

Министерство образования Российской Федерации
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

И.А. Степанюк

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН



Санкт-Петербург
2002

УДК 551.46

Степанюк И.А. Методы измерений характеристик морских внутренних волн. – СПб: изд. РГГМУ, 2002. – 138 с.

Рецензент: д-р техн. наук И.С. Ковчин (СПб филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН)

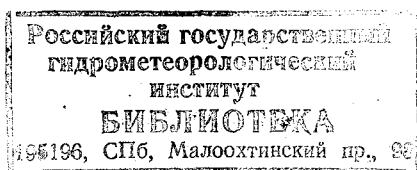
Рассматриваются принципы и технические средства измерений внутренних волн в зоне пикноклина. Преимущественное внимание обращено на контактные методы: поплавковые, интегральные, методы сканирования и др. Кратко рассматриваются дистанционные акустические, оптические и СВЧ-методы. Анализируются возможности стабилизации конструкций для технического обеспечения измерений и некоторые методы метрологических оценок измерителей.

Предназначена для широкого круга специалистов, интересующихся проблемами океанологических измерений, а также для студентов, магистров и аспирантов, специализирующихся в области технической океанологии.

In the monograph by Stepanyuk I.A. "The methods of measurements of the characteristics marine internal waves" the principles and means of measurements of internal waves in a zone of layer of jump are considered. The primary attention is inverted on contact methods; float, integrated, methods of scanning and others. Remote acoustic, optical and microwaves methods are briefly considered.

Opportunities of stabilization of designs for technical maintenance of measurements and some methods of metrology valuations measurers are analyzed.

The book is intended for a wide range of the experts, interested by problems of oceanology measurements, but also for the students, magisters and post-graduate students, that specializing in the field of technical oceanology.



ISBN 5-86813-015-4

- © И.А. Степанюк, 2002
- © Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2002

ПРЕДИСЛОВИЕ

Экспериментальные исследования внутренних волн длительное время производились преимущественно путем использования стандартного океанографического оборудования и приборов. Из специальных контактных измерительных устройств, по-видимому, первыми начали применяться поплавковые, у которых регистрировалось (в первых вариантах – механически) изменение положения взвешенного в пикноклине поплавка. Подобные устройства хорошо описаны в известной книге В.А. Снежинского [38]. Весьма резкий сдвиг в возможностях прямых измерений характеристик внутренних волн произошел после первых разработок буксируемых термоградиентных установок (“термокосы”, “термогирлянды” и др.). Следующим скачком, можно считать разработки интегральных (распределенных) измерительных преобразователей.

Параллельно развивались дистанционные методы. К середине 60-х годов проявился интерес к акустическим методам, затем стали оцениваться возможности оптических и радиолокационных средств исследований. К настоящему времени сформировался довольно широкий спектр дистанционных методов, в том числе и таких, которые изначально не предназначались для изучения внутренних волн, но после ряда методических проработок оказались весьма перспективными.

Однако какие-либо обобщения по специальным методам измерений характеристик внутренних волн в настоящее время отсутствуют. Информация разбросана по отдельным работам, посвященным натурным экспериментальным исследованиям, при этом основное внимание в таких работах обычно уделяется анализу полученных результатов исследований, а не техническим описаниям применявшихся измерительных средств. Следует отметить лишь монографию Ю.Б. Шауба [47], в которой технические особенности измерительных средств рассматриваются достаточно полно, но лишь для весьма ограниченного круга устройств, основанных на специальных, в том числе интегральных, измерениях электрической проводимости воды.

Представляется, что данная монография в некоторой степени восполнит отсутствие обобщающей литературы по специальным методам измерений характеристик внутренних волн. Несомненно,

что при подборе материала в значительной мере проявилось авторское пристрастие к контактным методам, которыми пришлось много и активно заниматься и где имеется много собственных разработок. В связи с этим дистанционные методы отражены всего лишь в виде краткого обзора. Это ни в коей мере не умаляет их значимости.

Довольно длительное время информация по специальным методам измерений характеристик внутренних волн имела ограничения по распространению. Для ряда методов, в том числе разработанных при участии автора, эти ограничения сохранились до сих пор, и такие методы в монографии не рассматриваются. С ними, при необходимости, можно ознакомиться по описаниям соответствующих авторских свидетельств и патентов.

При подготовке материала автор не мог и не считал нужным забывать свои преподавательские заботы и ориентировался не только на специалистов, но и на студентов, магистров и аспирантов. В связи с этим изложение материала может показаться в ряде мест слишком подробным, но ведь если для читающего такие места окажутся описанием хорошо известных истин, то он их может просто пропустить.

В заключение хотелось бы выразить большую благодарность за помощь бывшим студентам Российского государственного гидрометеорологического университета, а сейчас – специалистам и аспирантам Д.А. Акылбаеву, Д.М. Бутову, А.В. Зимину и А.И. Степанюку, которые потратили много сил и времени для технической подготовки этой рукописи к изданию.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКИХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

1.1. Измеряемые характеристики

При натурных исследованиях внутренних волн в море традиционно считается необходимым определение их спектральных характеристик, в простейшем случае – выявление энергонесущих периодов (частот). В более полных, обычно – специализированных, экспериментах дополнительно определяют также длину и динамические характеристики волн: скорость распространения, направление распространения и все три составляющие скорости волновых течений.

Отмеченные задачи являются весьма непростыми и требуют применения специальных методов и средств измерений. При этом, как правило, невозможно использовать некоторые универсальные методы и средства, позволяющие проводить исследования во всем широком диапазоне изменчивости характеристик и при планировании эксперимента становится необходимым в первую очередь определить: что же именно требуется исследовать.

Диапазон изменчивости частот внутренних волн ограничен сверху частотой Вайсяля–Брента, называемой также частотой плавучести:

$$N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}, \quad (1.1)$$

где N – круговая частота Вайсяля–Брента; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность воды; z – глубина.

При учете сжимаемости воды выражение для величины N немного усложняется:

$$N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} - \frac{g^2}{c^2}}, \quad (1.2)$$

где c – скорость звука.

Фазовая скорость внутренних волн в ситуации, когда стратификация считается двухслойной, а пикноклин достаточно узок, что-

бы его можно было аппроксимировать как границу раздела, а не как слой, обычно определяется выражением

$$C_{\text{вн}} = \pm \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\rho \{k [\text{cth}(kh) + \text{cth}(kH)]\}}}, \quad (1.3)$$

где k – горизонтальное волновое число; $\Delta \rho$ – разность плотностей слоев ниже и выше пикноклина; h – толщина верхнего слоя; H – толщина нижнего слоя.

При исследовании внутренних волн различают четыре основных диапазона: *длинные, средние, короткие и очень короткие* волны (например, [20]). У *длинных* волн длина намного больше толщин слоев h и H . В этом случае $kh \ll 1$ и $kH \ll 1$, а гиперболические котангенсы можно приближенно заменить значениями их обратных аргументов. Тогда

$$C_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\rho} \frac{hH}{(h+H)}}. \quad (1.4)$$

У *средних* волн длина существенно превышает толщину h , но сравнима с H . В этом случае по аналогии с предыдущим $kh \ll 1$, а $\text{cth}(kh) \Rightarrow 1/(kh)$. Соответственно

$$C_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{g \Delta \rho h [1 + kh \text{cth}(kH)]}{\rho}}. \quad (1.5)$$

У *коротких* волн длина существенно превышает h , но значительно меньше H . В этом случае можно считать $\text{cth}(kh) \Rightarrow 1/(kh)$ и $\text{cth}(kH) \Rightarrow 1$. Поэтому

$$C_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\rho} h}. \quad (1.6)$$

Короткопериодные внутренние волны обычно характерны для верхнего термоклина в открытом океане.

Очень короткие волны – это такие, у которых длина волны существенно меньше толщин обоих слоев. Здесь $kh \ll 1$ и $kH \ll 1$. Тогда фазовая скорость

$$C_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{2 \kappa \rho}}. \quad (1.7)$$

Волны подобного типа могут регистрироваться внутри пикноклина на прослойках с большими градиентами плотности.

Для двухслойной стратификации рассматриваемого типа, когда пикноклин аппроксимирован как *граница* раздела, градиент плотности на этой границе, очевидно, стремится к бесконечности. Соответственно частота Вэйсля-Брента для таких условий, как следует из выражения (1.1), тоже стремится к бесконечности. Естественно, в реальных условиях бесконечно больших частот внутренних волн не бывает. Однако экспериментальные данные, в частности, приводимые в п. 1.3, показывают, что внутри пикноклина могут регистрироваться волны действительно очень высоких частот, в том числе с рядом характерных особенностей (например – эффект “переключения”), которые никак не укладываются в рамки современных теоретических представлений.

Внутренние волны необязательно “привязаны” к пикноклину. Если их частота ниже, чем частота Вэйсля-Брента на всех горизонтах, то они могут наблюдаться во всей толще моря. Методы измерений в таких случаях основаны на традиционной съемке вертикальных профилей основных гидрофизических характеристик, осуществляемой с некоторой дискретностью, существенно меньшей периода волн. Здесь подобные методы не рассматриваются.

С повышением частоты волн зона их распространения все больше тяготеет к ядру пикноклина. В настоящее время исследование подобных *короткопериодных* волн, а особенно *очень короткопериодных*, представляется наиболее интересным.

Традиционные методы для таких исследований обычно мало результативны. Действительно, скорость зондирования V_z в морских условиях весьма ограничена и не может превышать скорость свободного падения. Обычно V_z задается близкой к 1 м/с. Если оценивать применимость метода зондирования (не сканирования – оно рассмотрено в п. 6.1, а именно зондирования), то, например, при глубинах примерно 600 м на единичное зондирование необходимо затратить не менее 20 мин. Задавая соотношение между дис-

кретностью и изучаемыми периодами примерно 1/5, получим, что даже при непрекращающемся зондировании возможна лишь регистрация волн с периодами не меньше 1,5 ч. При этом, естественно, невозможно дать какие-либо гарантии отсутствия в полученных данных эффекта иллюзии дискретизации.

Тем не менее, зондированием никак нельзя пренебрегать, поскольку только этот метод позволяет увидеть полную картину внутренних волн по всей толще моря, т.е. как самих исходных волн, так и индуцированных ими вертикальных движений выше и ниже пикноклина.

При уменьшении пределов зондирования, т.е. ограничении сверху и снизу в пределах зоны пикноклина, затраты времени, конечно, уменьшаются и могут регистрироваться более короткопериодные волны, но это уже не является зондированием в полном смысле этого термина, а превращается в *сканирование* (п. 6.1).

По сравнению с традиционными методами значительно более перспективными представляются рассматриваемые в последующих разделах специальные методы и средства исследований, которые позволяют получать информацию практически о любых периодах колебаний.

Амплитудные характеристики внутренних волн зависят от их собственной частоты и частоты плавучести. В монографии [20] приводится следующее приближенное выражение этой зависимости:

$$\psi \sim (N^2 - \bar{\omega}^2)^{-1/4}, \quad (1.8)$$

где ψ – амплитуда; $\bar{\omega}$ – средняя (несущая) частота волн в пакете.

Несомненно, что измеряемые амплитуды и периоды являются определяющими при разработке специальных измерительных средств. Однако для выбора оптимальной методики исследований необходимо более широкое рассмотрение, в частности, целесообразны оценки ожидаемого диапазона длин волн или диапазона значений горизонтального волнового числа.

В монографии [4] для обобщающих оценок измерительных задач считается целесообразным введение понятия “спектрально-волновое окно” (СВО). Под параметрами СВО понимается диапазон временных и пространственных частот, в которых исследуемое по-

ле или процесс должны быть восстановлены по данным измерений. СВО для внутренних волн устанавливается по временным частотам примерно от 0,2–0,3 до 50 ч⁻¹, а по волновым числам примерно от 10⁻⁵ до 10⁻¹ м⁻¹. Однако утверждать, что это какие-либо окончательные оценки, вряд ли стоит, поскольку имеющиеся уже сейчас некоторые экспериментальные данные выходят за отмеченные пределы (см., в частности, п. 1.3).

Также следует отметить, что в задачах измерения характеристик внутренних волн этих двух параметров недостаточно и необходимо дополнительно использовать третий параметр – диапазон амплитуд волн, поскольку от этого зависят конструктивные характеристики большинства измерительных преобразователей (ИП), в частности линейные размеры интегральных ИП. При оценках амплитуд, по-видимому, целесообразно ориентироваться на выражение (1.8).

1.2. Методические особенности измерений

Измерение амплитуд и периодов внутренних волн может производиться в одной точке наблюдений, например с использованием заякоренной буйковой станции. При этом возникает ряд специфических требований к конструкциям таких станций, что подробно рассмотрено в п. 7.1.

При задаче изучения всех характеристик распространяющихся волн (амплитуда, период, длина волны, фазовая скорость, направление распространения) становятся необходимыми полигонные измерения с размещением измерительных устройств не менее чем в трех разнесенных по акватории точках.

Схема размещения в вершинах прямоугольного треугольника (рис. 1.1) с равными катетами L_{1-2} и L_{1-3} при распространении волны вида

$$\Psi(\tau) = \Psi_m \cos(\omega\tau - kx), \quad (1.9)$$

($\omega = 2\pi/T$ – круговая частота, T – период волны; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны; x – координата, ортогональная фронту волны) позволяет определить по фазовым сдвигам сигналов скорость и направление распространения.

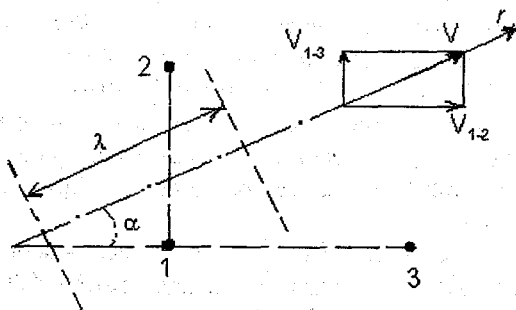


Рис. 1.1. Схема полигонных измерений

Действительно, направление распространения относительно линии точек 1 и 2:

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta\varphi_{1-3}}{\Delta\varphi_{1-2}}, \quad (1.10)$$

где $\Delta\varphi_{1-3}$ и $\Delta\varphi_{1-2}$ – фазовые сдвиги регистрируемых сигналов между точками 1–3 и 1–2.

Составляющие скорости распространения

$$\begin{aligned} V_{1-2} &= \frac{L_{1-2} \cos^2 \alpha}{\Delta\varphi_{1-2}}, \\ V_{1-3} &= \frac{L_{1-3} \sin^2 \alpha}{\Delta\varphi_{1-3}}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

где L – расстояния между точками 1–2 и 1–3.

Расположение точек в виде прямоугольного треугольника, естественно, не является единственным. Рассмотрим равносторонний полигон из трех пунктов наблюдений (рис. 1.2).

Координаты пунктов наблюдений в указанной на рисунке системе получаются следующими: $P_1(0; 0)$, $P_2\left(\frac{l}{2}; \frac{l\sqrt{3}}{2}\right)$, $P_3(l; 0)$, где

l – длина стороны треугольника.

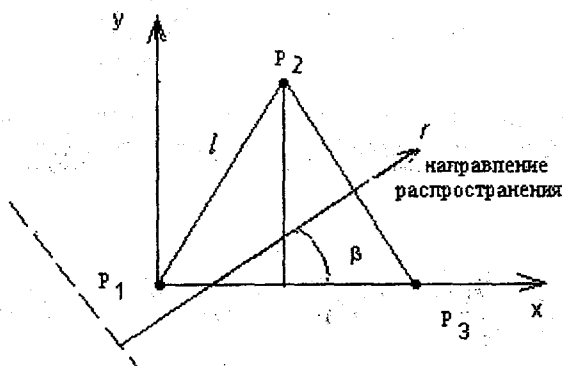


Рис. 1.2. Схема полигона в виде равностороннего треугольника

Если отсчитывать фазовые сдвиги регистрируемых сигналов в точках P_2 и P_3 по отношению к точке P_1 ($\varphi_1 = 0$), то при распространении волны вида (1.9) в направлении r эти сдвиги получаются следующими:

$$\varphi_1 = 0;$$

$$\varphi_2 = \frac{l}{2}k_x + \frac{l\sqrt{3}}{2}k_y; \quad (1.12)$$

$$\varphi_3 = lk_x,$$

где индексы 1, 2 и 3 относятся к соответствующим точкам P , а k_x и k_y — составляющие волнового числа по осям x и y .

Соответственно результирующее волновое число будет связано с фазовыми сдвигами выражением

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} = \frac{2}{l\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_2^2 - \varphi_2\varphi_3 + \varphi_3^2}, \quad (1.13)$$

а направление распространения относительно оси Ox —

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{k_y}{k_x} = \operatorname{arctg} \frac{2\varphi_2 - \varphi_3}{\varphi_3 \sqrt{3}}. \quad (1.14)$$

В работе [47] для определения фазовых сдвигов предлагается вычислять функции взаимной корреляции регистрируемых сигналов $\Psi(\tau)$:

$$R_{ji}(\theta) = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \int_{\tau_1}^{\tau_2} [\Psi_j(\tau) - \overline{\Psi_j}] [\Psi_i(\tau + \theta) - \overline{\Psi_i}] d\theta; \quad (j = 2; 3), \quad (1.15)$$

где θ – временной сдвиг функции.

Соответственно по максимумам функций $R_{2,1}(\theta)$ и $R_{3,1}(\theta)$ можно определить значения временных сдвигов θ_2 и θ_3 , связанных с фазовыми сдвигами соотношениями

$$\varphi_2 = \frac{\theta_2}{T}; \quad \varphi_3 = \frac{\theta_3}{T}, \quad (1.16)$$

где T – средний период регистрируемых волн.

Несомненно, что все приведенные рассуждения справедливы для полигона с длиной стороны, существенно меньшей длины регистрируемых волн.

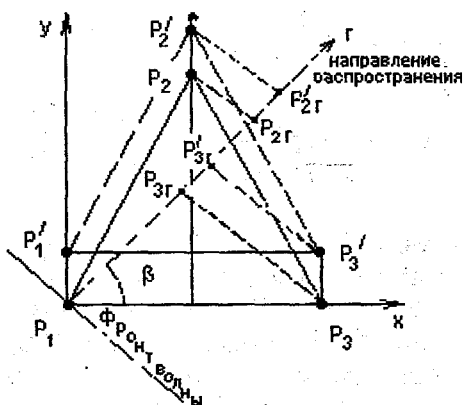
Вычисленные значения волнового числа и периода волн позволяют легко определить фазовую скорость распространения

$$C_{\text{вн}} = \frac{\omega}{k} = \frac{\pi l \sqrt{3}}{T \sqrt{\varphi_2^2 - \varphi_2 \varphi_3 + \varphi_3^2}}, \quad (1.17)$$

или с учетом выражений (1.15) и (1.16):

$$C_{\text{вн}} = \frac{\pi l \sqrt{3}}{\sqrt{\theta_2^2 - \theta_2 \theta_3 + \theta_3^2}}. \quad (1.18)$$

Рассмотрим вариант буксировки системы с расположением вертикальных измерительных линий P_1 , P_2 и P_3 в виде равно-
 стороннего треугольника (рис. 1.3). Буксировка осуществляется в
 направлении y с закреплением буксирной линии за точку P_2 .



Как и ранее, будем считать в качестве опорной измерительную линию P_1 . У сигналов, зарегистрированных по остальным линиям, наиболее целесообразно определять сдвиги во времени по отношению к сигналу опорной линии.

13

$$\theta_2 = \frac{l \cos(6\theta - \beta)}{C_{\text{вн}}} + \frac{V_c \theta_2 \sin \beta}{C_{\text{вн}}}, \quad (1.19)$$

$$\theta_3 = \frac{l \cos \beta}{C_{\text{вн}}} + \frac{V_c \theta_3 \sin \beta}{C_{\text{вн}}}, \quad (1.20)$$

где l — длина стороны полигона; V_c — скорость судна.

Соответственно направление и скорость распространения волн получаются следующими:

$$\beta = \arctg \frac{\theta_3 - 2\theta_2}{\theta_3 \sqrt{3}}; \quad (1.21)$$

$$C_{\text{вн}} = \cos \beta \left[\frac{l}{\theta_3} + V_c \left(\frac{\theta_3 - 2\theta_2}{\theta_3 \sqrt{3}} \right) \right].$$

Регистрация периода волн при буксировании системы измерительных линий требует учета эффекта Доплера, обусловленного движением судна. Действительно, в ситуации, показанной на рис. 1.3, наглядно видно, что регистрируемый период T' будет больше по сравнению с истинным периодом T . Эти различия пропорциональны проекции вектора скорости судна на направление распространения волны. Истинный период можно определить по выражению

$$T = T' \left(1 - \frac{V_c}{C_{\text{вн}}} \sin \beta \right); \quad (1.22)$$

а волновое число

$$k = \frac{2\pi}{T' (C_{\text{вн}} - V_c \sin \beta)}. \quad (1.23)$$

Из выражений (1.22) и (1.23) наглядно видно, что измерения в буксируемом режиме могут корректно выполняться лишь в том

случае, если скорость судна существенно меньше фазовой скорости распространения волн.

1.3. Некоторые специфические результаты измерений

Типичные внутренние волны, регистрируемые в натурных экспериментах, представляют собой, как правило, квазипериодические колебания, длительность процесса которых существенно превышает их период и у которых уверенно могут быть выделены все характеристики распространяющейся волны – период, скорость, направление и т.д. Подобные волны достаточно надежно интерпретируются и с той либо иной степенью достоверности описываются современными математическими моделями. Здесь экспериментальные и теоретические исследования, как правило, хорошо сбалансированы, как, например, в монографии [20].

Однако часто в натурных экспериментах получаются результаты, весьма далекие от типичных теоретических представлений. Сообщений о таких результатах весьма немного, тем более, что экспериментальные публикации по внутренним волнам вообще ограничены. Тем не менее, подобная часто появляющаяся “нетипичность” представляет значительный интерес, поскольку, во-первых, заставляет задуматься о малоизвестной специфике физических процессов в пикноклине, а во-вторых, позволяет рассчитывать на возможность выявления и локализации в естественных условиях источников регистрируемых возмущений. Длительность “нетипичных” процессов может быть сравнима с периодом регистрируемых квазипериодических колебаний положения пикноклина либо даже быть меньше периода. В таких случаях термин “внутренние волны” не всегда уместен. Более целесообразно говорить о “вариациях положения пикноклина”, “возмущениях” в пикноклине и т.д. При этом не всегда удается выявить, являются ли регистрируемые вариации распространяющимися или это некоторые локальные возмущения. Часто при анализе возмущений даже не может быть выдвинута какая-либо приемлемая гипотеза об их источнике и механизме формирования. Здесь в качестве примера уместно сослаться на крайне интересные результаты Ю.Б. Шауба по микромасштабным вариациям в пикноклине [47], в которых выявлены скачкообразные “переключения” частот, амплитуд и другие эффекты, которые невозможно объяснить в рамках известных физических представлений о ди-

наимике пикноклина (рис. 1.4). Пример скачкообразного изменения амплитуды при неизменном периоде приведен на рис. 1.4, а, то же самое, но с изменением среднего значения (положения условного нуля) — на рис. 1.4, б.

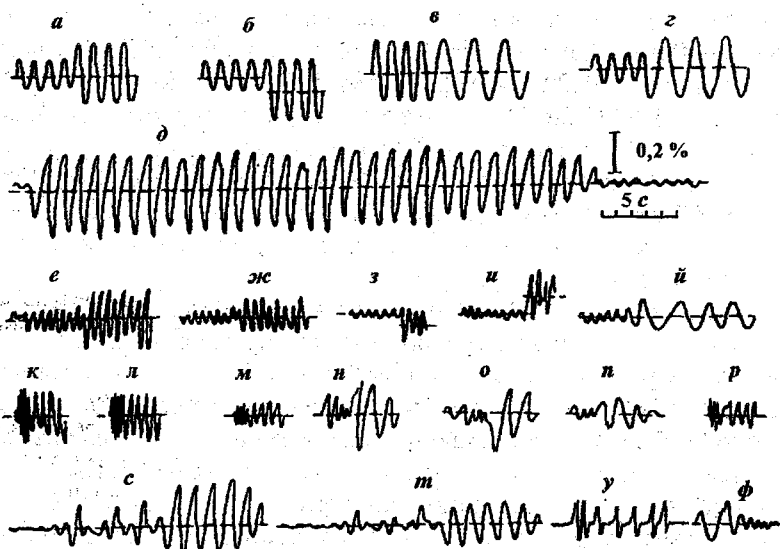


Рис. 1.4. Примеры регистрации микромасштабных вариаций пикноклина с различными видами специфических трансформаций (по данным работы [47])

Скачкообразное изменение периода представлено на примерах в и г: в первом случае сохраняется амплитуда колебаний, а во втором случае скачком меняются обе характеристики. На примере д представлены вариации в виде цугов, содержащих обычно ограниченное число периодов с мало меняющейся амплитудой и весьма строгим “выдерживанием” частоты. Для цугов характерны резкое начало и конец, между цугами возмущения малосущественны.

На рис. 1.4, е–ф в масштабе, уменьшенном вдвое, представлены необработанные участки записей вариаций пикноклина (точнее — внутри пикноклина, поскольку записи производились короткобазовыми измерителями интегральной электрической проводимости, см.

367233

п. 4.3), на которых присутствуют отмеченные выше эффекты в самых различных сочетаниях.

Следует также отметить, что выявленные вариации со всеми их особенностями характеризуются частотами колебаний, существенно большими, чем частота Вьяйсяля-Брента, что также, строго говоря, не укладывается в рамки классических представлений.

При анализе выявленных эффектов Ю.Б. Шауб выдвигает гипотезу о существовании внутри пикноклина неустойчивых слоев воды с отрицательными градиентами плотности и соответственно с мнимой частотой Вьяйсяля-Брента (например [47]). Для таких условий, по его мнению, переходы структуры в энергетически более устойчивое состояние могут осуществляться с помощью механизмов, существенно отличных от типичного инерционного.

В наших прибрежных исследованиях (Японское море) также был выявлен ряд весьма нетипичных вариаций термоклина. Измерения выполнялись с помощью интегральных термопреобразователей (п. 4.1), размещаемых обычно (1980–1982 гг.) в условиях заякоренной буйковой станции с притопленным несущим бумом.

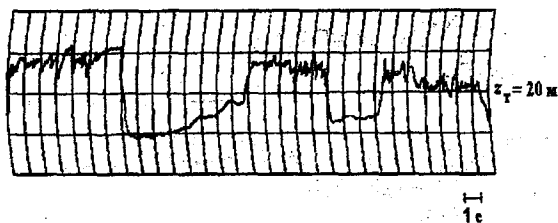


Рис. 1.5. Пример записи квазипрямоугольных вариаций термоклина (Японское море)

На рис. 1.5 приведен характерный пример записи с выраженной квазипрямоугольной формой вариаций, содержащих в области “плато” высокочастотные составляющие. Очень интересны появляющиеся при таких квазипрямоугольных вариациях “пятна” высокочастотных возмущений (рис. 1.6), которые могут регистрироваться как посередине, так и на краю “плато”. Можно предполагать, что механизм формирования таких “пятен” связан с обрушением внутренних волн при подходе к берегу.

Российский государственный
гидрометеорологический
институт

БИБЛИОТЕКА

195196, СПб, Малоохтинский пр., 90



Рис. 1.6. Вариации термоклина с "пятнами" высокочастотных возмущений (Японское море). Развертка во времени: 1 дел. – 1 с

В монографии Ю.Б. Шауба [47] приводятся весьма близкие по характеру возмущения (рис. 1.7), полученные с помощью методов, основанных на измерениях интегральной электрической проводимости (п. 4.3).

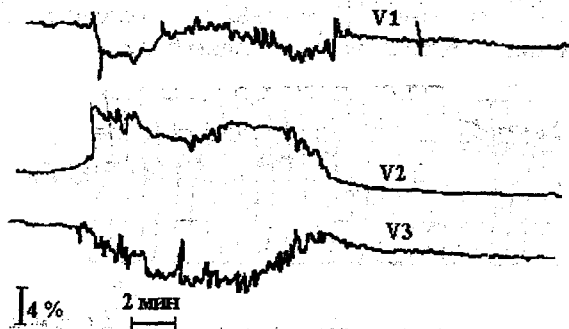


Рис. 1.7. Возмущения пикноклина квазипрямоугольного вида (из работы [47])

Результаты получены в прибрежных экспериментах при базе между токоподающими электродами в 17 м. Сигнал снимался с четырех приемных электродов при расстояниях между ними в 3 м. Соответственно получены записи с трех пар этих электродов в виде сигналов V1, V2 и V3.

Несомненно, что в каждом случае появления нетипичных вариаций пикноклина представляет интерес источник и механизм их инициирования. Для выявления источника необходима организация

параллельных измерений сопутствующих гидрофизических процессов. Естественно, при этом вовсе необязательно ожидать “видимых” связей, например совпадения периодов и характера возмущений. В качестве примера можно привести фрагмент параллельных измерений колебаний уровня моря и вариаций термоклина (рис. 1.8). Здесь некоторая, причем довольно слабая, “видимая” связь заметна лишь для центральной части фрагмента. Механизм формирования короткопериодных возмущений термоклина никак себя в колебаниях уровня не проявляет.

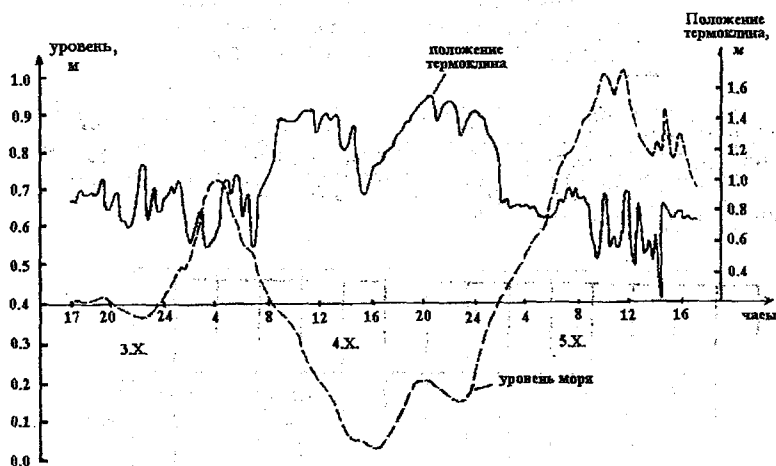


Рис. 1.8. Пример записи вариаций термоклина в условиях слабых колебаний уровня (Японское море, октябрь)

В работе [37] приводятся результаты параллельных измерений вариаций положения термоклина, колебаний уровня и вариаций магнитного поля. Ожидалось, что в результатах проявится действие магнитно-гидродинамического эффекта, обусловленного движениями воды при вариациях термоклина (внутренних волнах). Однако при довольно существенных значениях вариаций термоклина значимых связей между ними и остальными характеристиками выявить не удалось (рис. 1.9).

