцию внутри будок (из этого же соображения и в будках для самописцев, где использовались только записи термографа, были установлены также и гигрографы, как и в основной будке для суточных самописцев).

Таким образом, можно было считать, что установки будок различались лишь подставками и лесенками, которые для первых двух будок были деревянные, для третьей — металлические.

Для усиления эффекта влияния металлическая подставка и лесенка под третьей будкой были оставлены неокрашенными и имели темнокоричневый цвет ржавого железа.

Целью одновременных отсчетов по термометрам основной и запасной будок было получение величин возможных расхождений между термометрами, находящимися в двух совершенно одинаковых и рядом стоящих будках; эти величины должны были служить критерием при оценке разностей, полученных при сопоставлении показаний термометров в будках, различающихся подставками.

Погода в период испытаний оказалась недостаточно благоприятной. Наиболее благоприятными днями для испытания нужно считать дни с высокой температурой, ясные и тихие, так как очевидно, что если влияние металлической подставки на температуру внутри будки имеется, то наиболее должно сказаться оно именно в такие дни, а если оно в эти дни не обнаружится, то тем более не обнаружится оно в пасмурные и дни с переменной облачностью.

Хотя ясных (солнечных) дней для периода наблюдений с 10—11 до 15—16 час. оказалось достаточно, но жаркие и притом одновременно тихие дни были лишь случайны. Среднемесячная температура в июле была  $18,5^\circ$ , максимальная —  $23,4^\circ$ ; с 1 по 10/VIII средняя температура была  $18,5^\circ$ , максимальная —  $26,0^\circ$ ; наблюдений со слабым ветром (по ветромеру Третьякова  $\leq 1,5$  м/сек.) за весь период было всего 11, из них одновременно и солнечных (ясных) — всего 5.

Основные выводы испытания приводятся в нижеследующих таблицах, в которых приняты следующие условные обозначения:  $B_1$  — основная будка;  $B_2$  — запасная будка;  $B_3$  — будка на металлической подставке;  $\Delta$  — разность;  $\Delta(B_2 - B_1)$  — разность одновременных отсчетов сухих термометров запасной и основной будок;  $\Delta(B_2 - B_3)$  — то же запасной и будки на металлической подставке.

Как видно из табл. 1, разности  $\Delta(B_2 - B_3)$  — того же порядка, что и разности  $\Delta(B_2 - B_1)$ , и находятся в пределах точности измерений; лишь в единичных случаях разности  $\geq 10,4$ . Однако эти случаи сравнительно больших разностей вызывают сомнение, так как они не подтверждаются (почти во всех случаях) или вторыми контрольными отсчетами, или другими ближайшими по времени наблюдениями и скорее должны быть отнесены за счет неточности отсчетов.

Таблицы 1а и 1б показывают, что при более высоких температурах (соответствующих всегда солнечным дням) и при переходе от утра к послеполудню (тоже в солнечные дни) не происходит увеличения разностей  $[\Delta(B_2 - B_3)]$ , что имело бы место при наличии влияния металлической подставки.

Повторяемости различных значений разностей  $\Delta (B_2 - B_1)$  и  $\Delta (B_2 - B_3)$ 

	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	Число случаев
$\Delta (B_2 - B_1) \dots$	-	-	-	-	1	2	3	10	22	43	10	2	1	1	1	1	1	97
$\Delta (B_2 - B_3) \dots$	1	-	1	-	1	1	11	24	39	10	7	1	-	-	-	-	1	97

Таблица 1а

При температурах сравнительно низких ( $t \leq 17^\circ$ ) и сравнительно высоких ( $t \geq 20^\circ$ )

а) $t \leq 17^\circ$																			
$\Delta (B_2 - B_1) \dots$	-	-	-	-	-	-	-	1	6	12	-	-	-	-	-	-	-	19	
$\Delta (B_2 - B_3) \dots$	-	-	-	-	-	-	-	1	7	9	2	-	-	-	-	-	-	19	
б) $t \geq 20^\circ$																			
$\Delta (B_2 - B_1) \dots$	-	-	-	-	-	-	6	7	3	3	-	-	-	-	-	-	-	19	
$\Delta (B_2 - B_3) \dots$	-	-	-	-	1	-	1	6	8	1	2	-	-	-	-	-	-	19	

Таблица 1б

Для утренних наблюдений и наблюдений после полудня (соответствующих максимальным температурам) в солнечные дни

Утро																				
$\Delta (B_2 - B_1)$	-	-	-	-	-	-	1	3	3	9	4	-	-	-	-	-	-	-	23	
$\Delta (B_2 - B_3)$	-	-	-	-	-	-	4	5	7	2	5	-	-	-	1	-	-	-	23	
После полудня																				
$\Delta (B_2 - B_1)$	-	-	-	-	-	-	-	3	8	10	2	-	-	-	-	-	-	-	23	
$\Delta (B_2 - B_3)$	-	-	-	-	1	-	2	6	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	

Примечание В табл. 1б входят случаи, когда температура после полудня была выше, чем до полудня, более чем  $1^\circ$ .



Таблица 2

Средние значения разностей  $\Delta(B_2-B_1)$  и  $\Delta(B_2-B_3)$  для различных группировок по условиям погоды

Группировки	Число случаев	$\Delta(B_2-B_1)$	$\Delta(B_2-B_3)$	Примечание
Все случаи наблюдений	97	0,2	0,1	—
Солнечные дни . . . . .	62	0,2	0,1	Солнце светило непрерывно с утра и до конца наблюдений
Смешанные дни . . . . .	25	0,2	0,1	Переменная облачность
Пасмурные дни . . . . .	10	0,2	0,1	—
Дни со слабым ветром . . . . .	11	0,2	0,1	По ветромеру Третьякова на высоте 2 м 1,5 м/сек.
Дни со слабым ветром и при этом солнечные	5	0,2	0,1	Условия погоды случаев 2 и 5

Как видно из табл. 2, величины разностей не зависят от той или другой группировки по условиям погоды также и для  $\Delta(B_2-B_3)$ , что имело бы место при наличии металлической подставки.

Сравнительное рассмотрение лент термографов трех будок не обнаружило никаких отклонений для термографа, находящегося в будке с металлической подставкой, то сравнению с термографами, находящимися в будках с деревянными подставками.

Подводя итоги, имеем:

1) малые значения разностей (лежащие в пределах точности измерений) между показаниями термометров в будке с деревянной подставкой и в будке с металлической подставкой (даже для наиболее невыгодного случая непокрашенных подставок) и одинаковый их порядок с разностями между двумя будками на деревянных подставках;

2) единичные случаи сравнительно больших разностей  $\geq |0,4|$ , встречающиеся как среди  $\Delta(B_2-B_3)$ , так и среди  $\Delta(B_2-B_1)$ , следует рассматривать как случайные;

3) величины разностей не зависят от условий погоды и различия в сроках наблюдений, как наиболее благоприятных для получения больших разностей (например, солнечный день, после полудня и т. д.), так и наименее для этого благоприятных (например, пасмурный день, утро и т. д.).

Эти результаты позволяют сделать вывод, что в условиях погоды ст. Воейково металлические подставки и лесенки не оказывают влияния на показания термометров внутри будок.

Вывод, полученный метстанцией Воейково ГГО, подтверждается выводом, сделанным на основании оказавшихся в нашем распоряжении материалов наблюдений метстанции Маштаги Азербайджанского УГМС. На метстанции Маштаги летом 1948 г. в течение мая, июня и июля производились в основные сроки одновременные наблюдения по двум будкам: основной — на деревянной подставке, учебной — на металлической (покрашенной в белый цвет).

Материал наблюдений ст. Маштаги представляет интерес потому, что погода там характеризовалась значительно более высокими температурами. Так, средняя температура июля на ст. Маштаги была  $29,4^\circ$ , а в Воейково  $18,5^\circ$ , максимальная доходила до  $39,2^\circ$ , в Воейково — до  $26,0^\circ$ .

Недостаточно благоприятным условием для испытания металлической подставки а ст. Маштаги была наблюдающаяся здесь повышенная скорость ветра.

Приведем основные данные, полученные из материалов наблюдений ст. Маштаги.



Из табл. 3 следует, что и на ст. Маштаги наблюдались лишь единичные случаи, когда разности  $\Delta(B_1 - B_2)$  выходили за пределы точности измерений. Несколько менее чегок результат для 13 час.

Из табл. 4 следует, что и в случаях, наиболее благоприятных для получения больших разностей, они только в единичных случаях выходят за пределы точности измерений.

Рассмотрение отдельных случаев, дающих величины  $\geq |0,4|$ , показывает, что и на ст. Маштаги большие значения  $\Delta$  надо рассматривать как случайные.

Таблица 5

Число случаев разности $\Delta_{13} - \Delta_1$ , % .	< 0	= 0	> 0
Повторяемость знака разности, % .	43	12	45

В табл. 5 приняты обозначения:

$\Delta_{13}$  — разность одновременных отсчетов термометров первой и второй будок в 13 час.;  $\Delta_1$  — соответственно — в 1 час.

Табл. 5 показывает, что знаки разности  $\Delta_{13} - \Delta_1$  как  $> 0$ , так и  $< 0$  равно-возможны. Наличие же влияния металлической подставки на температуру внутри будки должно было сказаться на преобладании одного знака.

Приведенные результаты испытаний как на ст. Воейково ГГО, так и на ст. Маштаги Азербайджанского УГМС, существенно отличающихся по климатическим условиям, позволяют сделать вывод об отсутствии влияния металлических подставок на температуру внутри будки и, следовательно, о возможности заменять ими деревянные подставки.

## О ТОЧНОСТИ ПОВЕРКИ РУЧНЫХ АНЕМОМЕТРОВ

Настоящая статья имеет целью осветить вопрос о точности поверки ручных анемометров по методу ГГО, опубликованному в „Руководстве по поверке метеорологических и аэрологических приборов“.

Под точностью поверки ручных анемометров следует понимать точность результатов их тарирования в аэродинамической трубе в виде графической зависимости показаний анемометра и скоростей воздушного потока, измеряемых эталоном. На основании этой зависимости составляется таблица соответственных значений скоростей, которая приводится в поверочном свидетельстве анемометра.

Характеристика точности данных поверки необходима не только при суждении о годности прибора. Любой потребитель для правильного применения анемометров при изучении ветра должен иметь представление о той погрешности, которую он вносит, пользуясь результатами тарирования.

### Условия исследований

Исследование точности поверки ручных анемометров производилось в аэродинамической трубе Центрального бюро поверки метприборов при Главной геофизической обсерватории в Ленинграде в 1948 г.

Аэродинамическая труба ЦБП — разомкнутого типа. Сечение трубы восьмигранное с диаметром в рабочем пространстве в 1 м. Скорость потока можно непрерывно изменять в пределах от

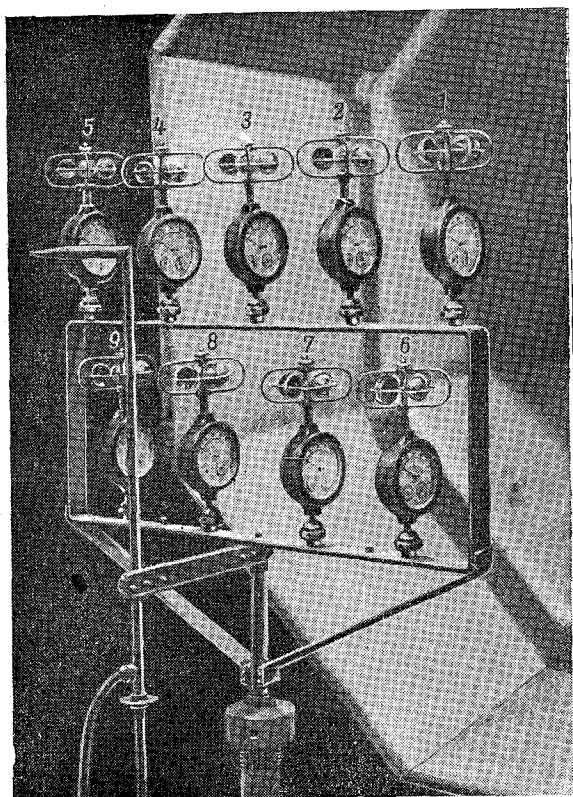


Рис. 1.

