

5. Милуков В. К., Клячко Б. С., Мясников А. В., Стриганов П. С., Янин А. Ф., Власов А. Н. Лазерный интерферометр-деформограф для мониторинга движений земной коры // ПТЭ. 2005. № 6. С. 87—103.

6. Милуков В. К., Мясников А. В. Долговременные наблюдения литосферных деформаций Баксанским лазерным интерферометром в условиях подземного размещения // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 32—35.

7. Нестеров В. В. Большебазовые лазерные интерферометры в геофизических исследованиях. Симферополь: Таврия, 1996.

8. Пустовитенко Б. Г. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. Севастополь: ЭКОСИ Гидрофизика, 2014. ISBN 978-966-442-091-1.

9. Ammon C. J., Lay T., Kanamori H., Clevela M. A rupture model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // Earth Planets Space. 2011. V. 63. P. 693—696.

10. Саваренский Е. Ф., Нерсесов И. Л., Кармалеева Р. М., Латынина Л. А. Длиннопериодные волны Алеутского землетрясения 4.02.1965 г., зарегистрированные кварцевыми экстензометрами // Физика Земли. 1966. № 5. С. 33—42.

11. Dziewonski A. M., Anderson D. L. Preliminary reference Earth model // Phys. Earth and Planetary Interiors. 1981. V. 25 (4). P. 297—356.

12. Amoruso A., Crescentini L. The geodetic laser interferometers at Gran Sasso, Italy: recent modifications and correction for local effects // J. Geodynamics. 2009. V. 48. P. 120—125.

13. Takemoto S., Momose H., Araya A., Morii W., Akamatsu J., Ohashi M., Takamori A., Miyoki S., Uchiyama T., Tatsumi D., Higashi T., Telada S., Fukuda Y. A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains // J. Geodynamics. 2006. V. 41. P. 23—29.

Дата принятия 20.05.2015 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.33.001.5.082.1:532

Измерительный преобразователь электрической проводимости жидкостей

А. Ю. ИЛЬИНЫХ¹, Ю. С. ИЛЬИНЫХ², Ю. Д. ЧАШЕЧКИН¹

¹Институт проблем механики РАН, Москва, Россия, e-mail: firs_mail.ru

²НПФ «Агрострой», Москва, Россия

Описан измерительный преобразователь электрической проводимости жидкостей, используемый как в лабораторных условиях, так и для изучения процессов в Мировом океане (натурные условия). Преобразователь представлен в виде отдельного блока для лабораторных исследований, который можно использовать в качестве составной части глубоководного гидрологического зонда. На примере различных процессов и течений в лаборатории механики жидкостей ИПМ РАН показано, что малогабаритный преобразователь имеет высокие быстродействие и пространственное разрешение.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, электрическая проводимость, гидрологический зонд, Мировой океан.

The measuring transducer of electrical conductivity for laboratory conditions as well as for study of ocean processes (in natural conditions) has been described. The transducer was designed and manufactured as a separate unit for laboratory research and as a part of deep-water hydrological probe. Small-size transducer has a high temporal and spatial resolution illustrated by measurements in various processes and flows in fluid mechanics laboratory of IPM RAS.

Key words: measuring transducer, conductivity sensor, hydrological probe, World Ocean.

В прикладной и теоретической гидродинамике давно исследуются процессы в средах с устойчивым распределением плотности, т. е. стратифицированных средах. Особый ин-

терес представляют внутренние волны среды, которые проявляются как в лабораторных, так и в натурных условиях, и связаны с колебаниями жидких элементов в ней. Эти волны

играют важную роль в общей динамике глубокого океана, атмосферы и других природных систем [1, 2]. Для исследований волновых процессов используют лабораторные измерители отдельных параметров жидкостей (солёности, плотности, температуры и др.) и гидрологические зонды для морской воды (солёность, плотность) [3, 4]. Для изучения тонкой структуры океана и турбулентных течений необходимы высокие быстродействие и пространственное разрешение измерительных преобразователей (ИП) параметров среды [5, 6].

