

А. Г. ВОСКАНЯН, А. А. ПИВОВАРОВ, Г. Г. ХУНДЖУА

К МЕТОДИКЕ НАБЛЮДЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В МОРЕ

Дано описание электронной схемы и методики непрерывной регистрации температуры с точностью $0,05^\circ$ и давления с точностью 1% в поверхностном слое моря до глубины 250 м. Дается описание методики работы с аппаратурой в морских условиях. Приведены образцы записи распределения температуры по глубине и некоторые результаты полученных данных вертикального зондирования во время суточной станции на Черном море.

Тепловое и динамическое взаимодействие моря и атмосферы обуславливает характерную особенность вертикальной температурной стратификации: существование почти однородного в термическом отношении поверхностного слоя моря, отделенного от глубинных вод сравнительно тонким слоем с резким перепадом температур. Многообразие и сложная взаимосвязь факторов пока не позволяют дать достаточно полного теоретического анализа такого вертикального профиля температуры в море. Установление эмпирических закономерностей на основе обобщения стандартных океанографических наблюдений также встречает значительные трудности вследствие дискретности таких наблюдений по глубине.

При экспериментальном исследовании, особенно тонкой структуры однородного поверхностного слоя моря, надежные результаты могут быть получены лишь путем непрерывной регистрации температуры воды по глубине. Для решения этой задачи в методике измерений все возрастающее значение приобретают принципы термометра сопротивления с металлическими или полупроводниковыми датчиками температуры. Однако в разработанных на этой основе океанографических приборах [1, 2] абсолютная погрешность регистрации температуры воды составляет $0,1^\circ$, что является неприемлемым для целого ряда задач термики моря.

На кафедре физики моря и вод суши в связи с исследованием температурного режима моря была создана и опробована в морских условиях новая аппаратура для регистрации температуры воды с точностью $0,05^\circ$ с одновременной регистрацией давления с погрешностью меньше 1%.

Разработанная аппаратура состоит из следующих блоков: измерительного моста, датчика давления с электрическим выходом, полупро-

водниковых стабилизаторов напряжения, регистрирующих устройств с согласующими цепочками и питания. Измерительный мост с датчиками температуры и блок давления со своими стабилизаторами напряжения питания размещены в контейнере и составляют подводную часть прибора. Регистрирующие устройства, стабилизатор опорного напряжения и блок питания объединены в общий пульт управления, который находится на борту судна. Пульт управления связан с подводной частью прибора многожильным морским кабелем. Общее питание при-