0,2 до 18 м/сек. Пульсация трубы незначительна, и ее можно считать практически несущественной. Скорости до 11 м/сек. измеряются микроанометром с углом наклона трубки в  $3^\circ$  (типа Розенмюллера), свыше 11 м/сек. — микроанометром с углом наклона трубки около  $7^\circ$  (типа ЦАГИ). Оба микроанометра работают от конусообразной комбинированной пито-статической трубки.

Точность поверки исследовалась при установке анемометров по-одному и группой, по 9 штук сразу.

При поверке анемометров по-одному пито-статическая трубка крепилась на расстоянии 16,5 см в сторону от анемометра, причем приемная часть находилась на уровне его чашек. Установка монтировалась в центральной плоскости рабочего поля трубы при симметричном расположении трубки и прибора по отношению к центру.

При групповой поверке анемометры устанавливались на специальной рамке (рис. 1) длиной 50 см, шириной 3 см и высотой 20,5 см. Расстояние между центрами цапг для крепления анемометров на этой рамке — 11 см. Пито-статическая трубка располагалась впереди анемометров на 16,5 см от рамки. Центр рабочего поля трубы проходил между осями трубки и анемометров.

Включение и выключение арретиров при поверке анемометров по-одному производилось при помощи веревочек, воздушный поток при этом не нарушался. При групповой поверке наблюдатель включал и выключал приборы последовательно в строго установленном порядке рукой, занося ее в поток максимум на 4—5 сек.

### Оценка ожидаемой суммарной ошибки поверки ручных анемометров

Процесс поверки ручных анемометров сводится к определению зависимости между показаниями приборов и истинной скоростью воздушного потока. Поэтому суммарная ошибка будет складываться из погрешностей в измерении скорости, с одной стороны, и погрешностей в показаниях анемометров, связанных с условиями их эксплуатации в аэродинамической трубе, — с другой. Разберем указанные погрешности в отдельности.

**Погрешности в измерении скорости воздушного потока.** Как известно, для определения скорости потока при помощи комбинированной пито-статической трубки и микроанометра пользуются формулой:

$$v = k \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент пито-статической трубки,  $(p_2 - p_1)$  — разность давлений, замеряемая микроанометром,  $\rho$  — плотность воздуха.

Если воспользоваться зависимостью между измеряемой разностью давлений и разностью отсчетов по шкале трубки микроанометра, наклоненного под углом  $\alpha$ , то формулу (1) для определения скорости воздушного потока можно написать так:

$$v = k \sqrt{\frac{2(l_1 - l_0) \gamma \sin \alpha}{\delta}}, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент пито-статической трубки,  $(l_1 - l_0)$  — разность отсчетов по шкале микроанометра,  $\alpha$  — угол наклона трубки микроанометра,  $\rho$  — плотность воздуха,  $\gamma$  — плотность спирта.

В связи с приведенными формулами точность измерения скорости воздушного потока будет в основном обуславливаться точностью измерения разности давлений применяемыми приборами, т. е. точностью пито-статической трубки и микроанометров.

Возможные погрешности в измерении скорости пито-статической трубкой. Хотя коэффициент пито-статической трубки, применяющейся в ЦБП, по сравнению с эталоном равен единице, что указывает на ее высокие конструктивные качества, однако международного стандарта на такого рода прибор до сих пор не существует. По литературным же данным известно, что погрешность в измерении скорости конусообразной трубкой, по форме и размерам подобной применяющейся в ЦБП, не превосходит 0,3% от замеряемой скорости. Указанная точность вполне достаточна для поверки анемометров.

Для выяснения степени точности установки трубки в потоке при заданном направлении скорости в лаборатории ЦБП был проведен специальный опыт по выявлению влияния угла между направлением скорости потока и осью трубки на определяемую величину скорости (при скорости 10 м/сек.). Результаты приведены на рис. 2, где по оси абсцисс графика отложены углы отклонения оси трубки от направления потока, по линии ординат — отношение  $\frac{v_\theta}{v_0}$ , где  $v_\theta$  — скорость, определенная по трубке при угле поворота  $\theta^\circ$ , а  $v_0$  — скорость при параллельном положении оси трубки. График показывает, что это отношение все время растет с увеличением испытываемых углов, и при угле  $15^\circ$  максимальная ошибка может быть равна  $2,6\%$  от замеряемой скорости.

На практике, при установке оси трубки параллельно воздушному потоку на глаз, ошибка будет меньше  $5^\circ$ , что в определении скорости вызовет погрешность ниже  $0,4\%$ .

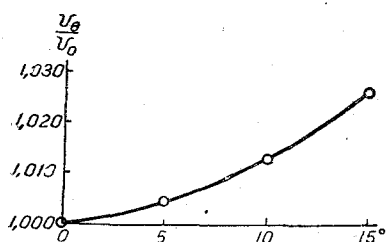


Рис. 2.

Возможные погрешности в измерении скорости воздушного потока применяемыми микроанометрами. Как упомянуто выше, скорость воздушного потока определяется по разности давлений, которая создается в пито-статической трубке и замеряется жидкостным микроанометром. Следовательно, погрешность в измерении разности давлений позволит определить возможную погрешность и в измерении скорости.

Ошибку в измерении скорости микроанометрами можно определить на основании известной зависимости между измеряемой разностью давлений и разностью отсчетов по шкале трубки микроанометра, наклоненной под углом  $\alpha$ .

Эта зависимость имеет вид:

$$p_2 - p_1 = [\gamma(l_1 - l_0) \sin \alpha] + H\gamma, \quad (3)$$

где  $\gamma$  — удельный вес спирта-ректификата, которым наполняется микроанометр,  $l_1$  — отсчет микроанометра при наличии измеряемой разности давлений,  $l_0$  — отсчет микроанометра, соответствующий положению уровня спирта при отсутствии давления,  $\alpha$  — угол наклона трубки микроанометра,  $H$  — перемещение уровня жидкости в сосуде, равное  $(l_1 - l_0) \frac{F_1}{F_2}$ , где  $F_1$  и  $F_2$  — площади сечений трубки и сосуда микроанометра.

В соответствии с указанной зависимостью относительная погрешность в измерении разности давлений будет:

$$\frac{\Delta(p_2 - p_1)}{p_2 - p_1} = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta(l_1 - l_0)}{l_1 - l_0} + \frac{\Delta \sin \alpha}{\sin \alpha} + \frac{H\gamma}{[\gamma(l_1 - l_0) \sin \alpha]}. \quad (4)$$

При помощи этой формулы была высчитана относительная ошибка в измерении разности давлений применительно к параметрам микроанометров для проверки ручных анемометров, а именно:

У микроанометра, применяемого для измерения скоростей до 11 м/сек.:

синус угла наклона трубки микроанометра . . . . .	0,0523
точность отсчета по шкале . . . . .	0,25 деления
отношение площади сечения трубки и площади сечения сосуда . . . . .	1/900

У микроанометра, применяемого для измерения скоростей свыше 11 м/сек.:

синус угла наклона трубки микроанометра . . . . .	0,125
точность отсчета по шкале . . . . .	0,50 деления
отношение площади сечения трубки и площади сечения сосуда . . . . .	1/700

Ошибка от неточностей уровней и установки трубки для обоих микроанометров на нужный угол принята равной  $0,2\%$ ; точность в определении плотности спирта  $0,001 \text{ г/см}^3$ ; плотность спирта  $0,8 \text{ г/см}^3$ .

Результаты вычислений относительной погрешности в измерении разности давлений для обоих микроанометров иллюстрированы на рис. 3. Полученная максимальная ошибка в измерении разности давлений пересчитана в соответствии с измеряемой скоростью.

Максимальная относительная погрешность на скоростях, при которых примерно производится поверка ручных анемометров, будет составлять в процентах к измеряемой скорости:

Скорость, м/сек. . . . .	1	2	5	10	15	20
Погрешность, % . . . . .	10,4	3,5	1,5	1,3	1,0	0,8

Необходимо добавить, что приведенная расчетная погрешность в измерении скорости микроанометрами в действительности может быть больше, если не принимать во внимание ошибок, связанных:

а) с изменением плотности воздуха и плотности спирта при условиях наблюдений, отличных от принятых для расчета заранее составляемой таблицы скоростей, соответствующих отдельным отсчетам микроанометров, и

б) с непостоянством воздушного потока в аэродинамической трубе.

В расчетную формулу (2) для определения скорости ветра входят плотность воздуха и плотность спирта, которые меняются с изменением атмосферного давления и температуры. Поэтому, естественно, что, пользуясь таблицей скоростей, рассчитанных по формуле для нормальных условий, без учета этих изменений, мы будем допускать погрешность. Порядок

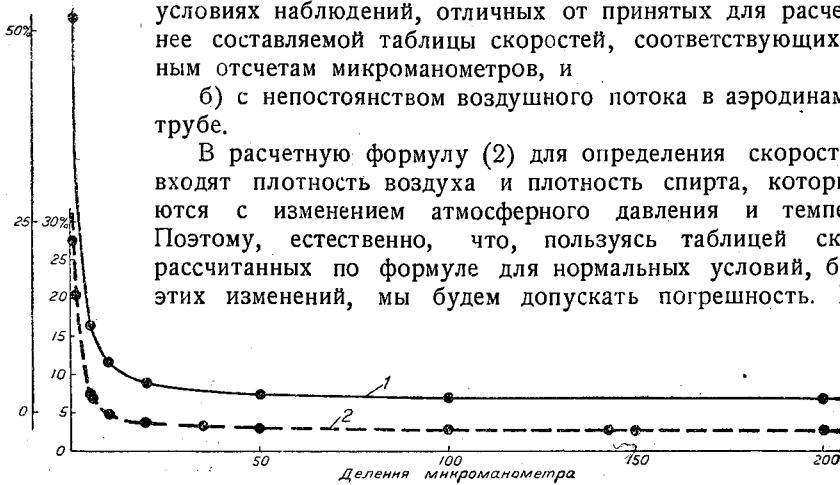


Рис. 3. Относительная ошибка измерения разности давлений.  
1 — по микроанометру ЦАГИ; 2 — по микроанометру Розенмюллера.

этой погрешности легко определить, если воспользоваться формулой поправочного коэффициента, на который умножают скорость, снятую с таблицы по данным микроанометра при наблюдаемых условиях. Поправочный коэффициент определяют по формуле:

$$k_1 = \sqrt{\frac{p_0 (273 + t)}{p (273 + t_0) [1 + \beta (t - t_0)]}}$$

где  $p_0$  — давление воздуха нормальное,  $p$  — наблюдаемое,  $t_0$  — температура нормальная,  $t$  — наблюдаемая,  $\beta$  — коэффициент объемного расширения спирта.

Ошибка от недоучета влияния давления и температуры воздуха при определении скорости, приведенная в табл. 1, вычислена для скоростей, при которых примерно производится поверка ручных анемометров.

Из приведенных данных видно, что при известном сочетании давления воздуха и температуры, не учитывая их при вычислении скорости, можно ввести погрешность около  $3-4\%$  от замеряемой скорости.

Ошибка от недоучета влияния непостоянства воздушного потока в аэродинамической трубе будет зависеть от качества трубы. Известно, что скорость в аэро-

динамических трубах не остается постоянной, а меняется в зависимости от времени и также при переходе от одной точки к другой, колеблясь около некоторого среднего значения.