В лабораторных условиях часто применяют оптические (теневого) методы наблюдений в сочетании с кондуктометрическим ИП. Стратификация среды и особенности конструкции преобразователей заметно ухудшают их динамические характеристики, так как существенно влияют на обтекание чувствительного элемента преобразователя [7, 8]. Для оценки динамических свойств последнего применяют различные виды входного воздействия: гармонические колебания в среде с однородным градиентом плотности; резкое смещение на небольшую высоту или перемещение ИП по высоте с постоянной скоростью [9, 10]. В последнем случае нормированный входной сигнал представляют как

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ (v/\eta)t, & 0 \leq t \leq T_c; \\ 1, & t > T_u, \end{cases} \quad (1)$$

где v , η — скорость перемещения и смещение чувствительного элемента по высоте; t — время; T_c — длительность сигнала.

При указанных выше воздействиях определяют передаточные функции $H(\omega)$ и переходные характеристики $h(t)$, позволяющие в дальнейшем описывать работу ИП в заданных условиях [11]. Возможности работы ИП после оптимизации параметров приведены в [12]. Быстродействие таких преобразователей порядка нескольких миллисекунд, а относительная погрешность измерений составляет несколько процентов [8].

В настоящей работе представлен микроконтактный ИП, разработанный и используемый в ИПМ РАН и ВНИИФТРИ при реальных динамических процессах в лабораторных бассейнах со стратифицированной жидкостью. Аналогичные приборы применяют в натурных условиях в различных регионах Мирового океана. Принцип работы преобразователя показан в [3, 12].

Чувствительный элемент разработанного ИП представляет коаксиальную ячейку: внешний электрод — никелевый капилляр диаметром 0,8—1 мм отделен изолирующей вставкой от внутреннего (платиновая или золотая проволока диаметром 0,3 мм). Капилляр (длиной 30 мм) закреплен в трубке из нержавеющей стали (диаметр 4 мм и длина 50 см) для возможности монтажа в бассейне. Рабочий объем ИП — небольшая область у торца чувствительного элемента в зоне контакта электродов с жидкостью. Оценка пороговой чувстви-

тельности приведена в [13], где показано, что пространственное разрешение преобразователя составляет не более трех диаметров капилляра, а порог чувствительности регулируется и определяется режимом работы. Электроды капилляра подключены к высокочастотному кабелю, который соединен с электронным блоком. Последний построен по схеме управляемого блокинг-генератора со следящей обратной связью большой скажности (около 1000). Импульсы — высокочастотный сигнал около 1 МГц. В кондуктометрии отдают предпочтение импульсным методам измерений электрической проводимости, позволяющим существенно уменьшать влияние электрохимических процессов и повышать точность измерений. Импульсы поступают на мостовую схему, в одно плечо которой включен чувствительный элемент преобразователя. Сигнал с моста отправляется на дифференциальный пиковый детектор и интегратор, усиливается, преобразуется в пропорциональное проводимости среды электрическое напряжение в диапазоне $-10...+10$ В.

Указанные особенности конструкции и работы преобразователя дают возможность использовать его при исследованиях мелкомасштабных процессов в небольших бассейнах в широком диапазоне градиентов плотности среды $\Delta\rho$

(период плавучести в жидкости $T_b = 2\pi\sqrt{\rho/(g\Delta\rho)} = 4...20$ с,

g — ускорение свободного падения).

Методика исследования. Эксперименты выполняли в лабораторном бассейне размером 70×25×70 см, заполненном непрерывно стратифицированным раствором поваренной соли NaCl (концентрация линейно меняется с глубиной). Кинематические вязкости раствора и воды ($\nu_g = 0,01$ см²/с) отличаются незначительно. В качестве источника возмущений в среде (излучателя) использовали диски из нержавеющей стали или оргстекла радиусом 3 и 6 см. Излучатель крепили на стержне, соединенном с электродвигателем через гибкий вал и понижающий редуктор. Электродвигатель питался от источника постоянного тока (до 24 В) с регулируемой частотой вращения от 1 до 100 мин⁻¹. Устройство позволяет поворачивать весь механизм привода вокруг вертикальной оси и располагать плоскость диска как вдоль луча зрения, так и перпендикулярно ему.