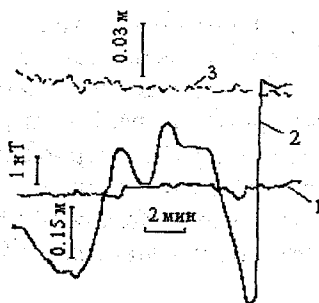


Рис. 1.9. Синхронные записи вариаций магнитного поля (кривая 1), положения термоклина (кривая 2) и колебаний уровня моря (кривая 3) из работы [37]

Для пикноклина часто характерны вариации, вообще существенно отличающиеся от периодических. В частности, наблюдаются уединенные вариации импульсного типа с крутым передним и пологим задним фронтами (рис. 1.10).

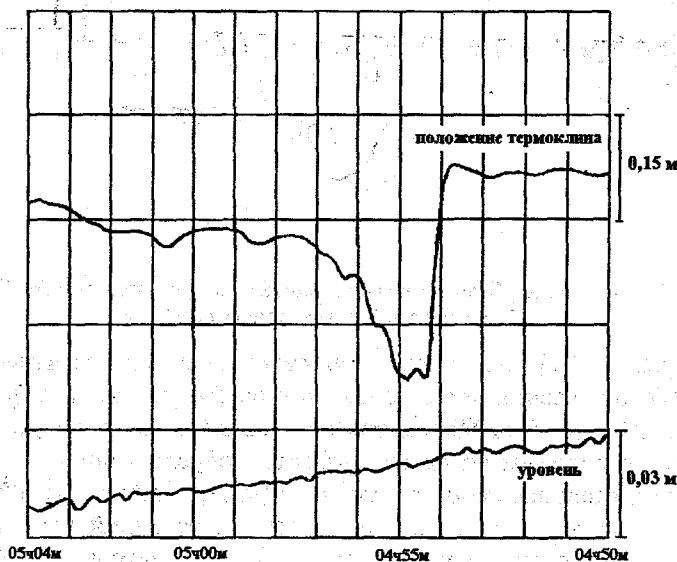


Рис. 1.10. Пример уединенной вариации положения термоклина с синхронной записью уровня моря (Японское море)

Источник подобных вариаций так же, как и в предыдущих случаях, пока остается гипотетичным. Следует отметить, что в одном из многосуточных экспериментов уединенные вариации приводимого на рис. 1.10 характерного типа регистрировались с фиксированной периодичностью около 0,5 суток.

Аналогичные вариации с крутым передним и пологим задним фронтами наблюдались также при проведении экспериментов на Каспийском море [19], однако здесь они регистрировались как повторяющиеся (рис. 1.11). Регистрация производилась интегральными термопреобразователями, расположенными по прямой через каждые 7 м. Вертикальная отметка на рисунке соответствует вариациям термоклина в 1 м.

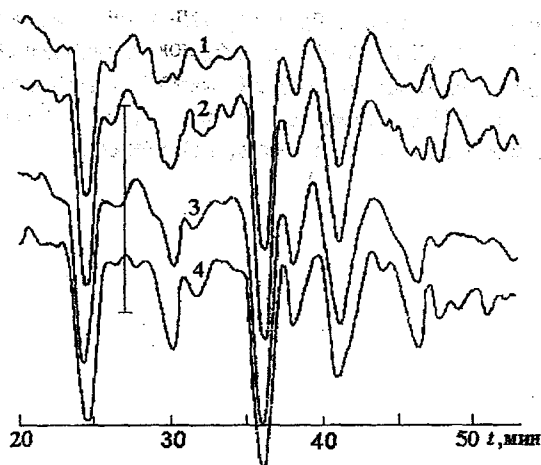


Рис. 1.11. Запись периодически повторяющихся импульсных вариаций (из работы [19])

Несомненно, что приведенные примеры, полученные разными авторами в различных географических условиях и с помощью различных методов, никак нельзя отнести к артефактам. А определившись, что это природные феномены, мы приходим к выводу о необходимости их широкого изучения, как экспериментального, так и теоретического.

Поскольку задачи данной работы чисто технические, то здесь совершенно не рассматриваются возможные механизмы формирования столь нетипичных внутренних волн. Однако даже из этих, приведенных как иллюстративные, данных видно, что при планировании экспериментов и, главное, при разработке специальной измерительной техники для таких экспериментов нельзя опираться на общепринятые диапазоны, например, представляемые в виде спектрально-волновых окон, как в работе [4]. Необходимо существенное расширение в область высоких частот вплоть до единиц герц, причем не только в связи с существованием микромасштабных волн типа рис. 1.4, но и для качественного отображения фронтов в вариациях импульсного типа.

В современных экспериментальных исследованиях внутренних волн все больше расширяется круг изучаемых зон раздела. Особенно следует отметить широкий интерес к таким пока малоизученным объектам, как дневной термоклин и "чистый" галоклин, в частности, в эстуариях полярных рек. Эксперименты в подобных зонах обычно требуют разработки специальных методов и средств измерений.

Глава 2. ПОПЛАВКОВЫЕ МЕТОДЫ

Основная сущность поплавковых методов измерения характеристик внутренних волн заключается в следующем. Если на границе раздела жидкостей с различными значениями плотности поместить некоторый поплавок (рис. 2.1), то на него будет действовать подъемная сила

$$F(x) = [V\rho_0 + (\rho - \rho_0) \int_0^x S(x) dx] g, \quad (2.1)$$

где V – объем поплавка; $S(x)$ – изменяющаяся в направлении OX площадь сечения; ρ_0 – удельный вес жидкости выше границы раздела; ρ – удельный вес жидкости ниже границы раздела.

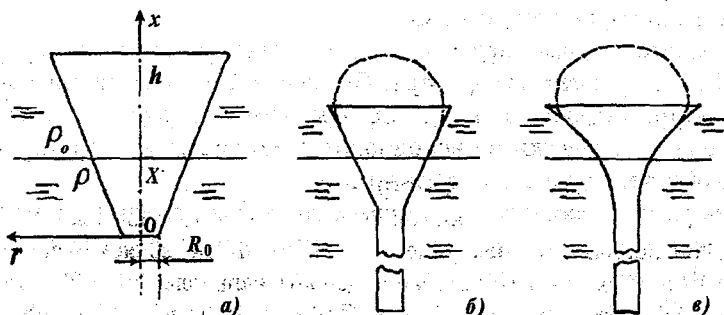


Рис. 2.1. Схема поплавков для отслеживания границы раздела

Для поплавков постоянного сечения

$$F = gS[h\rho_0 + (\rho - \rho_0)X], \quad (2.2)$$

где h – высота поплавка.

Если сила F уравновешена весом поплавка G , то при неизменных ρ и ρ_0 его уровень погружения X остается постоянным, и

при вертикальных перемещениях границы раздела поплавков отслеживает эти перемещения.

Одним из довольно широко использующихся способов наблюдений за внутренними волнами является метод, где в качестве элементарных поплавков используются частицы взвешенного красителя [46]. Наблюдения за перемещениями частиц производятся путем их фотографирования либо непрерывной съемки на фоне масштабной сетки. Отдельные этапы процесса при этом могут быть автоматизированы, например выпуск красителя, однако полная автоматизация, по-видимому, мало целесообразна.

В лабораторных установках, предназначенных для изучения внутренних волн, перемещения поплавка, естественно, невелики и их преобразование в электрический сигнал каких-либо трудностей не представляет (например [40]), тем более что электрическая часть преобразователя может быть расположена вне воды и функционировать в довольно легких условиях. При натурных исследованиях задача значительно усложняется.

В работе [38] рассмотрен ряд поплавковых устройств с механической регистрацией результатов. Примененные в них технические решения представляются весьма интересными, однако в настоящее время они практически не используются, по-видимому, именно из-за неудобств механической регистрации.

Достаточно простым и надежным способом преобразования перемещений поплавка в электрический сигнал представляется акустический. Поплавок 4 в этом случае содержит направленный акустический преобразователь 3 (рис. 2.2, а). Поплавок установлен непосредственно на базовом тресе 2 буйковой станции и уравновешен на границе раздела 6. При этом благодаря наличию цилиндрической втулки 5 поплавок имеет возможность свободно перемещаться вверх и вниз при колебаниях границы раздела. На расстоянии L от поплавка жестко закреплен на тресе второй акустический преобразователь 1. Преобразователь 3 (9) подключен к автономной схеме П (рис. 2.2, б), расположенной в герметичном контейнере внутри поплавка. Схема содержит узел автоматики 8, обеспечивающий периодическую смену режима работы (прием либо передача), усилитель 6, устройство формирования излучаемого сигнала 7 и узел автономного питания 5.

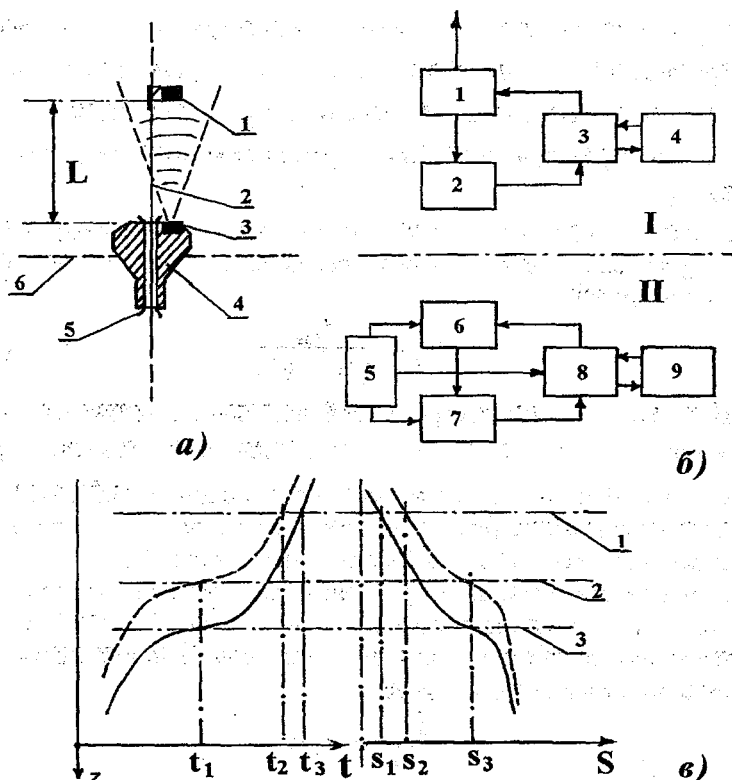


Рис. 2.2. Поплавковое устройство с акустическими преобразователями расстояния

Верхняя часть I устройства содержит аналогичные узлы: преобразователь 4, узел автоматики 3, усилитель 1 и узел формирования излучаемого сигнала 2. В отличие от автономной части II верхняя часть подсоединена к кабельной линии связи, по которой обеспечивается питание всех узлов и производится передача информации.

Расстояние L между преобразователем 1 (см. рис. 2.2, а) и поплавком 4 определяется выражением:

$$L = \frac{1}{2} C_{\text{зв}} (\tau_1 + \tau_2 + 2\tau_3) - \Delta L, \quad (2.3)$$

где $C_{зв}$ – скорость звука; τ_1 – время распространения импульса от преобразователя 1 до преобразователя 3; τ_2 – время распространения импульса в обратном направлении; τ_3 – время задержки импульса при переизлучении; ΔL – постоянная поправка, обусловленная τ_3 .

Поскольку процесс является циклическим, то на выходе усилителя 1 (рис. 2.2, б) формируется последовательность импульсов с текущей частотой

$$f_{инф} = \frac{C_{зв}}{2(L + \Delta L)}. \quad (2.4)$$

В качестве сигнала измерительной информации может использоваться как $f_{инф}$, так и $\Sigma\tau = \tau_1 + \tau_2 + 2\tau_3$. При этом, использование $f_{инф}$ создает определенные удобства при последующих преобразованиях, например в напряжение (для аналоговой записи), однако при этом возникает задача коррекции нелинейности в зависимости (2.4).

Периодическая смена направления распространения акустических импульсов вызвана необходимостью учета эффекта Доплера, возникающего вследствие движений поплавка. Действительно, при его движении вверх со скоростью V

$$\tau_1 = \frac{L}{C_{зв} - V} \text{ и } \tau_2 = \frac{L}{C_{зв} + V}.$$

Но при их суммировании

$$\tau_1 + \tau_2 = \frac{2LC_{зв}}{C_{зв}^2 - V^2} \approx \frac{2L}{C_{зв}},$$

поскольку $V^2 \ll C_{зв}^2$.

На результаты измерений оказывает влияние также изменчивость скорости звука. При постановке экспериментов в реальных условиях необходимо учитывать величину

$$C_{зв} = \bar{C}_{зв} + \Delta C_{зв},$$

где $\bar{C}_{зв}$ – среднее значение скорости звука на участке L при отсутствии внутренних волн; $\Delta C_{зв}$ – изменение скорости звука, обусловленное изменениями L .

Наличие $\Delta C_{зв}$ связано с тем, что при перемещениях границы раздела одновременно перемещаются вертикальные профили температуры ($t(z)$) и солёности ($S(z)$) и ввиду их зависимости от z и изменчивости их вертикальных градиентов $\frac{\partial t}{\partial z}$ и $\frac{\partial S}{\partial z}$ вблизи границы (рис. 2.2, в) появляется эта дополнительная зависимость $C_{зв}$ от L .

На рис. 2.2, в линией 1 показано положение неподвижного преобразователя, а линиями 2 и 3 — два различных положения поплавка. В положении 3 величина $C_{зв}$, очевидно, определяется средними значениями t и S в пределах участков профилей от t_1 до t_3 и от S_1 до S_3 . Как известно, например [45], $C_{зв}$ наиболее сильно зависит от t .

При изменениях среднего значения t_{cp} на 1К величина $\Delta C_{зв}$ может достигать 3–4 м/с, что приводит к появлению систематической погрешности измерений L примерно 0,5%, причем, в основном, аддитивной составляющей этой погрешности.

Изменчивость t и S наиболее значительна вблизи границы раздела. В связи с этим целесообразно удлинять поплавков, располагая преобразователь по-прежнему в верхней части. При этом изменения L будут происходить в слое с уменьшенными градиентами t и S и погрешность от $\Delta C_{зв}$ окажется существенно ниже.

Зависимость $\bar{C}_{зв}(t, S)$, несомненно, требует определения t и S перед началом изменений либо непосредственно в процессе их выполнения.

Жестко закрепляемый преобразователь может размещаться не только над границей раздела, но и под нею при соответствующей смене расположения преобразователя на поплавке. Выбор той или иной схемы расположения зависит от характера вертикальных профилей температуры и солёности выше и ниже границы раздела, а также от того, куда протянута кабельная линия связи: на берег или на обеспечивающее судно. Рассмотренный на рис. 2.2, а вариант, естественно, более удобен при работе с судна.

При проведении длительных экспериментов весьма важное значение приобретает изменчивость перепада плотностей на границе раздела, из-за чего может нарушаться уравнивание поплав-

ка. В таких случаях существенную роль начинает играть форма зависимости $S(x)$ в выражении (2.1). Поплавки постоянного сечения ($S(x) = \text{const}$), очевидно, менее удобны, поскольку изменения разности $(\rho - \rho_0)$ будут приводить к пропорциональным изменениям X , т.е. заглупления поплавок в нижний слой, а это, в свою очередь, вызовет возрастание систематической погрешности. Более интересными являются формы усеченного конуса (рис. 2.1, *a*), усеченного конуса с цилиндром (*б*), сочетания цилиндра с верхней частью, имеющей поверхность 2-го порядка (*в*). В частности, для формы (*a*):

$$F(x) = gV\rho_0 + \frac{\pi R_0^2 x (\rho - \rho_0)}{3} [3 + 3kx + k^2 x^2] g, \quad (2.5)$$

где R_0 — меньший радиус корпуса; k — относительный наклон образующей конуса.

Из сравнения выражения (2.5) и (2.2) видно, что одни и те же изменения $(\rho - \rho_0)$ в случае конусной поверхности приведут к существенно меньшим изменениям X , чем при цилиндрической поверхности [$S(x) = \text{const}$]. Еще больший эффект, очевидно, достигается у поверхностей 2-го порядка (*в*).

Сочетание с цилиндром, полностью погруженным в нижний слой воды (*б* и *в*) при условии, что уравнивающий груз располагается в нижней части цилиндра, обеспечивает повышенное значение метацентрической высоты, а тем самым — увеличение остойчивости. Это устраняет возможные перекосы поплавок вследствие действия гидродинамических факторов и облегчает его скольжение по направляющей.

Для улучшения гидродинамических характеристик также целесообразно, чтобы верхняя часть поплавок имела обтекаемую форму (*б* и *в*, пунктир).

В описанных методах используются полавки, которые "привязаны" к определенному пункту наблюдений и обладают возможностью перемещений "вверх-вниз". Обычно это обеспечивается их размещением на жесткой мачте (при малых глубинах) либо на базовом тресе буйковой станции.

При размещении на мачте наиболее целесообразно снабдить поплавков центральной втулкой с подпружиненными подшипниками, "катающимися" по мачте. Это создает необходимую свободу перемещений поплавок, в том числе при действии боковых нагрузок, например, из-за течения.

Размещение поплавок на тросе не позволяет применить подшипники. К сожалению, в таких условиях даже весьма качественные втулки через некоторое время выходят из строя. Причинами являются наклоны троса, воздействие боковых нагрузок, нарушения конструкции троса и другие. Чтобы избежать этого, целесообразно использовать жесткую трубу, закрепляемую на тросе так, что трос проходит внутри нее. На трубе становится возможным использование поплавок с подшипниками. Возможна также установка трубы на кронштейнах в стороне от троса, что сложнее конструктивно, но удобнее в эксплуатации. Длина трубы в обоих вариантах, естественно, должна превышать ожидаемую высоту внутренних волн. Из-за этого подобные конструкции не всегда возможно реализовать.

Отслеживания колебаний положения пикноклина может обеспечиваться также некоторыми другими методами.

В работе [48] описано устройство для измерения параметров внутренних волн, принцип действия которого основан на автоматическом слежении за положением выбранной изотермы в зоне термоклина. Устройство содержит термочувствительный преобразователь, расположенный на горизонте залегания выбранной изотермы и свободно висящий на нижнем конце многожильного кабеля, являющегося линией связи. Следящая система с серводвигателем расположена над поверхностью моря на стационарной платформе (океанографической башне). На этой же платформе установлена лебедка с электроприводом от серводвигателя следящей системы, а на барабан лебедки намотан верхний конец кабельной линии связи.

Устройство работает следующим образом.

Термочувствительный преобразователь в виде ППТР посредством кабеля подключен к мостовой схеме постоянного тока. Схема сбалансирована для определенного значения сопротивления ППТР, соответствующего выбранной изотерме в интервале от 10 до 21°C. При разбалансе выходной сигнал моста после требуемого усиления приводит во вращение серводвигатель, перемещающий преобразо-

ватель по вертикали до тех пор, пока мост опять не окажется сбалансированным. Направление вращения серводвигателя определяется знаком напряжения разбаланса.

Кроме термочувствительного преобразователя следящей системы устройство содержит дополнительный преобразователь температуры, а также преобразователь гидростатического давления. Оба этих преобразователя через линию связи подключены к измерительным схемам, выходные сигналы которых регистрируются на аналоговых самописцах. Запись одного из самописцев позволяет, тем самым, осуществлять непрерывный контроль слежения за выбранной изотермой, а запись второго соответствует вертикальным перемещениям изотермы, т.е. профилю внутренних волн.

Описанное устройство, на первый взгляд, не обладает характерными чертами поплавковых преобразователей. Однако, тем не менее, оно ближе к ним, чем к другим известным типам. Действительно, принципиальная сущность здесь такая же, как и при использовании поплавков — отслеживание вертикальных перемещений некоторого слоя с заданным значением характеристики. Только отслеживание выполняется не пассивно (за счет взаимодействия измерительного устройства и среды), а активно — с помощью специального исполнительного механизма.

Погрешность отслеживания заданной изотермы рассмотренным устройством оценивается в ± 10 см. Однако хотя в работе [48] об этом и не сообщается, погрешность, по-видимому, зависит от градиента температуры в термоклине и при малых градиентах существенно возрастает.

Основной недостаток устройства — его громоздкость. В связи с этим возможности его эксплуатации ограничены преимущественно стационарными сооружениями в прибрежной зоне типа океанографических платформ.

При отсутствии иных возможностей измерений устройство можно использовать также с заякоренных платформ либо судов. Однако в этом случае становится необходимым учитывать собственные движения платформы (судна), согласуя динамические параметры следящей системы с характеристиками этих движений. Применение с дрейфующих судов еще менее целесообразно, поскольку требует дополнительного учета направления и скорости дрейфа.

Намного интереснее применение поплавковых устройств, отслеживающих внутренние волны, с подводных баз, обычно размещаемых ниже пикноклина. Здесь появляется существенное преимущество – практически полностью отсутствуют гидродинамические воздействия, аналогичные поверхностным. Ведь глубинные воды достаточно "спокойны". Подобная конструкция может быть реализована на принципах буйковых станций с зондированием "из глубины" с помощью измерительного контейнера (зонда) с положительной плавучестью, свободно всплывающего, а затем принудительно возвращаемого обратно на глубинную базу (например [2]).

При зондировании в режиме непрерывного перемещения измерительного контейнера пересечение им пикноклина из-за обычно применяемой дискретизации измерений приводит к ряду искажений получаемой информации. Эти искажения связаны не только с неизбежным злом – несинхронностью отсчетов по различным каналам, что очень важно в условиях высокоградиентной зоны пикноклина, но и с перемещениями самой этой зоны. Особенно значимыми становятся такие искажения при зондировании с остановками на заданных горизонтах, например при необходимости измерения характеристик течений. В этом случае конкретные измерения (отсчеты) оказываются выполнены случайным образом в произвольных "точках" зоны пикноклина, т.е. "ниже-вблизи-выше" и т.д. При этом получаемая информация (совокупность измеренных гидрофизических характеристик либо временной ряд одной измеренной характеристики) становится нерепрезентативной [35].

Подробный анализ этих искажений является самостоятельной задачей и выходит за рамки данной работы. Однако здесь следует отметить, что описываемая далее станция снабжена конструктивными особенностями, в первую очередь предназначенными для устранения таких искажений, а уже во-вторых – для возможности измерения характеристик внутренних волн.

Станция содержит подводный базовый буй 1 (рис. 2.3), который тросом 2 скреплен с установленным на дне якорем 3. С базовым буюм связан подвижный буй 4, в котором размещены преобразователи 5, подключенные к измерительному блоку в контейнере 6. Связь подвижного буя с базовым обеспечивается посредством электролебедки 7 с тросом 8. Двигатель лебедки герметизирован.

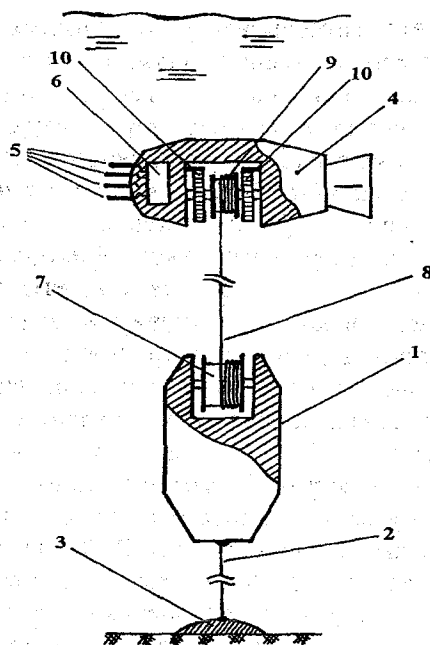


Рис. 2.3. Буйковая система с отслеживанием внутренних волн

Для отслеживания вертикальных перемещений пикноклина подвижный буй 4 снабжен барабаном 9 с намотанным на него запасом троса 8, превышающим ожидаемый размах перемещений. Ось барабана установлена в корпусе бую с возможностью вращения. Однако эта возможность ограничена демпферами 10, размещенными на оси с обеих сторон барабана.

Каждый из демпферов представляет собой спиральную пружину, один конец которой скреплен с осью барабана, а второй – с корпусом бую.

При реализации задачи измерения внутренних волн подвижный буй 4 поднимают в зону пикноклина, например, до заданного значения градиента плотности, после чего блокируется лебедка 7. Буй 4 продолжает подъем до тех пор, пока резерв положительной плавучести не окажется скомпенсированным натяжением пружин демпферов 10. Значение такого дополнительного подъема зависит от плотности окружающей среды и конструктивных характеристик

буга. Целесообразно, чтобы она ненамного превышала половину ожидаемой высоты внутренних волн.

Благодаря отмеченным особенностям буга оказывается как бы "взвешенным" в пикноклине. При прохождении внутренних волн он перемещается вместе с пикноклином. Регистрация перемещений производится по каналу измерения гидростатического давления. При этом возможен контроль качества отслеживания путем параллельных измерений плотности.

Измерения с помощью станции наиболее целесообразно проводить в управляемом варианте, т.е. имея возможность дистанционно регулировать с помощью лебедки 7 среднее положение буга 4. Это особенно важно, если буга вводится в пикноклин непосредственно в процессе прохождения волн – в этом случае он может остановиться не на горизонте среднего положения пикноклина, что является оптимальным условием измерений, а выше либо ниже этого горизонта, например вблизи вершины волны. В таком случае неизбежны существенные искажения регистрируемых характеристик волн.

Конструктивные параметры буга 4 и демпферов 10 выбираются из следующих соображений.

Буга с демпфером можно представить как динамическую систему, имеющую массу m_8 , колеблющуюся на пружине с жесткостью W_0 и снабженную успокоителем с вязким трением R_8 (механическим сопротивлением). Динамические свойства системы описываются линейным дифференциальным уравнением 2-го порядка

$$m_8 \frac{d^2 Y(\tau)}{d\tau^2} + R_8 \frac{dY(\tau)}{d\tau} + W_0 Y(\tau) = W_0 X(\tau), \quad (2.6)$$

где $X(\tau)$ – периодический сигнал на входе; $Y(\tau)$ – сигнал на выходе.

Решение этого уравнения дает передаточную функцию вида

$$F(i\omega) = \frac{1}{1 + \frac{i\omega R_8}{W_0} - \frac{\omega^2 m_8}{W_0}}. \quad (2.7)$$

Соответственно амплитудно-частотная характеристика системы (АЧХ) окажется следующей:

$$|F(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2 m_\delta}{W_0}\right)^2 + \frac{\omega^2 R_\delta^2}{W_0^2}}}. \quad (2.8)$$

В системах 2-го порядка, как известно, могут создаваться условия резонанса. Для общего случая эти условия определим из выражения, характеризующего экстремум амплитудно-частотной характеристики

$$\left. \frac{|F(i\omega)|}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_p} = 0, \quad (2.9)$$

где ω_p – частота резонанса.

Из выражений (2.8) и (2.9) получим для нашего случая

$$\omega_p = \frac{W_0}{m_\delta} \sqrt{\frac{m_\delta}{W_0} - \frac{R_\delta^2}{2W_0^2}}.$$

Безусловно, что резонанс для анализируемой системы вреден. Он будет отсутствовать, если

$$\frac{m_\delta}{W_0} \leq \frac{R_\delta^2}{2W_0^2},$$

что приводит к выражению

$$W_0 \leq 0,5 \frac{R_\delta^2}{m_\delta}. \quad (2.10)$$

В предельном случае выражение (2.10) приводит к условию $W_0 = 0$, т.е. к ликвидации демпферов. Это явно нецелесообразно, поскольку обязательно вызовет появление слабину троса, а значит – высокую вероятность петлеобразования. Тем самым, условие (2.10) лучше задавать близким к равенству.

Несомненно, что примененный в станции принцип "привязного" поплавка с демпфером может быть с успехом использован также в других устройствах – при размещении базовой основы с лебедкой

непосредственно на дне, при размещении базового буй выше пикноклина (в этом случае подвижный буй снабжается дополнительным грузом) и т.д.

Нет принципиальных препятствий использованию принципа непосредственно с исследовательского судна. При качке судна "взвешенный" в пикноклине буй с демпферами в отсутствие внутренних волн будет оставаться на горизонте расположения пикноклина независимо от вертикальных перемещений судна. Здесь важно лишь, чтобы частота среза $\omega_{\text{ср}}$ амплитудно-частотной характеристики (2.8) следующим образом была связана с минимальным периодом ожидаемой качки $\tau_{\text{к min}}$

$$\omega_{\text{ср}} \geq (2,5 \dots 3,0) \pi \tau_{\text{к min}}^{-1} \quad (2.11)$$

При условии (2.11) все колебания судна попадают в полосу частот пропускания буя, как динамической системы. Практически во всей этой полосе (от 0 до $0,7 \dots 0,8 \omega_{\text{ср}}$) модуль передаточной функции равен единице.

Частоту $\omega_{\text{ср}}$ можно выразить через параметры демпферов следующим образом. Учитывая, что на этой частоте квадрат модуля передаточной функции равен 0,5, получим из выражения (2.8)

$$\frac{\omega_{\text{ср}}^4 m_{\delta}^2}{W_0^2} + \omega_{\text{ср}}^2 \left(\frac{R_{\delta}^2}{W_0^2} - \frac{2m_{\delta}}{W_0^2} \right) = 1 \quad (2.12)$$

Затем, используя, например, предельный случай равенства в условии (2.10), получим простое решение уравнения (2.12)

$$\omega_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{W_0}{m_{\delta}}}$$

"Взвешивание" буя с демпферами в пикноклине при измерениях с судна несложно обеспечивается регулируемым грузом, расчет величины которого производится по данным вертикального зондирования.

Если при измерениях судно находится в дрейфе, то при анализе данных необходимо учитывать направление и скорость дрейфа.

Глава 3. ТЕРМОГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ

3.1. Многоканальные термоградиентные методы

Установки для измерений температуры, содержащие набор последовательно расположенных на разных горизонтах локальных преобразователей температуры, получили название термоградиентных [14]. Хотя, конечно, вертикальные градиенты температуры в таких установках не определяют непосредственно, а лишь путем последующей обработки. Применяются также термины "гирлянда термисторов", "термокоса" и некоторые другие [14, 40, 46, 48].

