

Е. П. АНИСИМОВА, А. А. СПЕРАНСКАЯ

## ИЗМЕРЕНИЕ МИКРОПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВОДОЕМАХ

Дано описание методики измерения микропульсаций температуры в естественных водных бассейнах. Оценены амплитудные и фазовые искажения, возникающие при измерении микропульсаций температуры за счет тепловой инерции датчика. Приведен пример непрерывной записи флуктуаций температуры воды на разных глубинах водоема.

Определение микропульсаций температуры воды является важной частью исследований турбулентности водоемов — одной из актуальных проблем современной гидрофизики.

В настоящее время для измерения пульсаций температуры воды используются датчики двух типов — металлические и полупроводниковые термометры сопротивления [1, 2, 3] и термопары [4, 5].

Описанные в литературе исследования микроструктуры температурного поля в воде относятся к незамерзающим морям. Причем чувствительность аппаратуры для измерений пульсаций температуры при условии применения усилителей постоянного тока не превышает  $0,001^\circ$  [3, 4, 5].

В процессе изучения турбулентности малопроточных водоемов, покрытых льдом, мы столкнулись с необходимостью измерения пульсаций температуры с амплитудами порядка  $5 \cdot 10^{-4}^\circ$ . С 1955 г. в качестве чувствительных элементов для определения пульсаций температуры таких амплитуд мы использовали дифференциальные термобатареи [6], так как их применение позволяет получить высокую чувствительность без усиления сигнала с датчика, что повышает стабильность аппаратуры и облегчает работу в природе. Датчики, основанные на аналогичном принципе, использовались в [7, 8].

Принцип измерения пульсаций температуры воды термопарным датчиком основан на различной термической инерции четных и нечетных спаев термобатареи, собранной из последовательно соединенных термопар. При наличии колебаний температуры на концах такой термобатареи возникает термоэлектрическая сила. Участок спектра турбулентных пульсаций температуры, на который реагирует датчик, зависит от тер-

мической инерции открытых (внешних) и термостатированных (внутренних) спаев. Термобатарея не реагирует на медленные плавные колебания средней температуры воды. Это позволяет практически неограниченно увеличивать продолжительность записи, не прерывая измерений для компенсации влияния средней температуры, что весьма важно при исследованиях структуры турбулентности природных водоемов, где средняя температура воды непрерывно меняется\*. Подбирая постоянные времени внешних и внутренних спаев, можно изготовить датчик, рассчитанный на измерение различных участков спектра в определенном интервале частот турбулентных пульсаций температуры. Напряжение с термобатареи подается непосредственно на шлейфовый осциллограф.

Известно, что чувствительность термобатареи при заданной паре металлов зависит от числа соединенных последовательно термопар, от внутреннего сопротивления датчика и от характеристик регистрирующей аппаратуры:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{c} \cdot \frac{ne}{1 + \frac{nR + r}{R_r}}, \quad (1)$$

где  $N$  — показание шкалы регистрирующего прибора, мм,  $t$  — разность температур между внутренними и внешними спаями термобатареи, °С,  $c$  — цена деления регистрирующего прибора, вольт,  $n$  — число последовательно соединенных термопар в батарее,  $e$  — постоянная выбранной термопары,  $nR$  — сопротивление термобатареи,  $R_r$  — сопротивление регистрирующего гальванометра,  $r$  — сопротивление подводящих проводов. Это соотношение используется для предварительного расчета числа термопар, необходимого для получения заданной чувствительности.

Использовавшиеся нами датчики представляют собой дифференциальные медно-константановые термобатареи, составленные примерно из 500 последовательно соединенных термопар, для изготовления которых используется неизолированная проволока диаметром 0,1 мм. Применяется пайка термопар, а не сваривание их, так как при сварке места соединений константана с медью становятся хрупкими и легко ломаются. Готовую термобатарею наклеивают на хлорвиниловую ленту. Затем ленту с термопарами навивают на латунный стержень, в котором для измерения средней температуры воды укрепляют термистор. Используют термисторы типа МТ-54, так как они обладают высокой стабильностью, большим температурным коэффициентом и малыми размерами термоприемника. Размеры готового датчика не превышают  $2,5 \times 1,5$  см. Внешний вид датчика представлен на рис. 1. Смонтированный датчик крепят к раме, снабженной хвостовым оперением, устанавливающим датчик по течению.