Таблица II

Погрешность в определении скорости без учета поправки на условия наблюдений в процентах от замеряемой скорости

Скорость ветра, м/сек.	Давление								
	735 мм			760 мм			780 мм		
	+5°	+20°	+30°	+5°	+20°	+30°	+5°	+20°	+30°
1	1,0	2,0	3,8	1,0	1,0	2,0	3,1	1,0	0,0
2	0,5	2,4	3,4	1,0	0,5	2,0	2,6	1,0	0,5
5	0,6	2,3	3,5	1,2	0,6	1,8	2,7	1,0	0,4
10	0,6	2,3	3,4	1,2	0,6	1,7	2,7	0,9	0,3
15	0,5	2,3	3,4	1,2	0,5	1,7	2,7	0,9	0,3
20	0,6	2,3	3,4	1,2	0,6	1,7	2,7	1,0	0,3

Ввиду отсутствия специальных приборов, позволявших измерить колебания воздушного потока, об этом факторе пришлось иметь суждение по колебанию столбика спирта в микроманометре, соединенном с пито-статической трубкой. Таким образом, в данные вошла и инерция самого микроманометра.

За меру колебания воздушного потока бралось отношение

$$\frac{v_{\text{макс}} - v_{\text{мин}}}{v_{\text{ср}}}$$

выражаемое в процентах от среднего.

Для оценки погрешности были использованы отсчеты микроманометра в одной из рядовых работ по градуировке отверстия в коллекторе, причем выбраны наиболее пульсирующие.

В результате обработанных данных можно констатировать отсутствие влияния пульсации на малых скоростях (1,2 м/сек.). Максимальное колебание скорости достигает величины около 1% от среднего значения на скоростях 7—10 м/сек. и около 0,5% — на скоростях, больших 10 м/сек.

Кроме колебаний воздушного потока во времени, на точность измерения скорости оказывает также влияние неравномерное распределение скоростей в рабочем сечении трубы.

Распределение скоростей в рабочем поле аэродинамической трубы ЦБП было неоднократно определено на опыте. На основании исследований было установлено, что постоянство в распределении скоростей в незагруженном приборами поле сохраняется в пределах 1% от замеряемой скорости. В загруженном приборами поле, когда происходит стеснение воздушного потока вследствие наличия анемометров, как увидим ниже, наблюдается более неравномерное распределение скоростей, которое влечет за собой и большую погрешность в тарировке анемометров.

**Погрешности в показаниях анемометров, связанные с условиями их эксплуатации при поверке в аэродинамической трубе.** Указанные погрешности будут складываться из ошибки отсчета по шкале анемометра, ошибки в фиксации времени по секундомеру и из ошибок, связанных с неточностью установки приборов и непостоянством скорости воздушного потока в аэродинамической трубе.

Трением в приборе можно пренебречь, поскольку оно сказывается на скоростях ниже 1 м/сек., а прибор используется для измерения скоростей, больших 1 м/сек.



Ошибка в отсчете по шкале анемометра может быть принята не больше 0,5 деления. Из простых расчетов ошибка от измеряемой скорости составит:

при скорости, м/сек. . . . .	1	2	5	10	15	20
ошибка, % . . . . .	0,5	0,25	0,10	0,05	0,03	0,02

Ошибка в фиксировании времени по секундомеру выразится максимум в 0,5 сек. При измерении скорости анемометром она составит 0,5% от измеряемой величины.

Таким образом, погрешности в показаниях анемометров, связанные с разобранными ошибками, составят:

при скорости, м/сек. . . . .	1	2	5	10	15	20
ошибка, % . . . . .	1,0	0,8	0,6	0,5	0,5	0,5

Ошибки от неточности установки анемометров и от непостоянства воздушного потока. Если плоскость, перпендикулярная оси вращения робинзоновских полушарий, не совпадает по направлению со скоростью потока, то указываемая прибором величина скорости отличается от действительной. Порядок ошибок, правда, небольшой. Имеются указания в литературе, что ими можно пренебречь, если угол не превосходит 5—10°. При угле около 20° ошибка не превосходит 1%.

Во избежание ошибок необходимо устанавливать анемометр так, чтобы указанная плоскость была параллельна скорости потока.

Шкала анемометра должна быть также параллельна потоку. Этим достигается не только лучшая обтекаемость при-

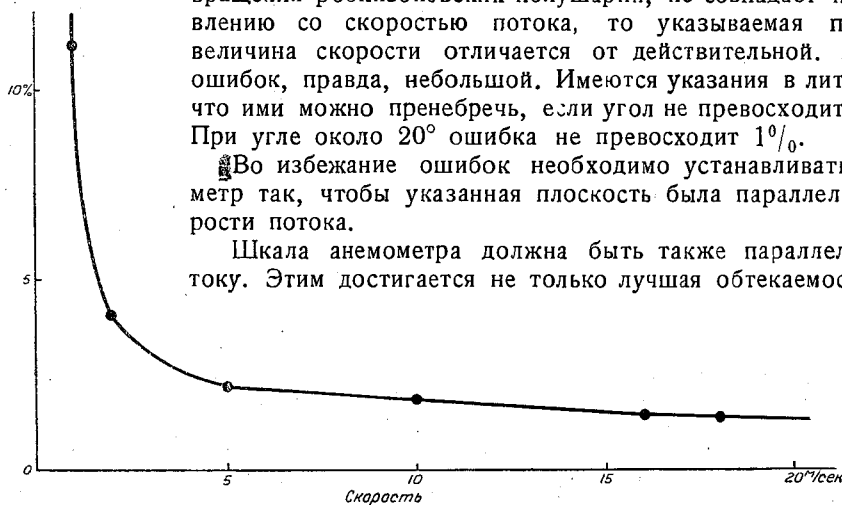


Рис. 4. Расчетная суммарная погрешность в процентах от измеряемой скорости, с которой производится поверка ручных анемометров в аэродинамической трубе Центрального бюро погоды.

бора, но и соблюдается определенное положение по отношению к потоку защиты полушарий анемометра, которая (по исследованиям Сабинина) сильно искажает величину скорости.

При изменениях скорости воздушного потока необходим некоторый промежуток времени, порядка 5 сек. и выше, чтобы анемометр приобрел угловую скорость, соответствующую данной скорости потока. В противном случае показания анемометра не будут соответствовать действительной скорости.

При колебаниях величины скорости потока происходит запаздывание в показаниях прибора, в результате чего средняя скорость по прибору отличается от действительной скорости потока. Оценить возникающую при этом ошибку весьма затруднительно. Во всяком случае величина ее зависит от индивидуальных свойств анемометра, амплитуды и частоты колебаний скорости и может меняться в очень широких пределах.

**Расчетная суммарная погрешность повзрки ручных анемометров.** Суммируя приведенные выше возможные ошибки при поверке ручных анемометров, будем иметь расчетную суммарную погрешность, представленную на рис. 4.

В соответствии с этим графиком в табл. 2 приведена погрешность на отдельных точках рабочей тарировочной кривой анемометров, возможная при их поверке.

Нельзя забывать, что указанные в табл. 2 и на рис. 4 погрешности могут увеличиться от неучтенных в расчете погрешностей в зависимости от перечисленных выше факторов, а именно: 1) от правильности установки пито-статической трубки и анемометра в рабочем поле трубы, 2) от недоучета влияния изменения давления температуры, 3) от степени постоянства воздушного потока во времени и пространстве рабочего поля, 4) от постоянства показаний самого анемометра и 5) от стеснения сечения потока загрузкой рабочего поля анемометрами.

Таблица 2  
Расчетная суммарная погрешность в процентах к измеряемой скорости на отдельных точках тарировочной кривой

Измеряемая скорость, м/сек.	Максимальная погрешность		Суммарная погрешность поверки ручных анемометров
	микроанемометров в измерении скорости	ручных анемометров в условиях поверки	
1	±10,4	±1,0	±11,4
2	3,5	0,8	4,3
5	1,5	0,6	2,1
10	1,3	0,5	1,8
15	1,0	0,5	1,5
20	0,8	0,5	1,3

### Погрешность поверки ручных анемометров по экспериментальным данным

При постановке эксперимента преследовались три цели: 1) определить погрешность рабочих тарировочных кривых ручных анемометров при их поверке в трубе по-одному, 2) определить ту же погрешность при групповой поверке сразу 9 анемометров и 3) определить погрешность поверки постоянства показаний анемометров.

**Погрешность поверки ручных анемометров при их установке по-одному.** Для определения данной погрешности было произведено 11 серий тарировок 9 новых ручных анемометров Московского завода по методике, предусмотренной „Руководством по поверке метеорологических и аэрологических приборов“.

Каждая отдельная серия тарировок состояла в следующем: анемометр устанавливался в центральной плоскости рабочего поля трубы, как это было описано выше. Тщательно проверялась установка пито-статической трубки и прибора, после чего производилась двукратная, непосредственно одна за другой, поверка каждого из 9 анемометров, без нарушения установки. Следующие серии производились каждый раз при вновь собранной установке и через разные промежутки времени. Таким образом, всего было произведено 99 тарировок.

По данным 11-кратной поверки каждого из 9 анемометров были вычерчены тарировочные кривые, с которых при одном и том же показании прибора (0,8, 1, 2, 5, 10, 15 и 20 делений в 1 сек.) сняты скорости и высчитаны средние арифметические этих скоростей по каждому из указанных делений в отдельности. Далее вычислены остаточные погрешности по данному прибору и составлены общие ряды из этих остаточных погрешностей по всем приборам по каждому делению в отдельности. По этим общим рядам были определены средние квадратичные и максимальные погрешности по формуле:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum p^2}{(k-1)n}}$$

где  $p$  — остаточные погрешности,  $k$  — число повторностей, равное 11,  $n$  — число приборов, равное 9.

Погрешность поверки ручных анемометров по-одному при нарушении их установки и при разных условиях наблюдений на отдельных точках тарифовочной кривой

Показания анемометров в 1 сек.	Соответствующая средняя скорость		Средняя квадратичная погрешность		Средняя квадратичная погрешность			Остаточные погрешности, в % от общего числа в пределах средней квадратичной погрешности			Общее число случаев			Максимальная относительная погрешность, в % от измеряемой скорости для округленного значения скоростей			Временные допуски на поверку, в % от средней скорости	
	абсолютная, м/сек.	относительная, в % к измеряемой скорости	абсолютная, м/сек.	относительная, в % к измеряемой скорости	удвоенная	угроенная	Однок.	Двойной	Тройной	13	14	15	16	расчетная погрешность	по экспериментальным данным			
																абсолютная, м/сек.		относительная, в % к измеряемой скорости
1																		
0,8	±0,04	±3,6	±0,08	±7,2	±0,12	±10,7	84	96	100	99	—	—	—	—	—	—	—	—
1	0,03	2,3	0,06	4,6	0,09	6,9	78	97	100	99	±11,4	±11,6	±10,0	±11,4	±11,6	±10,0	±10,0	±10,0
2	0,03	1,3	0,08	2,6	0,12	3,9	89	99	100	99	4,3	4,2	5,0	4,3	4,2	5,0	5,0	5,0
5	0,05	1,0	0,10	2,0	0,15	3,0	64	97	100	99	2,1	3,0	4,0	2,1	3,0	4,0	4,0	4,0
10	0,08	0,8	0,16	1,6	0,24	2,4	66	95	100	99	1,8	2,4	2,0	1,8	2,4	2,0	2,0	2,0
15	0,12	0,8	0,24	1,6	0,36	2,4	78	98	100	99	1,5	2,4	2,0	1,5	2,4	2,0	2,0	2,0
20	0,15	0,8	0,30	1,6	0,45	2,4	75	97	100	99	1,3	2,4	1,5	1,3	2,4	1,5	1,5	1,5

Далее, чтобы иметь возможность сравнивать результаты всего опыта, максимальные погрешности графически приводились к округленному значению скоростей, равному 1, 2, 5, 10, 15 и 20 м/сек. Результаты приведены в табл. 3 и изображены на рис. 5 (средняя кривая).

Так как обычно поверка анемометров производится один раз, то для оценки погрешности поверки следует взять тройную среднюю квадратичную погрешность.

Обращаясь к графику на рис. 5, констатируем, что по экспериментальным данным сохраняется та же закономерность в величине погрешности в зависимости от замеряемой скорости, что и полученная расчетным путем. Это говорит за то, что погрешность поверки прежде всего обуславливается погрешностью измерения скорости воздушного потока применяемыми приборами.

Абсолютная максимальная погрешность увеличивается с  $\pm 0,12$  м/сек. при скорости 1 м/сек. до  $\pm 0,45$  м/сек. при скорости в 20 м/сек. Соответственно относительная погрешность уменьшается с 11,6 до 2,4%.

