

# ИЗМЕРЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕСИ ПО ПУЛЬСАЦИЯМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ

В.З. Дыкман, О.И. Ефремов

Морской Гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: [oaoi@alfa.mhi.iuf.net](mailto:oaoi@alfa.mhi.iuf.net)

*В статье рассматривается модификация кондуктометрического метода исследования концентрации частиц взвеси для измерений *in situ*, базирующаяся на использовании точечного электрода малого диаметра. Описываются некоторые особенности структурной схемы прибора, рассчитаны характеристики его чувствительности и быстродействия.*

**1. Введение.** Исследование движения взвеси в прибрежной области моря обладает рядом особенностей. Прежде всего, в этой зоне в периоде штормов во взвешенном состоянии могут находиться крупные частицы, концентрация которых в основном определяет перенос обломочной массы волнами и береговыми течениями.

Скорость оседания гидравлически крупных частиц достигает величины порядка  $10 \text{ см с}^{-1}$ , и поэтому локальные и быстропеременные флуктуации интенсивности поля скорости течения, включая его турбулентную составляющую, могут сопровождаться соответствующими пульсациями массовой концентрации взвеси. Для изучения корреляционных связей между этими характеристиками нужно осуществлять одновременные и совмещенные в пространстве измерения флуктуаций скорости течения и массовой концентрации взвеси.

Измерение трех компонент высокочастотных и достаточно мелкомасштабных флуктуаций вектора скорости течения в поверхностных волнах, в том числе в прибрежной зоне, может осуществляться с помощью недавно разработанного в МГИ НАНУ электромагнитного датчика с круговой диаграммой направленности [1,2]. Для комплексирования с таким датчиком наиболее пригодным является кондуктометрический метод измерения концентраций

взвеси, основанный на различии электропроводности морской воды и взвешенной частицы.

Кондуктометрический метод реализован в известном счетчике Коултера, достаточно подробно описанном в [3]. Он представляет собой лабораторный прибор, в котором проба воды под давлением пропускается через узкое калиброванное отверстие диаметром порядка 0,1 мм. Непроводящие частицы взвеси, с большой скоростью пропускаемые через малый измерительный объем, уменьшают сечение проводника и формируют узкие импульсы напряжения, амплитуда которых зависит от размера частицы. Непосредственный счет импульсов с применением амплитудного анализатора позволяет точно и оперативно определять числовую и объемную концентрацию взвеси в пробах морской воды.

Применение кондуктометрического метода для измерений концентраций взвеси *in situ* требует дополнительного анализа ряда факторов, обычно не принимаемых во внимание при конструировании лабораторного прибора.

**2. Концентрация линий тока.** Задача о распределении токов в жидкости с удельной проводимостью  $\sigma$  в определенной степени аналогична задаче электростатики о распределении электрического поля в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . В частности, если в среду введены токовые электроды, то величина и направление токов в них аналогичны величине и знаку электрических зарядов. Аналогия становится искусственной при наличии в задаче изолирующих поверхностей, поскольку сред с  $\epsilon = 0$  в электростатике нет.

Изолирующие поверхности широко используются для концентрации линий токов в малых объемах жидкости. Уже упоминался счетчик Коултера с калиброванным отверстием в изолирующем стакане. В ряде STD-зондов для измерения удельной электрической проводимости воды применяются контактные датчики с достаточно узкими электродными каналами. В этих случаях всегда возникает проблема промываемости канала, причем часто она решается путем принудительной прокачки жидкости через измерительный объем. Мы ориентируемся на минимальное возмущение среды датчиком пульсаций электропроводности, и соответственно этому роль изолирующих по-

верхностей в электродной конструкции должна быть малой. В таком случае известные электростатические аналогии вполне применимы.