Если такими многоканальными измерениями охватывается слой воды, включающий термоклин, то, очевидно, прохождение внутренних волн будет отображаться в результатах измерений в виде вариаций локальной температуры на горизонтах, располагающихся достаточно близко от термоклина. Подобный способ наблюдений за внутренними волнами обладает рядом несомненных достоинств, в частности, позволяет оценивать затухание колебаний по обе стороны от термоклина, при наличии прослоек изучать перераспределение энергии между ними и т.д. [31]. Однако наличие большого числа преобразователей требует обычно использования многоканальных линий связи (в частности, многоканального кабеля), что делает конструкцию в целом довольно громоздкой.

Ранее широко применялись конструкции судовых буксируемых термоградиентных установок [14, 48], у которых кабельная линия связи с распределенными по ее длине локальными преобразователями температуры на основе полупроводниковых терморезисторов (ПТР) была выполнена в виде специальной цепи, состоящей из звеньев длиной около 28 см, имеющих сечение обтекаемой формы. Общая длина цепи 180 м. Преобразователи располагались по длине цепи на расстоянии около 7,5 м друг от друга. Работа с цепью (ее опускание и подъем) осуществлялись с помощью специального подъемника с дизель-гидравлическим проводом. На нижнем конце цепи устанавливался гидродинамический заглубитель.

С целью уменьшения линий связи в современных термоградиентных установках применяют автоматический поочередный вызов преобразователей. При этом результаты измерений по каждому

каналу смещены во времени относительно друг друга. При большом числе каналов (10–15) это смещение, хотя и составляет не более 1–2 с, накапливается и предопределяет довольно высокое значение минимальной дискретности измерений по каждому каналу.

Таким образом, оба этих варианта при их использовании для регистрации внутренних волн имеют существенные недостатки: громоздкость у первого варианта и высокая дискретность, ограничивающая возможности регистрации короткопериодных колебаний, у второго варианта.

Некоторые конструкции термоградиентных установок (например, [31, 46]) снабжены специальными резисторными интерполяторами, позволяющими выделять заданные значения температуры (изотермы) и регистрировать на самописце положение изотерм по вертикали и изменчивость этого расположения во времени.

Простейший вариант интерполятора представляет собой проводочный высокоомный резистор (реоход) с отводами. Отводы сделаны через расстояния, пропорциональные расстояниям между горизонтами расположения преобразователей в воде. Преобразователи включены в мостовые схемы, а выходы мостовых схем последовательно подсоединены к отводам интерполятора. В результате на реохорде формируется как бы аналог вертикального распределения температуры, представленный в виде распределения потенциала по всей длине реохорда. По реохорду с постоянной скоростью перемещается ползунок, механически связанный с регистрирующей кареткой самописца. Каретка срабатывает при заданных значениях потенциала, фиксируя в масштабе ленты самописца положение ползунка в этот момент времени и тем самым — положение по глубине соответствующей изотермы.

В результате периодического опроса реохорда получается запись вариаций изотерм, в том числе и тех, которые расположены в зоне термоклина. По полученным записям выявляют внутренние волны и определяют их характеристики.

Очень большим недостатком термоградиентных установок с интерполяторами является то, что реальный профиль аппроксимируется линейно-ломаной формой, что вносит большие погрешности в определение положения изотерм, особенно вблизи термоклина.

3.2. Суммирующие методы

Распределенные по вертикали поперек термоклина локальные преобразователи температуры (1, 2, ... i ..., N) целесообразно соединить последовательно между собой (рис. 3.1). Если сопротивление каждого преобразователя R_{ii} связано с температурой T_i линейной зависимостью

$$R_{ii} = R_{oi}(1 + \alpha_i T_i),$$

где α — постоянный коэффициент, то очевидно, при последовательном соединении

$$\sum_{i=1}^N R_{ii} = NR_0 + R_0 \alpha \sum_{i=1}^N T_i, \quad (3.1)$$

если $R_{01} = R_{02} = \dots = R_{0N} \equiv R_0$ и $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_N = \alpha$.

Из выражения (3.1) следует

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ii} = R_0 \left[1 + \alpha \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \right] = R_0 [1 + \alpha \bar{T}] \quad (3.2)$$

где $\bar{T}$ — среднее по вертикали значение температуры.

При вариациях термоклина и, соответственно, перемещениях профиля 1 относительно уровня 2 (положение 3) изменяются значения $T_1, T_2, \dots, T_i$ и, тем самым, значение $\bar{T}$. В результате суммарное

сопротивление $\sum_{i=1}^N R_{ii}$ оказывается функцией положения термоклина,

и запись изменений $\sum_{i=1}^N R_{ii}$ будет приближенно соответствовать профилю внутренних волн.

При малой инерционности ППТР запись получается ступенчатой.

Степень приближения, очевидно, зависит от того, насколько часто расположены по вертикали локальные преобразователи. От этого также зависит и порог чувствительности. Фактически в дан-

ном случае непрерывный профиль температуры, как и при использовании интерполяторов, заменяется линейно-ломаным, и погрешность результатов измерений зависит от степени соответствия профилей друг другу. В предельном случае суммирования подобных преобразователей преобразователь превращается в интегральный (см. п.4.1.).

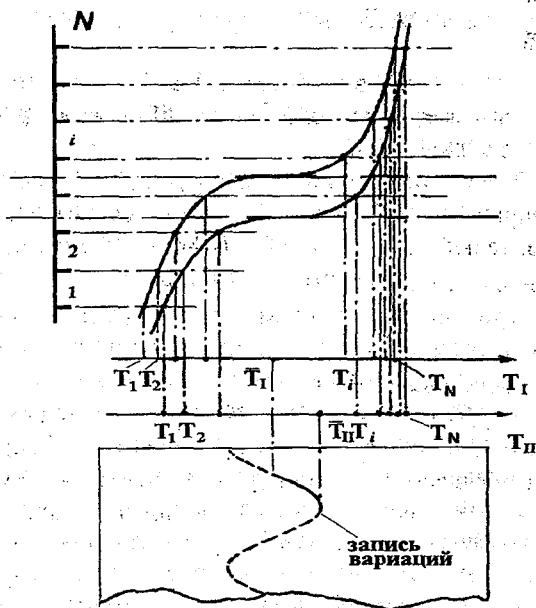


Рис. 3.1. Принцип действия суммирующих преобразователей

Если в качестве точечных преобразователей применяются полупроводниковые терморезисторы без коррекции нелинейности, то

$$\sum_{i=1}^N R_{ni} = R_{01} \exp \left[\frac{B_1}{T_1} \right] + R_{02} \exp \left[\frac{B_2}{T_2} \right] + \dots + R_{0N} \exp \left[\frac{B_N}{T_N} \right], \quad (3.3)$$

и даже в случае полной идентичности их констант, т.е. при

$$R_{01} = R_{02} = \dots R_{0N} \equiv R_0; \quad B_1 = B_2 = \dots B_N = B, \quad (3.4)$$

значение осредненного сопротивления

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ii} = R_0 e^{\frac{B}{\bar{T}}} \left[\frac{e^{B \left(\frac{\bar{T}-T_1}{T_1 \bar{T}} \right)} + e^{B \left(\frac{\bar{T}-T_2}{T_2 \bar{T}} \right)} + \dots + e^{B \left(\frac{\bar{T}-T_N}{T_N \bar{T}} \right)}}{N} \right], \quad (3.5)$$

где $\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i$ не является, как в предыдущем случае, типичной зависимостью от T , характерной для отдельного точечного преобразователя. Это вызывает появление дополнительных искажений регистрируемого профиля волн.

Тем не менее, применение суммирующих преобразователей оказывается оправданным только в случае их реализации на основе ППТР. Действительно, при этом возможно получение существенно более высокой чувствительности по отношению к $\bar{T}$, а значит, по отношению к вариациям термоклина. Это особенно важно при малом вертикальном градиенте в термоклине. В таких ситуациях суммирующие преобразователи на основе ППТР более перспективны, чем интегральные, которые в силу своих конструктивных особенностей могут быть выполнены только проволочными. Определенные преимущества появляются и при резком перепаде температур в термоклине — в этом случае запись вариаций при малой инерционности ППТР становится ступенчатой, а поскольку расстояния между ППТР известны, то это дает возможность масштабировать запись по шкале высот, как и при использовании дискретно-интегральных преобразователей (см. п. 4.1).

Для устранения искажений из-за нелинейности каждый из ППТР в суммирующем преобразователе включается в резисторную схему (рис. 3.2, а), позволяющую обеспечить линейность характеристики и устранить влияние исходного технологического разброса констант R_0 и B .

Очевидно, аналогичные результаты могут быть получены также при суммировании проводимостей γ_{Ti} у отдельных ППТР:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \gamma_{Ti} = \gamma_{T_0} [1 + \alpha_v \bar{T}]$$

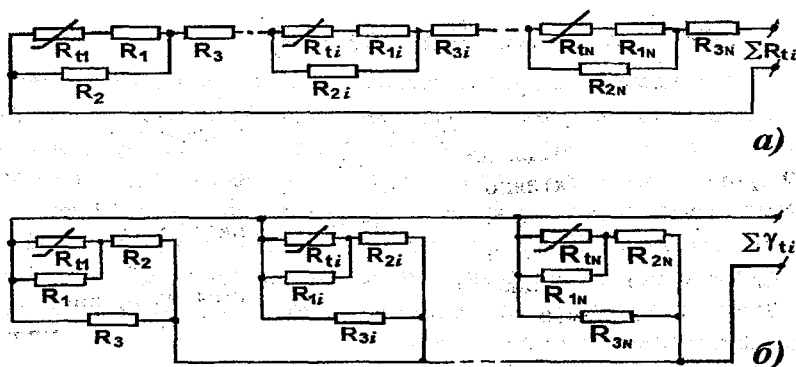


Рис. 3.2. Корректирующие схемы суммирующих преобразователей

Это создает определенные технические преимущества при большом числе ППТР, позволяя получать не слишком высокие значения результирующего сопротивления. В этом случае резисторные схемы, обеспечивающие линейность характеристик $\gamma_{Ti}(T)$ и коррекцию разброса констант, включаются параллельно друг другу (рис. 3.2, б).

Значения сопротивлений R_{1i}, R_{2i}, R_{3i} определяются по методикам, рассмотренным в работе [40].

Глава 4. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

В последнее время для исследований внутренних волн наиболее широко применяются интегральные преобразователи. Это вызвано, в первую очередь, тем обстоятельством, что они при довольно простых конструктивном и схемном решениях позволяют получать истинные формы профиля колебаний границы раздела (термоклина, галоклина). Во-вторых, получаемые записи колебаний благодаря некоторым специальным приемам удастся масштабировать по высоте и, тем самым, получать не только частотные, но и амплитудные характеристики процессов.

В качестве выходной физической величины в интегральных преобразователях используется вертикальное распределение температуры, электрической проводимости либо плотности на некоторой постоянной базе, устанавливаемой таким образом, чтобы граница раздела пересекала ее примерно посередине. При измерениях база должна сохранять стабильное положение в пространстве. В этом случае при вертикальных колебаниях границы раздела изменяются длины участков базы, находящихся под воздействием существенно различающихся значений измеряемой характеристики (T , σ_w либо ρ_w) и в результате изменяется интегральное значение этой характеристики. Например, для интегрального термопреобразователя (ИТП):

$$T_{\text{инт}} = \frac{1}{L_M} \int_{z_1}^{z_2} T(z) dz = \frac{1}{L_M} \left[\int_{z_1}^{z_T} T_1(z) dz + \int_{z_T}^{z_2} T_2(z) dz \right], \quad (4.1)$$

где $L_M = z_2 - z_1$ — длина измерительной базы; $T(z)$ — вертикальный профиль температуры на базе L_M ; $T_1(z)$ — вертикальный профиль температуры на верхнем участке базы (от z_1 до z_T); z_T — глубина расположения термоклина; $T_2(z)$ — вертикальный профиль температуры на нижнем участке базы (от z_T до z_2); z_1 — глубина расположения верхнего конца ИТП; z_2 — глубина расположения нижнего конца ИТП.

Вариации термоклина есть не что иное, как изменения значения z_T , и при неизменных функциях $T_1(z)$ и $T_2(z)$ они приводят к пропорциональным z_T изменениям $T_{\text{инт}}$.

Аналогичными выражениями могут характеризоваться интегральные преобразователи электрической проводимости ($\sigma_{\text{инт}}$) и плотности ($\rho_{\text{инт}}$).

При этом конструктивные решения всех этих трех типов преобразователей существенно различны. Также различны их функциональные возможности и метрологические характеристики.

4.1. Термоинтегральные методы

Простейшей конструкцией интегрального термопреобразователя является отрезок изолированной медной проволоки, закрепленной в виде петли 1 (рис. 4.1, а) на жесткой вертикальной базе 2. Оба конца петли подсоединяются к измерительной мостовой схеме 3. Такой вариант конструкции для реальных морских условий весьма ненадежен. Прежде всего, это обусловлено низкой механической прочностью медной проволоки, во-вторых, весьма слабыми защитными свойствами изолирующих покрытий. С целью устранения этих недостатков проволочную петлю помещают в защитную металлическую трубку (рис. 4.1, б), герметизированную с обоих концов и заполненную, как правило, трансформаторным либо силиконовым маслом для улучшения теплообмена.

При использовании одинарной петли чувствительность преобразователя оказывается весьма невысокой. Это обусловлено малым значением полного сопротивления получаемого распределенного терморезистора. При этом большое значение приобретают погрешности, связанные с тензочувствительностью, особенно для варианта а, с наличием термочувствительности резисторов мостовой схемы и т.д.

Снижения погрешностей легко добиться за счет увеличения сопротивления преобразователя либо за счет значительного увеличения числа петель (рис. 4.1, в), скрученных в тонкий жгут, либо за счет выполнения конструкции в виде однослойной обмотки на несущем основании (рис. 4.1, г). В варианте (в) может быть достигнуто наибольшее повышение чувствительности (число петель практически ничем не ограничено), однако с увеличением диаметра получае-

мого жгута возрастает постоянная времени преобразователя, т.е. ухудшаются динамические свойства. Вариант 2 избавлен от такого недостатка, хотя его изготовление является наиболее трудоемким.

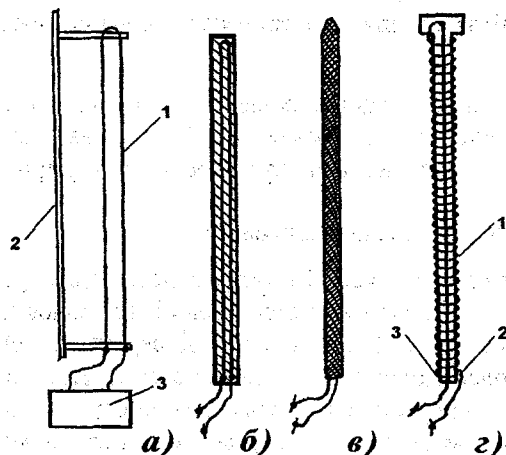


Рис. 4.1. Конструкции интегральных преобразователей

В конструкции 2 в качестве несущего основания 3 использован сталемедный провод в изолирующей оболочке, а термочувствительная обмотка 1 наложена "виток к витку" на эту оболочку. Нижний вывод обмотки 2 подключен непосредственно к линии связи, а верхний вывод 4 — к медным жилам несущего провода 3 (это соединение, естественно, изолировано). Преобразователь закрепляют поперек термодина на базовом тросе буйковой станции верхним и нижним концами провода 3, тем самым растягивающие усилия прикладываются к этому проводу, а не к термочувствительной обмотке, что практически полностью устраняет влияние тензoeffекта.

Поскольку интегральные преобразователи выполняются из металла (проволоки), то они имеют более высокую по сравнению с водой теплопроводность. Это может приводить к усиленным потокам тепла по преобразователю и, соответственно, к искажениям вертикального температурного профиля в окрестностях. Эти искажения проявляются в статической характеристике ИТП.

Рассмотрим статическую характеристику с учетом следующих приближений. Представим реальную конструкцию в виде цилиндра (рис. 4.2) с внутренним металлическим стержнем 1, помещенным в термоизолирующую оболочку 2, на которую наложен тонкостенный термочувствительный цилиндр 3. Такая конструкция, будучи помещенной в среду с резким перепадом температуры от T_1' до T_2' (рис. 4.2, кривая 4) на уровне $z_1 = L$ и $z_2 = 0$, может рассматриваться как длинная подвижная тепловая линия, состоящая из двух частей: нижней от $z_1 = 0$ до $z_1 = L$, находящейся под воздействием температуры $T_1'(z)$, и верхней от $z_2 = 0$ до $z_2 = L_M - L$, находящейся под воздействием температуры $T_2'(z)$.

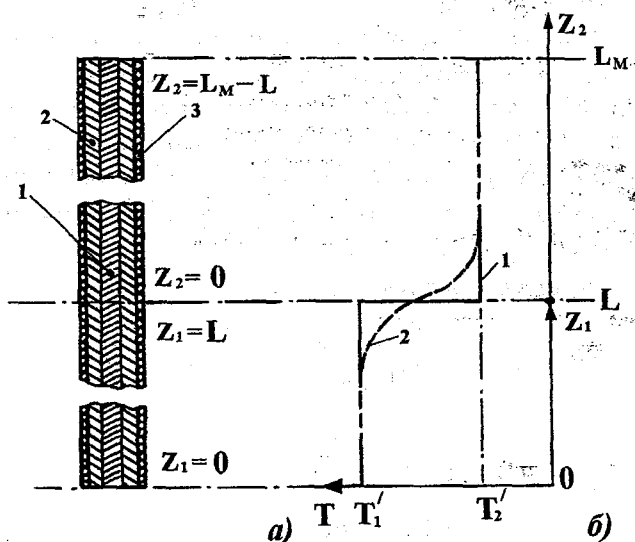


Рис. 4.2 Схема формирования искажений профиля температуры в ИТП

Пренебрегая влиянием теплового потока по внутреннему стержню 1 ввиду большой толщины слоя термоизоляции, запишем выражения теплового напряжения вдоль длины линии в виде системы уравнений теплопроводности:

$$\frac{d^2 T_1}{dz_1^2} - q_1(z) r_1(z) [T_1 - T_1'(z)] = 0; \quad 0 \leq z_1 \leq L; \quad (4.2)$$

$$\frac{d^2 T_2}{dz_2^2} - q_2(z) r_2(z) [T_2 - T_2'(z)] = 0; \quad 0 \leq z_2 \leq (L_M - L), \quad (4.3)$$

где $r_1(z)$ и $r_2(z)$ – удельные тепловые сопротивления участков линии z_1 и z_2 соответственно; $q_1(z)$ и $q_2(z)$ – удельные тепловые проводимости зон контакта теплопровод-среда.

Очевидно, не внося значительных погрешностей, можно считать, что $r_1(z) = r_2(z) = r = \text{const}$, а $q_1(z) = q_1 = \text{const}$ и $q_2(z) = q_2 = \text{const}$, поскольку обмотка выполнена из одного и того же материала по всей длине линии, а удельная тепловая проводимость между обмоткой и средой, в общем случае зависящая от плотности среды, в реальных условиях мало меняется вдоль участков z_1 и z_2 , но $q_1 \neq q_2$. Также для упрощения решения будем считать распределение температуры поперек термоклина таким, что $T_1'(z) = T_1' = \text{const}$ и $T_2'(z) = T_2' = \text{const}$.

Вводя следующие граничные условия

$$\left. \frac{dT_1}{dz_1} \right|_{z_1=0} = 0;$$

$$T_1|_{z_1=L} = T_2|_{z_2=0};$$

$$\left. \frac{dT_1}{dz_1} \right|_{z_1=L} = \left. \frac{dT_2}{dz_2} \right|_{z_2=0};$$

$$\left. \frac{dT_2}{dz_2} \right|_{z_2=L_M-L} = 0,$$

получим решение системы уравнений (4.2) и (4.3) в виде

$$T_1 = \frac{(T_2' - T_1') \operatorname{ch} b_1 z_1}{\left[1 + \frac{b_1 \operatorname{th} b_1 L}{b_2 \operatorname{th} b_2 (L_M - L)} \right] \operatorname{ch} b_1 L} + T_1'; \quad (4.4)$$

$$T_2 = \frac{(T_1' - T_2') \operatorname{ch} b_2 [(L_M - L) - z_2]}{\left[1 + \frac{b_2 \operatorname{th} b_2 (L_M - L)}{b_1 \operatorname{th} b_1 L} \right] \operatorname{ch} b_2 (L_M - L)} + T_2', \quad (4.5)$$

где $b_1 = \sqrt{rq_1}$ и $b_2 = \sqrt{rq_2}$.

Анализ выражений (4.4) и (4.5) показывает, что реальное распределение температуры вдоль термочувствительной обмотки имеет более сглаженный характер, чем распределение температуры поперек термоклина, однако эта сглаженность проявляется заметно лишь на расстояниях не более 1–2 см от уровня $z_1 = L$ (рис. 4.2, кривая 5), например, для случая, когда обмотка выполнена из медного провода [$r = 900$ К/(Вт·м), $q_1 = 38$ К/(Вт·м), $q_2 = 40$ К/(Вт·м)].

Результатом этого эффекта является то, что чувствительность преобразователя при малых вариациях термоклина оказывается зависящей от измеряемой величины. Естественно, значимость такого недостатка, в целом, не очень велика, особенно в сравнении с характеристиками "следающего" преобразователя, описанного в работе [48], где значение случайной погрешности оценивается в ± 10 см. Тем не менее, он должен учитываться при проведении измерений, особенно, в высокочастотной части спектра, где амплитуды колебаний могут становиться соизмеримыми с размерами "зоны сглаживания".

С учетом рассмотренной статической характеристики оценим чувствительность преобразования. Выражение для сопротивления ИТП в обозначениях рис. 4.2 может быть представлено следующим образом:

$$R_C = R_0 \left[1 + \frac{\alpha}{L_M} \left(\int_0^L T_1(z) dz_1 + \int_0^{L_M - L} T_2(z) dz_2 \right) \right], \quad (4.6)$$

где R_0 – сопротивление ИТП при нулевом значении температуры; α – температурный коэффициент сопротивления ИТП.

При этом относительная чувствительность получится равной

$$K_L = \frac{1}{R_0} \frac{dR_C}{dL} = \frac{\alpha}{L_M} \frac{d}{dL} \left[\int_0^L T_1(z) dz_1 + \int_0^{L_M-L} T_2(z) dz_2 \right],$$

а для упрощенных условий $T_1'(z) = T_1' = \text{const}$ и $T_2'(z) = T_2' = \text{const}$ без учета "зоны сглаживания"

$$K_L = \frac{\alpha}{L_M} (T_1' - T_2'). \quad (4.7)$$

Рассмотрим динамические свойства ИТП.

В связи с тем, что "зона сглаживания" оказывается весьма небольшой, свойства преобразователя в динамическом режиме можно рассматривать как свойства совокупности элементарных преобразователей длиной l_i , взаимодействующих со средой независимо друг от друга.

В таком случае свойства преобразователя в целом в достаточно хорошем приближении могут быть описаны стандартным линейным дифференциальным уравнением, характеризующим систему 1-го порядка:

$$\tau_e \frac{dT_{\text{инт}}(\tau)}{d(\tau)} + T_{\text{инт}} = T_w(\tau),$$

где $T_{\text{инт}}(\tau)$ – интегральная температура преобразователя; $T_w(\tau)$ – интегральная температура участка вертикального профиля в воде, окружающей ИТП; τ_e – постоянная времени ИТП.

Величина τ_e здесь определяется путем осреднения значений τ_{ei} – постоянных времени отдельных элементарных участков ИТП:

$$\tau_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_{ei},$$

где N – число элементарных участков.

Передаточная функция 1-го порядка, как известно (например, [40]), однозначно определяется через постоянную времени:

$$F(i\omega) = (1 + i\omega\tau_e)^{-1},$$

при этом функции спектральной плотности сигнала на входе $S_w(\omega)$ и сигнала на выходе $S_{\text{инт}}(\omega)$ связаны через квадрат модуля передаточной функции

$$S_{\text{инт}}(\omega) = |F(i\omega)|^2 S_w(\omega) = \frac{S_w(\omega)}{1 + \omega^2 \tau_e^2},$$

где ω – круговая частота вариаций сигнала.

Для рассматриваемой системы преобразователя

$$\omega = 2\pi\theta_{\text{вв}}^{-1},$$

где $\theta_{\text{вв}}$ – период внутренних волн.

При более тщательном анализе динамических свойств необходимо учитывать, как и в статическом режиме, продольные потоки тепла по ИТП. Естественно, наиболее качественным является экспериментальное определение динамических свойств ИТП путем прямых измерений модуля передаточной функции на различных частотах. Для этого необходимо использовать специальную установку (см. п. 7.2), где слои воды с заданными значениями температуры разделены слоем термоклина. Поперек этого слоя в пределах задаваемого расстояния осуществляется периодическое перемещение ИТП. Периоды перемещений задаются дискретно-переменными. Поскольку входной сигнал (амплитуда перемещений) сохраняется постоянным, то изменения нормированного выходного сигнала с уменьшением периода будут отображать поведение модуля передаточной функции.

В более простом случае экспериментально определяется значение τ_e , а передаточная функция и ее модуль рассчитываются по вышеприведенным соотношениям. Определение τ_e производится по такой же методике, как и для локальных термопреобразователей, т.е. путем воздействия ступенчатого входного сигнала. При этом необязательно задавать контактирующие через термоклин слои воды – достаточно двух отдельных объемов воды с различными значениями температуры. "Быстрый" перенос преобразователя из одного объема в другой эквивалентен ступенчатому сигналу. Есте-

венно, ожидаемая постоянная времени должна существенно превышать длительность такого "быстрого" переноса.

Столь простая методика, конечно, не может быть лишена недостатков. Самый значительный из них – попадание преобразователя в воздушную среду, где свое значение температуры, где происходит испарение пленки воды с преобразователя и т.д. Все это вносит искажения в получаемую кривую изменчивости температуры ИТП, по которой и определяется τ_e . Однако эти искажения обычно характерны для начального участка кривой, поэтому при соблюдении условия о соотношении между τ_e и длительностью переноса методика оказывается достаточно корректной.

По экспериментальным данным наименьшей постоянной времени (примерно 0,1–0,5 с) обладает конструкция ИТП на рис. 4.1, *г*, в которой термочувствительная обмотка нанесена "виток к витку" на несущую основу. Но, к сожалению, такая конструкция наименее надежна. Дело в том, что эта обмотка защищена от морской воды довольно тонким слоем изоляции. Опыт эксплуатации показывает, что такие преобразователи остаются работоспособными в течение весьма недолгого времени (в среднем 6–10 дней при дополнительном покрытии масляно-смоляными лаками). Если задача исследования высокочастотных вариаций не ставится, то наиболее целесообразно помещать конструкции вида *в* и *г* (см. рис. 4.1) в герметичные защитные трубки.

Наиболее важным недостатком рассмотренных вариантов преобразователей является отсутствие возможности устанавливать истинный масштаб записи вариаций термоклина по шкале высот z . Причина этого в том, что в выражения (4.1) и (4.6) входят $T_1(z)$ и $T_2(z)$ – распределения температуры выше и ниже термоклина, которые характеризуются существенной изменчивостью. При отсутствии информации о распределениях $T_1(z)$ и $T_2(z)$ и об их изменчивости остается неизвестным коэффициент масштабирования шкалы высот

$$K_M = \frac{\Delta z}{\Delta T_{\text{инт}}}, \quad (4.8)$$

где $\Delta T_{\text{инт}}$ – исходный масштаб записи в единицах интегральной температуры; Δz – масштаб записи в единицах высот.

В работе [1] предлагается усложненная система преобразователя, позволяющая определять и автоматически регулировать масштаб записи внутренних волн по шкале высот.

Вся система преобразователя стационарно устанавливается на заякоренной буйковой станции (рис. 4.3), состоящей из притопленного несущего буя 1, соединенного базовым тросом 2 с якорем 8. Параллельно базовому тросу закреплен интегральный термопреобразователь 4 таким образом, что его середина примерно совмещена с исходным положением термоклина 5. На верхнем конце интегрального преобразователя установлен точечный (локальный) преобразователь температуры 3, а на нижнем – аналогичный преобразователь 6.

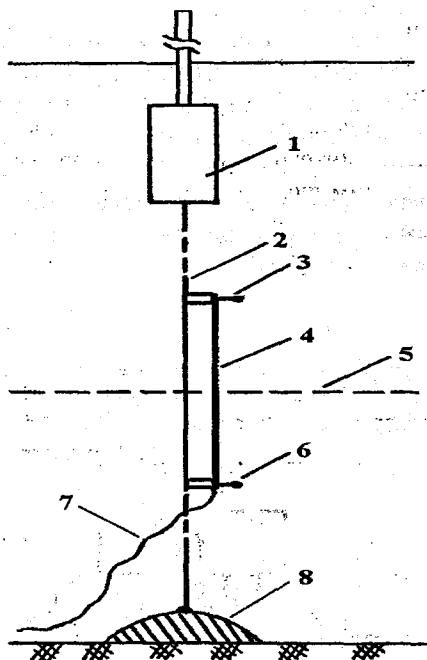


Рис. 4.3. Буйковая станция для измерений характеристик внутренних волн

Линией связи 7 система преобразователя подключена к электронному блоку, осуществляющему автоматическую установку масштаба записи по шкале высот. В электронном блоке (рис. 4.4) интегральный преобразователь 1 включен в мостовую схему постоянного тока 2. Сигнал напряжения с выхода схемы 2, пропорциональный изменениям $T_{\text{инт}}$, поступает на информационный вход управляемого масштабного преобразователя 3, коэффициент передачи которого зависит от напряжения на управляющем входе. Это напряжение формируется в зависимости от значений температур точечных преобразователей.

Точечные преобразователи (полупроводниковые терморезисторы) включены в мостовые схемы 6 и 9, выходы которых нагружены на схемы текущего осреднения 7 и 8.

Осредненные значения сигналов с выходов схем 7 и 8 поступают на дифференциальный операционный усилитель 5 с заданным постоянным коэффициентом передачи. Сигнал с выхода усилителя 5, тем самым, пропорционален разности осредненных значений температуры на концах интегрального преобразователя. Этот сигнал является управляющим для масштабного преобразователя 3.

Сигналы от схем 6 и 9 и результирующий сигнал с преобразователя 3 регистрируются в блоке 4.