Для визуализации течений использовали интерференционно-теневого прибор ИАБ-458 с диаметром поля зрения 230 мм. Вследствие зависимости коэффициента преломления световых лучей от плотности среды бассейн с плоскими стенками, заполненный линейно-стратифицированной жидкостью, эквивалентен оптической призме, поворачивающей лучи на угол ϕ . Осветительная и приемная части расположены в одной вертикальной плоскости напротив друг друга. Для компенсации отклонения лучей теневой прибор устанавливали на регулировочной платформе, соединенной с подставкой двумя вертикальными ходовыми винтами. С помощью дополнительного горизонтального ходового винта платформу поворачивали в горизонтальной плоскости. После настройки каждую подставку фиксировали четырьмя винтовыми стяжками. Таким образом, данная конструкция позволя-

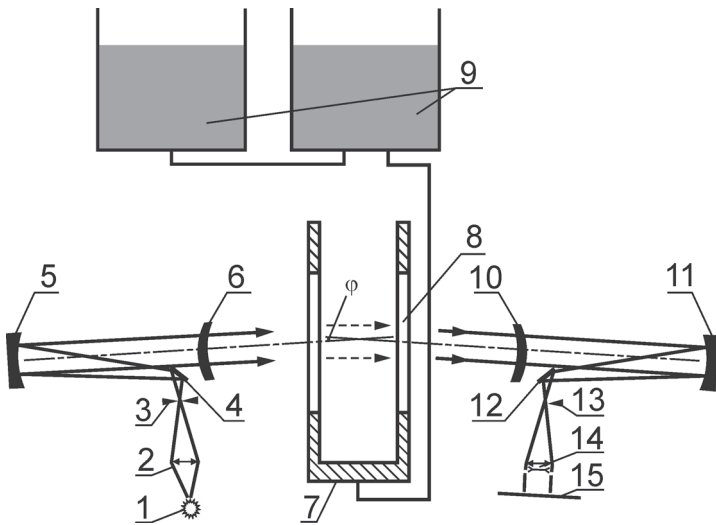


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки, основанная на приборе ИАБ-458:

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — осветительная щель; 4, 12 — поворотные зеркала; 5, 11 — главные сферические зеркала; 6, 10 — корректирующие мениски; 7 — запорная регулирующая арматура; 8 — бассейн; 9 — накопительные баки; 13 — визуализирующая диафрагма; 14 — оптическая система; 15 — плоскость наблюдения

ет независимо с высокой степенью точности регулировать пространственное и угловое положения осветительной и приемной частей прибора (6 степеней свободы).

Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Основным элементом является бассейн 8, в боковые стенки которого вставлены высококачественные оптические иллюминаторы, не искажающие фронт проходящих световых волн. Методом последовательного вытеснения снизу бассейн заполняют стратифицированной по плотности (солёности) жидкостью с помощью гидросистемы по традиционной схеме, включающей два накопительных бака 9, смеситель и соединительные шланги с запорной регулирующей арматурой 7. Установленное над бассейном устройство вертикальных перемещений датчика (сканер), позволяет смещать его по вертикали с постоянной скоростью на расстояние до 50 мм, быстро переводить с одного близкого горизонта на другой и устанавливать в выбранной области бассейна. Собственно оптическая система включает: источник света 1 (лампу накаливания); конденсор 2, формирующий изображение в плоскости регулирующей диафрагмы; осветительную щель 3; плоские поворотные зеркала 4, 12, направляющие пучки света на главные сферические зеркала 5, 11; корректирующие мениски 6, 10; визуализирующую диафрагму 13 (нить, нож, дифракционная решетка), оптическую систему преобразования изображения 14 для построения образа изучаемой картины течения в плоскости наблюдения 15.

Лабораторный бассейн и баки установлены на массивном металлическом столе, опирающемся на виброопоры для уменьшения механических помех. На собственных регулируемых фундаментах расположены: осветительная и прием-

ная части теневого инструмента; оптическая скамья с оптической регистрирующей аппаратурой, сопряженной с теньвым прибором вспомогательным объективом. Жесткий фундамент обеспечивает надежную регистрацию теневого изображения при отсутствии жесткой механической связи прибора и видеоаппаратуры.