Электростатический потенциал на больших расстояниях  $r$  от ограниченной системы зарядов, характеризующейся размером  $l$ , может быть расположен в ряд по степеням  $l/r$  [4]:

$$\varphi(r) = \frac{q_0}{r} + \frac{\bar{p}}{r^2} + 2ql^2 \frac{P_2(\cos \theta)}{r^3} \quad (1)$$

Главным членом в разложении (1) является потенциал точечного заряда  $\varphi = q_0 / r$ . Его смысл очевиден: на больших расстояниях детали распределения несущественны и система действует как точечный заряд, помещенный в начало координат. Но если полный заряд  $q_0 = 0$ , то первым не исчезающим членом разложения оказывается потенциал диполя с моментом  $\bar{p}$ , описываемый вторым членом в правой части (1). Третий член разложения, называемый квадрупольным, может оказаться главным при более симметричном расположении зарядов, когда дипольный момент  $\bar{p}$  мал или равен нулю. В (1) выписан потенциал так называемого линейного квадрупольного, когда заряды  $q, -2q, q$  расположены на одной оси на расстоянии  $l$  друг от друга,  $P_2(\cos \theta)$  — полином Лежандра.

Потенциал заряда спадает как  $1/r$ , потенциал диполя как  $1/r^2$ , потенциал квадрупольного как  $1/r^3$ . В аналогичной токовой задаче это означает, что для симметричной системы электродов большая часть линий тока замыкается внутри этой системы и сравнительно меньшая часть проникает в окружающую среду. Эти соображения важны для измерителя пульсаций электропроводности как такового, но для прибора, реагирующего на флуктуации взвеси, следует обратить внимание на структуру поля непосредственно вблизи отдельного токового электрода.

Плотность линий тока возрастает по мере приближения к токовому электроду и, в конечном счете, ограничивается лишь его физическими размерами. Следует ожидать, что частицы взвеси будут заметно модулировать сечение жидкого проводника, если диаметр точечного электрода сравним с их

размерами. Оценочные расчеты показывают, что при диаметре электрода 0,1 мм реальный измерительный объем составит примерно  $1 \text{ мм}^3$ . Детальные расчеты чувствительности приводятся ниже в п. 5. Однако уже сейчас ясно, что по сравнению со счетчиком Коултера, у которого измерительный объем по крайней мере на два порядка меньше, проектируемый прибор будет реагировать на более крупные частицы взвеси. Кроме того, очевидно, что ширина импульсов, которая при измерениях *in situ* определяется естественной скоростью потока, не будет одинаковой, как в лабораторном приборе.

**3. Скин - эффект.** Поскольку электропроводность морской воды обычно измеряется на переменном токе частоты  $\omega$ , имеет смысл рассмотреть возможную роль токов смещения по сравнению с токами проводимости. Соотношение между этими токами описывается уравнением Максвелла для  $\text{rot } \bar{H}$ ,

$$\text{rot } \bar{H} = \frac{4\pi}{c} \sigma \bar{E} + \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2)$$

и определяется выражением для критической частоты  $\omega_0$ , на которой токи проводимости и смещения в правой части (2) оказываются равными [5]:

$$\omega_0 = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

При  $\omega \gg \omega_0$  морская вода ведет себя как диэлектрик, при  $\omega \ll \omega_0$  — как проводник. Подставляя в (3) значения  $\sigma = 4 \text{ См/м} = 36 \cdot 10^9 \text{ 1/с}$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 72$ , получим  $\omega_0 = 2\pi \cdot 10^9 \text{ 1/с}$ , или  $f_0 = \omega_0/2\pi = 10^9 \text{ Гц} = 1000 \text{ МГц}$ .

Можно сделать вывод, что на частотах до 1 МГц токи смещения пренебрежимо малы и главную роль играют токи проводимости.

Глубина проникновения электромагнитного поля в проводник характеризуется толщиной скин-слоя  $\delta$  [5]:

$$\delta = c(2\pi\sigma\omega)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

При этом амплитуда напряженности электрического поля  $E$ , а значит и плотности электрического тока  $j = \sigma E$ , спадают с увеличением расстояния  $z$  вглубь от по-

верхности плоского проводника по экспоненциальному закону [4]:

$$E = E_0 e^{-\frac{z}{\delta}} \quad (5)$$

Наличие скин-слоя можно интерпретировать как зависящее от частоты уменьшение сечения жидкого проводника. В морской воде при  $\sigma = 4 \text{ См/м}$  на частоте  $f = 1 \text{ МГц}$  величина  $\delta$  по формуле (4) составляет  $\delta_1 = 25 \text{ см}$ , на частоте  $f_2 = 10 \text{ кГц}$   $\delta_2 = 2,5 \text{ м}$ . Можно сделать вывод, что толщина скин-слоя слабо влияет на концентрацию линий тока в морской воде.