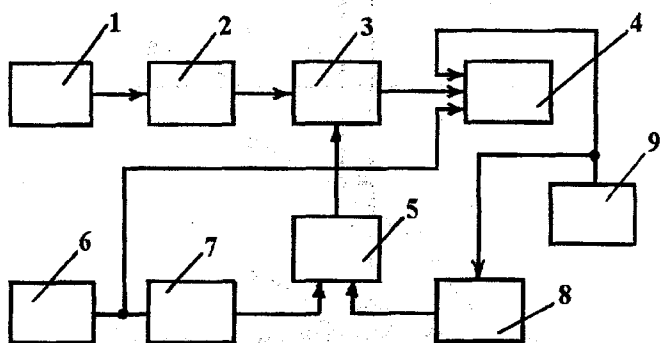


Рис. 4.4. Функциональная схема измерителя характеристик внутренних волн с автоматическим масштабированием шкалы высот

При прохождении внутренних волн (рис. 4.5) в пределах длины преобразователя происходят перемещения по вертикали не только положения термоклина 12, но и вертикального профиля температуры 10, занимающего при прохождении гребня волны положение 9, а при прохождении ложбины – положение 11. При этом точечные преобразователи, установленные на уровнях 8 и 13, воспринимают изменения температуры во времени 2 и 5, обусловленные вертикальными перемещениями профиля 10. При "гладких" видах профилей выше и ниже термоклина (рис. 4.5, а) эти изменения оказываются квазисинусоидальными (в случае периодических внутренних волн), а текущие средние по времени значения температуры 3 и 6 по оси 7 с достаточно хорошим приближением соответствуют средним по вертикали значениям в слоях от z_1 до z_T и от z_T до z_2 , отмеченных на оси глубин 14. Дополнительному улучшению такого соответствия способствует тот факт, что при вертикальных перемещениях температурный профиль частично трансформируется.

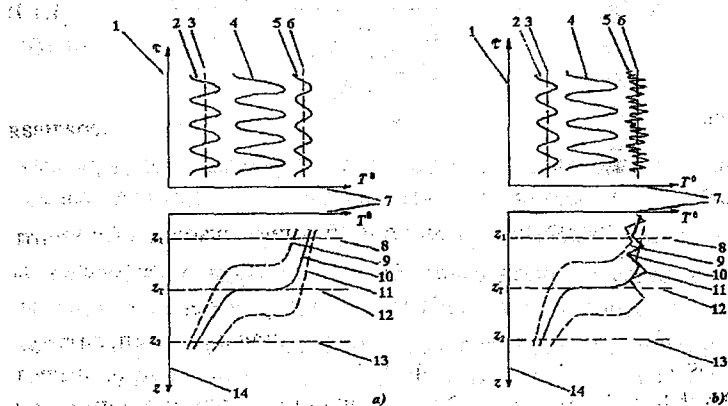


Рис. 4.5. Формирование управляющих сигналов в измерителе с автоматическим масштабированием шкалы высот

При таких условиях развернутая по времени t по оси 1 запись интегральной температуры 4, размах колебаний которой задан коэффициентом передачи управляемого масштабного преобразователя

и пропорционален разности текущих средних значений 3 и 6, оказывается соответствующей измеряемым внутренним волнам, и по ней можно определять не только периоды волн, но и их высоты.

Рассмотрим это соответствие в упрощенном виде. Входящую в выражения (4.1) и (4.8) интегральную температуру $T_{\text{инт}}$ заменим приближенным значением

$$T'_{\text{инт}} = \frac{\bar{T}_в l_в + \bar{T}_н l_н}{L_м}, \quad (4.9)$$

где $\bar{T}_в$ – осредненное по вертикали значение температуры в слое от z_1 до z_t ; $l_в$ – толщина слоя от z_1 до z_t ; $\bar{T}_н$ – осредненное значение температуры в слое от z_1 до z_t ; $l_н$ – толщина слоя от z_t до z_2 .

Связь между изменениями интегральной температуры $\Delta T'_{\text{инт}}$ и перемещения термоклина по вертикали найдем следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta T'_{\text{инт}} &= \frac{\bar{T}_в (l_в + \Delta z) + \bar{T}_н (l_н - \Delta z)}{L_м} - \frac{\bar{T}_в l_в + \bar{T}_н l_н}{L_м} = \\ &= \frac{\bar{T}_в - \bar{T}_н}{L_м} \Delta z. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Отсюда с очевидностью следует, что, непрерывно поддерживая коэффициент передачи масштабного преобразователя пропорциональным текущей разности $(\bar{T}_в - \bar{T}_н)$, что технически реализовано в рассмотренной выше конструкции, удастся обеспечить неизменность и заданность масштаба записи $\Delta T'_{\text{инт}}$ в единицах высоты волн. При изрезанности вертикального профиля температуры 10, например, в его верхней части (рис. 4.5, б), изменения температуры, воспринимаемые точечным преобразователем на уровне 8, имеют более сложный характер вида 5 по сравнению с изменениями при "гладком" профиле. Однако на текущем среднем значении 6 эта сложность практически не сказывается и связь между $\Delta T'_{\text{инт}}$ и Δz по-прежнему остается корректной.

Рассмотренный вариант масштабирования шкалы высот, как следует из приведенных схем, достаточно прост в реализации и весьма эффективен при измерениях периодических вариаций тер-

моклина. Однако для вариаций типа одиночного импульса, показанного, например, на рис. 4.9, автоматически устанавливаемая шкала высот может обладать существенной систематической погрешностью (схема не успевает выделить средние по вертикали $\bar{T}_в$ и $\bar{T}_н$). Также весьма важным недостатком является зависимость погрешности от амплитуды вариаций. Действительно, эквивалентность средних по времени значений температуры выше и ниже термоклина средним значениям ее по вертикали в слоях от z_1 до z_T и от z_T до z_2 (рис. 4.5), оказывается наиболее корректной лишь тогда, когда точки дополнительных измерений расположены на расстоянии, ненамного превышающем значение ожидаемой амплитуды вариаций. В противном случае реальное осредненное значение в верхней точке $\bar{T}'_в$ при типичной форме профиля (см. рис. 4.5) окажется завышенным по сравнению с $\bar{T}_в$, а значение в нижней точке $\bar{T}'_н$ — заниженным по сравнению с $\bar{T}_н$. Это приведет к появлению систематической погрешности в установке коэффициента масштабирования

$$\Delta_k = \frac{\Delta K_m}{K_m} \equiv \frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta \bar{T}} = \frac{\bar{T}'_в - \bar{T}'_н - \bar{T}_в + \bar{T}_н}{\bar{T}_в - \bar{T}_н} = \frac{(\bar{T}'_в - \bar{T}_в) + (\bar{T}_н - \bar{T}'_н)}{\bar{T}_в - \bar{T}_н} \quad (4.11)$$

Причем, поскольку истинный характер профиля в натурных условиях остается неизвестным, величина Δ_k практически не может быть установлена, тем самым результаты измерений нельзя скорректировать введением поправок.

Этот недостаток устранен в конструкции, показанной на рис. 4.6. В ней, как и в рассмотренных ранее вариантах, интегральный термопреобразователь (ИТП) 1 установлен на базовом тросе 2, связывающем якорь 3 с несущим бумом 4. Буй притоплен относительно поверхности моря 5. Параллельно основному ИТП 1 на базовом тросе станции закреплены дополнительные ИТП 6 и 7, причем верхний конец преобразователя 6 совмещен с верхним концом преобразователя 1, а нижний конец преобразователя 7 — с нижним кон-

цом преобразователя 1. Преобразователи 6 и 7 состыкованы между собой на уровне 8, совмещены с серединой ИТП 1 и соответственно — с невозмущенным положением термоклина 9 в месте установки буйковой станции при вертикальном температурном профиле 10 выше термоклина и профиле 11 ниже термоклина.

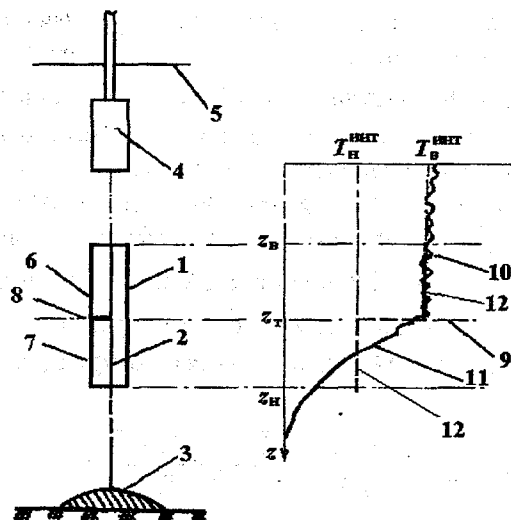


Рис. 4.6. Конструкция измерителя с тремя интегральными преобразователями

Основной ИТП 1 через измерительную схему, выполненную, например, в виде типичного моста постоянного тока, подсоединен к одному из синхронных каналов записи аналогового регистратора. Дополнительные ИТП 6 и 7 подключены к самостоятельным измерительным схемам, выполненным аналогично и подключенным, соответственно, ко второму и третьему синхронным каналам регистратора.

Работа устройства осуществляется следующим образом.

При прохождении внутренних волн характер профилей 10 и 11 сохраняется, при этом сопротивление ИТП 1 изменяется в соответствии с выражением

$$R_{\text{инт}} = R_0 \left[1 + \frac{\alpha}{L} \left(\int_{z_b}^{z_T} T_b(z) dz + \int_{z_T}^{z_n} T_n(z) dz \right) \right], \quad (4.12)$$

где z_T – горизонт расположения термоклина; $T_b(z)$ и $T_n(z)$ – распределения температуры по профилям 10 и 11; $L = (z_n - z_b)$ – длина основного ИТП; z_n – горизонт расположения нижнего конца ИТП; z_b – горизонт расположения верхнего конца ИТП; α – температурный коэффициент сопротивления материала ИТП; R_0 – сопротивление основного ИТП при равенстве нулю значений интегральной температуры [$T_b(z) = 0$ и $T_n(z) = 0$].

При неизменных профилях 10 и 11 оба интеграла в выражении (4.12) могут быть выражены через эквивалентные постоянные значения температуры $T_b^{\text{инт}}$ и $T_n^{\text{инт}}$, т.е.

$$\begin{aligned} \int_{z_b}^{z_T} T_b(z) dz &= T_b^{\text{инт}} (z_T - z_b); \\ \int_{z_T}^{z_n} T_n(z) dz &= T_n^{\text{инт}} (z_n - z_T). \end{aligned} \quad (4.13)$$

В таком случае реальный температурный профиль в виде сочетания 10 и 11 может быть заменен эквивалентным скачкообразным профилем 12.

При колебаниях положения z_T , т.е. при переменном $z_T(\tau)$, где τ – время, а также с учетом (4.13) получим следующую изменчивость $R_{\text{инт}}$:

$$\frac{dR_{\text{инт}}}{d\tau} = \frac{R_0 \alpha}{L} (T_b^{\text{инт}} - T_n^{\text{инт}}) \frac{dz_T}{d\tau} = k_z \frac{dz_T}{d\tau} \quad (4.14)$$

или в конечных приращениях

$$\Delta R_{\text{инт}} = k_z \Delta z_T. \quad (4.15)$$

Таким образом, коэффициент перевода k_z шкалы $R_{\text{инт}}$ в шкалу высот при известных R_0 , α и L легко определяется при наличии информации о $T_{\text{в}}^{\text{инт}}$ и $T_{\text{н}}^{\text{инт}}$.

Достоверное определение $T_{\text{в}}^{\text{инт}}$ и $T_{\text{н}}^{\text{инт}}$ в рассматриваемом методе обеспечивается по данным дополнительных ИТП 6 и 7. Ввиду характеристики вертикального профиля в зоне термоклина на записи верхнего ИТП 6 однозначно выявляются моменты перехода от квазисинусоидального характера к квазистатическому (рис. 4.7). В эти моменты времени данные обоих ИТП однозначно соответствуют искомым значениям.

Как следует из описанной сущности метода, определение k_z производится для любых высот волн. Тем самым, недостаток, характерный для предыдущей конструкции, здесь отсутствует.

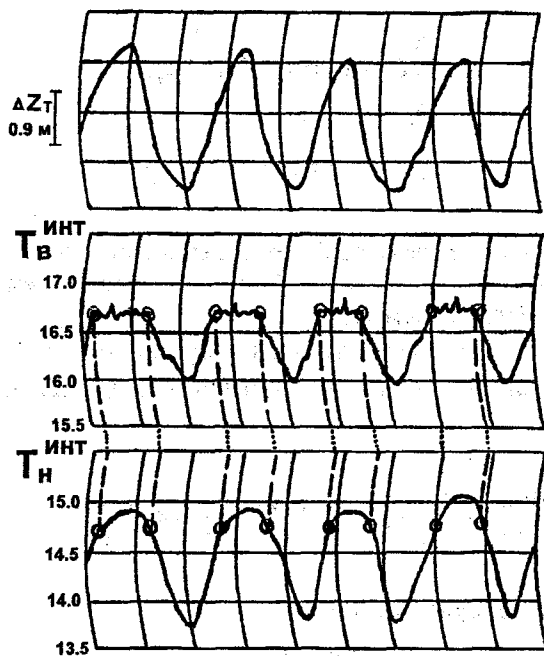


Рис. 4.7. Формы регистрируемых сигналов в измерителе с тремя ИТП

Регистрацию внутренних волн с одновременным масштабированием шкалы высот позволяет осуществлять сравнительно простой дискретно-интегральный вариант преобразователя (идея предложена А.Н. Рутенко), когда термочувствительная обмотка распределена по несущему основанию отдельными пакетами, как это схематично показано на рис. 4.8, а. Каждый пакет l_i длиной L может рассматриваться как элементарный интегральный преобразователь. Пакеты расположены на расстоянии h и соединены последовательно. Поскольку соединения практически не оказывают влияния на суммарное сопротивление, интегральная температура преобразователя

$$T_{\text{инт}} = \frac{1}{NL} \sum_{i=1}^N \int_0^L T(l_i) dl_i, \quad (4.16)$$

где $T(l_i)$ – распределение температуры в пределах i -го участка; N – число пакетов.

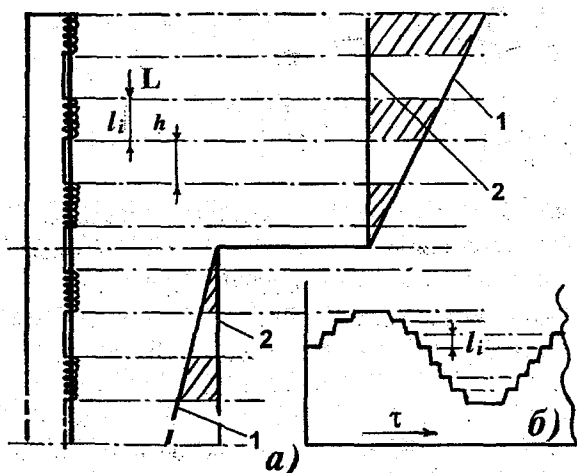


Рис. 4.8. Дискретно-интегральный термопреобразователь

При наиболее простой аппроксимации вертикального профиля кривой 2, когда температура в слоях выше и ниже термоклина од-

нородна и ее значения, естественно, равны T_v и T_n , выражение (4.16) преобразуется к виду

$$T_{\text{инт}} = \frac{nT_v + mT_n}{N}, \quad (4.17)$$

где $n + m = N$.

При прохождении периодических внутренних волн изменяется соотношение между m и n , при этом запись будет носить ступенчатый характер (рис. 4.8, б). Поскольку размер каждой ступеньки по шкале высот соответствует L , масштабирование такой записи не представляет никаких трудностей.

Если вертикальный профиль имеет более сложный характер, но распределения выше и ниже термоклина могут быть представлены линейными функциями 1 вида $T_v(l_i) = T_{1i} + \phi_1 l_i$ и $T_n(l_i) = T_{2i} + \phi_2 l_i$, то на сущности работы преобразователя это, очевидно, не скажется.

Действительно, в таком случае

$$\begin{aligned} T_{\text{инт}} &= \frac{1}{NL} \left[\sum_{i=1}^n \int_0^L (\phi_1 l_i + T_{1i}) dl_i + \sum_{i=1}^m \int_0^L (\phi_2 l_i + T_{2i}) dl_i \right] = \\ &= \frac{1}{NL} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\phi_1 L^2}{2} + T_{1i} L \right) + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\phi_2 L^2}{2} + T_{2i} L \right) \right], \end{aligned} \quad (4.18)$$

т.е. ступенчатый характер записи по-прежнему сохраняется, хотя сами размеры ступенек из-за различия ϕ_1 и ϕ_2 оказываются варьирующими, а масштаб записи по шкале высот становится переменным.

В дискретно-интегральном преобразователе, применяемом самостоятельно, важным недостатком, конечно, является сама ступенчатость записи, существенно ограничивающая возможный диапазон частот регистрируемых вариаций. В связи с этим более целесообразно сочетание непрерывного и дискретного интегральных преобразователей. Причем в такой конструкции сигналом измерительной информации является сигнал с непрерывного преобразователя, а дискретный преобразователь служит лишь для масштабирования записи. Такое сочетание позволяет осуществлять регистрацию внутренних волн с любой формой профиля, в том числе волн

типа уединенных вариаций. Пример записи такой вариации с импульсными отметками шкалы высот показан на рис. 4.9.

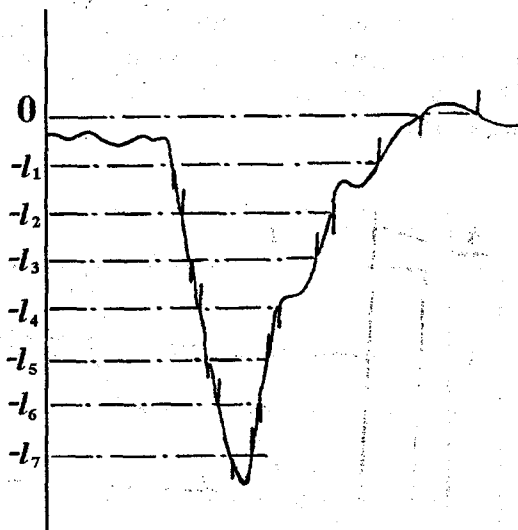


Рис. 4.9. Пример регистрации уединенной вариации термоклина измерителем с сочетанием интегрального и дискретно-интегрального преобразователя

В некоторых измерителях внутренних волн (например, [21]) применяется непрерывное масштабирование шкалы высот за счет использования двух непрерывных интегральных преобразователей 3 и 4, смещенных при установке друг относительно друга на заданное расстояние l по вертикали (рис. 4.10). При вертикальном профиле $T(z)$ вида 1 интегральные температуры преобразователей, соответственно, равны

$$T_{\text{инт.3}} = \frac{1}{L} \int_{z_1}^{z_2} T(z) dz; \quad (4.19)$$

$$T_{\text{инт.4}} = \frac{1}{L} \int_{z_1+l}^{z_2+l} T(z) dz, \quad (4.20)$$

где L — длина каждого из преобразователей.

Значение $T_{\text{инт.3}}$ для профиля 1 практически соответствует значению $T_{\text{инт.4}}$ для профиля 2, смещенного по вертикали относительно профиля 1 на расстояние l , т.е. величина $\Delta T_{\text{инт}} = T_{\text{инт.4}} - T_{\text{инт.3}}$ является сигналом измерительной информации о масштабе записи по шкале высот. Этот сигнал может быть использован для автоматической установки масштаба.

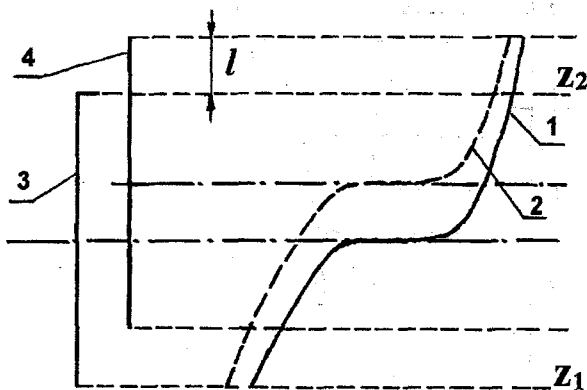


Рис. 4.10. Смещенные интегральные термопреобразователи

Такая конструкция весьма эффективна при "гладких" профилях температуры выше и ниже термоклина, но при наличии термических прослоек (рис. 4.5, б) масштабирование за счет смещения преобразователей может оказываться некорректным, а при вариациях знака у $\Delta T_{\text{инт}}$ – вообще неопределенным. У предыдущих вариантов влияние "изрезанности" профилей, как уже отмечалось, существенно меньше.

Рассмотренные термоинтегральные преобразователи наиболее целесообразно применять в стационарном режиме с установкой на заякоренных буйковых станциях. Однако с их помощью возможно проведение наблюдений также и с исследовательских судов. При этом необходимо использовать некоторые специальные приемы.

При работе с судна, находящегося в дрейфе (рис. 4.11), термоинтегральный преобразователь 1, закрепленный на стандартном океанографическом тросе (либо кабель-тросе) с грузом 2 на конце, опускают до глубины расположения термоклина Z_T , причем с этой

глубиной должна совпадать примерно середина преобразователя, как и в буйковом варианте. Однако, в отличие от буйковых станций подобное "подвешенное с судна" расположение подвержено качке в условиях волнения на поверхности. Тем самым, возникают собственные перемещения преобразователя относительно термоклина, которые регистрируются точно так же, как и внутренние волны. Исключить такую ложную информацию можно, используя дополнительный преобразователь гидростатического давления 3 ("датчик качки"), располагаемый на тросе на такой глубине, где отсутствуют вариации давления от поверхностных волн.

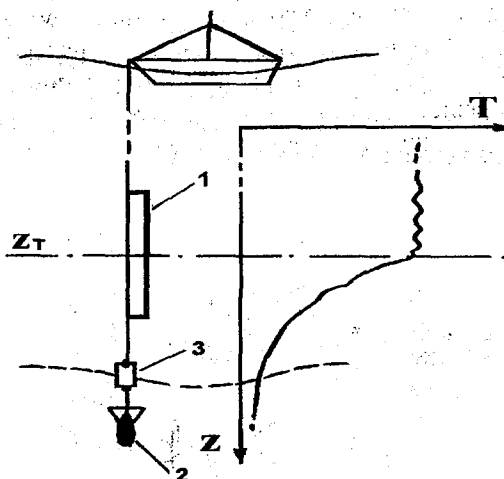


Рис. 4.11. Измерение характеристик внутренних волн с дрейфующего судна с использованием ИТП

В этой ситуации "датчик качки" обеспечивает формирование сигнала, соответствующего "чистым" вертикальным перемещениям всей конструкции. Этот сигнал вычитается из суммарного сигнала, получаемого с интегрального преобразователя, тем самым практически полностью ликвидируются искажения, связанные с качкой. Как известно (например [27]), подобный прием применяется в судовом волнографе типа ГМ-62. При необходимости все узлы этого волнографа могут быть использованы при измерениях внутренних волн. Естественно, за исключением канала струнного преобразова-

теля, который заменяется каналом термоинтегрального преобразователя.

Кроме качки, при измерениях с судна необходимо также учитывать характеристики дрейфа.

В работе [15] рассматривается метод измерений характеристик внутренних волн на ходу судна. Для этого используется решетка преобразователей (рис. 4.12), буксируемых за судном с фиксированным разнесом по пространству. Решетка состоит из четырех распределенных по вертикали измерительных линий, содержащих термоинтегральные преобразователи 1, на верхних концах которых установлены преобразователи локальной температуры 2, а на нижних – совместно преобразователи локальной температуры и гидростатического давления 3. Разнос линий по пространству обеспечивается с помощью буев специальной конструкции 4, а заглубление – с помощью решеток-заглубителей 5. Передача сигналов с преобразователей производится по кабель-тросам 6.

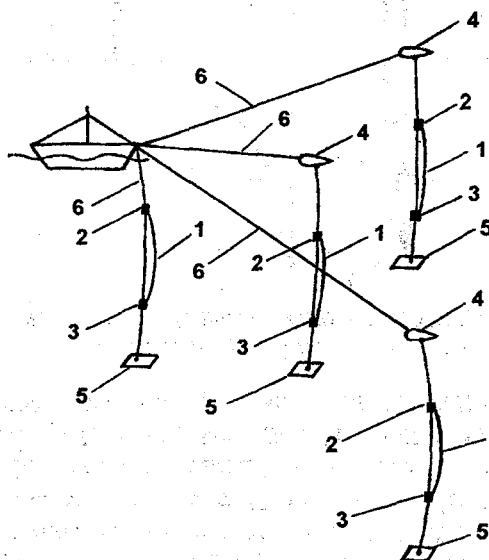


Рис. 4.12. Измерительные характеристики внутренних волн на ходу судна с помощью решетки ИТП

В этой конструкции возможно определение практически всех характеристик внутренних волн — периода, длины волны, амплитуды, направления и скорости распространения. Определение амплитуды возможно по данным одной измерительной линии, при этом масштабирование по шкале высот обеспечивается с использованием локальных значений температуры на верхнем и нижнем концах интегрального преобразователя 1. Одновременно необходим учет собственных вертикальных перемещений линии, в частности, из-за поверхностных волн. В самом простом случае перемещения всех элементов линии являются синфазными. Тогда учет сводится, как и в предыдущем варианте, к простому вычитанию из суммарного сигнала, поступающего с интегрального преобразователя, той части, которая соответствует вариациям гидростатического давления по данным с преобразователя 3.

Однако при большом заглублении линий возникают различия в синфазности, которые, к сожалению, не могут быть учтены. Это формирует некоторую шумовую часть в спектрах внутренних волн, рассчитываемых по получаемым данным.

При определении периода, длины волны, направления и скорости распространения необходимо учитывать движение судна при буксировке и вариации смещения измерительных линий относительно друг друга.

4.2. Методы, основанные на измерении вариаций интегральной плотности

Принцип, положенный в основу этих методов, аналогичен предыдущему, только в качестве входной измеряемой величины здесь используется вертикальный профиль плотности в пределах фиксированной базы, размещенной с пересечением пикноклина (рис. 4.13). Перемещения этого профиля относительно базы приводят к вариациям величины:

$$\rho_{\text{инт}} = \frac{1}{L} \int_{z_n}^{z_n} \rho(z) dz, \quad (4.21)$$

где $L = (z_n - z_n)$ — длина базы.

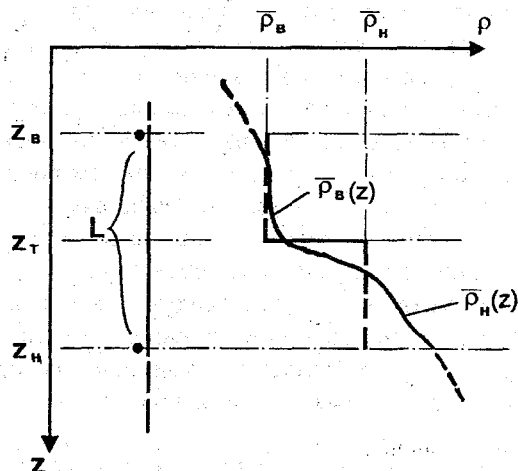


Рис. 4.13. Измерение вариаций интегральной плотности

Разделяя, как и ранее (см. п. 4.1), профиль $\rho(z)$ на два участка ($\rho_B(z)$ – выше горизонта z_T и $\rho_H(z)$ – ниже горизонта z_T), получим

$$\rho_{\text{инт}} = \frac{1}{L} \left[\int_{z_B}^{z_H} \rho_B(z) dz + \int_{z_B}^{z_H} \rho_H(z) dz \right] \quad (4.22)$$

Введем осредненные значения выше и ниже горизонта z_T :

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_B &= \frac{1}{z_T - z_B} \int_{z_B}^{z_T} \rho_B(z) dz, \\ \bar{\rho}_H &= \frac{1}{z_H - z_T} \int_{z_T}^{z_H} \rho_H(z) dz \end{aligned} \quad (4.23)$$

и преобразуем выражение (4.22) к виду

$$\rho_{\text{инт}} = \frac{z_T(\overline{\rho_v} - \overline{\rho_n}) - \overline{\rho_v} z_v + \overline{\rho_n} z_n}{L} \quad (4.24)$$

Отсюда получим чувствительность:

$$\kappa_{\rho} = \frac{\Delta \rho_{\text{инт}}}{\Delta z_T} = \frac{\overline{\rho_v} - \overline{\rho_n}}{L} \quad (4.25)$$

Непосредственное измерение интегральной плотности на некоторой вертикальной базе возможно при использовании следующей известной зависимости

$$C_{\text{зв}} = \frac{1}{\sqrt{\rho \beta_{\text{ад}}}} \quad (4.26)$$

где $C_{\text{зв}}$ – скорость звука в воде; $\beta_{\text{ад}}$ – коэффициент адиабатической сжимаемости; ρ – плотность воды, т.е. задача практически сводится к непрерывным измерениям скорости звука на неподвижной опорной базе, расположенной поперек пикноклина.

Величин ρ и $\beta_{\text{ад}}$ являются функциями температуры t , солёности S и гидростатического давления P , обуславливая зависимость $C_{\text{зв}}(t, S, P)$. Эта зависимость известна, например, в виде формулы Вильсона [25]:

$$C_{\text{зв}} = C(0; 35) + \Delta C_t + \Delta C_S + \Delta C_P + \Delta C_{tSP}, \quad (4.27)$$

где $C(0; 35)$ – значение скорости звука при $t = 0^\circ\text{C}$ и $S = 35 \text{ ‰}$; ΔC_t , ΔC_S , ΔC_P – частные зависимости от температуры, солёности и давления; соответственно; ΔC_{tSP} – дополнительная зависимость от совокупности величин t , S и P .

Причем

$$\Delta C_t = 4,5721t - 4,4532 \cdot 10^{-2} t^2 - 2,6045 \cdot 10^{-4} t^3 + 7,985 \cdot 10^{-6} t^4;$$

$$\Delta C_S = 1,3980(S - 35) + 1,692 \cdot 10^{-2} (S - 35)^2;$$

$$\Delta C_p = 1,60272 \cdot 10^{-1} P + 1,0268 \cdot 10^{-5} P^2 + 3,5216 \cdot 10^{-9} P^3 - \\ - 3,3603 \cdot 10^{-12} P^4.$$

Зависимость $\Delta C_{isP}(t, S, P)$ существенно слабее и из-за ее громоздкости здесь не приводится.

Кроме формулы Вильсона, в гидрофизических задачах могут использоваться также другие эмпирические формулы: Дель-Гроссо, Вуда и др. Они отличаются значениями постоянного члена и эмпирическими коэффициентами в зависимостях $\Delta C_t(t)$, $\Delta C_p(P)$, $\Delta C_s(S)$ и $\Delta C_{isP}(t, S, P)$. Однако эти отличия для рассматриваемых здесь задач практического значения не имеют.

Как следует из приведенных выражений, основное влияние на $C_{зв}$ оказывает изменчивость температуры. При изменении t на 1°C величина ΔC_t в среднем изменяется на 3–4 м/с. Изменение солёности в 1‰ в среднем соответствует изменению ΔC_s на 1 м/с. Давление влияет значительно меньше. При $\Delta P = 10^5$ Па (1 кг/см^2) величина $\Delta(\Delta C_p) \approx 0,16$ м/с для малых глубин.