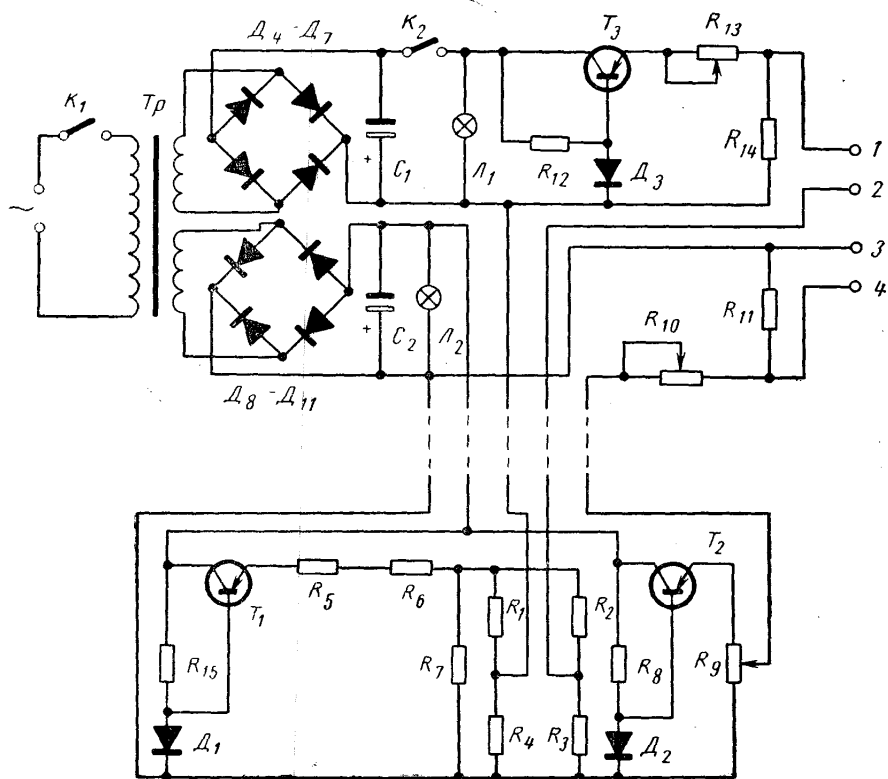


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема прибора

бора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 в и частотой 50 гц. Полная электрическая схема прибора дана на рис. 1.

Измерительный мост состоит из двух датчиков температуры R_1 и R_3 и манганиновых сопротивлений R_2 и R_4 . Мост питается от стабилизатора напряжения, собранного на кремниевом стабилитроне D_1 и проходном транзисторе T_1 . Сопротивления делителя R_5 и R_7 выполнены из манганина. Сопротивление R_6 изготовлено из медного провода и служит для температурной компенсации стабилизатора. Введение температурной компенсации позволяет получить стабилизацию питания моста в интервале изменения температуры 0—40° с погрешностью меньше 0,05% при точности измерения температуры воды 0,5%.

Определение глубины погружения прибора ведется при помощи датчика давления R_d мембранного типа с потенциометрическим выходом. Постоянство питания датчика давления обеспечивается стабилизатором, собранным на диоде D_2 и транзисторе T_2 .

Регистраторами каналов температуры и давления в пульте управления являются самопишущие потенциометры типа ЭПП-09МЗ. Согласующая цепочка канала регистрации давления собрана на сопротивлениях R_{10} и R_{11} . Для перекрытия диапазона регистрации температуры воды в интервале $5-25^\circ$ служит опорное напряжение, снимаемое со стабилизатора, собранного на диоде D_3 и транзисторе T_3 .

Рассмотрим определение основных параметров прибора и методику работы с ним в морских условиях.

Разрешающим устройством канала регистрации температуры воды является неуравновешенный мост постоянного тока. Для повышения чувствительности в данном варианте моста вместо одного применено два датчика температуры R_1 и R_3 , включенные в противоположные плечи. В качестве датчиков использованы одинаковые, герметичные до 25 атм платиновые термометры сопротивления типа ИС-264 А заводского изготовления с сопротивлением $R_0 = 100$ ом при 0° .

Сопротивления платиновых термометров в широком интервале являются линейной функцией температуры. Если мост равноплечий при 0° , т. е. $R_2 = R_4 = R_0 = R$, а сопротивление диагонали моста $R_d = nR$ и сопротивление цепи источника питания $R_E = mR$, то величина напряжения u разбаланса в диагонали моста при изменении температуры датчиков будет

$$u = \frac{nE\alpha t}{At + B}, \quad (1)$$

где $A = \alpha(2 + n + m)$, $B = 2(1 + n + m + nm)$, α — температурный коэффициент сопротивления платины.

Отсюда для определения чувствительности моста получим

$$\frac{du}{dt} = \frac{nE\alpha}{At + B} \left(1 - \frac{At}{At + B} \right). \quad (2)$$

При принятых значениях параметров измерительной схемы $n = 1$, $m = 0,1$ и напряжении источника питания $E = 1,5$ в величина чувствительности в средней точке измеряемого интервала температуры имеет значение

$$\frac{du}{dt} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ в/град.}$$

При измерении температуры с точностью $0,05^\circ\text{C}$ напряжение разбаланса du в диагонали моста будет составлять $6,5 \cdot 10^{-5}$ в, что находится в пределах чувствительности регистрирующего потенциометра и позволяет непосредственно использовать его без дополнительного усиления сигнала.