Если сравнить полученную экспериментальным путем величину максимальной погрешности с погрешностью по расчетным данным (графы 14 и 15 табл. 3), то увидим, что, начиная со скорости 5 м/сек., она превосходит последнюю. Это обстоятельство вполне понятно и является следствием влияния целого комплекса факторов, о которых говорилось выше (точность установки приборов, непостоянство воздушного потока в трубе и проч.).

Распределение остаточных погрешностей показывает, что в пределах тройной средней квадратичной погрешности (максимальной) укладываются все 100%. Это дает уверенность в том, что погрешность, большая тройной средней квадратичной, мало вероятна.

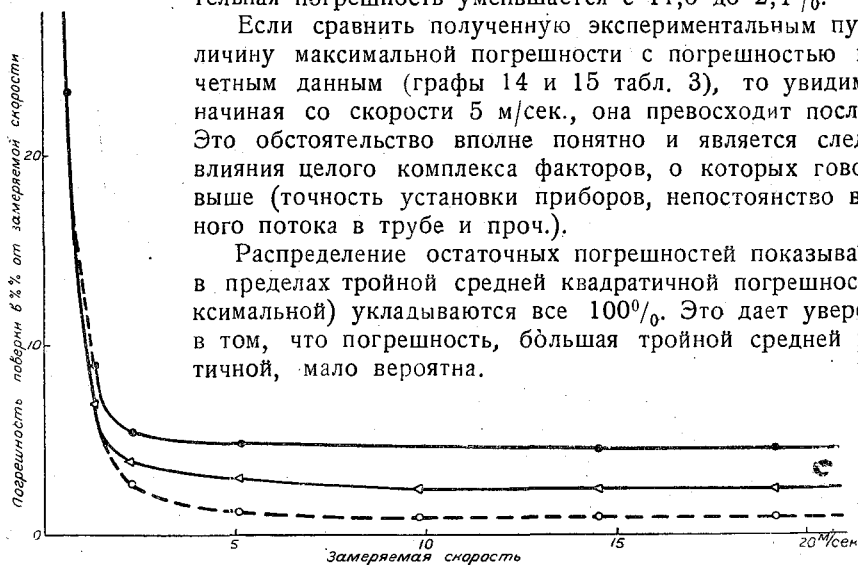


Рис. 5. Погрешность поверки ручных анемометров по экспериментальным данным в процентах от замеряемой скорости. Нижняя кривая — погрешность поверки постоянства анемометров. Средняя кривая — погрешность поверки анемометров по-одному при нарушении их установки и при разных условиях излюдений. Верхняя кривая — погрешность групповой поверки анемометров в количестве 9 штук сразу.

Интересно сопоставить временные допуски на возможное расхождение результатов при повторной поверке, опубликованные в „Руководстве по поверке метеорологических и аэрологических приборов“ с экспериментально полученными погрешностями.

Возможное расхождение между результатами двух поверок, согласно „Руководству“, не должно превышать

при скоростях, м/сек. . . . .	до 5	от 5 до 12	от 12 до 20
расхождение, м/сек. . . . .	0,1	0,2	0,3

Эти допуски близки к удвоенной средней квадратичной погрешности, в пределах которой укладывается подавляющее большинство остаточных погрешностей (графа 10, табл. 3). Это дает основание считать опубликованные допуски вполне приемлемыми для целей практики.

**Погрешность групповой поверки ручных анемометров.** Для определения погрешности было проведено восемь серий тарировок тех же 9 анемометров, которые

участвовали в первом опыте. Анемометры устанавливались на рамке, приспособленной для групповой поверки (описание рамки и установки см. стр. 85).

Каждая серия тарировок состояла из 9 поверок, охватывающих 9 перестановок каждого анемометра, и производилась по следующей схеме:

№ поверки	Места на рамке								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Приборы

1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	2	3	4	5	6	7	8	9	1
3	3	4	5	6	7	8	9	1	2
4	4	5	6	7	8	9	1	2	3
5	5	6	7	8	9	1	2	3	4
6	6	7	8	9	1	2	3	4	5
7	7	8	9	1	2	3	4	5	6
8	8	9	1	2	3	4	5	6	7
9	9	1	2	3	4	5	6	7	8

Таким образом, в отдельной серии каждый прибор тарировался по одному разу на каждом из 9 мест рамки.

После каждой серии установка сбивалась и следующие серии проводились при новой собранной установке и через разные промежутки времени. Данные тарировок обрабатывались так же, как в первом опыте, и представлялись в виде тарировочных кривых, с которых снимались скорости, соответствующие принятым показаниям анемометров (1, 2, 5, 10, 15, 20 делений в 1 сек.). Всего получено по 72 кривых для каждого места рамки (9 приборов по 8 повторностей), а для всех мест— 548 кривых.

Для каждой серии и по каждому прибору было вычислено: 1) среднее арифметическое из показаний анемометров на 9 местах рамки на отдельных скоростях; 2) остаточные погрешности (отклонения от средних арифметических показаний анемометров на каждом месте рамки); 3) составлен общий ряд остаточных погрешностей по всем приборам, который в дальнейшем обработан так же, как это указано для случая поверки анемометров по-одному.

В формуле для определения средней квадратичной погрешности

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum p^2}{(k-1)n}}$$

приняты обозначения:  $k$  — число повторностей, равное 8;  $n$  — число тарировочных кривых, равное 81 (9 приборов на 9 местах).

В табл. 4 и на рис. 5 (верхняя кривая) приведены результаты вычислений.

Как видно из таблицы, максимальная относительная погрешность ручных анемометров при их групповой поверке снижается от  $\pm 13\%$  на скорости 1 м/сек. до  $\pm 4,5\%$  на скорости 20 м/сек.

Остаточные погрешности в пределах тройной средней квадратичной погрешности составляют 100% всего числа. Число остаточных погрешностей, превышающих двойную среднюю квадратичную, невелико: от 5 до 1% во всем диапазоне скоростей (графы 9, 10, 11 табл. 4). Следовательно, вероятность появления случайных погрешностей, превышающих двойную среднюю квадратичную, небольшая.

Сопоставляя максимальные погрешности, полученные при групповой поверке анемометров и при их поверке по-одному (графы 14 и 15 табл. 4), приходим к заключению, что точность групповой поверки меньше. Причина этого вполне понятна, так как наличие рамки с приборами вызывает неравномерное распределение

Погрешность групповой поверки ручных анемометров при нарушении их установки и при разных условиях наблюдений на отдельных точках тарировочной кривой

Показания анемометров в 1 сек.	Средняя квадратичная погрешность		Средняя квадратичная погр. шн. сть			Остаточные погрешности, в % от общего числа в пределах средней квадратичной погрешности			Общее число случаев	Максимальная относительная погрешность, в % от измеряемой скорости для округленного значения скорости				
	абсолютная, м/сек.	относительная, в % к измеряемой скорости	удвоенная		утроенная		Однок.	Двойнок.		Тройнок.	скорость, м/сек.	групповая поверка	поверка му	
			абсолютная, м/сек.	относительная, в % к измеряемой скорости	абсолютная, м/сек.	относительная, в % к измеряемой скорости								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,32	±0,04	±3,0	±0,08	±6,0	±0,12	9,0	76	98	100	648	1,0	±13,0	±11,6
2	2,28	0,04	1,8	0,08	3,6	0,12	5,4	75	95	100	648	2,0	5,6	4,2
5	5,16	0,08	1,6	0,16	3,2	0,24	4,8	75	99	100	648	5,0	4,8	3,0
10	9,89	0,16	1,6	0,32	3,2	0,48	4,6	73	98	100	648	10,0	4,6	2,4
15	14,53	0,22	1,5	0,44	3,0	0,66	4,5	72	99	100	648	15,0	4,5	2,4
20	19,15	0,29	1,5	0,58	3,0	0,87	4,5	70	99	100	648	20,0	4,5	2,4

скоростей в рабочем поле трубы и непостоянство в показаниях одного и того же анемометра, поверяемого на различных местах рамки.

В подтверждение этого было специально исследовано поле скоростей трубы, загруженной рамкой с девятью приборами.

Исследование проводилось при помощи второй пито-статической трубки, коэффициент которой, по сравнению с рабочей нормальной трубкой, равен единице.

Рабочая трубка оставалась все время в центре установки приборов на рамке, как это имеет место при групповой поверке, а вторая перемещалась в вертикальной плоскости установки нормальной трубки и устанавливалась соответственно положению приборов на рамке на уровне их полушарий. Опыт проведен при скорости потока около 15 м/сек.

Для суждения о распределении скоростей в исследуемом сечении вычислялись отношения скорости, определенной при помощи второй трубки на уровне полушарий анемометров на каждом из 9 мест рамки, к скорости, определенной при помощи нормальной рабочей трубки  $\left(\frac{v_2}{v_{\text{норм}}}\right)$ . На рис. 6 приведены эти отношения в связи с полученной средней разницей в показаниях анемометров при групповой поверке и по-одному, взятой в процентах от средней скорости при поверке анемометров

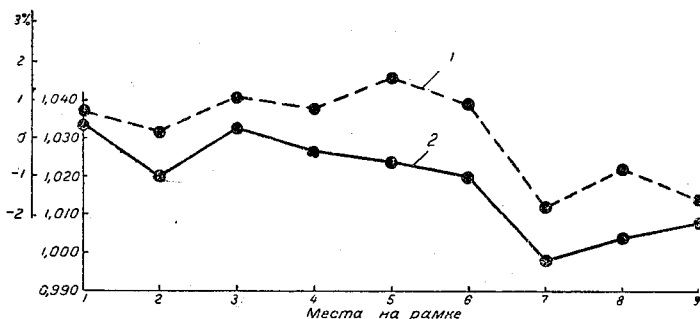


Рис. 6. Средняя разница в скоростях воздушного потока при групповой поверке анемометров и по-одному в процентах от истинной скорости и распределение скорости в рабочем поле трубы.

по-одному. При сравнении кривой средней разницы в скоростях воздушного потока при групповой поверке анемометров и по-одному (верхняя кривая) с кривой распределения скоростей (нижняя кривая) бросается в глаза аналогичный ход обеих кривых.

Скорость воздушного потока неравномерно меняется при переходе от одного места рамки к другому в пределах от  $+3,4\%$  на первом месте рамки до  $-0,2\%$  на седьмом (нижняя кривая на рис. 6). Поэтому вполне естественно, что и показания анемометров на отдельных местах рамки также не будут одинаковы, что и подтверждается средней разницей в скоростях воздушного потока при групповой поверке по сравнению с поверкой анемометров по-одному на отдельных местах рамки.

**Погрешность поверки постоянства показаний анемометров.** Методикой поверки ручных анемометров предусматривается определение постоянства показаний, которое сводится к повторной поверке прибора тотчас же после первой без нарушения установки. О постоянстве показаний анемометров судят по разбросу точек от средней тарировочной кривой, проведенной между этими точками.

Для количественной характеристики постоянства показаний анемометров при повторной поверке без нарушений условий и установки материалы многократных поверок анемометров по-одному были обработаны следующим образом.