Измерение скорости звука в вертикальном направлении на неподвижной опорной базе никаких особенностей практически не имеет. По сравнению с типичными измерителями здесь лишь значительно увеличивается длина базы.

Конструктивно интегральный преобразователь выглядит следующим образом. По обе стороны от скачка плотности 2 (рис. 4.14) располагаются обратимые акустические преобразователи 1 и 3, закрепляемые на базовой основе 4. Преобразователи 1 и 3 линией связи 5 связаны с электронным блоком 6. В простейшем варианте задача электронного блока – обеспечение цикличности следования акустических импульсов с частотой $f(C_{зв})$. Это достигается за счет того, что излученный преобразователем 1 акустический импульс через промежуток времени $\tau = \frac{L}{C_{зв}}$, где L – длина базы, воспринимается преобразователем 3 и поступает в электронный блок 6, который практически без задержки формирует новый импульс запуска преобразователя 1. Таким образом, импульсы следуют с частотой

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{C_{зв}}{L}.$$

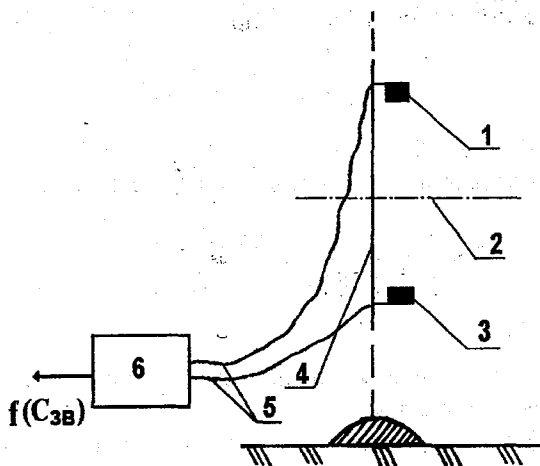


Рис. 4.14. Акустический интегральный преобразователь

Погрешность современных циклических измерителей скорости звука среднего класса составляет $\pm 0,02\%$ [44], т.е. для морской воды примерно $\pm 0,3$ м/с, что соответствует, в частности, изменению интегральной температуры в $\pm 0,1$ К. Тем самым, возможности рассмотренного варианта оказываются примерно равноценными возможностям проволочных интегральных термопреобразователей. Преимуществом же по сравнению с термопреобразователями является практически отсутствие инерционности и возможность регистрации вариаций положения не только термоклина, но и гало- и, в целом, пикноклина.

При необходимости устранить влияние эффекта Доплера, обусловленного вертикальными движениями (хотя их скорости обычно невелики), схема устройства может быть видоизменена в соответствии с приемами, известными в практике акустических измерений [44]. В схеме на рис. 4.14 электронный блок 6 в таком случае из принятого преобразователем 3 импульса по-прежнему формирует новый импульс запуска, но возбуждает этим импульсом преобразо-

ватель 3, а не 1, как в предыдущем случае, т.е. второй акустический импульс посылается в обратном направлении. При наличии вертикальных движений со скоростью V_z последовательные интервалы времени между импульсами будут определяться выражениями:

$$\tau_1 = \frac{L}{C_{3B} + V_z} \text{ и } \tau_2 = \frac{L}{C_{3B} - V_z}.$$

Измерение текущей частоты на выходе блока 6 предполагает не что иное, как осреднение интервалов τ_1 и τ_2 , т.е. значение частоты

$$f = \frac{1}{T} = \frac{2}{\tau_1 + \tau_2} = \frac{(C_{3B}^2 - V_z^2)}{LC_{3B}} \approx \frac{C_{3B}}{L},$$

поскольку $V_z^2 \ll C_{3B}^2$.

В результате влияние вертикальных движений воды оказывается практически устраненным.

Эффект Доплера может проявиться не только за счет вертикальных движений воды, но и за счет течения. Рассмотрим ситуацию, когда измерительная база L , например, размещенная на тресе буйковой станции (рис. 4.15), наклонена по отношению к пикноклину и, соответственно, к вектору горизонтальной скорости V_T . Из-за этого появляется составляющая скорости V_L , действующая вдоль базы.

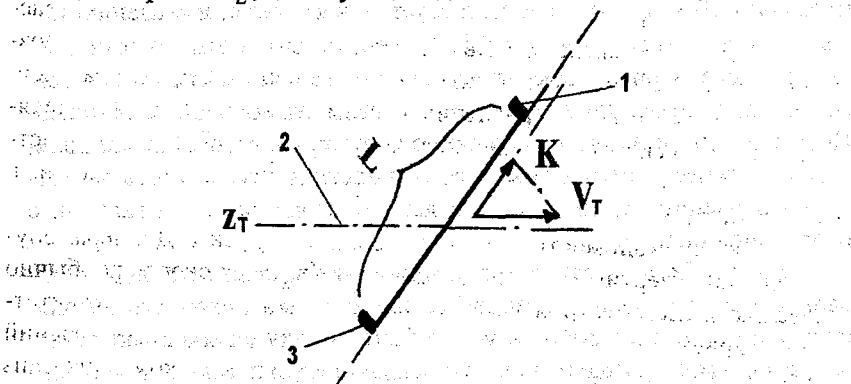


Рис. 4.15. Схема измерений при наклонной базе

При $V_L = \text{const}$ проявление эффекта Доплера приводит к возникновению постоянной составляющей при классической схеме циклических измерений скорости звука. С этим можно было бы примириться, поскольку ставится задача регистрации изменчивости $C_{зв}$, а не самой величины. Однако в реальных условиях рассчитывать на постоянство V_L практически невозможно, в частности, из-за изменчивости характеристик течения (направление, скорость) и т. д. В связи с этим целесообразно использовать такую же модификацию циклических измерений, как и при устранении влияния V_z .

Аналогичная ситуация возникает при использовании рассматриваемых методов с дрейфующего судна в условиях качки. Учет самой качки здесь производится так же, как и при реализации термоинтегральных методов (см. рис. 4.11), т.е. по данным, получаемым с помощью дополнительного преобразователя гидростатического давления, располагаемого на нижнем конце измерительной линии. Но кроме этого, качка вызывает появление знакопеременной относительной скорости движения и, соответственно, возможность эффекта Доплера. Тем самым, здесь также необходимо использование модификации циклического измерителя.

Кроме акустических, для измерения вариаций интегральной плотности возможно применение иных методов. В частности, представляются перспективными методы, основанные на поглощении слоем воды потока гамма-излучения. Это поглощение зависит от плотности. Реализация методов возможна по той же схеме, т.е. путем разнесения излучателя и приемника в пределах вертикальной базы. Немаловажным достоинством здесь является то, что источники гамма-излучения являются полностью автономными. Для регистрации гамма-излучения применяются дозиметрические устройства, при этом наиболее целесообразны устройства, снабженные аналоговым выходом.

Однако широкого применения для измерения характеристик внутренних волн гамма-методы пока не находят. Возможно, это связано с распространившейся в последние годы "боязнью" использования ионизирующих излучений.

При реализации как акустических, так и гамма-методов чрезвычайно важной задачей является масштабирование шкалы высот. В соответствии с выражением (4.25) чувствительность методов за-

висит от значений $\overline{\rho_v}$ и $\overline{\rho_n}$, которые необходимо определять самостоятельно. Прямые измерения $\overline{\rho_v}$ и $\overline{\rho_n}$ осуществить довольно сложно, поскольку в соответствии с выражениями (4.23) эти величины содержат интегралы, где один из пределов интегрирования является переменным.

Одним из методов определения $\overline{\rho_v}$ и $\overline{\rho_n}$ является их расчет по данным периодически выполняемого вертикального зондирования температуры и солености. Поскольку при этом становится известным профиль $\rho(z)$ в пределах от z_v до z_n , причем по этому профилю однозначно определяется z_t , то расчет сводится к вычислению интегралов по выражениям (4.23). Зондирование целесообразно производить в сроки, согласованные с фазой регистрируемых внутренних волн.

Несомненно, что этот метод, обеспечивая качественные результаты, является одновременно весьма дорогостоящим, причем при любом варианте зондирования: с судна, с подводного либо надводного буйа, в ограниченном варианте "челночного" зондирования в пределах от z_v до z_n в автоматическом режиме, например путем перемещений зонда вверх-вниз по базовому тросу, и т. д.

Применение метода получается оправданным при комплексных измерениях с судна, а также в комплексных буйковых станциях, где канал измерения характеристик внутренних волн является одним из многих реализованных каналов.

В самостоятельных измерителях внутренних волн целесообразны следующие методы.

Приближенные значения $\overline{\rho_v}$ и $\overline{\rho_n}$ наиболее просто определить, используя локальные измерения плотности на верхнем и нижнем концах интегрального преобразователя. Причем, как и в термоинтегральном методе, результаты таких измерений необходимо осреднять за промежуток времени, существенно превышающей период регистрируемых внутренних волн.

В качестве локальных измерителей можно использовать устройства с прямыми измерительными преобразователями плотности, например предложенными Ричардсоном [48]. Такой преобразователь представляет собой полую трубку в форме камертона, размещенную внутри герметизированного бокса, причем полость трубки

сообщается с окружающей водой. Частота резонансных колебаний подобного "водяного камертона" является функцией плотности воды при весьма большой добротности колебательной системы, что обеспечивает высокую точность измерений.

Однако камертонные преобразователи в настоящее время практически не используются, поскольку более надежны и методически хорошо отработаны косвенные измерения плотности — по данным о температуре и солености. Тем самым, на горизонтах z_v и z_n необходимо размещение согласованных пар преобразователей температуры и электрической проводимости, обработка сигналов которых позволяет получать вначале значения солености, а затем — плотности. Алгоритм такой обработки для вод открытого моря является стандартным.

Отмеченное согласование пар преобразователей предполагает одинаковость их динамических свойств и размеров областей пространственного осреднения.

При конкретном использовании преобразователей температуры и электрической проводимости совместно с акустическими интегральными измерителями целесообразно после получения значений солености определять не плотность, а непосредственно скорость звука выше и ниже пикноклина, например, по уже рассматривавшейся формуле Вильсона.

Конструктивно сложнее, хотя методически более оправданы прямые локальные измерения скорости звука. Поскольку для таких измерений все равно нужна некоторая база, то их "локальность" в какой-то мере условна. Однако для реальных случаев соотношение между интегральной и локальной базами может быть задано достаточно большим, так что условие "локальности" вполне выполнимо.

Недостатки использования локальных измерений для масштабирования шкалы высот волн здесь полностью такие же, как в аналогичном варианте термоинтегральных методов. Максимальное приближение к $\bar{\rho}_v$ и $\bar{\rho}_n$ (либо к $\bar{C}_{zv}^v$ и $\bar{C}_{zn}^n$) осредненных локальных данных получается при близости "размаха" внутренних волн и длины интегральной базы. С уменьшением "размаха" погрешности возрастают.

Более качественные результаты получаются при использовании двух интегральных акустических измерителей со смещенными по вертикали базами. Чтобы не возникло перепутывание сигналов, в

каждом из измерителей необходимо применять индивидуальную несущую частоту, пакет колебаний которой и представляет собой излучаемый импульс.

Значение коэффициента масштабирования, как и в аналогичном варианте термоинтегральных методов, определяется как отношение разности синхронных значений $C_{3в}^{инт}$, измеренных на этих смещенных базах, к значению смещения.

4.3. Методы, основанные на измерении интегральной электрической проводимости

Как известно, удельная электрическая проводимость морской воды связана с температурой T , соленостью S и гидростатическим давлением P :

$$\sigma_w = F(T, S, P). \quad (4.28)$$

Эта зависимость является эмпирической и весьма тщательно установлена для вод океана. Для прибрежных вод, для вод внутренних морей она, как правило, является индивидуальной и не всегда известна. Однако основные закономерности сохраняются. Для задач измерения характеристик внутренних волн этого вполне достаточно, поскольку при преобразовании измеренных значений интегральной проводимости в значения ординат волн, как и ранее, необходимо использовать специальные приемы, где подробности взаимосвязи (4.28) практического значения не имеют.

Из-за взаимосвязи (4.28) в термоклине либо, в целом, в пикноклине одновременно наблюдается, как правило, также скачок электрической проводимости. Хотя здесь возможны исключения. Они связаны с тем, что σ_w возрастает с повышением температуры и с увеличением солености. В случае, если профили $T(z)$ и $S(z)$ таковы, что в пикноклине $\frac{\partial T}{\partial z} < 0$, а $\frac{\partial S}{\partial z} > 0$ и при этом формируется повышенный градиент плотности, то профиль проводимости $\sigma_w(z)$, наоборот, сглаживается и, в принципе, может оказаться вообще

безградиентным. Хотя подобная "безградиентность" $\sigma_w(z)$ в пикноклине не столь уж частое явление, это следует иметь в виду при реализации рассматриваемых далее методов.

Измерение интегральной удельной электрической проводимости либо интегрального удельного сопротивления $\gamma_{\text{инт}} = \frac{1}{\sigma_{\text{инт}}}$, что экви-

валентно, часто оказывается весьма эффективным при регистрации внутренних волн как в "чистом" термоклине (из-за сильной зависимости σ_w от T), так и в "чистом" галоклине, например, в эстуариях при однородном профиле $T(z)$, а также в пикноклине при

$\frac{\partial T}{\partial z} < 0$ и $\frac{\partial S}{\partial z} < 0$. Кроме того, следует отметить, что, по-видимому,

пока лишь только эти методы позволяют осуществлять регистрацию специфических внутренних волн "внутри" термоклина – так называемых микромасштабных волн (см. гл. 1).

Рассмотрим чувствительность методов. В настоящее время измерение проводимости может обеспечиваться с погрешностью не хуже $\pm 0,05\%$ (например [40]). Температурный коэффициент

проводимости, т.е. величина $\frac{1}{\sigma_w} \frac{\partial \sigma_w}{\partial T}$ в диапазоне температур $(-1$

$\dots +35)^\circ\text{C}$ и соленостей $(29 \dots 39)\text{‰}$ меняется от 1,7 до 3,0% / K и возрастает с уменьшением значений T и S . Тем самым измерения интегральной проводимости могут позволить выявлять изменчивость интегральной температуры, например в "чистом" термоклине, порядка $\pm 0,02 \dots 0,03$ K, что существенно превышает возможности методов, основанных на измерении интегральной плотности и сравнимо, либо превышает (например, в Арктике) возможности термоинтегральных методов.

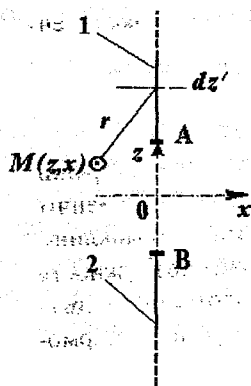
Соленостный коэффициент проводимости, т.е. величина $\frac{1}{\sigma_w} \frac{\partial \sigma_w}{\partial S}$, также весьма значим. В том же, что и ранее, диапазоне он

изменяется примерно от 2,5 до 3,2% / ‰ и возрастает в сторону уменьшения T и S . Тем самым, реально выявление изменчивости интегральной солености в $\pm 0,01 \dots 0,02\text{‰}$. Это дает дополнительные

преимущества при измерениях в пикноклине отмеченного ранее типа ($\frac{\partial T}{\partial z} < 0$ и $\frac{\partial S}{\partial z} < 0$), а также позволяет осуществлять высокоточную регистрацию характеристик внутренних волн в "чистом" галоклине.

Измерительные преобразователи (ИП), которые можно применять для измерений интегральной электрической проводимости, схематично выглядят так же, как и те, что применяются для локальных измерений (например [40]). В зависимости от требуемой точности и решаемых задач они содержат два, три, четыре и далее – кратное двум число электродов. Однако, если у локальных преобразователей размеры электродов и расстояние между ними близки между собой, то у интегральных ИП расстояние между электродами существенно превышает их размеры. В силу этого электрическое поле, которое формируется в морской воде в зоне между электродами, рассматривается (например [47]) как поле дипольного источника.

Рассмотрим характеристики этого поля для случая, когда электроды расположены по вертикали в точках А и В (рис. 4.16) и подключены к источнику тока проводами 1 и 2.



Поле удельной электрической проводимости будем считать однородным, т.е. $\sigma_w(z) = \text{const}$. Тогда электрическое поле в области между А и В будет определяться выражениями [47]:

$$\begin{aligned} E_z &= \frac{J}{2\pi\sigma_w} \left(\int_{-\infty}^B F_1 dz' + \int_A^{\infty} F_1 dz' \right); \\ E_x &= \frac{J}{2\pi\sigma_w} \left(\int_{-\infty}^B F_2 dz' + \int_A^{\infty} F_2 dz' \right), \end{aligned} \quad (4.29)$$

Рис. 4.16. Электрический диполь в морской воде

которые получаются путем интегрирования полей элементарных электрических диполей по всей длине питающих линий 1 и 2 (линии в обе стороны от А и В условно устремлены в бесконечность). В этих выражениях

$$F_1 = \frac{e^{ikr}}{r^3} \left[(1 - ikr) \frac{(z - z')^2}{r^2} - \frac{(1 - ikr - k^2 r^2) x^2}{2r^2} \right];$$

$$F_2 = \frac{e^{ikr}}{r^3} \left[(1 - ikr) + \frac{(1 - ikr - k^2 r^2)}{2} \right] \frac{(z - z') x}{r^2},$$

где r – расстояние от точки $M(z, x)$, в которой вычисляется поле, до ординаты z' элементарного диполя, т.е. $r = [(z - z')^2 + x^2]^{1/2}$; k – волновое число; при пренебрежении токами смещения в морской воде $k = (i\omega\mu\sigma_w)^{1/2}$; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота тока, питающего электроды А и В; μ – магнитная проницаемость среды; J – ток, питающий диполь.

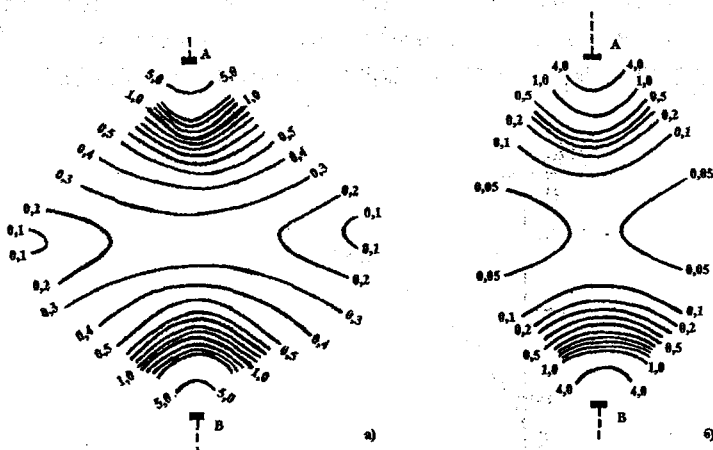


Рис. 4.17. Характеристики электрического поля разнесенных электродов

На рис. 4.17 по данным работы [47] приведена изменчивость модуля компоненты $|E_z|$, рассчитанная для разноса электродов $AB = 20$ м при $J = 1$ А, $\sigma_w = 4,0$ См/м и частотах $f = 0,25$ кГц (рис. 4.17, а) и $f = 4$ кГц (рис. 4.17, б). В силу однородности σ_w поле является симметричным. В то же время оно существенно неоднородно. Мак-

симильная изменчивость $|E_z|$ наблюдается вблизи электродов. В центральной части при низкой частоте (0,25 кГц) поле более однородно – изменчивость при $z = \pm 2$ м и $x = \pm 2$ м не превышает $\pm 10\%$ относительно среднего значения. Повышение рабочей частоты ведет к резкому ослаблению поля в центральной части: для $f = 0.25$ кГц значение $|E_z|$ в центре ($z = 0$; $x = 0$) приблизительно равно 0,3 мВ/м, а для $f = 4$ кГц – 0,05 мВ/м. Увеличение f до 64 кГц приводит к падению значения $|E_z|$ в центре до $0,6 \cdot 10^{-4}$ мВ/м, что вообще делает измерения весьма затруднительными. Одновременно с ослаблением поля увеличение частоты повышает неоднородность в центре: при $f = 4$ кГц изменчивость в зоне $z = \pm 2$ м и $x = \pm 2$ м достигает $\pm 25\%$ относительно среднего значения.

В то же время с ростом частоты увеличивается чувствительность к изменениям σ_w . Характер этой изменчивости показан на рис. 4.18 при $\Delta\sigma_w / \sigma_w = 5\%$ и среднем значении $\sigma_w = 4,0$ См/м.

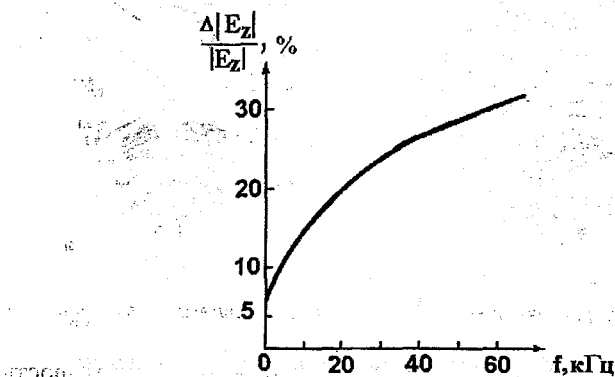


Рис. 4.18. Характер зависимости относительной чувствительности электрического поля к изменчивости проводимости при различных частотах

Для отмеченной 5-процентной изменчивости проводимости изменения напряженности поля в центре ($z = 0$; $x = 0$) при повышенных частотах могут достигать 20–30 %. Такое "усиление" чувствительности преимущественно связано с эффектом "стягивания" поля к электродам, резко возрастающим с увеличением частоты, что на-

глядно видно на рис. 4.17, а, б. К сожалению, из-за этого практически невозможно использовать подобную повышенную чувствительность, ведь, как отмечалось выше, "стягивание" поля приводит к падению $|E_z|$ в центральной части до значений, измерять которые очень трудно.

Наличие границы раздела вод, например, совпадающей с серединой электродной базы АВ (см. рис. 4.16), приводит к ряду характерных аномалий формирующегося электрического поля. В частности, существенно нарушается симметрия. Расчеты для ситуации, когда выше границы раздела ($z > 0$) находится вода с проводимостью $\sigma_{w1} = 4,0$ См/м, а ниже ($z < 0$) — с проводимостью $\sigma_{w2} = 3,64$ См/м, дают значения асимметрии Δ порядка 0,4 мВ/м при $z = \pm 8$ м и АВ = 20 м (рис. 4.19).

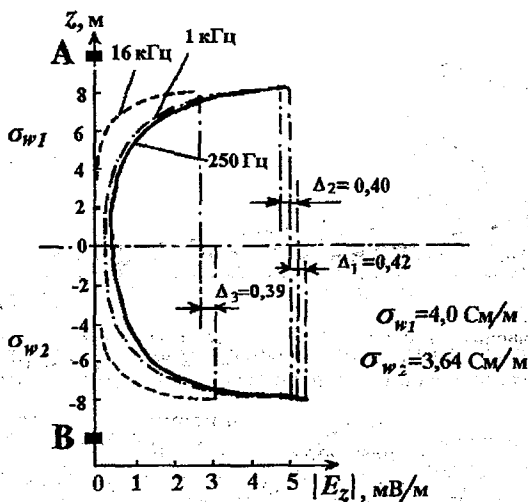


Рис. 4.19. Характеристики электрического поля при симметричном размещении электродов поперек пикноклина

С позиций задачи измерения характеристик внутренних волн представляет интерес изменчивость значений напряженности электрического поля в зависимости от перемещений границы раздела. На рис. 4.20 приведены данные расчета условной "чувствительности"

$$K_z = \frac{d|E_z|}{dH}$$

на различных расстояниях от исходного положения границы раздела ($z = 0; 2; 4$ м) при различных частотах. Конструктивные параметры системы и проводимости слоев те же, что и ранее.

Здесь "чувствительность" K_z резко падает с увеличением частоты, в отличие от чувствительности к изменениям проводимости. Величина K_z также уменьшается с увеличением расстояния от границы раздела.

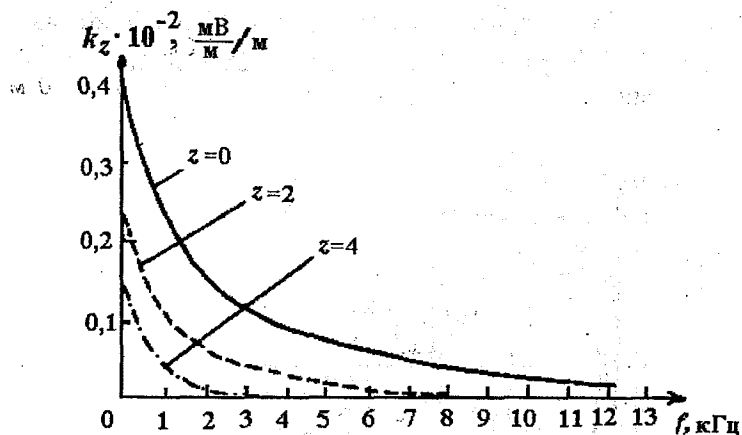


Рис. 4.20. Зависимость чувствительности преобразования от частоты при различных расстояниях от исходного положения границы раздела

Все рассмотренные особенности электрического поля, формирующегося между двумя электродами, позволяют задать оптимальные параметры конструкции преобразователя внутренних волн. Наиболее целесообразно проводить измерения электрического поля по линии АВ (рис. 4.21, а), располагая измерительные электроды С и D по обе стороны от исходного положения границы раздела ($z = 0$). При этом расстояние CD должно превышать максимально возможный размах колебаний внутренних волн. Но одновременно в пределах этого расстояния формируемое токоподающими электродами АВ электрическое поле необходимо задать максимально одно-

родным и максимально чувствительным к изменениям средней проводимости воды в слое CD. Это можно обеспечить повышением частоты источника питающего напряжения, однако, не чрезмерным, чтобы измеряемые значения разности потенциалов между С и D не оказались ниже уровня шумов измерительного устройства И. Целесообразен выбор значения частоты в пределах 0,5 ... 4 кГц.

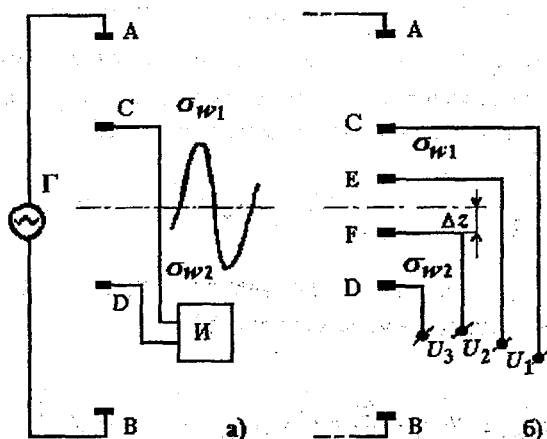


Рис. 4.21. Схемы включения и использования многоэлектродных преобразователей характеристик внутренних волн

При однородности поля в пределах CD для невозмущенной границы раздела, проходящей посередине между С и D, можно записать выражение для измеряемой разности потенциалов

$$U = \frac{j\gamma_1 l}{2} + \frac{j\gamma_2 l}{2} = jl\bar{\gamma}_0, \quad (4.30)$$

где $\gamma_1 = (\sigma_{w1})^{-1}$; $\gamma_2 = (\sigma_{w2})^{-1}$ – удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев; l – расстояние между электродами С и D; $\bar{\gamma}_0 = \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)$ – среднее удельное сопротивление; j – плотность тока на участке между С и D.

При смещении границы раздела, например, вверх на величину Δz , причем $\Delta z \leq l/2$, получим

$$U = j \left(\frac{l}{2} + \Delta z \right) \gamma_2 + j \left(\frac{l}{2} - \Delta z \right) \gamma_1 = j \left[l \gamma_1 + \left(\frac{l}{2} + \Delta z \right) \Delta \gamma \right], \quad (4.31)$$

где $\Delta \gamma = \gamma_1 + \gamma_2$.

Таким образом, напряжение U оказывается зависящим от Δz . Собственно, напряжение U , пропорциональное напряженности электрического поля ($U = E_z l$), как это рассматривалось ранее, зависит от изменений $\bar{\gamma}_0$, а уже через эти изменения зависит от Δz . Действительно, для смещенного положения границы раздела среднее значение удельного сопротивления на участке CD

$$\bar{\gamma}_{\Delta z} = \frac{1}{l} \left[\gamma_1 \left(\frac{l}{2} - \Delta z \right) + \gamma_2 \left(\frac{l}{2} + \Delta z \right) \right] = \bar{\gamma}_0 + \frac{\Delta z}{l} (\gamma_2 - \gamma_1). \quad (4.32)$$

При этом выражение для U , полученное через $\bar{\gamma}_{\Delta z}$, будет совпадать с вышеприведенным выражением (4.31):

$$U = j l \bar{\gamma}_{\Delta z} = j l \left[\bar{\gamma}_0 + \frac{\Delta z}{l} \Delta \gamma \right] = j \left[l \gamma_1 + \left(\frac{l}{2} + \Delta z \right) \Delta \gamma \right]. \quad (4.33)$$

Как следует из выражений (4.31) и (4.33), пропорциональность U и Δz определяется не только через известные и постоянные величины (j , l), но и через γ_1 и γ_2 , которые изменчивы и изначально обычно неизвестны, т.е., как и в других рассматривавшихся методах, здесь по-прежнему возникает задача масштабирования результатов регистрации внутренних волн.

При использовании 4-электродной конструкции типа ACDB (см. рис. 4.21, а) возможны изначальные (либо даже в процессе наблюдений) определения γ_1 и γ_2 . Для этого необходимо выполнить измерения величины U в ситуациях, когда зона CD полностью занята водой верхнего слоя (γ_1) и, во-вторых, водой нижнего слоя (γ_2). Напряжения на электродах CD, регистрируемые в этих ситуациях, будут определяться выражениями:

$$\begin{aligned} U_1 &= jI\gamma_1, \\ U_2 &= jI\gamma_2 \end{aligned} \quad (4.34)$$

при прежнем условии постоянства плотности тока в зоне CD.

Используя выражение (4.34) совместно с (4.31), легко получить

$$\Delta z = \frac{I[2U - (U_1 + U_2)]}{2(U_2 - U_1)}. \quad (4.35)$$

Таким образом, при постоянстве γ_1 и γ_2 , откуда следует постоянство U_1 и U_2 , вариации напряжения U оказываются линейно связанными с перемещениями Δz границы раздела.

Обеспечение ситуаций, требуемых для получения U_1 и U_2 , при проведении управляемого натурного эксперимента возможно путем механических перемещений линии ACDB по вертикали: вверх – до устойчивого прекращения изменчивости регистрируемого напряжения и, соответственно, вниз – до аналогичной ситуации.