Так как собственная погрешность потенциометра составляет 0,5%, то вся шкала его с погрешностью $0,05^\circ$ будет равна 10° . Для работы в море выбран интервал температуры в 20° , поэтому в канале регистрации предусмотрено опорное напряжение для переключения шкалы потенциометра на два диапазона: $5-15^\circ$ и $15-25^\circ$.

Как показывает выражение (2), чувствительность моста повышается при возрастании напряжения E источника питания. Однако при этом величина протекающего через датчики тока также растет, что может приводить к существенным ошибкам вследствие перегрева датчиков температуры измерительным током.

Допустимое значение напряжения питания моста выбиралось из условия, чтобы величина перегрева датчиков током питания была мень-

ше заданной точности измерений. Для примененных платиновых термометров сопротивления величины перегрева θ в зависимости от протекающего через них тока i были получены экспериментально по следующей методике. Датчики, включенные в плечи уравновешенного моста, помещались в термостат и определялось изменение сопротивления их при различных значениях тока питания. По полученной кривой находилось предельное значение силы тока, не вызывавшее изменения сопротивления датчиков больше допустимой погрешности измерений. Затем при этом значении силы тока проводилась градуировка термометров сопротивления в термостате с регулируемой температурой. Сравнение градуировочной кривой и кривой изменения сопротивления платиновых термометров в зависимости от протекающего через них тока позволяет получить величины перегрева. Результаты такого определения представлены в таблице. При регистрации температуры воды указанными датчиками с точностью до $0,05^\circ$ в спокойной воде напряжение питания моста не должно превышать 2 в.

$E, \text{ в}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$i, \text{ ма}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\theta \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$	0,03	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	1,5	2,0	2,4	3,0

Для определения погрешностей, обусловленных тепловой инерционностью датчиков температуры, их постоянная времени была найдена экспериментально по известной методике [3]. Для датчиков заводского исполнения постоянная времени в спокойной воде равна 3,5 сек. При выполнении герметической оболочки датчиков глицерином постоянная времени уменьшается до 1,4 сек. Датчики последнего типа и использовались при практических наблюдениях температуры воды в море.

Определение глубины погружения прибора осуществляется посредством дистанционного датчика давления типа ДМ. Для обеспечения необходимой точности питание датчика давления дополнительно стабилизировано. Неоднократные испытания датчиков давления с самописцем показали, что погрешность измерения не превышает 1%.

Для удобства наблюдений в процессе температурного зондирования и обработки получаемых записей шкалы самописцев проградуированы в градусах температур $0,05^\circ$ и в метрах глубины 0,5 м. Шкала температуры имеет два диапазона с пределами 5— 15° и 15— 25° , шкала глубины — один диапазон 0—100 м.

Стабильность работы прибора проверялась во время испытаний. Полная проверка проводилась в лабораторных условиях после возвращения из экспедиции. Результаты сравнения с первоначальной шкалой температуры и глубины показали расхождения в принятой точности измерений.

Обработка материалов и методики наблюдения вертикальной температурной стратификации проводились на Черном море с судна «Московский университет» (в июле и октябре—ноябре 1965 г.). Связь подводной части прибора (контейнер с датчиками и измерительный мост) с пультом управления, расположенным на борту судна, осуществлялась многожильным морским кабелем типа РШМ. Скорость опускания прибора изменялась от 0,1 до 0,5 м/сек.