Результаты экспериментов, выполненных при горизонтальном расположении плоскости диска, приведены на рис. 2. Скорость вращения диска регулировали напряжением питания двигателя. Чувствительный элемент располагали на расстоянии 7 см от оси диска. Все эксперименты, проведенные в начальной стадии вращения диска, направлены на исследование возможностей как преобразователя, так и систем наблюдения. Период плавучести и погрешность ее определения составили соответственно $T_b = 7$ с и 2,5 %. Линейная скорость вращения кромки диска равна 0,25 м/с (напряжение питания двигателя 10 В). Регистрограммы (см. рис. 2) приведены для разных положений ИП относительно зоны перемешивания: кривая I соответствует сигналам преобразователя при расположении чувствительного элемента в плоскости вращения диска, а кривая II — при вертикальном смещении чувствительного элемента вверх на 5 мм, в поле внутренних волн. В первом случае в сигнале присутствуют мелкомасштабные возмущения, кривая II более регулярная. Стрелками отмечены положения на оси времени соответствующих кадров а — з, приведенных на врезках. Вторжение частично перемешанной тонкоструктурированной жидкости около диска сопровождается генерацией внутренних волн, которые в теньвом изображении визуализируются темными и светлыми полосами. Границы полос — гребни и впадины внутренних волн, на ранних стадиях процесса — правильной формы (рис. 2, а, в), на более поздних — сложной (рис. 2, б, г).

Толщину и скорость продвижения границ области перемешивания рассчитывали по регистрограммам с учетом градуировок [15]. Период плавучести в экспериментах не превысил 10 с, что наложило ограничения, связанные с внутренним масштабом длины (вязким волновым масштабом

$\delta_N^y = \sqrt{\nu T_b / 2\pi}$), на линейные размеры неоднородностей, составляющие несколько миллиметров. По предварительно зарегистрированному периоду плавучести оценивали градиент плотности (солёности) и далее по регистрограмме — вариации электрической проводимости, а по связи последней с плотностью среды — изменения плотности в соседних слоях. Во время динамических испытаний (оценке времени реакции на внешнее возмущение [14]) градуировку выполняли с помощью вертикального перемещения ИП в рабочей среде с постоянной скоростью, равной 3 мм/с. Стратификация среды во всех случаях была около 7 с, градиент плотности $\partial \rho / \partial z = 1,4 \cdot 10^{-3}$ г/см⁴. Опыты показали, что при вертикальном смещении ИП до 5 мм время реакции не превышает 5 с.

Из анализа регистрограммы делаем вывод, что вертикальное смещение частиц жидкости в слоях между темными и светлыми полосами (гребнями и впадинами внутрен-

них волн) не превышает 0,1 мм. Скорость перемещения слоев по горизонтали составляет 1 мм/с. Пространственное разрешение преобразователя не меньше 0,1 мм при скорости смещения перемешанной области относительно чувствительного элемента около 3 мм/с.

Разработанный преобразователь с высокими быстродействием и пространственным разрешением можно применять для исследования гидродинамических процессов в лабораторных условиях в относительно небольших бассейнах, а простая конструкция ИП позволяет использовать его в морских условиях (с указанными метрологическими характеристиками — при исследовании тонкой структуры [15]).

Работа выполнена при поддержке РАН (проект ОЭМПУ РАН IV-4-12 «Динамика формирования и взаимодействия волн и вихрей в сплошных средах») и РФФИ (грант 15-01-09235).