Конструктивно более удобны для этих целей шестиэлектродные преобразователи вида ACEFDB (рис. 4.21, б). Здесь основными измерительными электродами являются Е и F расстояние между ними должно превышать максимальный размах колебаний внутренних волн. Пары электродов СЕ и FD являются дополнительными, при выполнении предыдущего условия они всегда располагаются в стороне от границы раздела и, тем самым, позволяют непрерывно измерять напряжения U_1 и U_2 .

Поскольку для этой конструкции однородность создаваемого электрического поля и постоянство плотности тока должны по-прежнему обеспечиваться для участка CD, то получается, что с ее помощью при прежних размерах базы АВ можно измерять характеристики внутренних волн с существенно меньшей амплитудой, чем при использовании 4-электродной конструкции.

Однако при этом не следует забывать, что примененные в обоих вариантах приемы масштабирования результатов измерений предназначены для условий, когда достаточно резко выражена именно *граница* раздела. Если наблюдения ведутся за внутренними волнами в *слое* пикноклина, то эти приемы не всегда эффективны.

Следует также иметь в виду, что при уменьшении частоты питающего напряжения на значения напряжений U_1 и U_2 в соответ-

вии с данными рис. 4.20 начинает влиять расположение границы раздела по отношению к электродам и ее перемещение.

Рассмотрим особенности наблюдений при наличии *слоя* пикноклина.

Довольно распространенной является ситуация, когда слой пикноклина характеризуется высокими градиентами проводимости, но слои выше и ниже пикноклина можно считать практически безградиентными. В такой ситуации при длине [CD] либо [EF], превышающей толщину пикноклина и "размах" внутренних волн, рассмотренные выше приемы будут столь же эффективными, как и в случае границы раздела. Однако очевидно, что максимальный "размах" волн, который будет регистрироваться без искажений, здесь уменьшается не менее, чем на толщину слоя.

Если слои выше и ниже слоя пикноклина являются градиентными либо "переслоенными", то, к сожалению, качество масштабирования через измерение напряжений U_1 и U_2 , оказывается весьма низким. Здесь, как и при применении термоинтегральных преобразователей (см. п.4.1), становится необходимым измерение текущих интегральных значений $\gamma_1^{\text{инт}}$ и $\gamma_2^{\text{инт}}$, что не обеспечивается конструкциями, показанными на рис. 4.21.

Самостоятельный интерес представляет методика измерений в слое пикноклина, когда амплитуды внутренних волн меньше, чем толщина слоя. В этом случае измерения возможны с помощью конструкции ACDB, причем, длина [CD] задается меньшей толщины слоя пикноклина. Необязательно также, чтобы эта длина превышала амплитуду регистрируемых волн, т.е. могут использоваться преобразователи вида ACDB весьма малых размеров. Для интерпретации результатов измерений здесь необходима информация о значении градиента проводимости в слое, а также о том, с какой степенью приближения можно считать этот градиент постоянным. Используя значение постоянного градиента $\Delta\sigma_w/\Delta z$ или $\Delta\gamma/\Delta z$ несложно перевести измеренные вариации напряжения $U = jI\bar{\gamma}_{CD}$, где $\bar{\gamma}_{CD}$ — среднее удельное сопротивление слоя CD, в вариации Δz положения пикноклина.

Задача определения градиента решается либо нормированными перемещениями линии ACDB вверх-вниз в условиях управляемого

эксперимента, либо, как и ранее, использованием многоэлектродного преобразователя.

Несомненно, что при измерениях малых амплитуд внутренних волн чрезвычайно важной становится задача стабилизации измерительного преобразователя в пространстве. При невозможности обеспечить стабилизацию, например при измерениях с дрейфующего судна, необходим дополнительный контроль вертикальных перемещений преобразователя.

Трудности масштабирования при сложных профилях проводимости в пикноклине и соседних с ним слоях, а также стремление максимально сузить измерительную область привело к разработке дискретно-интегральных преобразователей.

Дискретно-интегральный преобразователь внутренних волн содержит распределенный по вертикали через фиксированные расстояния Δz (рис. 4.22) набор локальных преобразователей электрической проводимости 1. Середина этого набора примерно совмещена со средним положением пикноклина 2, образованного, например, в результате скачка на профиле солёности $S(z)$. Все локальные преобразователи набора соединены между собой, в наиболее простом случае — последовательно. Набор закреплён на базовом тросе 3 буйковой станции, содержащей притопленный буй 4 и якорь 5.

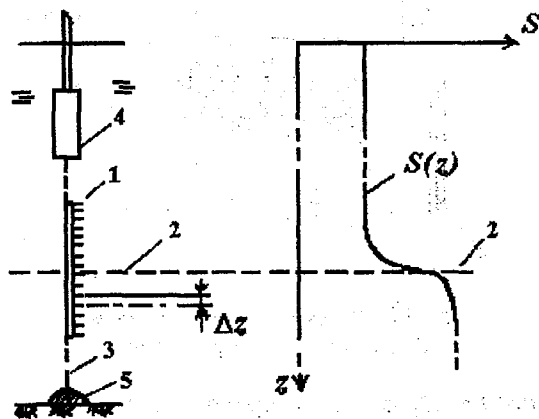


Рис. 4.22. Дискретно-интегральный преобразователь характеристик внутренних волн

В качестве локальных преобразователей могут быть использованы как кондуктивные, так и индуктивные ИП. Но и те и другие — с некоторыми специфическими особенностями. Из всего разнообразия конструкций кондуктивных преобразователей, описанных, например, в работе [40], по-видимому, наиболее целесообразны 3- и 7-электродные. Это обусловлено тем, что в данных конструкциях внешние электроды, например 1 и 2 (рис. 4.23), замкнуты накоротко, тем самым, результат преобразования не зависит от характеристик среды вне преобразователя. Подлежит измерению проводимость двух "включенных параллельно" участков между центральным электродом 3 и внешними электродами. Все электроды жестко закреплены внутри диэлектрической трубки 4, сквозь которую свободно проходит окружающая вода.

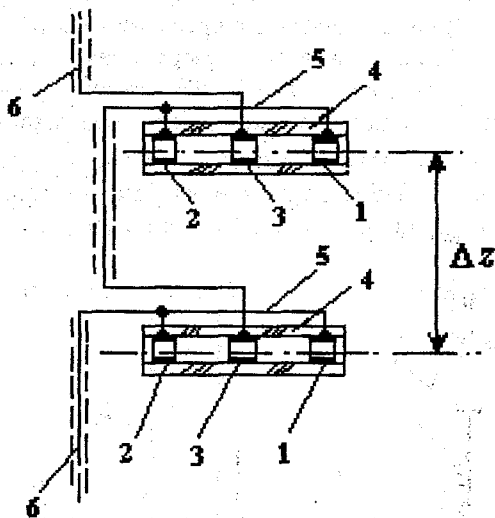


Рис. 4.23. Трехэлектродные локальные кондуктивные преобразователи

Локальные преобразователи проводами 5 и 6 последовательно соединены друг с другом и такой "суммарный" преобразователь, собственно, уже является преобразователем характеристик внутренних волн.

Высказанное выше замечание относительно наибольшей целесообразности 3- либо 7-электродных конструкций не исключает применения иных вариантов, в том числе наиболее простых, состоящих из двух электродов, расположенных по вертикали (рис. 4.24). Здесь важно, чтобы расстояние l_i между этими электродами было существенно меньше расстояния Δz — это обеспечивает "локализацию" измерительной области. Кроме того, соединение пар электродов между собой целесообразно выполнить таким образом, чтобы смежные через промежуток Δz электроды были замкнуты накоротко. В этом случае среда в пределах каждого Δz получается практически эквипотенциальной (заштриховано), а межэлектродные токи сосредотачиваются на участках l_i .

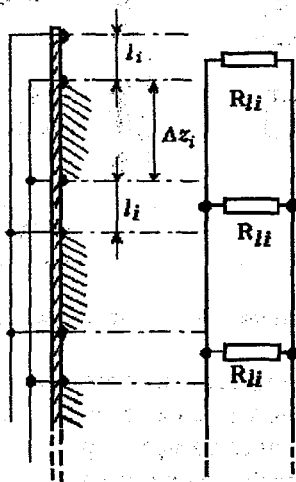


Рис. 4.24. Двухэлектродные преобразователи с локализацией измерительной области

В такой конструкции сопротивления элементарных участков R_{ii} получаются подключенными параллельно друг другу и результирующее сопротивление в хорошо проводящей воде может оказаться слишком малым, чтобы обеспечить надежную регистрацию с

достаточной чувствительностью. Это существенно ограничивает возможности преобразователя.

Для повышения "локальности" с одновременным увеличением элементарных сопротивлений R_i целесообразно использовать повышенные частоты пропускаемого через электроды тока. Как, например, наглядно видно на рис. 4.17, формирующееся при этом в воде электрическое поле преимущественно сосредотачивается вблизи электродов. Для этих же целей также полезно уменьшать размеры электродов.

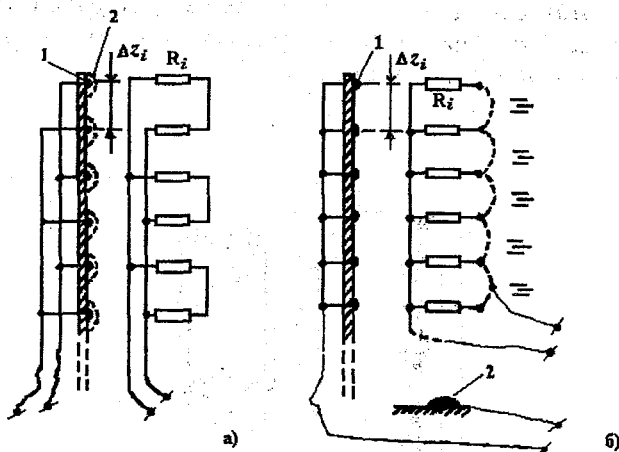


Рис. 4.25. Схемы измерительных линий с набором локальных электродов

Эффект приэлектродного сосредоточения поля может быть использован в конструкциях с условно "одноэлектродными" локальными преобразователями проводимости (рис. 4.25). В варианте на рис. 4.25, а электроды 1 разнесены на расстояние Δz_i и соединены "через один", образуя два набора, смещенных относительно друг друга на Δz_i . При этом частота пропускаемого тока, размеры электродов и расстояние Δz_i выбраны такими, чтобы зоны 2 сосредоточения поля возле каждого электрода были существенно меньше Δz_i . В варианте на рис. 4.25, б все электроды 1 измерительной линии соединены друг с другом. Их размеры и расстояния Δz_i заданы из тех

соображений, что и в предыдущем варианте. Второй же питающий провод подсоединен к электроду большой площади 2, который может размещаться на удалении от линии электродов 1; например, вблизи берега, как в конструкциях известных волнографов ГМ-61 [40].

В обоих вариантах, как наглядно видно из схем соединения, все элементарные сопротивления R_i (сопротивления "заводнения" электродов) получаютя подключенными параллельно друг другу, что может при неудачном выборе параметров преобразователя привести к слишком малым значениям результирующего сопротивления.

Для оценок сопротивления "заводнения" R_i можно воспользоваться следующими формулами, приведенными, например, в работе [47].

Для электрода в форме шара радиусом a :

$$R_i = \frac{1}{4\pi\sigma_w a}, \quad (4.36)$$

а для электрода в виде стержня радиусом a и длиной b ($b \gg a$):

$$R_i = \frac{1}{4\pi\sigma_w a} \ln \frac{b}{a}, \quad (4.37)$$

где σ_w — удельная электрическая проводимость воды.

Кроме кондуктивных, в качестве локальных преобразователей проводимости в дискретно-распределенных измерителях внутренних волн с успехом могут быть использованы стандартные индуктивные преобразователи на основе тороидальных магнитопроводов 1 и 2 с обмотками 3 и 4 (рис. 4.26).

Здесь магнитопроводы, как обычно (например [40]), закреплены соосно и вместе с обмотками герметизированы. Электромагнитная связь между ними обеспечивается посредством "витка" воды 5, одновременно охватывающего оба магнитопровода и имеющего сопротивление R_w . Величина R_w зависит от геометрических характеристик магнитопроводов и от проводимости воды σ_w [40].

Возбуждающие обмотки 3 всех магнитопроводов соединены параллельно и подключены к источнику переменного тока 6. Измерительные же обмотки 4 включены последовательно. Суммарный сигнал, снимаемый с них, поступает на регистратор 7, например в виде аналогового самописца.

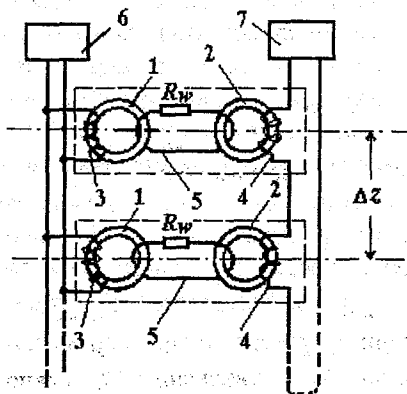


Рис. 4.26. Измерительная линия с дискретными индуктивными преобразователями

При регистрации сигналов с помощью самописца запись сравнительно "гладкого" профиля внутренней волны 1 (рис. 4.27) выглядит ступенчатой в виде 2, что, однако, не является в данном случае недостатком, поскольку "высота" ступенек однозначно соответствует расстоянию Δz , и это позволяет определить амплитудные характеристики регистрируемых волн.

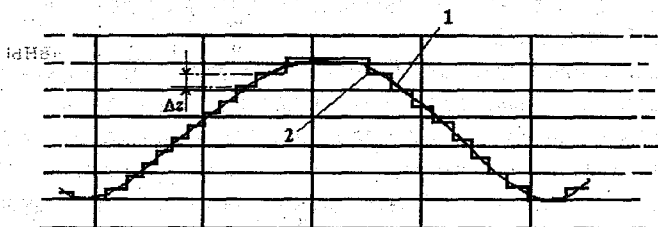


Рис. 4.27. Характер сигнала у дискретно-интегрального преобразователя

В работе [43] описан оригинальный вариант интегрального преобразователя, который затруднительно отнести к какому-либо из выше рассмотренных типов. Преобразователь не имеет гальванических контактов с морской водой и основан на измерении коэффици-

ента затухания электромагнитного поля, прошедшего через слой воды. Конструктивно этот преобразователь выполнен в виде двухпроводной симметричной радиоперемы длиной 20 м. Оба проводника линии изолированы. В качестве экрана использован стальной неизолированный трос, который одновременно служит для подвешивания плавучего якоря. Один из проводников линии подсоединен к генератору звуковой частоты и может рассматриваться как излучающая антенна. Второй проводник является приемной антенной и через усилитель и ряд промежуточных преобразователей связан с регистрирующим устройством. Расстояние между излучающей и приемной антеннами, а также между ними и экраном задано в 5–7 мм.

Измеряемый с помощью преобразователя коэффициент затухания электромагнитного поля однозначно связан с интегральным (вдоль линии) значением удельной электрической проводимости. По данным работы [43] измерения могут выполняться в диапазоне 1,5–6,5 См/м. Преобразователь показал себя весьма эффективным при регистрации внутренних волн в изотермических слоях моря.

Глава 5. ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

5.1. Акустические методы

Для дистанционной регистрации внутренних волн с заякоренных либо дрейфующих плавсредств можно с высокой эффективностью применять акустические методы. В их основу положены закономерности распространения акустических импульсов в вертикальном направлении. В частности, известно, что при использовании эхолотов для регистрации глубин моря на ленте самописца может регистрироваться устойчивый сигнал, отраженный от некоторой зоны в области пикноклина и не повторяющий профиль дна, т. е. не являющийся “ложным дном” (вторичным либо третичным отражением). Пример такой записи показан на рис. 5.1. Эту отражающую зону называют звукорассеивающим слоем (ЗРС). При движении плавсредства, например, по сетке разрезов, это позволяет производить картирование топографии пикноклина по акватории, выявлять “дырки” в пикноклине, зоны апвеллинга и другие особенности. В условиях же стоянки плавсредства при непрерывной регистрации на ленте самописца фиксируется профиль вариаций положения пикноклина.



Рис. 5.1. Фрагмент записи положения пикноклина при эхолотировании

Несомненно, что при измерениях глубины сигнал, отражающийся от ЗРС, является помехой. В связи с этим во многих конструкциях стандартных навигационных эхолотов применены специальные приемы фильтрации помех, и ЗРС на записях обычно не проявляется.

По-видимому, наиболее целесообразным при наблюдениях внутренних волн является применение рыбопоисковых эхолотов, которые специально предназначены для выявления неоднородностей (скоплений рыб) в толще воды и подобная фильтрация помех в них отсутствует.

С зоной пикноклина в море, как известно (например [44]), чаще всего связан слой повышенной концентрации планктона и взвеси. Собственно, он и является ЗРС. По своим акустическим свойствам этот слой – более сильный отражатель, чем непосредственно пикноклин. При наблюдениях в таких условиях преимущественно регистрируются сигналы, отраженные от ЗРС, хотя иногда можно выявить также и сигналы, отраженные от верхней границы пикноклина.

Поскольку элементы слоя взвешены в воде и как бы представляют собой поплавки нулевой плавучести, то ЗРС при прохождении внутренних волн, как правило, отслеживает эти колебания; а получаемая на эхограмме запись отображает характеристики проходящих волн (рис. 5.2).



Рис.5.2. Фрагмент записи вариаций ЗРС (из работы [8])

Планктон и взвесь, создающие ЗРС, может концентрироваться как под пикноклином, так и непосредственно внутри пикноклина. При наблюдениях за внутренними волнами принципиального значения это обычно не имеет, за исключением задач, где нужны не только частотные, но и корректные амплитудные характеристики.

На рис. 5.2 дополнительно показан полученный одновременно с эхограммой профиль вертикального распределения температуры

1. Внутри термоклина выявляется несколько отражающих слоев. В работе [8] не конкретизируются виды этих слоев, хотя делается ряд предположений, в частности о том, что в ЗРС более значимы не планктонные рассеиватели, а взвеси. Возможность отражения непосредственно от скачка плотности не рассматривается, хотя запись 2 явно "привязана" к резкому излому профиля. Наиболее выраженная запись 3 явно связана с ЗРС традиционного типа (планктон плюс взвеси).

При определении характеристик внутренних волн посредством регистрации вариаций ЗРС важное значение приобретает то, что планктон способен к самостоятельным вертикальным миграциям, например под влиянием изменений освещенности. В такой ситуации зарегистрированные колебания ЗРС могут отображать одновременно оба процесса, что необходимо учитывать при интерпретации результатов.

Один из простейших приемов разделения собственных движений ЗРС и внутренних волн состоит в следующем. Собственные вертикальные миграции ЗРС являются весьма инерционным процессом, а характерная для них периодичность — полусуточная (утренние и вечерние миграции). В связи с этим данные о колебаниях ЗРС со значительно меньшими периодами можно считать относящимися к внутренним волнам.

Вопрос соответствия колебаний ЗРС и внутренних волн исследовался в ряде работ (например [5, 8, 26, 28]). В частности, в работе [5] описаны результаты одновременной регистрации этих явлений, причем регистрация внутренних волн осуществлялась локальными (т.е. не интегральными) измерителями температуры на различных горизонтах в толще воды. Установлено, что чем ближе этот горизонт к глубине расположения ЗРС, тем лучше соответствие регистрируемых колебаний. Пример такого соответствия, заимствованный из работы [5] показан на рис. 5.3.

Коэффициенты взаимной корреляции колебаний ЗРС и внутренних волн на горизонтах, близких к ЗРС, находятся в пределах 0,6 ... 0,8 [5].

Таким образом, акустические методы можно считать достаточно корректными, особенно для задач, где требуется в первую очередь простота и оперативность получения данных, а уже во вторую очередь — их качество.

При предположении о возможности собственных миграций ЗРС в период наблюдений целесообразно периодически осуществ-

лять контроль вертикальной структуры слоя, включающего ЗРС, путем зондирования с помощью СТД-зонда либо батитермографа.

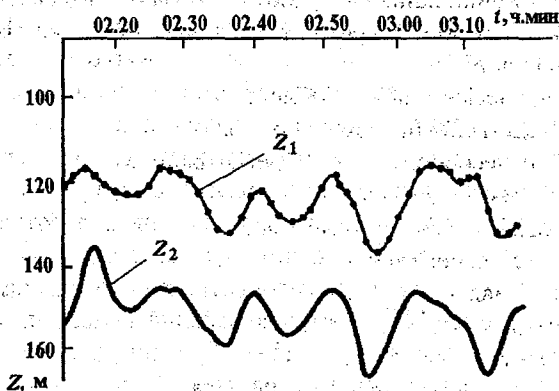


Рис. 5.3. Фрагмент синхронной регистрации колебаний положения фиксированной изотермы (z_1) и ЗРС (z_2) (из работы [5])

При применении стандартных эхолотов для проведения наблюдений результаты можно улучшить, если внести конструктивные изменения в приемный тракт прибора. В частности, весьма целесообразно повысить усиление. Конечно, не чрезмерно, чтобы не “замусорить” запись. Целесообразно исключить “гашение нуля”. Возможно также применение специальных схем обработки сигналов.

Определенные возможности повышения качества информации существуют за счет подбора частоты излучаемых колебаний. Дело в том, что планктон и взвеси, создающие ЗРС, имеют различные размеры. Соответственно и резонансное рассеяние получается разным для этих составляющих, и выбором частоты можно “настроиться” на регистрацию небιологических ЗРС.

Несомненно, что регистрация небιологических ЗРС для задач определения характеристик внутренних волн наиболее интересна, поскольку собственные вертикальные миграции таким ЗРС не свойственны, тем самым их перемещения по глубине однозначно можно считать соответствующими колебаниям положения пикноклина.

Кроме взвесей, по мнению, высказанному в работах [22, 26], важное значение имеют тонко- и микроструктурные неоднородности внутри слоя пикноклина, которые также “привязаны” к пикноклину.

По оценкам, сделанным в работе [22], на частоте 25 кГц эти неоднородности вносят определяющий вклад в суммарный сигнал, рассеиваемый в области пикноклина. В работе [26] рассматривается специальная методика обработки регистрируемых сигналов. Измерения выполнялись на частоте 25,5 кГц. Отмечается, что сигналы, отражаемые от небиологических рассеивателей, имеют весьма размытые границы и непосредственный анализ эхограмм оказывается затруднительным. Здесь целесообразно вести регистрацию в цифровом виде и определять не только расстояние до рассеивателей, но и интенсивность отраженных сигналов. В дальнейшем при обработке производится высококачественная фильтрация данных с помощью фильтров НЧ и выделяются максимумы амплитуд отраженных сигналов.

По данным работы [26] спектры колебаний таких максимумов по глубине с погрешностью не хуже 15–20 % совпадают со спектрами, рассчитанными по данным прямых измерений внутренних волн, выполненных с помощью интегральных термопреобразователей.

В заключение следует отметить очень весомое достоинство акустических методов по сравнению с другими. Только с их помощью удастся наглядно зарегистрировать спорные до настоящего времени процессы *расслоения* пикноклина, например при прохождении двух систем волн от различных источников.

5.2. Оптические и радиолокационные методы

В этом выделенном классе методов можно определять лишь весьма ограниченное число характеристик внутренних волн. Обычно определяют длину волны, хотя потенциально методы позволяют выявлять также период, скорость и направление распространения. Практически нереально, во всяком случае, с достаточной корректностью, определять амплитуду волн. Общий принцип, положенный в основу выделенных методов, – определение характеристик волн по их проявлениям (“следам”, “сликам”) на поверхности моря. Эти проявления обусловлены преимущественно воздействием течений, вызываемых внутренними волнами, на характеристики поверхностного волнения в высокочастотной области, т.е. в основном на рябь и гравитационно-капиллярные волны.

В оптическом диапазоне считается возможным наблюдать следы от внутренних волн визуально как в штилевых условиях, так и

при ветре вплоть до значений скорости 3–4 м/с. Инструментальные измерения возможны с помощью спектрофотометров. В работе [23] описаны результаты подобных измерений в натурных условиях (Ладожское озеро). Эксперименты выполнялись с борта судна в нади́р в области длин волн 300–700 нм. Одновременно производилась спектрозональная аэрофотосъемка в трех спектральных интервалах: 450–460, 490–510 и 560–580 нм. Контроль внутренних волн осуществлялся по данным измерений температуры и прозрачности на фиксированном приповерхностном горизонте.

Анализ полученных данных (рис. 5.4) подтвердил высокую степень корреляции следов на поверхности с внутренними волнами в пикноклине, располагавшемся на глубинах 12–16 м. Наиболее чувствительным диапазоном оказался 490–510 нм [23].

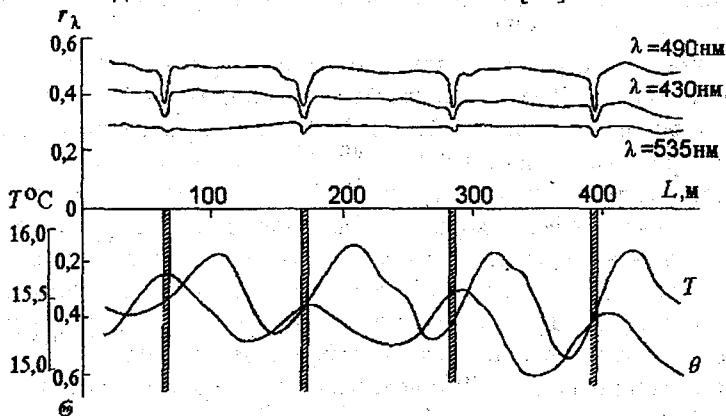


Рис. 5.4. Пример выявления внутренних волн путем регистрации коэффициента спектральной яркости морской поверхности (из работы [23]), здесь r_λ – распределение коэффициента спектральной яркости по направлению движения L в различных спектральных диапазонах; T – вариации температуры воды на горизонте 5 м; θ – вариации прозрачности на горизонте 5 м

Рассматривая эти данные “со стороны”, можно отметить, что в характеристиках спектральной яркости “собственно волны” не регистрируются, выявляются лишь некоторые “отметки-следы”, формирующиеся один раз за период в области максимального уклона реальных волн. Это действительно позволяет определять их период,

длину и характеристики распространения, но не дает никакой информации о спектральном составе и амплитудных характеристиках.

Оптические методы могут применяться не только с борта судна, но также с авиасредств и с космических аппаратов (например [13, 16]).

Локация морской поверхности в СВЧ-диапазоне позволяет выделять участки "следов" по изменениям характеристик рассеянного в обратном направлении радиолокационного сигнала. Само по себе рассеяние связано с возмущениями поверхности воды в гравитационно-капиллярной области (например [7]). Интенсивность рассеянного сигнала пропорциональна спектральной плотности этих возмущений ("ряби") при длине волны, равной половине длины электромагнитной волны (например [9]). Проявления внутренних волн в этих возмущениях ("следы") связаны с изменениями спектральной плотности.

Однако спектральная плотность ряби в первую очередь зависит не от внутренних волн, а все же от характеристик ветра — среднего значения скорости и ее пульсаций. Зависимость интенсивности изучаемых радиолокационных (РЛ) отражений от средних значений скорости ветра считается монотонной, причем интенсивность возрастает с увеличением скорости. Несомненно, что постоянство скорости ветра в морских условиях не может выдерживаться. При пульсациях характерное время перестройки ряби оценивается десятками секунд. Эффекты от пульсаций ветра в регистрируемых данных проявляются аналогично эффектам от внутренних волн, причем их проявления, как показывают натурные эксперименты, могут быть существенно сильнее.

Один из наиболее эффективных приемов разделения эффектов состоит в определении скорости перемещений характерных РЛ отражений (контрастов). В случае регистрации внутренних волн скорость перемещения контрастов соответствует фазовой скорости волн и примерно составляет $10-10^2$ см/с, при пульсациях ветра она равна средней скорости ветра ($10-10^3$ см/с).

В более общем случае целесообразно получение пространственно-временных спектров сигналов РЛ отражений. Здесь возможно разделение эффектов за счет различий дисперсионных свойств и направлений распространения (например [10]). Дальнейшее развитие РЛ методов представляется весьма перспективным.

Глава 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН МЕТОДАМИ СКАНИРОВАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРЯ

6.1. Сканирование с помощью локальных измерительных средств

Для определений характеристик внутренних волн традиционно используется периодическое зондирование верхнего слоя моря с дрейфующего либо заякоренного судна. При этом получают вертикальные профили основных гидрофизических характеристик и выделяют временную изменчивость в слое, охваченном внутренними волнами. Несомненно, что этот способ привлекает своей методической простотой, поскольку зонды имеются, как правило, на любом современном исследовательском судне. Однако его нельзя считать универсальным. Ограничения связаны с вынужденной дискретизацией наблюдений по времени, а также с невозможностью превысить при зондировании скорость свободного падения зонда в воде, причем в режиме свободного падения работы обычно не ведутся из-за опасности перекручивания несущего троса (кабель-троса). Реально задаваемая скорость зондирования, как правило, составляет 1–1,5 м/с. При зондировании слоя 0–200 м со скоростью 1 м/с (вниз-вверх) минимальное требуемое время, очевидно, составит примерно 6,5 мин, которое, собственно, и определяет в этом случае минимально возможную дискретность.

При наличии короткопериодных внутренних волн отмеченное ограничение, во-первых, свидетельствует о невозможности их выявления, а во-вторых, чревато проявлением известного эффекта "иллюзии дискретизации", когда энергия невыявляемых короткопериодных колебаний "перебрасывается" в низкочастотную часть спектра, либо искажая регистрируемые в этой части реально имеющиеся колебания, либо формируя участок с ложными колебаниями. Эффект "иллюзии дискретизации" достаточно подробно рассматривается в литературе (например [4, 40]). При типичном исследовании "вслепую", т.е. когда параметры изучаемых процессов надо не уточнять, а именно – выявлять, подобный эффект может сказаться на результатах исследований крайне негативно.

Несомненно, что при отсутствии задач изучения полных вертикальных профилей гидрофизических характеристик зонды могут использоваться в упрощенном варианте, когда производится их перемещение вверх-вниз лишь в пределах некоторого слоя, включающего пикноклин. В этом случае требуемые затраты времени значительно ниже, и исследуемый частотный диапазон колебаний может быть существенно смещен в короткопериодную область спектра.

Следует отметить еще одну важную особенность зондирования, которую при анализе вертикального распределения гидрофизических характеристик чаще всего не принимают во внимание, — воздействие качки судна на получаемые результаты. Это воздействие проявляется через периодические вертикальные перемещения точки подвеса зонда вследствие качки. При исследовании внутренних волн с периодами, намного превышающими период качки, казалось бы, это воздействие несущественно. Однако все значительно сложнее, поскольку отмеченные перемещения полностью эквивалентны хоть и ложным, но внутренним волнам с периодами качки. При этом отмеченный выше эффект "иллюзии дискретизации", как и в случае реальных короткопериодных внутренних волн, обеспечивает перенос их энергии в спектре в область больших периодов.