На рис. 2 приведен образец записи распределения температуры по глубине в поверхностном слое моря (до 30 м) при опускании и подъеме прибора с одной и той же скоростью 0,4 м/сек. На том же рисунке нанесена шкала температуры и глубины. Смена опускания и подъема прибора отмечена пунктирной линией. Рассмотрение рис. 2 и аналогичных ему записей показывает, что при зондировании со скоростью до 0,4 м/сек максимальные расхождения в значениях температуры воды на одной и той же глубине, обусловленные инерционностью датчиков, не выходят за пределы точности измерений $0,05^\circ$. При этом прибор регистрирует тонкие детали в вертикальном профиле температуры, и про-

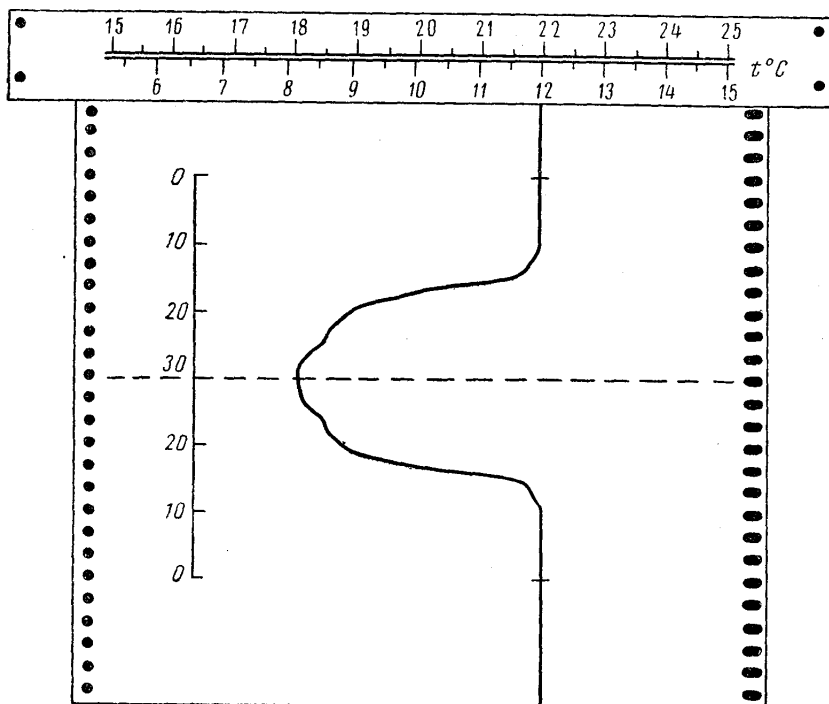


Рис. 2. Образец записи при опускании и подъеме прибора

должительность зондирования до 100 м оказывается меньше, чем при проведении дискретных измерений глубоководными термометрами.

Примером применения новой аппаратуры к экспериментальному исследованию температурной стратификации в море может служить вертикальное зондирование во время суточной станции 31 июля — 1 августа 1965 г. для нагретого моря. Наблюдения проводились при безоблачном небе с четко выраженным суточным ходом основных актинометрических и гидрометеорологических элементов. Амплитуда температурных колебаний в воздухе на высоте 1 м примерно 2° , скорость ветра 5—6 м/сек в вечерние и утренние часы и 2—3 м/сек в ночное и дневное время. Температура воды на различных глубинах поверхностного слоя также изменялась с суточным периодом. В частности, на глубине 0,5 м амплитуда температурных колебаний составляла примерно $0,5^\circ$.

Вертикальное зондирование температуры проводилось ежедневно в течение всей суточной станции. Наблюдения, показывающие наиболее характерные черты температурной стратификации, приведены на рис. 3

и 4. Для удобства рассмотрения данные наблюдений сгруппированы в соответствии с суточным ходом нагревания и охлаждения поверхностного слоя моря.