Медно-константановый термостолбик может быть изготовлен также методом электролиза [10]. При этом по длине константановой проволоки чередующимися участками осаждается медь. Электрохимический способ упрощает и несколько ускоряет процесс изготовления термобатарей, так как исключается кропотливая работа спаивания отдельных проволок. Однако при этом в каждой отдельной термопаре возникает циркуляционный ток, который снижает величину общей термоэлектрической силы термобатареи, что невыгодно при сборке высокочувствительных датчиков.

\* Используя для регистрации пульсаций температуры термометр сопротивления, удается получить такой же эффект слежения прибора за средней температурой, лишь сильно усложняя измерительную схему [9].

Для работы в пресных водоемах нет необходимости электроизолировать термопары, для морских же вод готовые цепочки термопар еще до монтажа датчика покрывают тонким слоем масляного лака или лака СБ-1С и высушивают в термостате.

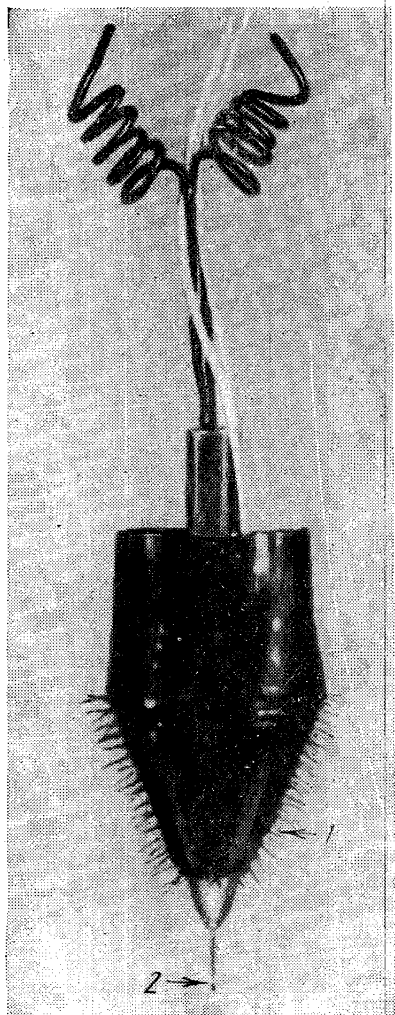


Рис. 1. Датчик для измерения пульсаций температуры и средней температуры воды: 1 — внешние малоинерционные спай термопары, 2 — термистор

ции температуры с амплитудами  $1,0-3,3 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Для определения частот турбулентных микропульсаций температуры, которые можно фиксировать с помощью термопарного датчика, необходимо определить термическую инерцию прибора. При работе с термопарным датчиком в качестве регистратора обычно используется шлейфовый осциллограф с гальванометрами, обладающими достаточно высокой собственной частотой колебаний. Таким образом, инерция прибора полностью определяется инерцией термопары.

При измерении небольших разностей температур зависимость электродвижущей силы термопары от перепада температур между ее открытыми и термостатированными спаями можно считать линейной. При градуировке датчик выдерживают в термостате, заполненном водой, до полного выравнивания температуры между наружными и внутренними спаями, что определяется по нулевому отклонению зайчика шлейфа осциллографа, подключенного к термопаре. После уравнивания системы датчик быстро переносят во второй термостат, температура воды в котором отличается от температуры воды в первом термостате на  $\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$ . Перенос датчика из одного сосуда в другой не сказывается на градуировке, так как инерционные спай термопары обладают достаточно большой постоянной времени. На ленте осциллографа фиксируется напряжение, возникшее на концах термопары и пропорциональное перепаду температур между термостатами. Фиксируя напряжение, возникающее на концах термопары при перепадах температур между термостатами в 1, 2, 3° и т. д., получаем градуировочный график. Так как зависимость между перепадом температур и напряжением на концах термопары линейна, то простым пересчетом из градуировочного графика определяется чувствительность термопары. Средняя чувствительность термопары описанной конструкции равна  $3 \cdot 10^{-3} \text{ вольт/}^\circ\text{C}$ . Это позволяет, используя в качестве регистратора гальванометры с чувствительностью  $0,3-1,0 \cdot 10^{-6} \text{ вольт/мм}$ , измерять пульсации

Постоянная времени датчиков определялась экспериментально по осциллограмме переходного процесса при скачкообразном изменении температуры среды.