Для каждого из девяти поверяемых приборов по данным каждой отдельной поверки вычерчивались по две тарировочных кривых по точкам, полученным при

Погрешность поверки постоянства показаний ручных анемометров

Показания анемометров в 1 сек.	Средняя скорость, м/сек.	Средняя квадратичная погрешность				Средняя квадратичная погрешность				Остаточные погрешности, в % от общего числа в пределах средней квадратичной погрешности			Общее число случаев	Максимальная относительная погрешность, в % от замеряемой скорости для округленного значения скоростей			Допуска на непостоянство показаний анемометров, в % от замеряемой скорости		
		кватратичная погрешность		утроенная		Однок.	Двук.	Тройн.	по экспериментальным данным	расчетная погрешность									
		абсолютная, м/сек.	относительная, в % к замеряемой скорости	абсолютная, м/сек.	относительная, в % к замеряемой скорости														
											абсолютная, м/сек.	относительная, в % к замеряемой скорости							
1																			
0,8	1,12	±0,03	±2,7	±0,06	±5,4	±0,09	±8,1	72,7	98,0	100	198								
1,0	1,29	0,03	2,3	0,06	4,6	0,09	6,9	85,9	97,0	100	198		±10,7	±11,4					
2,0	2,24	0,02	0,9	0,04	1,8	0,06	2,7	86,9	95,0	100	198		2,0	3,2	4,3				
5,0	5,09	0,02	0,4	0,04	0,8	0,06	1,2	88,9	97,0	100	198		5,0	1,3	2,1				
10,0	9,82	0,03	0,3	0,06	0,6	0,09	0,9	80,8	93,0	100	198		10,0	0,9	1,8				
15,0	14,51	0,04	0,3	0,08	0,6	0,12	0,9	71,7	93,9	100	198		15,0	0,9	1,5				
20,0	19,17	0,06	0,3	0,12	0,6	0,13	0,9	78,8	98,0	100	198		20,0	0,9	1,3				



первой и повторной поверках. Далее, как и в предыдущих опытах, при одних и тех же показаниях приборов (0,8, 1, 2, 5, 10, 15 и 20 делений в 1 сек.) с этих парных кривых снимались соответствующие им истинные скорости и вычислялись остаточные погрешности (отклонения от средней скорости, соответствующей указанным делениям анемометров каждой из двух поверок).

Так были составлены ряды остаточных погрешностей для всех приборов по каждому из упомянутых делений отдельно, на основании которых вычислены средняя квадратичная и максимальная погрешность.

Средняя квадратичная погрешность вычислялась по той же формуле, по которой обрабатывался и весь материал, а именно:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum \rho^2}{(k-1)n}}$$

Для данного случая в формуле:  $k$  — число повторностей, равное 11;  $n$  — число тарировочных кривых для 9 приборов, равное 18 (9 приборов  $\times$  2);  $\rho$  — остаточные погрешности.

Максимальные погрешности также приводились к округленному значению скоростей.

Для характеристики рядов распределения подсчитаны остаточные погрешности в пределах одной, двух и трех средних квадратичных погрешностей. Результаты обработки приведены в табл. 5 и на рис. 5 (нижняя кривая).

Согласно приведенным в них данным, максимальная погрешность от  $\pm 10,7\%$  на скорости 1 м/сек. снижается до  $\pm 0,9\%$  на скорости 20 м/сек. Распределение остаточных погрешностей по отдельным скоростям близко друг к другу. Все погрешности укладываются в пределах тройной средней квадратичной погрешности.

Следовательно, непостоянство показаний анемометров, превосходящее по своей величине тройную среднюю квадратичную погрешность, мало вероятно.

Если сравнить полученную величину максимальной погрешности для округленного значения скоростей с величиной расчетной погрешности в измерении скорости, то следует признать, что при повторной проверке ручных анемометров с соблюдением одних и тех же условий и сохранением установки приборов, точность проверки в нашем случае точнее проверки постоянства показаний анемометров) превосходит расчетные предположения. Это вполне возможно вследствие того, что довольно значительная ошибка от приведения уровня жидкости в сосуде микроанемометров, вошедшая в расчет, в действительности исключается градуировкой микроанемометров.

Непостоянство показаний анемометров, как упоминалось выше, в практике проверки характеризуется разбросом проверяемых точек относительно средней кривой.

Принятый на этот счет допуск (см. „Руководство по проверке метеорологических аэрологических приборов“) ограничивает разброс точек на скоростях:

от 1 до 5 м/сек. . . . .	$\pm 0,05$ м/сек.
„ 5 „ 20 „ . . . . .	$\pm 0,10$ м/сек.

Выражая этот допуск в процентах от замеряемой скорости, получим:

скорость, м/сек. . . . .	1	2	5	10	15	20
допуск, % . . . . .	$\pm 5,0$	2,5	1,0	1,0	0,7	0,5

Сравнивая эти допуски с погрешностями, приведенными в табл. 5 (графы 14 и 16), можно заметить, что величина их подходит к величине удвоенной средней квадратичной погрешности и немного меньше утроенной, за исключением допуска при скорости 1,0 м/сек. Отсюда установленные допуски следует считать вполне разумными.

Что касается допуска на скорости 1 м/сек., то его следует расширить до величины, равной двойной средней квадратичной погрешности, т. е. до  $\pm 0,07$  м/сек., или до  $7\%$ .

## Общие выводы

Резюмируя все изложенное выше, приходим к следующим выводам.

1) Погрешность поверки ручных анемометров определяется совокупностью погрешностей измерения скорости воздушного потока и погрешностей самих анемометров, связанных с условиями их эксплуатации в аэродинамической трубе.

2) Экспериментальные данные, полученные в Центральном бюро поверки в результате многократных проверок, позволили сделать количественную оценку погрешности поверки ручных анемометров применительно к своим условиям, а именно:

а) погрешность поверки ручных анемометров при нарушении их установки и при различных условиях наблюдений, выраженная в процентах от измеряемой скорости, на отдельных точках тарировочной кривой составляет:

при скорости, м/сек . . . . .	1	2	5	10	15	20
средняя погрешность, % . . . . .	$\pm 3,9$	1,4	1,0	0,8	0,8	0,8
максимальная погрешность, % . . . . .	$\pm 11,6$	4,2	3,0	2,4	2,4	2,4

б) погрешность групповой поверки ручных анемометров составляет:

при скорости, м/сек. . . . .	1	2	5	10	15	20
средняя погрешность, % . . . . .	$\pm 4,3$	1,9	1,6	1,5	1,5	1,5
максимальная погрешность, % . . . . .	$\pm 13,0$	5,6	4,8	4,6	4,5	4,5

3) Временные допуски на повторную поверку, опубликованные в „Руководстве по поверке метеорологических и аэрологических приборов“, близки к удвоенной средней квадратичной погрешности поверки ручных анемометров по-одному. Это дает основание считать опубликованные допуски вполне приемлемыми для целей практики.

Существующие допуски на непостоянство показаний анемометров, также опубликованные в упомянутом „Руководстве“, близки по своей величине к удвоенной средней квадратичной погрешности поверки постоянства показаний ручных анемометров и немного меньше утроенной, за исключением допуска при скорости 1,0 м/сек. Отсюда можно считать, что данные допуски вполне реальны на скоростях, больших 1,0 м/сек.

Допуск на скорости в 1,0 м/сек. следует расширить до величины, равной двойной средней квадратичной погрешности, т. е. принять равным  $\pm 0,07$  м/сек., или 7% от измеряемой скорости.

4) Ввиду того что погрешность поверки ручных анемометров будет зависеть от точности измерительной установки в целом, т. е. от совокупности измерительных приборов, вспомогательных приспособлений для их установки и, кроме того, качества аэродинамической трубы, погрешность поверки анемометров, произведенная в других трубах и другими средствами, может отличаться от полученной в условиях ЦБП.

Поэтому считаем целесообразным выдвинуть вопрос о стандартизации аэродинамических труб и унификации измерительных приборов и вспомогательных приспособлений для целей поверки анемометров.

## ПОГРЕШНОСТИ ПОВЕРКИ РТУТНЫХ БАРОМЕТРОВ

Для определения атмосферного давления в метеорологической службе пользуются показаниями ртутного барометра.

Вводимая в показания инструментальная поправка определяется из сравнения показаний барометра с эталонным барометром посредством контрольного.

Большой архивный материал по поверке ртутных барометров в ЦБП свидетельствует, что при сравнения поверяемого барометра с контрольным разности их показаний  $\Delta H$  по величине не совпадают полностью между собой.

Отсюда следует, что инструментальная поправка, получающаяся при поверке, дается с погрешностью, величину которой необходимо знать для оценки точности наблюдений.

Из опыта и на основании архивного материала по определению инструментальной поправки при перепроверке барометров следует, что инструментальная поправка меняется со временем.

В 1948—1949 гг. в ГГО была проведена экспериментальная работа на тему „Погрешности поверки ртутных барометров“, чтобы на большом материале повторных проверок определить величину случайных ошибок при поверке.

Для установления источника случайных ошибок рассмотрим факторы, определяющие точность показаний ртутных барометров и их влияние на результаты поверки.

Известно, что точность показаний ртутного барометра зависит от следующих факторов: 1) плотности ртути, 2) давления остаточного воздуха в торичеллиевой пустоте, 3) давления паров ртути в торичеллиевой пустоте, 4) точности определения ускорения силы тяжести в данном месте, 5) положения барометра относительно вертикали, 6) капиллярной депрессии, 7) точности нанесения шкалы, 8) метода подводки ртути и наводки для отсчета.

1. Плотность химически чистой ртути является величиной постоянной при данной температуре и при  $0^{\circ}\text{C}$  по определениям разных исследователей совпадает до пятого десятичного знака. Следовательно, у барометра, наполненного недостаточно очищенной ртутью, при сравнениях его показаний с контрольным при разных атмосферных давлениях даже в пределах 80 мм этот фактор дает столь малую ошибку, что ею можно пренебречь и принять плотность ртути одинаковой для обоих барометров.

2. Давление остаточного воздуха в торичеллиевой пустоте является величиной переменной вследствие изменения упругости воздуха в зависимости от изменения температуры и занимаемого им объема. Однако допускаемое количество воздуха имеет при нормальном давлении и температуре  $0^{\circ}\text{C}$  упругость, равную  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  мм и при  $25^{\circ}\text{C} \approx 1,001 \cdot 2 \cdot 10^{-6}$  мм.

Отсюда ясно, что влияние допускаемого количества воздуха настолько мало, что не может отразиться на показаниях барометра в пределах точности отсчета.

3. Давление ртутных паров в торичеллиевой пустоте является величиной переменной, зависящей от температуры и занимаемого ими объема. Но даже при  $30^{\circ}\text{C}$  и нормальном давлении упругость паров равна 0,003 мм, т. е. находится за пределами точности отсчета.

4. Зависимость показаний от точности определения поправки на приведение показаний барометра к нормальной тяжести совершенно отпадает, поскольку сравнения ведутся только для вывода поправки к отсчетам поверяемого барометра по сравнению с контрольным, висющим рядом и на одной высоте.

5. Отклонение барометра от вертикали дает ошибку в 0,01 мм при угле  $\sim 17,3'$ . При таком угле чашка отходит от линии отвеса на  $\sim 3,9$  мм, — на величину, которую всегда можно заметить, и исправить положение барометра.

6. Капиллярная депрессия в момент равновесия у барометра с цилиндрической трубкой остается величиной постоянной. У барометра с конической трубкой капиллярная депрессия — величина переменная, выявляемая у чашечного барометра специальной поверкой в совокупности с влиянием других факторов, например точности нанесения шкалы и пр.

По литературным данным, капиллярная депрессия  $h$  в мм ртутного столба вычисляется по формуле  $h = \frac{k}{e^{nd}}$ , где  $k = 7,6962$ ,  $n = 0,268$ ,  $d$  — диаметр трубки,  $e$  — основание натуральных логарифмов. Но обе постоянных  $k$  и  $n$  для одной и той же трубки варьируют вследствие непостоянства формы мениска. Даже при диаметре в 18 мм изменения величины депрессии могут достигать 0,05 мм, а при меньшем диаметре трубки вариации капиллярной депрессии значительно больше — порядка нескольких десятых миллиметра.

7. Точность нанесения шкалы в действительности больше точности отсчетов и поэтому не может являться источником случайных погрешностей, следовательно и колебаний разностей  $\Delta H$  при сравнениях барометра с контрольным при одинаковых атмосферных давлениях.

8. Метод подводки ртути и наводка имеют особое значение. Вследствие зависимости капиллярной депрессии от формы мениска должны соблюдаться условия, обеспечивающие его нормальную высоту при подводке к визирной плоскости и при наводке для отсчета. Для чашечных барометров это условие выполняется постукиванием по барометру, что же касается контрольного и инспекторского барометров, то условием для нормальной высоты мениска является подводка ртути только в направлении снизу вверх.