Приведенные данные позволяют проследить формирование в суточном цикле однородного по температуре приповерхностного слоя моря. Развитие его начинается в утренние часы (кривая 7 рис. 3) при нагревании воды вследствие поглощения лучистой энергии солнца и выравнивании температуры под влиянием турбулентного обмена тепла. Совместное воздействие этих факторов приводит к постепенному увеличению толщины прогретого однородного приповерхностного слоя и возрастанию градиента температуры в слое раздела между прогретыми

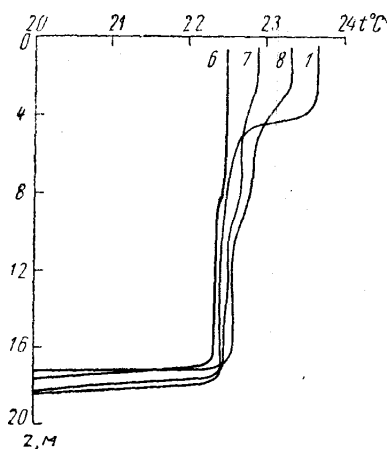


Рис. 3. Профили температуры при нагревании приповерхностного слоя моря. Кривая 1 получена в 16 час, 6—в 8 час 30 мин, 7—в 10 час 30 мин, 8—в 13 час 30 мин

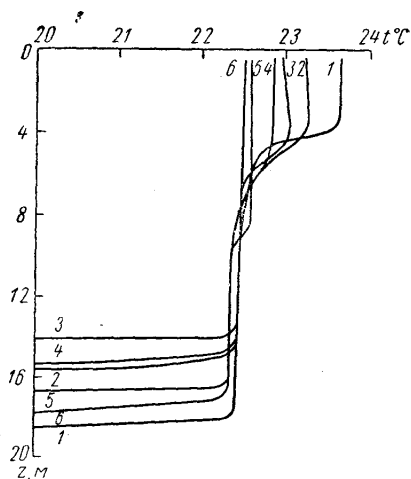


Рис. 4. Профили температуры при охлаждении поверхностного слоя моря. Кривая 1 получена в 16 час, 2—в 18 час 30 мин, 3—в 20 час 30 мин, 4—в 23 час 30 мин, 5—в 5 час 30 мин и 6—в 8 час 30 мин

приповерхностными и более глубокими слоями воды. Наиболее четко эти слои выражены в момент максимального нагрева (кривая 1 на рис. 3 и рис. 4). При охлаждении приповерхностных вод толщина однородного слоя продолжает непрерывно возрастать, а слой раздела с резким перепадом температур постепенно размывается (последовательные кривые на рис. 4). К концу суточного цикла однородный приповерхностный слой полностью исчезает (кривая 6, рис. 4).

Формирование однородного термического слоя с суточным периодом изменения температуры качественно подобно годовому ходу температуры и для незамерзающих морей. Это является как бы естественным моделированием более длительного процесса возникновения, развития и разрушения однородного поверхностного слоя моря с годовым периодом изменения. Поэтому проведение суточного цикла полного комплекса наблюдений основных актинометрических и гидрометеорологических элементов с одновременной регистрацией вертикальной температурной стратификации представляет безусловный интерес и для решения более общей задачи о годовом ходе термического режима незамерзающих морей.

Данные непрерывного температурного зондирования позволяют более надежно определять и следить за изменением границ слоя рез-

кого перепада температур, отделяющего поверхностные воды от глубинных. Как видно из рис. 3 и 4, толщина однородного поверхностного слоя в суточном периоде испытывает периодические колебания. Количественное описание их, так же как и формирование однородного приповерхностного слоя с суточным периодом существования, требует специального рассмотрения.

Полученные данные при работе с новой аппаратурой показывают преимущества этой методики по сравнению с наблюдениями глубоководными термометрами применительно к экспериментальным исследованиям температурной стратификации в море.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по океанографическим приборам и оборудованию. М., Изд-во АН СССР, 1962.
2. Биндер Б. Л. Тр. Ин-та гидрометеорол. приборостр., вып. 11, 1963.
3. Попов М. М. Термометрия и калориметрия. Изд-во МГУ, 1954.

Поступила в редакцию
21. I 1966 г.

Кафедра
физики моря и вод суши