Кривая установления температуры открытых спаев термобатарей хорошо описывается дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{dt}{d\tau} + \frac{t - t^*}{\beta} = 0, \quad (2)$$

где  $\tau$  — время,  $t$  — температура спаев,  $t^*$  — температура среды, в которую погружен датчик,  $\beta$  — постоянная времени, характеризующая инерцию спаев.

Уравнение, которому подчиняется процесс установления температуры термостатированных спаев, отличается от уравнения (2) лишь масштабом времени  $\beta$ .

Решение уравнения (2) при условии постоянства температуры среды, в которую помещается термоприемник ( $t^* = \bar{t} = \text{const}$ ), выразится равенством

$$t = \bar{t} + (t_0 - \bar{t}) e^{-\frac{\tau}{\beta}}, \quad (3)$$

где  $t$  и  $t_0$  — температура термоприемника в моменты времени  $\tau$  и  $\tau=0$ ,  $\bar{t}$  — температура среды,  $\beta$  — постоянная времени датчика.

Используя запись хода температуры термоприемника во времени, полученную на ленте осциллографа при погружении термобатарей в воду с постоянной температурой, по формуле (3) можно рассчитать постоянную времени для чувствительных и термостатированных спаев термобатарей.

Постоянная времени открытых спаев использовавшихся нами термометрических датчиков равна 0,1 сек.

Рассмотрим ошибку, с которой спаи термобатарей, обладающие постоянной времени  $\beta$ , воспринимают колебания температуры воды, если последние имеют установившийся периодический характер с амплитудой  $\Delta t$  и частотой  $\nu$ , т. е. если

$$t^* = \bar{t} + \Delta t \sin \omega \tau, \quad (4)$$

где  $\bar{t}$  — среднее значение температуры воды и  $\omega = 2\pi\nu$ , то уравнение (2) примет вид

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{\beta} [\Delta t \cdot \sin \omega \tau + \bar{t} - t]. \quad (5)$$

Уравнение, соответствующее установившемуся колебательному характеру температуры среды, имеет вид

$$(\Delta t) = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 + \omega^2 \beta^2}} \cdot \sin(\omega \tau + \varphi), \quad (6)$$

где  $\varphi = \text{arctg } \omega \beta$ .

Таким образом, пульсации температуры, которые фиксируются прибором, будут уменьшены по амплитуде в  $H(\nu) = \sqrt{1 + \omega^2 \beta^2}$  раз и сдвинуты по фазе на  $\varphi(\nu) = \text{arctg } \omega \beta$ .

Амплитудные и фазовые искажения, которые вносит термобатарея в измерения пульсаций температуры различных частот за счет инерции открытых спаев, представлены на рис. 2.

Фазочастотная характеристика термобатарей на участке спектра пульсаций от 0 до 2 гц линейна, т. е. термобатарея не изменяет частотный состав спектра в этом диапазоне.

За счет термической инерции внутренних спаев спектр пульсаций, регистрируемый с помощью термопарного датчика, ограничен и со стороны низких частот. Постоянная времени внутренних спаев около 20 сек. Следовательно, с помощью описанной аппаратуры возможно регистрировать без существенного уменьшения пульсации температуры до частот порядка 0,05 гц. При этой частоте амплитуда пульсаций уменьшается на 15%.

В течение ряда лет с помощью термопарного датчика, соединенного со шлейфовым осциллографом, нами проводились исследования микроструктуры температурного поля озер Байкал и Севан и Учинского водохранилища Московской области. Исследования проходили в период, когда поверхность водоемов свободна ото льда, в зимнее время — подо льдом и в моменты становления и вскрытия водоемов. Описанная аппаратура позволила определить основные турбулентные характеристики температурного поля в воде — интенсивность пульсаций, тепловой поток, коэффициент обмена тепла, размеры температурных неоднородностей, спектральные функции пульсаций температуры — и выявить некоторые закономерности турбулентного обмена в водоемах.