В силу ряда специфических преимуществ представляется значительно более интересным по сравнению с рассмотренным вариантом зондирования метод исследования, при котором производится сканирование некоторого слоя воды за счет использования специальных носителей измерительных средств, обеспечивающих требуемые по условиям эксперимента перемещения вверх-вниз в пределах изучаемого слоя. Подобные сканирующие методы с достаточной полнотой рассмотрены в монографии [4]. Там же рассмотрено их применение для исследования внутренних волн, а также даны примеры такого применения.

Сканирование требуемого слоя воды с помощью таких носителей может производиться лишь в буксируемом режиме. Для обеспечения возможности перемещений по вертикали буксируемые носители (БН) снабжены управляемым горизонтальным рулем. Известны разработки БН типа "Нырок", "Галс", "Галс-2", "Кальмар" и др. с различными техническими характеристиками. Возможная скорость

буксировки – до 12 узлов ("Нырок-2" – 16 узлов). Расчетная глубина погружения – до 500 м ("Кальмар"), 1000 м ("Галс"), 1500 м ("Нырок-2"). Диапазон сканируемых глубин у БН зависит от скорости буксировки: с увеличением скорости диапазон уменьшается. Увеличенным диапазоном характеризуются: "Галс-2" (50–250 м при скорости 6 узлов) и "Кальмар" (200 м при скорости 6 узлов).

Режим сканирования (скорость судна, диапазон сканируемых глубин) устанавливают, исходя из решаемых задач исследования в требуемом пространственно-временном окне.

При несомненном удобстве сканирования с помощью БН не следует пренебрегать некоторыми специфическими особенностями поведения БН на глубине в режиме буксировки. Достаточно высокая стабильность положения БН по глубине обеспечивается лишь при постоянных отрицательных углах атаки. При максимальных значениях установленных углов амплитуда колебаний по глубине не превышает 1–2 м. Однако выявлено, что при нулевом значении угла атаки БН совершает колебательные движения относительно установившегося горизонта с амплитудой около 5–10 м и периодом около 1–2 мин.

Характеристики колебательных перемещений БН зависят не только от угла атаки, но и от ряда других параметров режима буксировки. Отмечается [4], что при скорости 10 узлов регистрировались колебания с амплитудой до 20 м и периодом около 30 с. Тем самым, при исследовании внутренних волн выбор режима сканирования оказывается одной из первоочередных задач.

Влиять на получаемую информацию, к сожалению, могут не только рассмотренные факторы. Установлено, что БН в переходном режиме, т.е. при изменении глубины, а именно это требуется при исследовании внутренних волн, в значительной мере теряют устойчивость и совершают колебательные движения с различными амплитудами и периодами. На рис. 6.1 приведен пример таких движений, заимствованный из работы [4].

Очевидно, что сами по себе колебательные движения носителя при непрерывной регистрации гидрофизических характеристик значительной опасности могут и не представлять, но лишь только в случае надежной и высокоточной регистрации глубины. При этом гидрофизические данные могут быть привязаны к конкретным глу-

бинам, и любые колебательные движения носителя становятся эквивалентными сканированию, хоть и неуправляемому. Естественно, здесь должны учитываться методические особенности использования конкретных измерительных средств, в частности смещение во времени отсчетов по различным каналам, например несинхронность отсчетов по каналам температуры и давления – эти особенности получаются очень важными при сравнимости отмеченных смещений и периодов колебательных движений носителя.

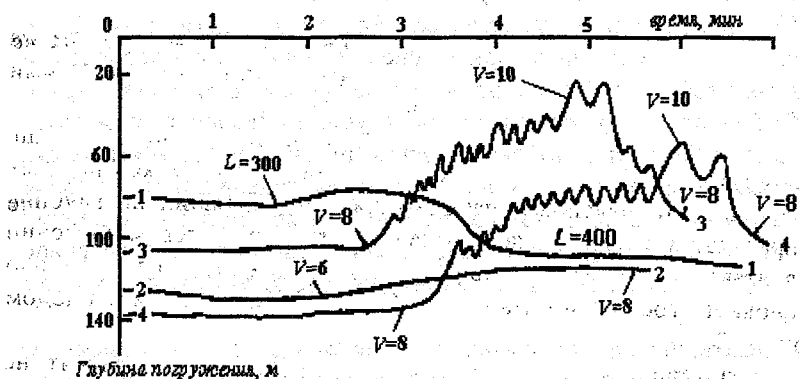


Рис. 6.1. Вариации положения буксируемых носителей в переходных режимах (из работы [4])

Отмеченная особенность в неявном виде подчеркивает дополнительные преимущества метода сканирования слоя перед методом периодического зондирования, ведь абсолютная погрешность определяется не только классом используемого измерительного преобразователя, но и предельным значением диапазона, которое у зондов обычно существенно больше, чем в сканирующих устройствах. Соответственно, у зондов при прочих равных условиях оказывается большей абсолютная погрешность.

6.2. Методы интегрального сканирования термоклина

По сравнению с методами сканирования локальными измерительными средствами для определения характеристик внутренних волн зачастую более удобными оказываются методы интегрального сканирования термоклина. Эти удобства преимущественно обу-

словлены тем, что в интегральных методах подлежит регистрации не распределение температуры по вертикали, а непосредственно глубина расположения термоклина. Во-вторых, применяемые здесь измерительные средства конструктивно значительно проще.

Интегральные методы обычно реализуются в буксируемом режиме. В качестве интегрального термопреобразователя используется обычный морской кабель (кабель-трос), из жил которого две соединены вместе на нижнем конце [40]. При измерениях кабель буксируется за судном (рис. 6.2), причем заглубление нижнего конца осуществляется либо за счет обтекаемого груза (а) при достаточно большой длине кабеля, либо путем использования гидродинамического заглубителя (б).

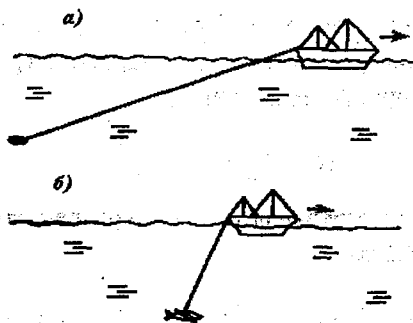


Рис. 6.2. Схемы буксирования интегральных преобразователей

Для варианта а) заглубление в 200 м при скорости судна 15–18 узлов обеспечивается при длине кабеля примерно 3000 м. При этом вариации глубины расположения нижнего конца не превышают $\pm 0,7$ м. Эти вариации очень важны для рассматриваемых методов. Их можно существенно уменьшить, если проводить работы при пониженной скорости судна.

При использовании гидродинамических заглубителей (рис. 6.2, б) вариации нижнего конца зависят от свойств заглубителя и скорости судна. Оценки вариаций для управляемых заглубителей типа БН приводятся в п. 6.1.

Поскольку заглубление интегрального термопреобразователя обычно превышает глубину расположения термоклина z_T , то необ-

ходимы некоторые дополнительные приемы, позволяющие выявлять эту глубину.

В буксируемом комплексе "Шлейф" [33] интегральный ИП дополнительно снабжен преобразователями локальной температуры на его верхнем (0–1 м) и нижнем ($> z_T$) концах, а также преобразователем гидростатического давления на нижнем конце. Это позволяет на основании теоретических представлений о распределении $T(z)$ выше и ниже z_T восстанавливать полный вертикальный профиль температуры и определять глубину z_T .

В слое 0– z_T распределение $T(z)$ считается однородным, а само значение $T(z) = \text{const}$ равным T_{nc} , измеряемой локальным преобразователем на верхнем конце. При $z_T \leq z \leq z_n$, где z_n – глубина расположения нижнего конца интегрального ИП, распределение $T(z)$ задается степенной функцией вида

$$T(z) = T_{nc} + k(z - z_T)^n. \quad (6.1)$$

В этом случае интегральная температура, регистрируемая ИП, определяется выражением

$$\begin{aligned} T(z) &= \frac{1}{z_n} \left\{ T_{nc} z_T + \int_{z_T}^{z_n} [T_{nc} + k(z - z_T)^n] dz \right\} = \\ &= T_{nc} + \frac{k(z_n - z_T)^{n+1}}{z_n(n+1)}. \end{aligned} \quad (6.2)$$

Располагая результатами измерения температуры на нижнем конце ИП (T_n) и на некотором промежуточном горизонте (T_n при $z_n > z_T$), можно записать

$$\begin{aligned} T_n &= T_{nc} + k(z_n - z_T)^n; \\ \frac{T_n - T_{nc}}{z_n - z_{nc}} &\approx \left. \frac{dT(z)}{dz} \right|_{z=z_n} = nk(z_n - z_T)^{n-1}. \end{aligned} \quad (6.3)$$

Совместным решением уравнений (6.2) и (6.3) определяются коэффициенты k и n , а также глубина z_T .

В результате может быть восстановлен вертикальный профиль температуры в слое $0 - z_n$. Однако из-за предположений о характере изменчивости $T(z)$, используемых в выражениях (6.3), получаемые результаты оказываются весьма приближенными.

Значительно более перспективным является метод, который позволяет определять в буксируемом режиме реальные, а не расчетные значения z_T , и основан на использовании перемещаемых по вертикали термоинтегральных ИП [3]. Устройство, реализующее такой метод, кроме интегрального ИП, буксируемого за судном, содержит преобразователь гидростатического давления на нижнем конце ИП.

При буксировании обеспечивают возможность периодических перемещений нижнего конца ИП между глубинами z_1 и z_2 , выбранными таким образом, что $z_1 < z_T < z_2$, причем наиболее целесообразно задать это условие в виде $z_T \approx 0,5(z_1 + z_2)$.

В наиболее простом случае в устройстве, буксируемом исследовательским судном 1 (рис. 6.3), периодические перемещения нижнего конца 4 интегрального преобразователя 2 между горизонтами z_1 и z_2 производятся путем периодических изменений скорости буксирования. Перемещения происходят по кривой 3.

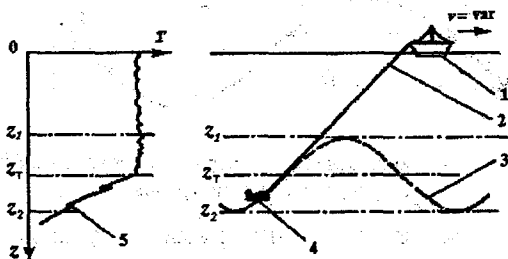


Рис. 6.3. Схема измерений при одновременном измерении температуры и толщины ВКС

В таком режиме интегральный ИП примерно половину периода находится в верхнем квазиоднородном слое (ВКС), т.е. от 0 до z_T по кривой 5, и в этот промежуток времени его интегральная температура $T_{\text{инт}}$ изменяется очень мало. На непрерывной записи $T_{\text{инт}}$

(рис. 6.4) появляется квазистатический участок. При опускании нижнего конца ИП глубже z_r часть преобразователя попадает в область резко изменяющихся значений температуры, причем длина этой части изменяется в соответствии с изменениями скорости буксирования $V(\tau)$. Соответственно запись $T_{\text{инт}}$ в этот промежуток времени носит квазисинусоидальный характер. Очевидно, что моменты изменения характера записи соответствуют моментам пересечения нижним концом ИП глубины z_r (точки 1, 2, 3, ...).

Изменения глубины погружения нижнего конца интегрального ИП могут обеспечиваться не только за счет изменения скорости буксирования, но и путем использования гидродинамического заглубителя (рис. 6.3, б), угол атаки которого периодически изменяется в требуемых пределах.

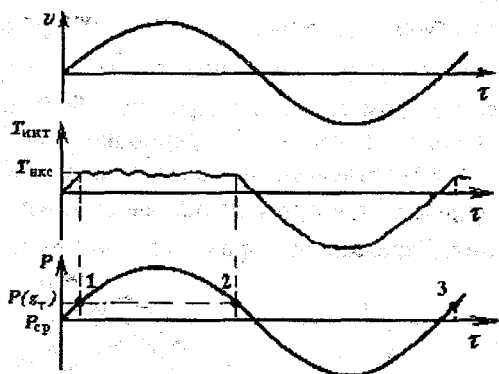


Рис. 6.4. Схема определения температуры и толщины ВКС по результатам регистрации

При реализации метода для измерений внутренних волн важное значение имеет правильный выбор периода перемещений нижнего конца ИП. Его целесообразно устанавливать из следующих соображений.

Задают минимальную длину волны λ_{min} , меньше которой внутренние волны в данном районе не ожидаются. В этой ситуации с использованием условия Котельникова устанавливается предел возможной дискретности отсчетов

$$\Delta\tau \leq 0,5 \frac{\lambda_{\min}}{V_{\text{ср}}},$$

где $V_{\text{ср}}$ — средняя скорость судна.

Как следует из рис. 6.4, за один период перемещений τ_n производятся два отсчета z_i . В таком случае $\Delta\tau \approx 0,5\tau_n$. В результате получим, что

$$\tau_n \leq \frac{\lambda_{\min}}{V_{\text{ср}}}. \quad (6.4)$$

Минимум же возможного диапазона значений τ_n целесообразно связать с постоянной времени τ_e интегрального ИП. Рассматривая, как и ранее, интегральный ИП в виде динамической системы первого порядка, можно записать следующее выражение для модуля передаточной функции:

$$|F(i\omega)| = \left(\sqrt{1 + \frac{4\pi^2\tau_e^2}{\tau_n^2}} \right)^{-1}. \quad (6.5)$$

Задаваясь уровнем пропускания $|F(i\omega)| \approx 0,7$, при котором сдвиг по фазе между выходным и входным сигналами не будет превышать четверти периода (а при таком сдвиге еще возможно выделить требуемые моменты перехода в характере записи), получаем нижнее условие для τ_n :

$$\tau_n \geq 2\pi\tau_e.$$

В результате совмещенное условие для требуемого периода перемещений будет следующим:

$$2\pi\tau_e \leq \tau_n \leq \frac{\lambda_{\min}}{V_{\text{ср}}}. \quad (6.6)$$

Несомненно, что при выборе τ_n необходимо учитывать также и те возможные искажения, которые может внести в результаты регистрации собственное движение судна.

Глава 7. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

7.1. Базовые буйковые конструкции для измерителей характеристик внутренних волн

В стационарном варианте проведения наблюдений за внутренними волнами необходимо выполнение ряда специфических требований к несущим буйковым конструкциям:

- исключение вертикальных перемещений точки подвеса тросовой (кабель-тросовой) линии с измерительными преобразователями;
- исключение горизонтальных перемещений точки подвеса.

Эти требования обеспечивают стабильное вертикальное положение ИП на тросовой линии и, соответственно, низкие погрешности измерений. Однако их выполнение возможно лишь при использовании специальных типов буйковых конструкций.

Известен ряд конструкций буйковых станций, в значительной мере отвечающих указанным требованиям (например [14, 27]). Здесь вряд ли есть необходимость повторять их описания. Обычно в таких конструкциях довольно велики габариты несущего буйа. Буй обладает большой плавучестью и при установке станции его, как правило, притапливают, тем самым обеспечивая повышенное натяжение троса и снижение динамических нагрузок от ветра и поверхностного волнения. Если необходима поверхностная индикация положения станции, или какие-либо дополнительные измерения на поверхности моря, или поддержка кабеля связи с обеспечивающим плавсредством, то станцию снабжают сравнительно малогабаритным поверхностным буюм с малой плавучестью и связывают его с основным буюм тросовой линией повышенной длины. При таких условиях поверхностный буй "болтается" на волнах, мало влияя на положение самой станции.

Описанная конструкция целесообразна при сравнительно больших глубинах моря в пункте постановки измерений и, соответственно, при сравнительно больших глубинах залегания пикноклина. При прибрежных измерениях, например, в дневном термоклизе, в галоклизе эстуариев и т.д. необходимы более простые, но не менее надежные варианты конструктивных решений.

7.1.1. Буйковые конструкции со стабилизацией положения при гидродинамических и аэродинамических нагрузках

Представляют несомненный интерес конструктивные решения на основе притопленного буя с выступающей над поверхностью воды мачтой, которая выполняет роль индикатора и одновременно несущей основы для поверхностных и надводных преобразователей. Известен ряд приемов, способствующих стабилизации буя и мачты при воздействии на них гидродинамических и аэродинамических факторов [14, 27, 32, 34, 36, 40]. Преимущественное распространение в конструкциях получили цилиндрические буи вертикального типа, имеющие увеличенную метацентрическую высоту и соответственно повышенную остойчивость. Мачта крепится в верхней части буя, выступая над поверхностью моря на требуемую высоту.

Для уменьшения периодических вертикальных смещений, обусловленных волнением, в нижней части буя устанавливают демфирующий элемент, например в виде горизонтальной площадки, создающей повышенное значение гидродинамического сопротивления при вертикальных движениях.

Самостоятельная стабилизация мачты в известных конструкциях, как правило, не применяется. Однако при комплексных исследованиях, когда мачта содержит значительное число дополнительных элементов, из-за воздействия ветра формируется кренящий момент сил. Мачта в таких условиях эксплуатации оказывается в наклонном положении, зависящем от скорости ветра, причем с наложением осциллирующих вариаций этого наклона. А при совпадении собственной резонансной частоты конструкции с частотой вариаций вынуждающей силы амплитуда осцилляций наклона ("раскачка") становится полностью неприемлемой для задач проводимых исследований, формируя в получаемых результатах ложные "внутренние" волны.

В наших разработках прибрежного буя основное внимание было обращено на стабилизацию мачты. В качестве несущей основы станции во всех конструкциях применяется притопленный цилиндрический буй вертикального типа с повышенным значением метацентрической высоты. Однако в отличие от известных технических решений буй в горизонтальном сечении выполнен в виде кольца 1, через внутреннюю часть которого проведена мачта 2 с системой ее стабилизации (рис. 7.1).

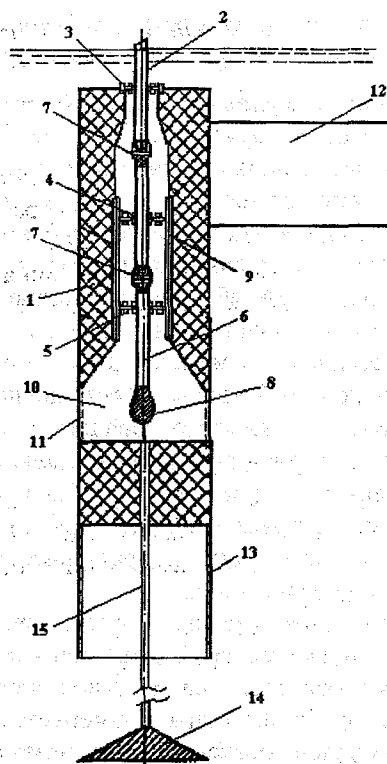


Рис.7.1. Прибрежный буй с системой стабилизации положения мачты

Система содержит набор карданных подвесов 3, 4 и 5, в которых установлены внутренние отрезки 6 мачты, соединенные между собой шарнирами 7, а также противовес 8. Подвес 3 является основным и стационарным, а подвесы 4 и 5 могут перемещаться по направляющим 9. Противовес 8 находится внутри полости 10, окруженной перфорированной стенкой 11, связывающей нижнюю и верхнюю части буй.

При отклонения мачты от вертикального положения восстанавливающий момент сил действует со стороны противовеса 8 и передается мачте через шарнирные соединения 7. При этом карданные

подвесы 4 и 5 благодаря подвижности в направляющих 9 не препятствуют свободным поворотам шарниров.

Места закрепления подвесов 4 и 5 на внутренних отрезках мачты определяют значение собственной резонансной частоты системы. Перед установкой буйковой станции эта частота задается с существенным смещением относительно ожидаемой частоты колебаний гидро- и аэродинамических воздействий, благодаря чему при эксплуатации не возникает резонансных качаний.

Дополнительно в конструкции буя применена стабилизация по основному потоку, обеспечиваемая плоскостным стабилизатором 12, установленным в верхней части.

Для уменьшения периодических вертикальных подвижек буй снабжен известными из других конструкций демпфирующими элементами: "юбкой" 13 в своей нижней части и балластным демпфером 14, связанным с основной частью буя жесткой штангой 15.

Буйковая станция с разработанной системой стабилизации положения мачты в несколько упрощенном варианте использовалась при проведении экспериментов в прибрежных условиях. Полная длина мачты составляла 6 м. Верхушка мачты крепилась тросовыми оттяжками к крестовидной опоре, связанной с верхней частью буя. При эксплуатации в условиях тайфуна "Эллис" (скорость ветра до 30 м/с) отклонения мачты от вертикального положения не превышали 15°, при этом ее качания отсутствовали.

В выполненных на основе описанного буя последующих разработках несущих конструкций применена дополнительная система автоматического отслеживания мачты относительно вертикали, а также усовершенствована конструкция противовеса 8 с целью минимизации его гидродинамического сопротивления.

Кроме технических решений, позволяющих существенно улучшить стабилизацию мачты, разработан ряд оригинальных конструкций, где одновременно повышается качество стабилизации в пространстве как самого буя, так и связанной с ним мачты [34,36].

В нашей конструкции, предложенной в работе [34], буй выполнен в виде традиционного цилиндрического корпуса 1 (рис. 7.2), обладающего положительной плавучестью и ориентированного осью OO' по нормали к среднему положению 2 поверхности моря. С нижней частью корпуса связана демпфирующая платформа 3. Эта связь вы-

полнена; например, с помощью жестких штанг 4. Плоскость AA' максимального сечения платформы 3 задана ортогональной к оси OO' .

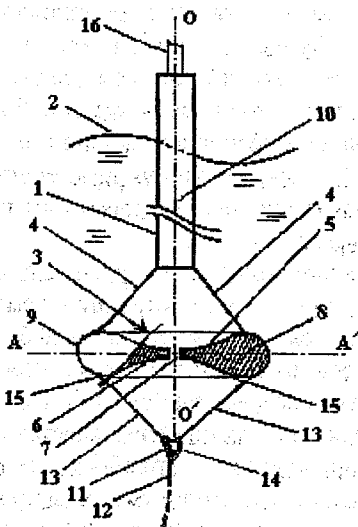


Рис. 7.2. Конструкция буя с двояковогнутой демпфирующей платформой

Демпфирующая платформа 3 выполнена двояковогнутой, например в виде двух полусфер 5 и 6, обращенных выпуклостями встречно по отношению друг к другу. Центральная часть платформы 3, образованной этими полусферами (в общем случае — поверхностями вращения), снабжена сквозным отверстием 7, ось которого задана совпадающей с осью цилиндрического корпуса 1. При этом, поскольку отверстие 7 должно иметь фиксированные параметры, его наиболее целесообразно ограничить трубкой, выполненной из такого же материала, как и полусферы, и состыкованной своими торцами с этими полусферами.

В вариантах выполнения верхняя и нижняя поверхности платформы 3 могут соответствовать поверхностям вращения иным, чем сфера, например гиперболоиду, параболоиду и т.д.

Пространство 8 между полусферами 5 и 6 наиболее целесообразно заполнить сплошным материалом с плотностью, не меньшей чем плотность окружающей воды.

Края полусфер 5 и 6 по всей окружности платформы 3 сопряжены с круговым обтекателем 9. Форму обтекателя в его радиальном сечении наиболее целесообразно задать близкой к каплевидной. Такая форма, в частности, может быть образована за счет сопряжения с полусферами 5 и 6 только лишь лобовой части обтекателя 9, при этом выпуклости полусфер должны быть разделены расстоянием по оси OO' , существенно меньшим чем лобовое сечение обтекателя, — в конечном счете, это приводит к целесообразности выполнения полусфер касательными одна к другой в центральной зоне платформы 3. При описанном сопряжении обтекателя 9 и полусфер 5 и 6 внутреннее пространство 8 платформы 3 является общим для полусфер и обтекателя и заполняется одним и тем же материалом с плотностью, как уже отмечалось, не меньшей чем плотность окружающей воды. При этом сами полусферы 5 и 6 получают неполными и могут составлять, например, "треть сферы" и т.д.

Платформа 3 размещена между центром плавучести 10, располагающимся в корпусе 1, и центром массы 11, искусственно смещенным по другую сторону платформы за счет дополнительной присоединенной массы. При использовании буйа в составе заякоренной буйковой станции в качестве такой присоединенной массы выступает трос (кабель-трос) 12, связывающий буй с якорем. Присоединение выполнено с помощью дополнительных не менее трех отрезков троса 13 равной длины, скрепленных нижними концами с узлом крепления 14, а верхними концами закрепленных на окружности платформы 3 с равномерным распределением по этой окружности точек закрепления 15. Для установки навигационных элементов и приповерхностных измерительных преобразователей буй снабжен мачтой 16.

Предложенный буй функционирует следующим образом.

В условиях волнения на поверхности моря буй подвергается совокупному действию вертикальных и боковых нагрузок. Размах возможных перемещений буйа вверх-вниз за счет волнения существенно ограничивается благодаря наличию демпфирующей платформы 3, обладающей повышенным гидродинамическим сопротивлением.

Периодические боковые нагрузки на буй возникают из-за волновых течений в воде. Это приводит к возбуждению угловых колебаний буя и мачты, период которых соответствует периоду воздействующих волн. Наличие "плоской" демпфирующей платформы, как в широко применяющихся технических решениях, описанных выше, может существенно увеличивать возможный размах этих колебаний. Причина в том, что нагрузки на такую платформу при вертикальных перемещениях оказываются неоднородными, приводя к формированию случайных уклонов платформы относительно горизонтали и, соответственно, к дополнительным наклонам буя, в общем случае не совпадающим с наклонами от волновых течений. При измерениях внутренних волн подобная особенность может привести к формированию в результатах измерений "ложного" спектрального участка в малоизученной высокочастотной области.

В описываемом решении буя платформа 3 выполнена двояковогнутой и при движении буя вверх-вниз полусферы 5 и 6 выполняют роль "парашютов", при этом посредством отверстия 7 создается скоростная струя в воде, направленная по оси OO' и обеспечивающая, тем самым, стабилизацию положения этой оси в пространстве, а соответственно – угловую стабилизацию всего буя. Возможная неоднородность действия вертикальных нагрузок практически устраняется за счет используемой двояковогнутой формы платформы 3, а также за счет обеспечения "стекания" воды в отверстие 7. При этом при движении вверх "парашютными стропами" поверхности 5 являются штанги 4, поскольку действующая сила (сила плавучести) приложена к корпусу буя, а конкретнее – к центру плавучести 10, обычно расположенному в верхней части корпуса. При движении вниз действует сила тяжести, преобладающая в данный промежуток времени над силой плавучести и приложенная к центру массы 11, который смещен существенно вниз. Наиболее целесообразно располагать этот центр, во-первых, на продолжении оси OO' , во-вторых, существенно ниже платформы 3. При заякоренной установке буя такое расположение обеспечивается за счет присоединенной массы троса (кабель-троса) 12. При свободной установке (дрейфующий вариант), которая тоже может использоваться при наблюдениях за внутренними волнами, буй необходимо снабдить подвешенным на тросе грузом. И в том, и в другом случае соедине-

ние с бую наиболее целесообразно выполнить с помощью дополнительных нижних "стропов" 13, обеспечив фиксацию положения центра массы на продолжении оси OO' .

Примененное сопряжение поверхностей вращения 5 и 6 с круговым обтекателем 9 обеспечивает снижение гидродинамического сопротивления платформы при воздействии на нее течений с преимущественно горизонтальным вектором скорости, т.е. дрейфовых и волновых течений. Это приводит к снижению боковых нагрузок на буй и к результирующему уменьшению угловой неустойчивости его положения.

Рассмотренное сопряжение поверхностей с обтекателем 9 целесообразно в "компактных" конструкциях буев, когда расстояние по оси OO' между поверхностями 5 и 6 задано существенно меньшим, чем максимальная толщина платформы 3. Однако для глубоководных буев, где можно реализовать повышенное расстояние между центром плавучести и центром массы, в ряде случаев становится целесообразным значительное разнесение по оси OO' положения поверхностей 5 и 6, что создает конструктивные и технологические преимущества. В таком варианте сопряжение поверхностей с обтекателем малоцелесообразно, поскольку может привести к повышению гидродинамического сопротивления (из-за повышенного лобового сечения). Более разумно размещение этого каплевидного обтекателя между разнесенными поверхностями 5 и 6 – это дает дополнительный стабилизирующий эффект.

В стабилизированном бую, предложенном в работе [36], основное внимание обращено на обеспечение стабильного положения мачты и ее нижней оконечности, к которой крепится трос (кабель-трос) станции.

Буй содержит цилиндрический корпус 1 (рис. 7.3) с положительной плавучестью, ориентируемый осью OO' по нормали к среднему положению 2 поверхности водоема. Соосно с корпусом установлена мачта 3 с размещенными на ней измерительными и навигационными устройствами, например 4 и 5. С нижней частью корпуса 1 связана демпфирующая платформа 6, ориентированная плоскостью максимального сечения AA' ортогонально по отношению к оси OO' . Платформа 6 связана с корпусом буя посредством дополнительных демпферов 7, выполненных, например, в виде ци-

линдрических пружин. Возможно выполнение демпферов также в варианте гидравлических систем, обладающих характеристикой, эквивалентной жесткости цилиндрической пружины. Эта жесткость связывается с массой буя и минимальным периодом отслеживаемых колебаний δ поверхности водоема следующим образом.

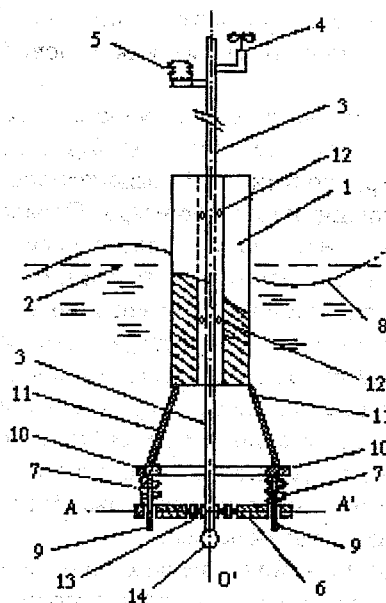


Рис. 7.3. Конструкция буя с пружинной демпфирующей платформой

Рассмотрим буй с демпфирующей платформой и пружинами по аналогии с описанным в главе 2 демпфированным измерительным поплавком-бум как динамическую систему, имеющую массу m_0 , колеблющуюся на пружине с жесткостью W_0 и снабженную успокоителем с вязким трением (механическим сопротивлением) R_0 , что соответствует классической эквивалентной схеме колебаний массы на упругой подвеске в вязкой среде. Подобная система может быть описана линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$m_6 \frac{d^2 Y(\tau)}{d\tau^2} + R_6 \frac{dY(\tau)}{d\tau} + W_0 [Y(\tau) - X(\tau)] = 0, \quad (7.1)$$

где $X(\tau)$ – сигнал на входе системы; $Y(\tau)$ – сигнал на выходе.