В большинстве измерителей электропроводности используются частоты, близкие к  $f_2$ . В нашем случае имеются по крайней мере две причины, требующие повышения несущей частоты. Первая – достаточно малая ширина импульсов, которая при естественных скоростях обтекания до  $1 \text{ м/с}$  может достигать величины порядка одной миллисекунды. Кроме того, при малой площади измерительного электрода, повышение частоты измерительного тока необходимо для уменьшения влияния перехода металл-электролит, обладающего емкостными свойствами. В приборе используется несущая частота  $500 \text{ кГц}$ .

**4. Пограничный слой и термоанемометрический эффект.** Если значительная часть линий тока проходит через вязкостный пограничный слой, измеряемые характеристики флуктуаций электропроводности будут искажены по сравнению с их значениями для невозмущенной среды. Чтобы вывести точечный токовый электрод за пределы пограничного слоя, необходимо знать толщину последнего для реальных размеров электродной конструкции и диапазона скоростей обтекания. Приближенная оценка толщины пограничного слоя  $d$  обычно выполняется по формуле [5]:

$$\frac{d}{l} \approx \sqrt{\frac{\nu}{u_0 l}} \quad (6)$$

Здесь  $l$  – характерный размер электродной конструкции,  $\nu$  – кинематическая вязкость воды,  $u_0$  – средняя скорость обтекания. Формула (6) справедлива для тел произвольной формы, в случае значительной

асимметрии под  $l$  надо понимать размеры тела в направлении обтекания. Для значений  $\nu = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $l = 4 \text{ мм}$ ,  $u_0 = 10 \text{ см/с}$  получаем  $d \approx 0,2 \text{ мм}$ . Можно считать, что электрод диаметром  $100 \text{ мкм}$ , возвышающийся над конструкционной изолирующей поверхностью на  $0,3 \text{ мм}$ , будет выступать за пределы пограничного слоя. Для большего эффекта боковую поверхность выступа необходимо покрыть изоляцией.

При прохождении измерительного тока через исследуемый объем жидкости в нем выделяется некоторое количество тепла. Для небольших токов оно может показаться незначительным, но концентрация тепла в малом измерительном объеме будет давать повышение температуры, которым не всегда можно пренебречь. Зависимость перегрева от скорости обтекания создаст термоанемометрический эффект, заключающийся в модуляции измеряемой электропроводности флуктуациями скорости. Требуются конкретные оценки величины этого эффекта.

Для расчета будем использовать характерное для черноморской воды значение удельной электропроводности  $\sigma = 2,6 \text{ См/м}$ . При диаметре электрода  $100 \text{ мкм}$  сопротивление измерительного объема  $R$  составит  $1150 \text{ ом}$ . Задаваясь величиной измерительного тока  $I = 1 \text{ мА}$ , получим рассеиваемую мощность  $P = I^2 R = 11,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$ , или  $\approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ кал/с}$ . При скорости обтекания  $u_0 = 3 \text{ см/с}$  характерное время нагрева будет  $t_0 = l_0/u_0 \approx 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ . Эквивалентное количество тепла в этом случае составит  $Q \approx 1 \cdot 10^{-5} \text{ кал}$ , а перегрев объема  $1 \text{ мм}^3$  будет  $\Delta T \approx 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$ . Такое повышение температуры приведет к увеличению электропроводности на  $0,23 \text{ \%}$ , и термоанемометрические флуктуации могут дать эффект такого же порядка. Уменьшение измерительного тока до  $0,5 \text{ мА}$  даст снижение перегрева в 4 раза, что позволит уменьшить термоанемометрический эффект. Кроме того, термоанемометрические флуктуации будут заметными в области частот, где значительны флуктуации скорости, т.е. в диапазоне обычных флуктуаций электропроводности. Специфический импульсный сигнал, образующийся при прохождении через измерительный объем взвешенных частиц (сигнал мутности) и занимающий более высокочас-

тотный диапазон, слабо реагирует на пере-  
грев измерительного объема.