Из обзора факторов, определяющих точность показаний ртутного барометра, видно, что при соблюдении правил подводки ртути и наводки главным источником случайных погрешностей при поверке является капиллярная депрессия, варьирующая вследствие микроколебаний атмосферного давления.

По экспериментальным данным проведенных работ, целью которых было определить величину случайных ошибок при поверке, были найдены погрешности: 1) отдельной разности  $\Delta H$  при сравнениях барометров с контрольным ЦБП, 2) поправки барометров относительно контрольного ЦБП, 3) инструментальной поправки относительно эталона давления и 4) погрешность к отдельному отсчету.

Данные для определения погрешностей были получены из 20 серий сравнений десяти чашечных барометров с контрольным ЦБП в период с 3/III по 2/VII 1948 г., такого же количества серий сравнений пяти контрольных барометров с 28/I по 31/III 1949 г. и пяти инспекторских с 9/IV по 18/V 1949 г.

Сравнения велись по методу, принятому ГГО, и полученные данные были обработаны как при обыкновенной поверке.

### Погрешности $\sigma$ отдельной разности $\Delta H$ и отдельного отсчета

Для определения погрешностей были вычислены квадратичные отклонения от средней из десяти разностей  $\Delta H$  в каждой серии. Таким образом, были получены погрешности разностей по 20 сериям для всех трех видов барометров.

Ниже приводятся погрешности  $\sigma$  отдельной разности  $\Delta H$  для чашечных барометров относительно двух контрольных барометров ЦБП:

№ барометров . . . . .	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
$\sigma$ относительно контрольного № 3 . . . . .	$\pm 0,11$	0,12	0,11	0,12	0,13	0,15	0,12	0,12	0,12	0,13	$\pm 0,12$
$\sigma$ относительно контрольного № 1402185 . . . . .	$\pm 0,10$	0,09	0,11	0,09	0,09	0,12	0,11	0,09	0,10	0,09	$\pm 0,10$

Таким образом, погрешность  $\sigma$  отдельной разности  $\Delta H$  в среднем для всех десяти чашечных барометров относительно обоих контрольных барометров ЦБП равна  $\pm 0,11$  мб.

Если учесть, что погрешность отдельной разности  $\Delta H$  зависит не только от погрешности показаний чашечного барометра, но и от погрешности показаний контрольного барометра ЦБП, равной  $\pm 0,03$  мм<sup>1</sup>  $= \pm 0,04$  мб, то погрешность отсчета чашечного барометра равна  $\sigma_1 = \pm \sqrt{0,11^2 - 0,03^2} = \pm 0,10$  мб.

Количество разностей  $\Delta H$  с погрешностью, не превышающей  $1\sigma$ , относительно контрольного № 3 составляет 71,0%, относительно № 1402185 составляет 70,7%. Следовательно около 30% отдельных разностей имеют погрешность больше  $\pm 1\sigma$ , поэтому наибольшее расхождение разностей  $\Delta H$  в каждой серии больше  $2\sigma$  и для всех десяти барометров в среднем равно 0,35 мб. В отдельных же случаях (не более 2%) наибольшее расхождение разностей  $\Delta H$  в серии равно 0,60 мб.

Для определения погрешностей  $\sigma$  отдельной разности  $\Delta H$  контрольных барометров при обработке данных сравнений с контрольным ЦБП были выведены разности после введения поправок на приведение показаний барометров к 0° С.

Ниже приводятся средние погрешности  $\sigma$  отдельной разности  $\Delta H$  из полученных 20-ти для каждого барометра с учетом  $\Delta t$ :

№ барометров . . . . .	1	2	3	4	5
$\sigma$ относительно контрольного № 149 с учетом $\Delta t$ . . . . .	$\pm 0,05$	0,06	0,06	0,05	0,05
$\sigma$ относительно контрольного № 568 с учетом $\Delta t$ . . . . .	—	—	—	$\pm 0,07$	0,06

Из приведенных данных видно, что погрешность отдельной разности  $\Delta H$  по величине в среднем для всех пяти барометров равна 0,05 мм.

Можно положить, что погрешность  $\sigma$  отдельной разности  $\Delta H$  зависит в равной мере от неточности показаний контрольного ЦБП и поверяемого барометров, поэтому погрешность одного отсчета контрольного барометра будет равна  $\pm \frac{0,05}{\sqrt{2}} \leq 0,03$  мм.

Для сравнения величин погрешностей отдельной разности  $\sigma$  по экспериментальным данным с погрешностями при поверке в ЦБП был обработан архивный материал за 1948 г. и первую половину 1949 г. Всего за этот период было проверено и выпущено 148 контрольных барометров, и погрешность отдельной разности  $\sigma$  в среднем для всех барометров получилась равной  $\pm 0,05$  мм. Таким образом, по данным поверки погрешность  $\sigma$  отдельной разности  $\Delta H$  вполне совпадает с погрешностью по экспериментальным данным.

В 20 сериях из 10 отсчетов погрешность  $\sigma$  в 74,1% случаев равна  $\pm 1\sigma$ , а в остальных 25,9% случаев не превосходит  $\pm 3\sigma$ .

Наибольшее расхождение между разностями  $\Delta H$  в одной серии в 98% случаев не превосходит  $5\sigma$ , т. е. 0,25 мм, а в среднем для всех барометров равно 0,18 мм.

Для инспекторских барометров с двумя шкалами погрешность  $\sigma$  отдельной разности  $\Delta H$  была вычислена по миллиметровой и по миллибаровой шкалам.

Ниже приводятся погрешности  $\sigma$  относительно одного контрольного ЦБП для пяти и относительно другого контрольного для двух инспекторских барометров:

№ барометров . . . . .	1	2	3	4	5
$\sigma$ мм относительно № 149 . . . . .	$\pm 0,06$	0,06	0,06	0,07	0,06
$\sigma$ мб относительно № 149 . . . . .	$\pm 0,08$	0,08	0,08	0,10	0,07
$\sigma$ мм относительно № 568 . . . . .	—	—	—	$\pm 0,09$	0,06
$\sigma$ мб относительно № 568 . . . . .	—	—	—	$\pm 0,11$	0,10

<sup>1</sup> См. дальше этот же раздел.

Таким образом, в среднем для всех инспекторских барометров погрешность  $\sigma$  отдельной разности равна  $\pm 0,06$  мм и  $\pm 0,08$  мб.

Количество разностей  $\Delta H$  с погрешностью до  $\pm 1\sigma$  составляет 74,3% по миллиметровой и 71,5% по миллибаровой шкале.

Расхождение между разностями  $\Delta H$  в каждой серии не превосходит  $5\sigma$  в 92% случаев по миллиметровой и в 96% случаев по миллибаровой шкале.

Наибольшее расхождение между разностями  $\Delta H$  в одной серии равно 0,30 мм и 0,40 мб, а в среднем для всех барометров — 0,19 мм и 0,25 мб.

Погрешность  $\sigma$  отдельной разности  $\Delta H \pm 0,06$  мм и  $\pm 0,08$  мб зависит от погрешности показаний как контрольного, так и инспекторского барометров. Поскольку погрешность одного отсчета контрольного барометра равна  $\pm 0,03$  мм и  $\pm 0,04$  мб, то погрешность одного отсчета инспекторского барометра равна  $\sqrt{0,06^2 - 0,03^2} = \pm 0,05$  мм и  $\sqrt{0,08^2 - 0,04^2} = \pm 0,07$  мб.

### Погрешность поправки относительно контрольного барометра ЦБП

Полученные по экспериментальным данным поправки относительно контрольных ЦБП не сохраняются во времени.

Колебания поправок чашечных барометров относительно средней в пределах  $\pm 0,15$  мб составляет 79%, в пределах от  $\pm 0,15$  мб до  $\pm 0,25$  мб — 16% случаев. Следовательно, можно положить пределом колебаний поправок во времени  $\pm 0,2$  мб.

Вследствие непостоянства поправок во времени их погрешности вычислены относительно средней из 20-ти, выведенных за весь период наблюдений.

Ниже приводятся погрешности поправок для каждого из десяти чашечных барометров относительно контрольных ЦБП:

№ барометров	1	2	3	4	5	6 <sup>1</sup>	7	8 <sup>1</sup>	9	10
$\sigma$ относительно контрольного № 3	$\pm 0,09$	0,08	0,09	0,10	0,09	0,22	0,08	0,23	0,13	0,15
$\sigma$ относительно контрольного № 1402185	$\pm 0,10$	0,08	0,08	0,10	0,16	0,19	0,07	0,09	0,16	0,13

В среднем погрешность поправки для всех барометров равна  $\pm 0,12$  мб и почти совпадает с погрешностью отдельной разности  $\Delta H \pm 0,11$  мб.

Количество поправок с погрешностью до  $\pm 1\sigma$  составляет 68%, до  $\pm 2\sigma$  — 94%, а свыше  $\pm 2\sigma$  — только 6% случаев.

У контрольных барометров поправки также не сохраняются во времени. Колебание поправок в пределах  $\pm 0,05$  мм относительно средней составляет 81%. Погрешности поправок относительно средней за время наблюдений приводятся ниже:

	Контрольный барометр						
	№ 149				№ 568		
№ барометров	1	2	3	4	5	4	5
Погрешность поправки относительно контрольного	$\pm 0,04$	0,04	0,03	0,05	0,04	$\pm 0,03$	0,03

В среднем для всех барометров погрешность поправок равна  $\pm 0,04$  мм. Погрешности всех поправок укладываются в  $2\sigma$ , т. е. не превосходят  $\pm 0,08$  мм. Общее

<sup>1</sup> Плоские мениски, поэтому их не следует вводить в подсчет средне<sup>3</sup>.

количество поправок с погрешностью до  $\pm 1\sigma$  составляет в среднем для всех контрольных барометров 68<sup>0</sup>/<sub>0</sub> и только 32<sup>0</sup>/<sub>0</sub> случаев имеют погрешность больше  $\pm 1\sigma$ .

Непостоянство поправок во времени характерно и для инспекторских барометров.

Колебания поправок относительно средней в пределах  $\pm 0,05$  мм составляют 87<sup>0</sup>/<sub>0</sub> и в пределах  $\pm 0,05$  мб — 66<sup>0</sup>/<sub>0</sub> случаев. Погрешности поправок инспекторских барометров по миллиметровой и миллибаровой шкале приводятся ниже:

	Контрольный барометр						
	№ 149					№ 568	
	1	2	3	4	5	4	5
№ барометров . . . . .							
$\sigma$ по миллиметровой шкале . . . . .	$\pm 0,03$	0,04	0,04	0,05	0,02	$\pm 0,05$	0,03
$\sigma$ по миллибаровой шкале . . . . .	$\pm 0,04$	0,06	0,06	0,07	0,03	$\pm 0,07$	0,04

Средняя погрешность поправок относительно контрольных ЦБП для всех поверявшихся инспекторских барометров равна  $\pm 0,04$  мм и  $\pm 0,06$  мб.

Колебание поправок с погрешностью до  $\pm 1\sigma$  по миллиметровой шкале равно 74<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, до  $\pm 2\sigma$  — 96<sup>0</sup>/<sub>0</sub> и только 4<sup>0</sup>/<sub>0</sub> случаев имеют погрешность от  $\pm 2\sigma$  до  $\pm 3\sigma$ . По миллибаровой шкале количество поправок до  $\pm 1\sigma$  составляет 74<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, до  $\pm 2\sigma$  — 98<sup>0</sup>/<sub>0</sub> и 2<sup>0</sup>/<sub>0</sub> случаев имеют погрешность от  $\pm 2\sigma$  до  $\pm 3\sigma$ .

### Погрешность инструментальной поправки контрольных барометров ЦБП

В инструментальную поправку поверяемого барометра входят слагаемыми поправка поверяемого барометра относительно контрольного ЦБП и инструментальная поправка контрольного ЦБП. Таким образом, для вычисления погрешности инструментальной поправки поверяемого барометра необходимо определить погрешность инструментальной поправки контрольного барометра ЦБП.

Инструментальная поправка основных контрольных барометров ЦБП определяется путем сравнения их показаний с эталонными барометрами ГГО № 1 и № 2 в течение одной ночи, обычно только один или два раза в год.