Амплитудно-частотная характеристика данной системы (АЧХ), получаемая путем решения уравнения (7.1), следующая:

$$|F(i\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2 m_6}{W_0}\right)^2 + \frac{\omega^2 R_6^2}{W_0^2}}}. \quad (7.2)$$

Круговая частота среза этой АЧХ приближенно может быть определена выражением

$$\omega_{cp} = \sqrt{\frac{W_0}{m_6}}. \quad (7.3)$$

Известно, что в динамических системах 2-го порядка могут возникать, в принципе, условия резонанса. Они обычно выявляются приравнением к нулю первой производной АЧХ по частоте. Однако, для рассматриваемого буйа подобные условия маловероятны из-за большого механического сопротивления при вертикальных движениях ввиду наличия демпфирующей платформы 6. Таким образом, условие, определяющее отсутствие резонанса,

$$\frac{m_6}{W_0} \leq \frac{R_6^2}{2W_0^2} \quad (7.4)$$

здесь будет всегда выполняться.

Пропускание системой колебательных вертикальных движений с коэффициентом, близким к единице, обеспечивается до частот примерно $(0,65-0,70)\omega_{cp}$ (система эквивалентна фильтру нижних частот). Буй, естественно, может использоваться для измерений

внутренних волн с частотами, большими, чем $0,65 \omega_{\text{ср}}$. Поскольку

$\omega = \frac{2\pi}{\tau_{\text{в}}}$, то отсюда получается условие для жесткости пружин

$$W_0 = (8,2 \dots 9,5) \frac{\pi^2 m_{\delta}}{\tau_{\text{в}}^2}, \quad (7.5)$$

где $\tau_{\text{в}}$ — максимальный период задаваемого диапазона регистрации внутренних волн.

Оценка затухания на срезе фильтра нижних частот, которому эквивалентна динамическая система буя, дает значение около 9–12 дБ/октаву. Увеличение затухания, которое, несомненно, полезно для поставленных задач измерений, обеспечивается путем выполнения дополнительного условия, связывающего параметры платформы 6 и демпферов 7:

$$W_0 \leq 0,5 \frac{R_{\delta}^2}{m_{\delta}}, \quad (7.6)$$

где R_{δ} — гидродинамическое сопротивление платформы; m_{δ} — полная масса всей конструкции буя, включая присоединенную массу; W_0 — жесткость демпферов 7.

При этом наиболее целесообразно максимальное приближение к равенству.

Дополнительные демпферы 7 наиболее целесообразно размещать по окружности платформы 6 через одинаковые дуговые расстояния, например четыре демпфера через 90° . Внутри пружин 7 необходимо установить направляющие 9, свободно перемещающиеся в соответствующих соосных с ними отверстиях платформы 6. Это позволяет устранить горизонтальные смещения этой платформы относительно оси OO' при действии гидродинамических факторов.

Своей верхней частью демпферы 7 закреплены в жесткой кольцевой опоре 10, скрепленной набором штанг 11 с нижней частью корпуса буя.

Как следует из приведенного описания конструкции, здесь стабилизируется положение всей системы. Стабилизация обеспечивается как известными приемами (увеличенная метацентрическая высота, наличие демпфирующей платформы), так и специальными

дополнительными приемами – применением нежесткого закрепления демпфирующей платформы.

Для задач измерений внутренних волн необходима преимущественно стабилизация положения точки подвеса троса (кабель-троса). При этом обычно весьма целесообразны параллельные измерения колебаний поверхности моря, в частности, с помощью известных преобразователей струнного типа (например [40]), которые должны закрепляться в фиксированном вертикальном положении. Для этого в разработанной буйковой конструкции мачта 3 устанавливается в корпусе буя в осевой цилиндрической прорези с возможностью перемещений вдоль оси OO' , например, с помощью группы подпружиненных подшипников 12. Своей нижней частью мачта 3 закрепляется на платформе 6. Это закрепление выполняется с помощью карданной системы 13 либо с использованием вместо этой системы стандартной шаровой опоры, что позволяет избежать деформаций места закрепления при нарушениях ортогональности плоскости AA' и оси OO' из-за неравномерного действия на платформу 6 и корпус буя гидродинамических факторов. Трос станции крепится к мачте через нижний рым 14.

Рассмотренная буйковая система может использоваться как в закоренном, так и в дрейфующем вариантах.

7.1.2. Конструкции с глубинным расположением несущего буя

Из имеющихся современных разработок буйковых станций представляют несомненный интерес для задач наблюдений за внутренними волнами станции с сильно заглубленным, иногда близким к придонному, расположением основного (несущего) буя [2, 35]. Станции имеют широкие функциональные возможности, значительно шире, чем рассматриваемые здесь задачи исследования внутренних волн. В описании станций эти задачи даже не выделяются, однако анализ возможностей приводит к выводу об однозначной применимости станций для таких задач.

Подобная станция (например [2, 35]) содержит глубинный буй 1 (рис. 7.4), связанный посредством троса (кабель-троса) 2 с якорем 3, установленным на дне 4 водоема. Буй размещен на глубине, где отсутствуют гидродинамические возмущения, вызываемые волне-

нием на поверхности 5. Эта глубина, как правило, значительно ниже глубины расположения пикноклина. На бую 1 при комплексных исследованиях размещены измерительные преобразователи 6 гидрофизических характеристик *in situ*, подключаемые к электронному блоку 7 внутри корпуса бую.

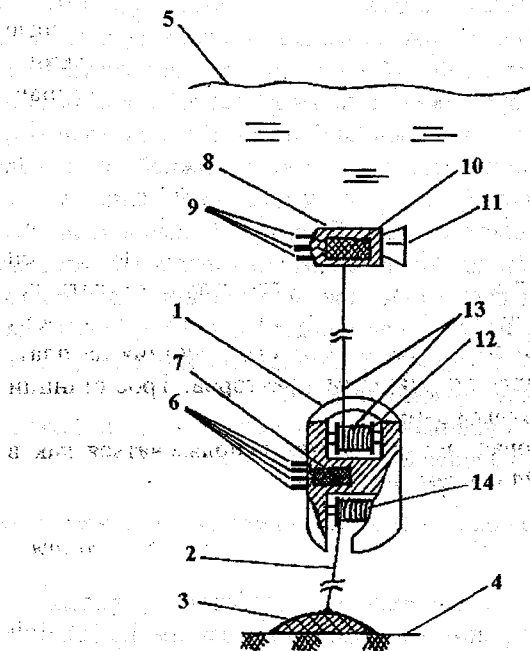


Рис. 7.4. Буйковая станция с глубинным расположением несущего бую

Для обеспечения измерений в пикноклине станция дополнительно содержит подвижный буй 8 с собственным набором измерительных преобразователей 9, подсоединенных к электронному блоку 10. Для ориентации по течению и стабилизации в потоке при попадании в разные слои воды буй 8 снабжен хвостовым оперением 11.

Перемещение подвижного бую на требуемый горизонт наблюдений производится с помощью лебедки 12, установленной на бую 1 и снабженной барабаном с запасом троса (кабель-троса) 13. Электродвигатель лебедки герметизирован и размещен внутри барабана,

что обеспечивает высокую надежность и существенно снижает энергозатраты.

Измерительный преобразователь внутренних волн может быть размещен непосредственно на кабель-тросе, связывающем подвижный буй с базовым. Ввиду необходимости намотки кабель-троса на барабан здесь наиболее целесообразно использование гибких преобразователей интегрального типа.

В станции экологического контроля ЦНИИ "Гидроприбор" базовый притопленный буй 1 дополнительно содержит еще одну лебедку 14, которая выполнена аналогично лебедке 12, и на барабан которой намотан запас троса (кабель-троса) 2. С помощью этой лебедки осуществляются изменения глубины расположения базового буя.

Описанная автономная станция функционирует следующим образом.

В собранном компактном виде станция транспортируется судном к точке установки. В этой точке с известной глубиной моря в электронный блок станции вводится программа ее разворачивания и дальнейшего функционирования. После этого станция сбрасывается за борт и под действием веса якоря, превышающего суммарную плавучесть буюв 1 и 8, опускается в исходном компактном виде на дно моря. В соответствии с введенной программой разворачивания срабатывает лебедка 14, освобождая для свободного всплытия базовый буй 1, который поднимается до требуемой по программе глубины. На этой глубине, получив сигнал от канала измерения гидростатического давления (один из преобразователей 6), лебедка 14 блокирует дальнейшее всплытие буя.

Глубина расположения базового буя задается, исходя из запаса троса (кабель-троса) на лебедке 12, т.е. чтобы могла быть реализована возможность всплытия подвижного буя 8 на глубину, расположенную выше пикноклина. Всплытие подвижного буя также осуществляется по программе, однако сигнал, блокирующий лебедку 12, здесь формируется в результате обработки данных каналов температуры и гидростатического давления (преобразователи 9). По каналу температуры выявляется глубина расположения пикноклина, а с использованием канала давления формируется команда типа "на N метров выше пикноклина".

Описанная базовая станция получила интересное дальнейшее развитие. Подвижный буй этой станции с соответствующими изменениями конструкции оказывается возможным применить для непосредственных измерений характеристик внутренних волн. Это техническое решение подробно рассмотрено в главе 2.

7.2. Методы выполнения метрологических оценок измерителей характеристик внутренних волн

Для метрологических оценок, как известно, необходимо наличие образцовых средств измерений, методик аттестации и специальных лабораторных установок, моделирующих изменения измеряемой величины. Применительно к задачам аттестации измерителей характеристик внутренних волн какие-либо стандартные (государственные) возможности в настоящее время отсутствуют. Тем самым, чрезвычайно актуальны и интересны любые попытки продвижения в этом направлении.

Одна из таких попыток рассмотрена в нашей работе [41]. В разработанной лабораторной установке внутренние волны моделируются следующим образом. Поскольку создание вертикального бассейна с соответствующей температурной или в общем случае – с термохалинной стратификацией водного слоя уже само по себе является весьма нетривиальной задачей, а тем более мало реально обеспечение нормируемых внутренних волн в этом слое, то в установке требуемый профиль температуры (либо температуры и солености) задается в горизонтальном направлении. Слой пикноклина создается пористой перегородкой, толщина которой выбрана такой, чтобы при задаваемых перепадах характеристик в секциях, разделяемых этой перегородкой, нормировался требуемый градиент. Несомненно, что обмен через перегородку остается, однако его интенсивность настолько мала, что за период проведения метрологических оценок им можно пренебречь. Внутренние же волны имитируются перемещением измерительного преобразователя относительно перегородки и, соответственно, относительно профиля задаваемой гидрофизической характеристики в бассейне.

Применение описанного принципа позволяет, во-первых, определять статические характеристики преобразователей при различных видах профилей и значениях градиента, а во-вторых, дает воз-

возможность выполнять оценки динамических свойств преобразователей, создавая как скачкообразный входной сигнал, так и набор синусоидальных входных сигналов различных периодов.

Из описанной сущности принципа следует, что он может быть применен преимущественно для метрологических оценок преобразователей интегрального типа.

Разработанная установка состоит из горизонтально расположенного бассейна 1 (рис. 7.5), разделенного на две секции перегородкой 2. Интегральный преобразователь 3 проходит сквозь отверстие в центре перегородки 2 и закреплен на несущем тросе 4, пропущенном через шкивы 5. С помощью блока кинематики 6, содержащего реверсивный двигатель и редуктор, система трос-преобразователь может перемещаться относительно перегородки 2 с требуемыми амплитудами и периодами. Амплитуда задается перемещаемыми концевыми выключателями 7, срабатывающими от фиксатора 8, закрепленного на тросе 4. Режим работы обеспечивается блоком 9, содержащим стабилизированные источники питания и мостовые измерительные схемы, куда подключены измерительные преобразователи. С помощью блока 9 также обеспечивается управление блоком кинематики 6 через выключатели 7 (связи на рисунке не показаны).

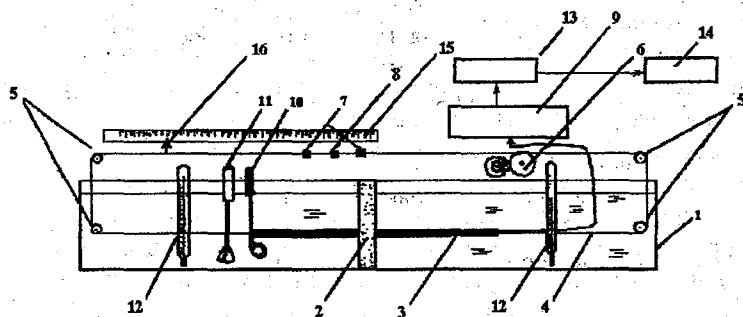


Рис. 7.5. Схема установки для метрологических испытаний интегральных преобразователей

Сигналы с преобразователей после блока 9 поступают на вход блока усиления и фильтрации 13, затем – на регистратор 14.

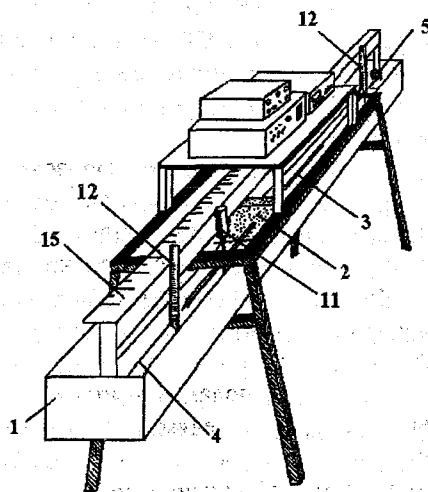


Рис. 7.6. Общий вид установки для метрологических испытаний интегральных преобразователей (условные обозначения см. рис. 7.5)

Требуемый температурный градиент в установке создается благодаря использованию нагревателя 10 в одной из секций и устройства перемешивания воды 11. Контроль значений температуры в секциях производится с помощью преобразователей 12. Соленостный градиент обеспечивается при исходной подготовке воды для обеих секций. Общий вид установки показан на рис. 7.6.

Определение статической характеристики аттестуемого измерителя производится путем дискретных перемещений системы трос-преобразователь. Контроль перемещений осуществляется по линейной шкале 13 со стрелочным указателем. Пример полученной на установке статической характеристики измерителя с интегральным термопреобразователем приведен на рис. 7.7. Здесь показана аппроксимирующая функция преобразования и границы погрешности при доверительной вероятности 0,95.

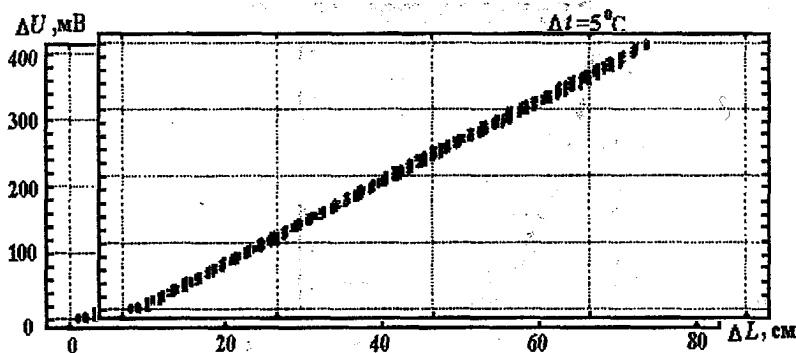


Рис. 7.7. Пример экспериментальной статической характеристики интегрального термопреобразователя

Исследования динамических свойств измерителей с интегральными преобразователями, как уже отмечалось выше, могут осуществляться в двух вариантах.

В первом формируется скачкообразное перемещение системы трос-преобразователь относительно перегородки. Естественно, что скорость подобного перемещения ограничена. Для практических целей оказывается вполне достаточным, если длительность скачка не будет превышать 5% ожидаемого значения постоянной времени.

Во втором варианте за счет использования блока кинематики 6 с реверсивным двигателем удастся создавать гармонические “внутренние волны” в интервале дискретных частот, задаваемых в редукторе блока 6. Тем самым, становится возможным определять непосредственно амплитудно-частотную характеристику аттестуемого измерителя.

Пример результатов, получаемых при исследовании динамических свойств измерителей с термоинтегральным преобразователем, показан на рис. 7.8. Полученные экспериментальные данные здесь показаны в виде прямоугольников. Аппроксимация данных экспоненциальной функцией приведена в виде срединной кривой. Границы погрешности указаны для доверительной вероятности 0,95.

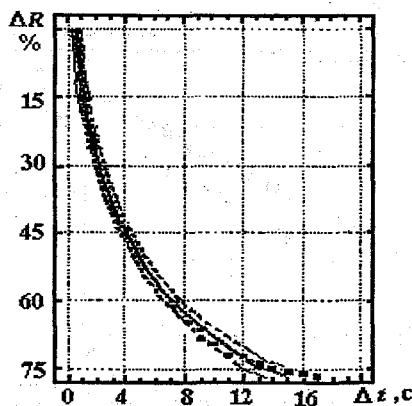


Рис. 7.8. Пример определения динамической характеристики интегрального термопреобразователя при скачкообразном входном сигнале

Опыт работы с установкой показал, что она полностью обеспечивает возможность получения качественных метрологических оценок. Естественно, она не может использоваться для всех видов преобразователей. Из-за ограниченных размеров бассейна здесь могут исследоваться термопреобразователи (дискретно-интегральные и интегральные) и преобразователи электрической проводимости (дискретно-интегральные и некоторые интегральные). Возможности работы с иными видами преобразователей не оценивались.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. № 1143973, СССР, МКИ 4 G 01 C 13/00. Устройство для измерения параметров внутренних волн в море // Степанюк И.А. – БИ № 9, 1985.
2. А.с. № 1062111, СССР, МКИ 4 B63 B 17/00. Якорная буйковая станция // Чертанов В.С. и др. – БИ № 8, 1983.
3. А.с. № 1531045, СССР, МКИ 4 G 01 W 1/00. Способ измерения параметров верхнего квазигоризонтального слоя моря с движущегося судна // Степанюк И.А. – БИ № 47, 1989.
4. Автоматизированные системы с буксируемыми приборами в океанологических исследованиях / Гайский В.А., Артемов Ю.Г., Блинков В.А. и др. – Киев: Наукова думка, 1987. – 176 с.
5. Андреева И.Б., Макшас Я.П. Колебания глубин звукорассеивающих слоев и внутренние волны // Океанология, 1976, № 3. – С. 436–440.
6. Андреева И.Б. Акустические методы регистрации характеристик малых неровностей дна и биологических скоплений в океане // Автоматизация научных исследований морей и океанов. Сб. докладов Всесоюз. симп. 26.05–2.06.67. – Севастополь: МГИ АН УССР, 1968. – С.186–193.
7. Баханов В.В., Зуев А.Л., Маров М.Н., Пелиновский Е.Н. О влиянии внутренних волн на радиолокационные характеристики морской поверхности в СВЧ-диапазоне. – Препринт № 198. – ИПГ АН СССР. – 1988. – 15 с.
8. Белоножко В.П. Некоторые результаты использования явления рассеяния звука в океанологических исследованиях // Гидрофизические исследования в северной части Тихого океана и дальневосточных морях. – Владивосток: Изд. ДВНЦ АН СССР, 1979. – С. 55–65.
9. Большаков А.Н. и др. Комплекс аппаратуры для измерения пространственно-временных характеристик деятельного слоя на масштабах внутренних волн. // Неконтактные методы и средства измерения океанографических параметров. Сб. докл. 5-го Всесоюзного семинара. – М.: Гидрометеиздат (отделение), 1986. – С. 48–52.
10. Большаков А.Н. и др. Радиолокационное изображение морской поверхности на масштабах внутренних волн // Неконтактные методы и средства измерения океанографических параметров. Сб. докл. 5-го Всесоюз. семинара. – М.: Гидрометеиздат (отделение), 1986. – С. 53–57.
11. Булаков Н.П., Иванов В.А., Лисиченко А.Д. Короткопериодные внутренние гравитационные волны в районе с большими горизонтальными градиентами плотности // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1985, т. 21, № 12. – С. 1308–1314.
12. Винников С.Д. Измерение малых скоростей течения баропоплавком / Труды ГТИ, 1972, вып. 192. – С.232–239.
13. Гришин Г.А., Гродский С.А., Ильин Ю.П. К вопросу об определении параметров двухслойной стратификации по данным дистанционных наблюдений // Неконтактные методы и средства измерения океанографических параметров. Сб. докладов 5-го Всесоюзного семинара. – М.: Гидрометеиздат (отделение), 1986. – С. 214–216.

14. Дерюгин К.К., Степанюк И.А. Морская гидрометрия. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 392 с.
15. Иванов В.А., Козан Б.С., Лисиченок А.Д., Россов В.В. Буксируемый комплекс для измерения пространственных параметров внутренних волн // Океанология. – Т. XXIХ, вып 4. – 1989. – С. 675–679.
16. Казьмин А.С. Поверхностные проявления внутренних волн в океане по наблюдениям с орбитальной станции “Салют-6” и с корабля // Исследования Земли из космоса. – 1986. – № 2. – С. 7–15.
17. Ковчин И.С., Степанюк И.А. Особенности инструментальных измерений характеристик динамики вод на шельфе арктических морей // Итоговая сессия ученого совета. Тезисы докладов. – СПб.: Изд.РГТМУ, 1999. – С. 104–106.
18. Коняев К.В. Измерение пространственного строения внутренних волн с помощью градиентной системы датчиков температуры // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1975. – Т.11, № 7. – С. 734–742.
19. Коняев К.В. Экспериментальное исследование короткопериодных внутренних волн в море // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1975. – Т.11, № 3. – С. 285–296.
20. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. – СПб: Гидрометеиздат, 1992. – 272 с.
21. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Новые данные о внутренних волнах в море, полученные с помощью распределенных датчиков температуры // Доклады АН СССР. – 1973. – Т. 209, № 1. – С. 86–89.
22. Корнев В.Г. и др. Объемное рассеяние звука на частоте 25 кГц при наличии слоя скачка температуры // Акустический журнал, 1979. – Т.25, № 4. – С.556–565.
23. Коровин В.П. Исследование параметров внутренних волн оптическими методами // Межведомственные исследования Балтийского моря. Сб. работ Ленинградской гидрометеорологической обсерватории. – Вып.13. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – С. 118–123.
24. Корзун В.А. Технические возможности дистанционной (космической) индикации океана // Экспресс-информация “Промысловая океанология”. – 1974. – Сер. 9, вып.1. – С.5–14.
25. Краусс В. Внутренние волны. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 232 с.
26. Ломейко А.И., Любичкий А.А. О дистанционном определении параметров внутренних волн по амплитудным характеристикам рассеянного звукового сигнала // Неконтактные методы и средства измерения океанографических параметров. Сб. докладов 5-го Всесоюз. семинара. – М.: Гидрометеиздат (отделение), 1986. – С. 180–185.
27. Маклаков А.Ф., Снежинский В.А., Чернов Б.С. Океанографические приборы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 384 с.
28. Муякишин С.И., Селивановский Д.А. О гидролокационном измерении течений, вызванных внутренними волнами // Океанология. – 1982. – Т.22, № 6. – С. 1029–1032.
29. Нелепо Б.А., Сизов А.А., Пантелеев Н.А. Проявление внутренних волн на поверхности в открытом океане // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 226, № 1. – С. 225–228.

30. *Нелепо Б.А., Смирнов Г.В., Шадрин А.Б.* Интегрированные системы для гидрофизических исследований. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 239 с.
31. *Пака В.Т.* О выборе измерительной системы при исследовании внутренних волн // Волновые процессы в морях и океанах. Труды Всесоюз. совещания. – Севастополь: 1983. – С. 92 – 94 (Деп. ВИНТИ № 281 – 84 деп).
32. *Парамонов А.Н., Кушнир В.М., Забурдаев В.И.* Современные методы и средства измерения гидрологических параметров океана. – Киев: Наукова думка, 1979. – 248 с.
33. *Парамонов А.Н., Греков Н.А., Иванов А.В.* Буксируемый измерительный комплекс для исследования изменчивости интегральной температуры верхнего слоя океана // Океанология. – 1980. – Т.20, вып. 4. – С. 937 – 942.
34. Патент № 2090432 RU, МКИ 6 В 63 В 22/18. Стабилизированный буй // Воронин Л.И., Дорохин В.И., Колышев А.И., Степанюк И.А. – БИ № 26, 1997.
35. Патент № 2090431 RU, МКИ 6 В 63 В 22/06. Буйковая станция для гидрофизических измерений // Воронин Л.И., Дорохин В.И., Лобанов В.А., Степанюк И.А. – БИ № 26, 1997.
36. Патент № 2092374 RU, МКИ 6 В 63 В 22/18. Стабилизированный буй // Воронин Л.И., Дорохин В.И., Степанюк И.А. – БИ № 28, 1997.
37. *Рутенко А.Н., Буров Б.А., Щербатенко Л.Т.* Исследование вариаций магнитного поля, индуцируемых поверхностными и внутренними волнами // Структура и динамика вод Мирового океана. Сборник научных трудов. – Л.: Изд. ЛПИ, 1983. – вып. 80. – С.152–158.
38. *Снежинский В.А.* Практическая океанография. – М.–Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 672 с.
39. *Степанюк И.А., Коровин В.П., Вайновский П.А.* Интегральный метод регистрации высокочастотных вариаций термоклина // Межведомственные исследования Балтийского моря. Сборник работ Ленинградской гидрометеорологической обсерватории. – 1983. – Вып. 13. – С. 114–118.
40. *Степанюк И.А.* Океанологические измерительные преобразователи. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 272 с.
41. *Степанюк И.А., Акылбаев Д.А.* Моделирование методов измерений характеристик внутренних волн // Итоговая сессия ученого совета: тезисы докладов. – СПб.: Изд. РГГМИ, 1997. – С. 93–94.
42. *Степанюк И.А.* Измерение внутренних волн в галоклине эстуариев полярных рек // Итоговая сессия ученого совета: тезисы докладов. – СПб.: Изд. РГГМУ, 1999. – С. 109–110.
43. *Сытников В.Ф.* Измерение внутренних волн в изотермических слоях // Морской гидрофизический журнал. – 1986. – № 3. – С. 62–64.
44. Ультразвук. / Под ред. Голямина И.П. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
45. Физика океана. / Под ред. Доронина Ю.П. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 287 с.
46. Формирование, структура и флуктуации верхнего термоклина в океане. / Пер. с англ. под ред. Фукса В.Р. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 143 с.
47. *Шауб Ю.Б.* Новые методы электрометрии в морских исследованиях. – М.: Наука, 1985. – 216 с.
48. *Шули А.* Электронная аппаратура в океанографии. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 64 с.

49. Andow T., Hanawa K., Toba J. Experimental study on internal waves in a stratified shear flow // J. Oceanogr. Soc. Japan. - 1981. - V.37, N 4. - P. 179 - 192.
50. Barbee W.B., et al. Measurement of internal waves of tidal frequency near a continental boundary // J. Geophys. Res. - 1975. - Vol.80, N. 15. - P. 1965 - 1974.
51. Sanford T.B. Observations of the vertical structure of internal waves // J. Geophys. Res. - 1975. - Vol. 80, № 27. - P. 3861 - 3871.
52. Koop C.G., Butter G. An investigation of internal solitary waves in a two-fluid system // J. Fluid. Mech. - 1981. - Vol. 112. - P. 225 - 251.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Особенности измерений характеристик внутренних волн	5
1.1. Измеряемые характеристики	5
1.2. Методические особенности измерений	9
1.3. Некоторые специфические результаты измерений	15
Глава 2. Поплавковые методы	23
Глава 3. Термоградиентные методы	36
3.1. Многоканальные термоградиентные методы	36
3.2. Суммирующие методы	38
Глава 4. Интегральные методы	47
4.1. Термоинтегральные методы	48
4.2. Методы, основанные на измерении вариаций интегральной плотности	70
4.3. Методы, основанные на измерении интегральной электрической проводимости	79
Глава 5. Дистанционные методы	97
5.1. Акустические методы	97
5.2. Оптические и радиолокационные методы	101
Глава 6. Определение характеристик внутренних волн методами сканирования верхнего слоя моря	104
6.1. Сканирование с помощью локальных измерительных средств	104
6.2. Методы интегрального сканирования термоклина	107
Глава 7. Методы и средства технического обеспечения измерений	113
7.1. Базовые буйковые конструкции для измерителей характеристик внутренних волн	113
7.1.1. Буйковые конструкции со стабилизацией положения при гидродинамических и аэродинамических нагрузках	114
7.1.2. Конструкции с глубинным расположением несущего буя	124
7.2. Методы выполнения метрологических оценок измерителей характеристик внутренних волн	127
Литература	132

CONTENS

Introduction	3
Chapter 1. Features of measurements of the characteristics internal waves	5
1.1. Measured characteristics	5
1.2. Methodical features of measurements	9
1.3. Some specific results of the measurements	15
Chapter 2. Float methods	23
Chapter 3. Termogradient methods	36
3.1. Multichannel termogradient methods	36
3.2. Summing methods	38
Chapter 4. Integrated methods	47
4.1. Termointegrated methods	48
4.2. Methods, based on measurement of variation of integrated density	70
4.3. Methods, based on measurement of integrated electrical conductivity ..	79
Chapter 5. Remote methods	97
5.1. Acoustic methods	97
5.2. Optical and radiolocation methods	101
Chapter 6. Definition of characteristics of internal waves by methods of scanning of top layer of the sea	104
6.1. Scanning with the help of local means of measurements	104
6.2. Methods of integrated scanning of termocline	107
Chapter 7. Methods and means of technical maintenance of measurements	113
7.1. Base buoy constructions for measuring of characteristics of internal waves	113
7.1.1. Buoy constructions providing the stabilization of situation while at hydrodynamic and aerodynamic loads	114
7.1.2. Constructions with deep arrangement of the bearing buoy	124
7.2. Methods of carrying out of metrological valuations of the means of measuring of internal waves characteristics	127
Reference	132

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Иван Антонович СТЕПАНЮК

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК
МОРСКИХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН

МОНОГРАФИЯ

Редактор Н.И. Афанасьева
ЛР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 13.03.2002 г. Формат 60х90 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 8,6 Уч.-изд. л. 0,0. Тираж 200. Зак. 10
РГТУ, 195196, СПб, Малоохтинский пр., 98.
Отпечатано ООО «Концепт».

1911

1912

1913

1914

1915

1916