

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.463

Я. Д. АФАНАСЬЕВ, С. И. ВОРОПАЕВ, И. А. ФИЛИППОВ

МИКРОДАТЧИК ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЙ
В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ

Приводится конструкция и характеристики одноэлектродного датчика электропроводности с высоким пространственным разрешением. Исследовано влияние неоднородности проводящей среды, гидродинамического и теплового эффектов на качество измерений.

Для измерения тонкой структуры поля плотности часто используются миниатюрные датчики электропроводности. Взяв за основу датчик со сферическим электродом [5], который не получил распространения из-за сравнительно низкого пространственного разрешения, был изготовлен миниатюрный сферический электрод с хорошей стабильностью и приемлемым пространственным разрешением. Ниже приводится конструкция датчика, даны оценки его пространственного разрешения, динамической погрешности, влияния неоднородности среды, анемометрического эффекта.

Конструкция микродатчика. Рабочий электрод датчика — сфера радиусом $R_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ см, изготовленная из платиновой проволоки диаметром $d = 2 \cdot 10^{-3}$ см в дуговом разряде в воде. Проволока со сферой на конце вставлена в стеклянный капилляр, который заполнен эпоксидной смолой или заварен.

Чувствительность датчика определяется уровнем шумов, который зависит от состояния рабочей поверхности электрода. При покрытии электрода платиновой чернью шумы падают до уровня, не превышающего уровень шумов усилительного устройства, и в пересчете на соленость их среднеквадратичная величина не превышает $\sim 10^{-4}\%$ 0. **Стабильность** в значительной степени определяется постоянством площади поверхности электрода, имеющей контакт с соленой водой. Из-за различия в коэффициентах термического расширения материала электрода и корпуса датчика между ними имеются микротрещины, в которые затекает вода. Оценка отношения Ω/Ω_0 (полного сопротивления датчика Ω с учетом затекания к сопротивлению Ω_0 без учета затекания) дает для сферического электрода значение 0,993, а для датчика с торцевым электродом — 0,55 при глубине затекания, составляющей лишь 2% от диаметра проволоки.

Пространственное разрешение. Сопротивление сферического объема среды с радиусом r и проводимостью σ_0 , которая окружает сферический электрод радиуса R_0 , равно [3]: $\Omega(r) = (4\pi\sigma_0)^{-1}(R_0^{-1} - r^{-1})$. Следовательно, 90% вклада в полное сопротивление дает сферический объем среды с радиусом $10 R_0$ и для пространственного разрешения (δ) датчика по уровню 0,9 получаем оценку $\delta = 20 \cdot R_0 = 10^{-1}$ см. **Неоднородность проводящей среды** приводит к тому, что сопротивление, измеряемое датчиком, следует относить к точке среды, смещенной на некоторое расстояние Δz от центра датчика. Аналитическое решение задачи о сопротивлении сфе-

ры в соленой воде с постоянной по вертикали частотой Брента — Вайсяля N дает оценку $\Omega = \left[4\pi\sigma_0 R_0 \left(1 - \frac{5}{6} \left(\frac{\gamma\rho_0 N^2}{g\sigma_0} R_0 \right)^2 \right) \right]^{-1}$. (Для связи проводимости σ раствора поваренной соли с плотностью раствора ρ использовалось соотношение [5]: $\sigma - \sigma_0 = \gamma(\rho - \rho_0)$, где $\sigma_0 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, $\rho_0 = 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $\gamma = 2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$). Второе слагаемое здесь учитывает неоднородность проводимости среды, g — ускорение силы тяжести. Так, если проводимость на уровне центра датчика равна σ_0 , то измеренное значение будет «сдвинуто» по вертикали на величину $\Delta z \simeq \frac{\gamma\rho_0 N^2}{g\sigma_0} R_0^2$. При