Поправки большей частью определяются после текущего ремонта, например после чистки короткого колена и пр., после чего поправка обычно не сохраняется.

В экспериментальной работе по определению погрешностей проверки контрольных и инспекторских барометров использовались два основных барометра ЦБП: № 149 и № 568, а для чашечных — два вспомогательных барометра: № 3 и № 1402185.

Погрешности инструментальной поправки основных контрольных барометров № 149 и № 568 были определены на основании архивного материала. Для этого оказалось удобным использовать проводившиеся в 1939 г. многократные сравнения указанных барометров с эталонными.

На основании обработанных данных средняя погрешность инструментальной поправки барометра № 149 определена в  $\pm 0,03$  мм и № 568 в  $\pm 0,02$  мм, максимальная же погрешность не превышает  $2\sigma$ , т. е.  $\pm 0,06$  мм.

Погрешность инструментальной поправки контрольного барометра № 3 по архивным данным за 1946—1949 гг. составляет  $\pm 0,04$  мм, а № 1402185  $\pm 0,03$  мм.

### Погрешность инструментальной поправки ртутных барометров и погрешности при наблюдениях

Инструментальная поправка как сумма двух поправок имеет погрешность, зависящую от погрешностей обоих слагаемых. Поскольку погрешность поправки чашечного барометра относительно контрольного ЦБП равна  $\pm 0,12$  мб и погрешность

инструментальной поправки контрольного барометра ЦБП равна  $\pm 0,03$  мм, или  $\pm 0,04$  мб, то погрешность инструментальной поправки чашечного барометра  $\sqrt{0,12^2 + 0,04^2} = \pm 0,13$  мб.

Максимальная погрешность инструментальной поправки чашечного барометра определяется максимальной погрешностью поправки чашечного барометра относительно контрольного ЦБП, равной  $3\sigma = \pm 0,36$  мб и максимальной погрешностью инструментальной поправки контрольного ЦБП, равной  $2\sigma = \pm 0,08$  мб, следовательно максимальная погрешность равна  $\sqrt{0,36^2 + 0,08^2} = \pm 0,37$  мб.

Из найденных погрешностей при поверке можно определить погрешности при наблюдениях.

Погрешность одного отсчета по чашечному барометру равна  $\pm 0,10$  мб, при введении инструментальной поправки добавляется ее погрешность  $\pm 0,13$  мб, следовательно исправленный отсчет будет иметь погрешность  $\sqrt{0,10^2 + 0,13^2} = \pm 0,16$  мб.

Максимальная же погрешность одного отсчета по чашечному барометру равна  $\pm 0,30$  мб, максимальная погрешность его инструментальной поправки  $\pm 0,37$  мб, следовательно исправленный отсчет будет иметь погрешность  $\sqrt{0,30^2 + 0,37^2} = \pm 0,47$  мб.

Если инструментальная поправка к чашечному барометру дается не одним числом для всей шкалы, а для каждого десятка миллибар отдельно, то погрешность каждой поправки такого рода больше приведенных выше, так как по экспериментальным данным шкаловые поправки имеют погрешность  $\pm 0,08$  мб. Поэтому инструментальная поправка для отдельного десятка будет равна  $\sqrt{0,12^2 + 0,04^2 + 0,08^2} = \pm 0,15$  мб. Максимальная же погрешность для каждого десятка миллибар включает, кроме максимальной погрешности поправки поверяемого барометра и максимальной погрешности инструментальной поправки контрольного ЦБП, еще погрешность перехода от одной поправки к другой, равную  $\pm 0,10$  мб. Поэтому максимальная погрешность равна

$$\sqrt{(3 \cdot 0,12)^2 + (2 \cdot 0,04)^2 + 0,08^2 + 0,10^2} = \pm 0,39 \text{ мб.}$$

При наблюдениях по такому барометру погрешность одного отсчета, исправленного инструментальной поправкой, равна  $\sqrt{0,10^2 + 0,15^2} = \pm 0,18$  мб, а максимальная  $\sqrt{(3 \cdot 0,10)^2 + 0,39^2} = \pm 0,49$  мб.

У контрольного барометра погрешность инструментальной поправки зависит от погрешности его поправки относительно контрольного ЦБП и погрешности инструментальной поправки последнего, следовательно она равна  $\sqrt{0,04^2 + 0,03^2} = \pm 0,05$  мм, максимальная же погрешность равна  $\sqrt{(2 \cdot 0,04)^2 + (2 \cdot 0,03)^2} = \pm 0,10$  мм. Погрешность одного отсчета контрольного барометра, исправленного инструментальной поправкой, равна  $\sqrt{0,03^2 + 0,05^2} = \pm 0,06$  мм, а максимальная погрешность  $\sqrt{(2 \cdot 0,03)^2 + (2 \cdot 0,05)^2} = \pm 0,12$  мм.

Погрешность инструментальной поправки инспекторского барометра с двумя шкалами равна  $\sqrt{0,04^2 + 0,03^2} = \pm 0,05$  мм и  $\sqrt{0,06^2 + 0,04^2} = \pm 0,07$  мб, максимальная погрешность  $\sqrt{(3 \cdot 0,04)^2 + (2 \cdot 0,03)^2} = \pm 0,14$  мм и  $\sqrt{(3 \cdot 0,06)^2 + (2 \cdot 0,04)^2} = \pm 0,20$  мб.

Погрешность одного отсчета, исправленного инструментальной поправкой, равна  $\pm 0,06$  мм и  $\pm 0,08$  мб, а максимальная  $\pm 0,17$  мм и  $\pm 0,26$  мб.

Приведенные погрешности характеризуют точности поправок ртутных барометров при их поверке по методу, принятому ГГО.

Ниже приводятся сведенные в таблицу погрешности всех трех родов барометров при поверке и при наблюдениях.



	Барометры				
	чашечные		контроль- ные, мм	инспекторские	
	без раз- бивки, мб	с раз- бивкой, мб		мм	мб
Средние погрешности инстру- ментальной поправки . . . . .	$\pm 0,13$	$\pm 0,18$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,07$
Максимальные погрешности инст- рументальной поправки . . . . .	$\pm 0,37$	$\pm 0,39$	$\pm 0,10$	$\pm 0,14$	$\pm 0,20$
Средние погрешности одного отсче- та исправленного инструменталь- ной поправкой . . . . .	$\pm 0,16$	$\pm 0,19$	$\pm 0,06$	$\pm 0,06$	$\pm 0,08$
Максимальные погрешности одного отсчета, исправленного инстру- ментальной поправкой . . . . .	$\pm 0,47$	$\pm 0,49$	$\pm 0,12$	$\pm 0,17$	$\pm 0,26$

## О ТОЧНОСТИ ПОПРАВОК МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕТРОВ

Возросшая за последние 10—12 лет сеть поверочных организаций, запросы гидрометслужбы о точности наблюдений, о продолжительности эксплуатации приборов вызвали вопрос о постановке экспериментальных работ по определению количественных значений погрешностей поверки приборов, в частности термометров.

Инструментальные поправки к термометрам, как известно, определяются относительно международной стоградусной шкалы температур посредством сравнения их с контрольным термометром.

В поверочных свидетельствах к термометрам поправки даются двух видов: поправки „при“ — на точках сличения с контрольным термометром и так называемые поправки „от—до“ — для определяемых способом интерполяции промежуточных шкалы. Поправки „при“ даются как в сотых, так и в десятых долях градуса, поправки „от—до“ даются только в десятых долях градуса.

В работах за 1948—1949 гг. на тему „Погрешности поверки метеорологических термометров“ на большом цифровом материале были получены погрешности обоих видов поправок термометров: психрометрических, к аспирационному психрометру большой модели, к ртутному барометру, максимальных и минимальных.

Для проведения экспериментальных работ были использованы по 10 термометров каждого типа, удовлетворяющих техническим требованиям на изготовление их и требованиям поверки, изложенным в „Руководстве по поверке метеорологических и аэрологических приборов“.

Проведение эксперимента заключалось в десятикратных повторных сериях сравнений термометров с контрольным на каждой из точек 10°, 20°, 30° и т. д. Кроме того, термометры психрометрические и к аспирационному психрометру б/м сравнивались по десять раз на промежуточных точках 5°, 15°, 25° и т. д., а максимальные, минимальные и к ртутному барометру — на этих же точках по одному разу.

Сравнения проводились в поверочных установках Центрального бюро поверки ГГО применительно к методу, принятому в ГГО и изложенному в указанном выше „Руководстве“.

По этому методу инструментальные поправки к метеорологическим термометрам получаются суммированием поправок поверяемых термометров, полученных относительно контрольного термометра, с инструментальными поправками самого контрольного термометра. Следовательно, погрешность инструментальных поправок поверяемых термометров зависит от погрешности поправок относительно контрольного и погрешности поправок самого контрольного термометра.

### Погрешности поправок относительно контрольного термометра

Под погрешностью поправок условимся понимать среднюю квадратичную погрешность, определяемую по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum p^2}{(k-1)n}}$$

где  $p$  — остаточные погрешности,  $k$  — число сравнений,  $n$  — количество сравниваемых термометров.

Погрешности поправок относительно контрольного термометра на различных температурных точках

Наименование термометров	-60°		-50°		-40°		-30°		-20°		-10°		0°	
	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные
Психрометрические . . . . .	-	-	-	-	-	-	±0,01	±0,03	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02
К аспирационному психро-метру б/м . . . . .	-	-	-	-	-	-	±0,01	±0,02	±0,01	±0,03	±0,01	±0,03	±0,01	±0,02
Максимальные . . . . .	-	-	-	-	-	-	±0,02	±0,05	±0,01	±0,02	±0,01	±0,03	±0,01	±0,04
Минимальные . . . . .	±0,02	±0,05	±0,01	±0,02	±0,02	±0,05	±0,03	±0,09	±0,01	±0,03	±0,01	±0,04	±0,02	±0,05
К ртутным барометрам . . . . .	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	±0,01	±0,03

Наименование термометров	+10		+20°		+30°		+40°		+50°		Число случаев
	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	сред-ние	макси-мальные	
Психрометрические . . . . .	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02	±0,01	±0,03	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02	110
К аспирационному психро-метру б/м . . . . .	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02	90
Максимальные . . . . .	±0,01	±0,03	±0,01	±0,03	±0,01	±0,03	±0,01	±0,02	±0,01	±0,02	100
Минимальные . . . . .	±0,01	±0,04	±0,01	±0,02	-	-	-	-	-	-	100
К ртутным барометрам . . . . .	±0,01	±0,03	±0,01	±0,03	±0,01	±0,03	±0,01	±0,03	±0,01	±0,03	100

Поправка относительно контрольного получается как средняя из 10 отдельных поправок в серии сравнений поверяемого термометра с контрольным. Так как при нашем эксперименте проводилось по 10 серий сравнений на каждой температурной точке, то мы имели для каждого термометра по 10 поправок относительно контрольного. Вычислялись средние из этих 10 поправок и находились отклонения каждой поправки от средней. Затем на каждой температурной точке подсчитывалась повторяемость отклонений по всем термометрам и вычислялись средняя и максимальная погрешности поправок относительно контрольного. За максимальную погрешность принималась утроенная средняя погрешность.

Результаты вычислений приводятся в табл. 1.

Из рассмотрения погрешностей, приведенных в этой таблице, следует, что погрешности поправок относительно контрольных на любой точке шкалы термометра не превышают величин, представленных табл. 2.

Таблица 2

Погрешности поправок относительно контрольного для различных термометров

Наименование термометров	Погрешность	
	средняя	максимальная
Психрометрические . . . . .	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$
К аспирационному психрометру б/м . . . . .	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$
Максимальные . . . . .	$\pm 0,02$	$\pm 0,05$
Минимальные . . . . .	$\pm 0,03$	$\pm 0,09$
К ртутным барометрам . . . . .	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$

Полученные погрешности очень незначительны по величине. Это указывает на то, что метод сравнений, принятый ГГО, гарантирует получаемые поправки относительно контрольного с достаточной точностью при условии качества изготовления самих термометров. Если качество самих термометров неудовлетворительное, что имело место при нашем исследовании с некоторыми максимальными термометрами, то погрешность поправок в отдельных случаях может превышать приведенные величины.