Л и т е р а т у р а

1. Thorpe S. A. The excitation, dissipation and interaction of internal waves in the deep ocean // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. N. 3. P. 328—338.
2. Чунчузов Е. П. О вкладе внутренних гравитационных волн в энергетический баланс атмосферы на уровне менопаузы // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15. № 10. С. 1087—1091.
3. Ильиных Ю. С., Чашечкин Ю. Д., Левцов В. И., Беляев В. С. Прецизионный гидрологический зонд для океанологических исследований // Измерительная техника. 1995. № 8. С. 39—42.
4. Смирнов Г. В., Лавров С. А., Рабинович М. Е., Светличный А. С. Первичные измерительные преобразователи океанографических параметров. Владивосток: Издательство Дальневосточного университета, 1990.
5. Ильиных Ю. С., Чашечкин Ю. Д. Прецизионные методы измерения физико-химических характеристик океана // Измерительная техника. 1993. № 9. С. 56—64.
6. Ильиных Ю. С., Чашечкин Ю. Д. Точечные, распределенные и градиентные измерительные преобразователи в океанологических исследованиях // Измерительная техника. 1994. № 3. С. 15—20.
7. Левцов В. И., Чашечкин Ю. Д. Высокочувствительный контактный преобразователь удельной электропроводности жидкости // Тезисы докл. 1 Всесоюз. конф., ВНИИФТРИ, М., 1980. С. 46—50.

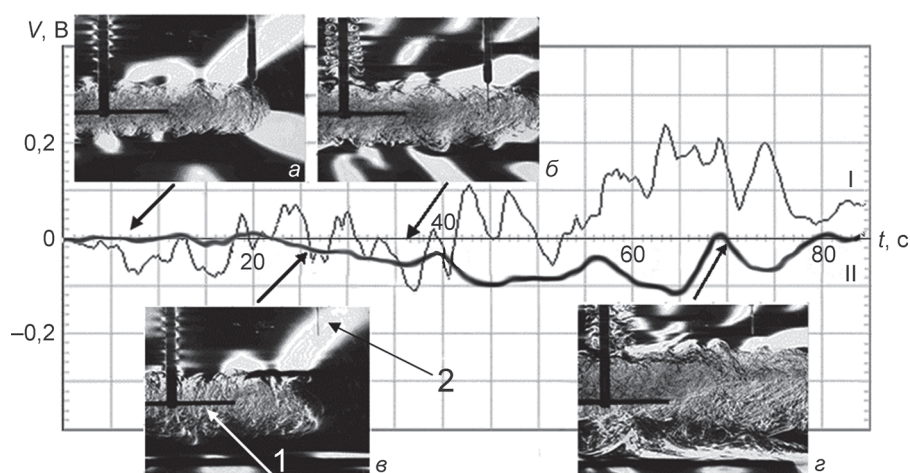


Рис. 2. Регистрограммы преобразователя электрической проводимости 2 в потоке перемешиваемой жидкости (I) и вне потока (II) — регистрируются только внутренние волны; стрелки на оси t указывают время получения кадров а — г; цифрой 1 обозначен диск

8. Попов В. А., Чашечкин Ю. Д. Динамические характеристики контактных преобразователей удельной электрической проводимости // Метрология. 1983. № 11. С. 38—44.
9. Ильиных Ю. С., Чашечкин Ю. Д. Оценка динамических характеристик измерителя скорости звука в непрерывно стратифицированной жидкости // Измерительная техника. 1993. № 2. С. 64—65.
10. Беляев В. С., Неклюдов В. И., Чашечкин Ю. Д. Динамические измерения параметров стратифицированных течений // Динамические измерения: Тезисы докл. IV Всесоюз. Симпозиума, Л., 1984, С. 156—160.
11. Широков К. П. Основные понятия теории динамических измерений // Измерительная техника. 1975. № 12. С. 9—14.
12. Неклюдов В. И., Чашечкин Ю. Д. Экспериментальное исследование генерации и взаимодействия двумерных монохроматических внутренних волн // Препринт ИПМ АН СССР № 356. М., 1988.
13. Левцов В. И., Чашечкин Ю. Д. Оценка пороговой чувствительности контактного преобразователя удельной электропроводности // Измерительная техника. 1979. № 4. С. 42—44.
14. Гвоздев А. В., Неклюдов В. И., Чашечкин Ю. Д. Сравнительный анализ динамических характеристик контактных преобразователей в непрерывно стратифицированной жидкости // Измерительная техника. 1990. № 3. С. 33—35.
15. Океанология. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана / Под ред. А. С. Моница. М.: Наука, 1978.

Дата принятия 02.03.2015 г.