$N = 1 \text{ с}^{-1}$ этот сдвиг для нашего датчика пренебрежимо мал. **Гидродинамические эффекты.** При движении датчика проявляется эффект дрейфа частиц в неоднородной по проводимости жидкости, увлекаемых из своего первоначального положения при прохождении твердого тела [4]. Конец стеклянного капилляра с вынесенным вперед датчиком отогнут под углом 45° к направлению движения датчика. В такой геометрии влиянием корпуса, по крайней мере на ближайшее поле течения вокруг электрода, можно пренебречь. При $N = 1 \text{ с}^{-1}$ и скорости движения датчика $U = 3 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ для чисел Рейнольдса $Re = 2UR_0/\nu$ и Ричардсона $Ri = 4N^2 R_0^2 / U^2$ получаем оценки $Re \simeq 3$, $Ri \simeq 10^{-5}$ ($\nu = 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ — кинематическая вязкость). При этом движение жидкости, обтекающей датчик, будет ламинарным, а силы плавучести можно не учитывать. Численные расчеты сопротивления Ω движущегося датчика с использованием аналитических зависимостей [4] для дрейфа частиц показали, что погрешность, обусловленная гидродинамическим эффектом дрейфа частиц жидкости, мала и имеет тот же порядок величины, что и погрешность, обусловленная неоднородностью проводящей среды. **Тепловые эффекты.** Ток, проходящий в цепи, нагревает жидкость вблизи датчика, меняя ее проводимость и, следовательно, измеряемое сопротивление. Аналитическое рассмотрение баланса выделяющегося тепла позволило получить оценки сопротивления Ω датчика. Для неподвижного или движущегося с малой скоростью датчика (при этом число Пекле $Pe = UR_0/k \ll 1$; k — коэффициент термодиффузии) получена строгая оценка: $\Omega \simeq (4\pi\sigma_0 R_0)^{-1} \left[1 - \frac{1}{3} \times \right.$
 $\left. \times \alpha \varphi_0^2 \sigma_0 / c_p \rho k \right]$, где c_p , ρ — удельная теплоемкость и средняя плотность

жидкости; $\varphi_0 = 0,5 B$ — потенциал электрода; $\sigma = \sigma_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$ — связь проводимости и температуры среды; $\alpha = 2 \cdot 10^{-2} \text{ град}^{-1}$ [5]. Для движущегося с большой скоростью датчика ($Pe \gg 1$) получена асимптотическая оценка: $\Omega \simeq (4\pi\sigma_0 R_0)^{-1} \left[1 - \frac{1}{3} \alpha \varphi_0^2 \sigma_0 / c_p \rho U R_0 \right]$. Таким образом, в случае движущегося со скоростью $U = 3 \text{ мс} \cdot \text{с}^{-1}$ датчика ($Pe \simeq 10$) сопротивление меняется на $0,1\%$. В случае же неподвижного датчика эта погрешность в 10 раз больше. Уменьшая величину питающего датчик напряжения, можно уменьшить погрешность, однако при этом уменьшается крутизна преобразования. Если же, наоборот, увеличить это напряжение, то получаем миниатюрный датчик для измерения скорости течения в однородной по проводимости жидкости с характеристикой $1 - 4\pi\sigma_0 R_0 \Omega \sim U^{-1}$.

Некоторые примеры измерений, выполненных с помощью рассмотренного микродатчика, можно найти в [1, 2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Я. Д., Ворopaев С. И., Филиппов И. А. Модель грибовидных течений в стратифицированной жидкости при непрерывном действии источника импульса // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. 1989. Т. 25. № 7. С. 741—750.
2. Афанасьев Я. Д., Ворopaев С. И. Модель грибовидных течений в стратифицированной жидкости при кратковременном действии источника импульса // Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. 1989. Т. 25. № 8. С. 843—851.
3. Gibson C. H., Schwarz W. H. Detection of conductivity fluctuation in a turbulent flow field // J. Fluid Mech. 1963. V. 16. Pt. 3. P. 357—364.

4. *Lighthill M. J.* Drift//J. Fluid Mech. 1956. V. 1. Pt. 1. P. 31—53.
5. *Martin S., Simmons W., Wunsch C.* The excitation of resonant triads by single internal waves//J. Fluid Mech. 1972. V. 53. Pt. 1. P. 17—44.

Институт океанологии им. П. П. Ширшова
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
12.V.1989
После доработки
9.I.1990

Y a. D. AFANASYEV, S. I. VOROPAYEV, I. A. FILIPPOV

CONDUCTIVITY MICROPROBE FOR FINE STRUCTURE MEASUREMENTS IN STRATIFIED FLOWS

A simple single-electrode conductivity probe for density measurements in stratified flows is proposed. Stability, space resolution, dynamical and thermal effects are investigated.