### Погрешности инструментальных поправок термометров

Как уже упоминалось выше, инструментальные поправки к поверяемым термометрам по принятому методу получаются суммированием поправок относительно контрольного термометра с его поправкой. Отсюда погрешность инструментальной

Таблица 3

Средние погрешности инструментальных поправок контрольных термометров

№ термометров	Ртутные			Спиртовые
	21	22	411	215
Погрешности поправок . . . . .	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$

поправки определяется двумя погрешностями: погрешностью поправки относительно контрольного и погрешностью инструментальной поправки контрольного термометра. Погрешности поправок контрольных термометров, с которыми производится сравнение, были получены в результате статистической обработки архивного материала по определению поправок к этим термометрам и приводятся в табл. 3.

Так как рассматриваемые погрешности являются случайными, то к ним можно применить способ квадратичного суммирования. Тогда погрешности инструментальных поправок будут следующие (табл. 4).

Таблица 4

Погрешности инструментальных поправок метеорологических термометров

Наименование термометров	Средняя погрешность	Повторяемость, %	Максимальная погрешность	Повторяемость, %
Психрометрические . . . . .	$\pm 0,01$	94,6	$\pm 0,03$	99,8
К аспирационному психрометру б/м . . . . .	$\pm 0,01$	95,6	$\pm 0,04$	99,9
Максимальные . . . . .	$\pm 0,02$	93,6	$\pm 0,06$	99,8
Минимальные . . . . .	$\pm 0,03$	92,0	$\pm 0,09$	100
К ртутным барометрам . . . . .	$\pm 0,01$	93,8	$\pm 0,03$	100

В результате сличения поверяемых термометров с контрольным поправки к поверяемым термометрам получаются на точках шкалы, кратных десяти. Погрешности этих поправок даны в табл. 4.

Сравнивая табл. 2 и 4, видим, что погрешности инструментальных поправок контрольных термометров заметно не влияют на погрешности инструментальных поправок поверяемых термометров. Погрешности последних определяются главным образом величиной погрешности поправок относительно контрольного термометра.

При составлении поверочного свидетельства полученные поправки подвергаются некоторым изменениям. Для поправок „при“, согласно принятой методике, допускаются изменения поправок на  $\pm 0,01^\circ$  и на  $\pm 0,02^\circ$  на всех точках шкалы, кроме  $0^\circ$ , с целью получения более плавного сглаженного хода поправок. Однако следует заметить, что, исходя из полученных погрешностей, нет основания выделять при сглаживании точку  $0^\circ$ , так как погрешности на точке  $0^\circ$  того же порядка, что и на других точках.

Таблица 5

Погрешности поправок «при» на точках сличения

Наименование термометров	Абсолютные погрешности		Относительная максимальная погрешность, %
	средняя	максимальная	
Психрометрические . . . . .	$\pm 0,01$	$\pm 0,04$	10
К аспирационным психрометрам б/м . . . . .	$\pm 0,01$	$\pm 0,05$	12,5
Максимальные . . . . .	$\pm 0,02$	$\pm 0,07$	17,5
Минимальные . . . . .	от $-0,09$	до $\pm 0,34$	68
К ртутным барометрам . . . . .	$\pm 0,01$	$\pm 0,04$	8

Следовательно, поправки „при“, указываемые в поверочных свидетельствах, имеют, кроме приведенных в табл. 4, еще погрешности сглаживания, не превышающие  $\pm 0,02^\circ$ . Если принять за среднюю погрешность сглаживания  $\pm 0,01^\circ$ , то погрешности поправок „при“ будут находиться в пределах, указанных в табл. 5.

В табл. 5 обращают на себя внимание пределы погрешностей поправок минимальных термометров. Дело в том, что спирт, наполняющий резервуар и капилляр минимальных термометров, обладает способностью при некоторых условиях дистиллироваться в верхнюю часть капилляра, а также смачивать стенки капилляра. Поэтому показания спиртовых термометров имеют ошибки, вызванные этим явлением. Оно может проявляться и во время пребывания в поверке термометров и влиять на величину поправок.

При поверке ошибка за счет дистилляции определяется расхождением показаний при  $0^\circ$  между двумя определениями поправок: в начале и в конце цикла поверки. Это расхождение, согласно установленным допускам на поверку, не должно превышать  $-0,25^\circ$ . При обработке полученного при сличении с контрольным термометром материала для вычисления поправок к поверяемым термометрам принимаются вторые поправки на точке  $0^\circ$ , т. е. полученные в конце цикла поверки. Тем самым допускается, что количественные значения погрешностей поправок на первых и на последних поверенных точках, при всех других равных условиях, могут изменяться от  $0,00^\circ$  до  $+0,25^\circ$ . Если дистилляции во время поверки нет, что имело место при нашем опыте, то максимальная погрешность поправок может быть  $\pm 0,09^\circ$ . При наличии дистилляции погрешность поправок может меняться от  $-0,09^\circ$  до  $+0,34^\circ$ .

В табл. 5 приводятся также относительные погрешности в процентах, показывающие отношение максимальных погрешностей к наименьшим допускаемым величинам поправок.

При составлении в поверочных свидетельствах табличек с поправками, округленными до  $0,1^\circ$  (так называемые поправки „от — до“), допускается погрешность округления, не превышающая  $\pm 0,05$ . Кроме того, при определении способом линейной интерполяции промежутков применения этих поправок также вносится некоторая погрешность.

Погрешность интерполяции определялась путем статистической обработки разностей между опытными и интерполированными на точках шкалы  $-5^\circ$ ,  $+5^\circ$ ,  $+15^\circ$ ,  $+25^\circ$  и т. д. поправками. Средняя погрешность интерполяции для ртутных термометров была получена порядка  $\pm 0,02^\circ$ , а для спиртовых  $\pm 0,05^\circ$ .

Учитывая все эти погрешности и применяя способ квадратичного суммирования, получаем погрешности поправок „от — до“ (табл. 6).

Таблица 6

Погрешности поправок «от—до» различных термометров

Наименование термометров	Абсолютная погрешность		Относительная максимальная погрешность, %
	средняя	максимальная	
Психрометрические . . . . .	$\pm 0,03$	$\pm 0,09$	25
К аспирационным психрометрам б/м	$\pm 0,03$	$\pm 0,09$	25
Максимальные . . . . .	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$	25
Минимальные . . . . .	—	от $-0,18$ до $+0,43$	86
К ртутным барометрам . . . . .	$\pm 0,03$	$\pm 0,09$	20

### Погрешности отдельных поправок в серии

Как уже упоминалось выше, поправки относительно контрольного термометра получаются как средние из 10 поправок (разностей между отсчетами контрольного и поверяемого термометров) в серии.

Для поверки интересно было оценить точность каждой из этих 10 отдельных поправок. Для этого на нескольких температурных точках для каждого вида термометров вычислялись отклонения каждой из 10 поправок от средней из них. Состав-

Погрешности отдельных поправок (разностей) в серии на различных точках шкалы

Наименование термометров	-60°		-50°		-40°		-30°		-20°		-10°		0°	
	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные
Психрометрические . . . . .	—	—	—	—	—	—	±0,02	±0,06	±0,03	±0,08	±0,02	±0,07	±0,003	±0,01
К аспирационным психро- метрам б/м . . . . .	—	—	—	—	—	—	±0,02	±0,07	±0,03	±0,07	±0,03	±0,07	±0,002	±0,004
Максимальные . . . . .	—	—	—	—	—	—	±0,03	±0,09	±0,02	±0,07	±0,03	±0,08	±0,01	±0,02
Минимальные . . . . .	±0,04	±0,12	±0,04	±0,11	±0,04	±0,11	±0,04	±0,13	±0,04	±0,11	±0,04	±0,12	±0,01	±0,04
К ртутным барометрам . . . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	±0,01	±0,03

Наименование термометров	+10°		+20°		+30°		+40°		+50°		Число случаев
	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	сред- ние	макси- маль- ные	
Психрометрические . . . . .	±0,03	±0,08	—	—	±0,03	±0,08	—	—	—	—	200
К аспирационным психро- метрам б/м . . . . .	±0,03	±0,08	—	—	—	—	—	—	±0,02	±0,07	200
Максимальные . . . . .	±0,02	±0,07	—	—	±0,02	±0,07	—	—	±0,03	±0,08	200
Минимальные . . . . .	±0,03	±0,09	±0,03	±0,08	—	—	—	—	—	—	300
К ртутным барометрам . . . . .	±0,04	±0,12	±0,04	±0,12	±0,04	±0,12	—	—	—	—	400

лялись ряды распределения отклонений по каждой температурной точке отдельно и вычислялись погрешности отдельной поправки в серии.

В табл. 7 приводятся погрешности отдельных поправок в серии для каждого типа исследуемых термометров.

Рассматривая табл. 7, отмечаем, что погрешности отдельных отсчетов при 0° заметно отличаются от погрешностей на других точках. Это станет вполне понятным, если учесть, что условия поверки точки 0° несколько отличны от условий поверки других точек. Во-первых, поверка точки 0° производится в тающем снегу, следовательно при стационарной температуре, в то время как другие точки проверяются при непрерывно меняющейся температуре жидкости в ванне. Во-вторых, на точке 0° при каждом наблюдении производится только отсчет поверяемого термометра, следовательно и погрешность будет только одного отсчета. На других точках наблюдение состоит из двух отсчетов (контрольного термометра и поверяемого), значит и погрешность разности между ними возрастает.

На всех других точках шкалы, кроме точки 0°, можно считать погрешность отдельных разностей в серии для каждого типа термометров не превышающей величин, приведенных в табл. 8.

Таблица 8

Погрешности отдельных поправок (разностей) в серии для различных термометров

Наименование термометров	Погрешности	
	средняя	максимальная
Психрометрические . . . . .	$\pm 0,03$	$\pm 0,08$
К аспирационным психрометрам б/м	$\pm 0,03$	$\pm 0,07$
Максимальные . . . . .	$\pm 0,03$	$\pm 0,09$
Минимальные . . . . .	$\pm 0,04$	$\pm 0,11$
К ртутным барометрам . . . . .	$\pm 0,04$	$\pm 0,12$

На основании полученных погрешностей можно заключить, что для обеспечения точности инструментальных поправок в тех пределах, которые даны в табл. 5 и 6, необходимо соблюдать еще следующие условия поверки дополнительно к тем, которые изложены в „Руководстве“ по поверке метеорологических и аэрологических приборов.

1. Наибольшее расхождение отдельных отсчетов в серии при 0° у ртутных термометров с ценой деления 0,2° не может быть больше 0,02°; с ценой деления выше 0,2° расхождение допустимо не больше 0,06°.

У спиртовых термометров — расхождение не более 0,08°.

2. Наибольшее расхождение между отдельными поправками (разностями) в серии на точках шкалы, отличных от 0°, у ртутных термометров с ценой деления 0,2° допустимо 0,15°; у термометров ртутных и спиртовых с ценой деления 0,5° допустимое расхождение 0,20° и у ртутных с ценой деления 1° — не больше 0,25°.

3. При повторной поверке термометров (точки 0°), характеризующей изменение поправок в связи со старением стекла, нецелесообразно менять поправки по шкале, если изменение поправки на точке 0° у ртутных термометров не превышает  $\pm 0,02^\circ$ , а у спиртовых  $\pm 0,10^\circ$ .

### Выводы

Анализируя изложенный материал, приходим к выводу, что точность поправок ртутных термометров, определяемых по методу, принятому ГГО, довольно велика.

Погрешность более чем у 90% (табл. 4) поправок не превышает средней погрешности порядка  $\pm 0,03^\circ$ , и только единичные поправки имеют максимальные погрешности, которые все же остаются меньше 0,1°.

У спиртовых термометров точность поправок значительно понижена по сравнению с ртутными. Главной причиной, вызывающей уменьшение точности, является возможность дистилляции спирта и смазывание стекла.