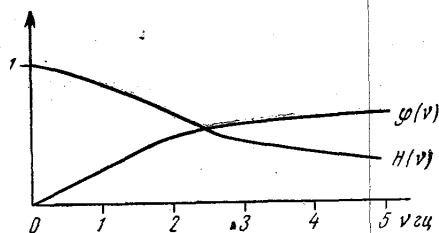


Рис. 2. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики чувствительных спаев термобатареи

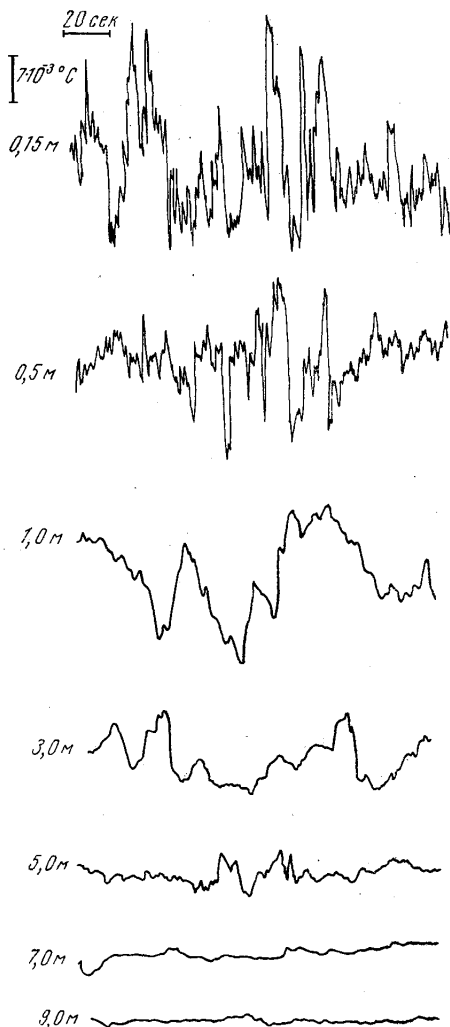


Рис. 3. Пример записи пульсаций температуры на различных глубинах Учинского водохранилища

В качестве иллюстрации работы прибора на рис. 3 представлена запись пульсаций температуры на различных глубинах Учинского водохранилища в летний период. На приведенной осциллограмме хорошо видно убывание амплитуд и частот турбулентных микропульсаций температуры по направлению от поверхности водоема ко дну. Во время записи пульсаций температуры на водохранилище наблюдалось значительное волнение. При устойчивой стратификации температуры и практически полном отсутствии адвективного обмена приведенные записи свидетельствуют о затухании обмена, вызванного ветровым перемешиванием, с глубиной водохранилища.

## ЛИТЕРАТУРА

1. English W. W. Bull. Amer. Phys. Soc., 28, No. 5, 15, 1953.
2. Контобойцева Н. В. «Изв. АН СССР», сер. геофизическая, № 1, 86, 1958.
3. Колесников А. Г., Пантелеев Н. Ан., Пыркин Ю. Г., Петров В. П., Иванов В. Н. «Изв. АН СССР», сер. геофизическая, № 3, 408, 1958.
4. Libermann L. J. Acust. Soc., 23, No. 5, 1951.
5. Urick, Searfoss. Naval Research Laboratory NII Report, 1948.
6. Колесников А. Г., Савин В. Г., Сперанская А. А. Сб. «Новые методы и аппаратура для исследования русловых процессов», 1959.
7. Филиппов И. А. «Тр. Ин-та океанологии», 47, 1961.
8. Немченко В. «Тр. Морского гидрофизического ин-та», 13, 73, 1958.
9. Цванг Л. Р. «Изв. АН СССР», сер. геофизическая, № 8, 1252, 1960.
10. Попов М. М. Термометрия и калориметрия. Изд-во МГУ, 1954.

Поступила в редакцию  
28. 11 1963 г.

Кафедра  
физики моря и вод суши