**5. Расчёт чувствительности.** На рис. 1 изображена схема прохождения сферической частицы взвеси, имеющей радиус  $b$ , со скоростью  $u$  на прицельном расстоянии  $r$  от электрода с радиусом  $a$ . Поскольку частица считается непроводящей, она уменьшает сечение сферического слоя, окружающего электрод, и формируется импульсное увеличение сопротивления  $\Delta R$ , описываемое выражением:

$$\Delta R = \frac{2\rho b^3}{3\pi(x^2 + r^2)[2(x^2 + r^2) - b^2]} \quad (7)$$

Здесь  $\rho$  – удельное сопротивление жидкости.

Форма импульса  $\Delta R(x)$  при  $b = a$  для двух значений прицельного расстояния  $r_1 = 2a$  и  $r_2 = 5a$  приведена на рис. 2. При большем прицельном расстоянии амплитуда импульса резко уменьшается (как  $r^{-4}$ ), а ширина возрастает пропорционально  $r$  (если пренебречь малым слагаемым  $b^2$  в знаменателе (7)). Амплитуда импульса сопротивления  $g_k$ , формируемого частицей взвеси радиусом  $b_k$ , проходящей на прицельном расстоянии  $r_k$ , в указанном приближении дается выражением:

$$g_k = \frac{\rho b_k^3}{3\pi r_k^4} \quad (8)$$

Предположим, что взвесь состоит из частиц одного радиуса  $b$ , тогда амплитуда (8) будет зависеть только от прицельного расстояния  $r_k$ . В соответствии со схемой рис. 1 процесс обтекания точечного электрода проводящей жидкостью, содержащей непроводящие частицы взвеси, представляет собой сумму большого числа кратковременных импульсов и может описываться функцией

$$y(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g_k V(t - t_k). \quad (9)$$

Форма импульсов дается функцией  $V(t)$ , а их амплитуда  $g_k$  есть случайная величина, зависящая от прицельного расстояния  $r_k$ . Последовательность случайных моментов времени  $t_k$  представляет собой процесс Пуассона со средней скоростью отчетов  $\lambda$ . Среднее значение  $y(t)$  дается выражением [7]:

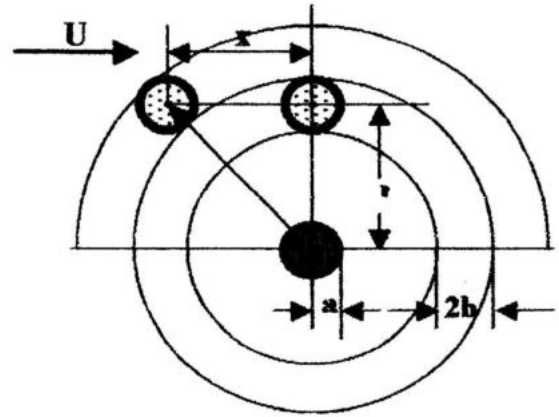


Рис. 1 – Схема прохождения сферической частицы

$$My(t) = \alpha \cdot Mg_k \cdot \int_{-\infty}^{\infty} v(t) dt \quad (10)$$

Интеграл в правой части (10) может быть выражен через прицельное расстояние  $r$  и скорость обтекания  $u$ , с учетом соотношений:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + r^2)^2} = \frac{\pi}{2r^3}, \quad (11)$$

$$\Delta t = \frac{2l}{u} = \frac{\pi r}{2u}. \quad (12)$$

Здесь  $2l$  – ширина нормированного импульса (см. рис. 2). Минимальное прицельное расстояние  $r_{\min} = a + b$ , максимальное  $r_{\max}$  можно определить из (8):

$$r_{\max} = \left( \frac{\rho b^3}{3\pi \Delta R_{\min} u} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (13)$$

Здесь  $\Delta R_{\min}$  – минимально различимая амплитуда импульса сопротивления, зависящая от уровня шумов первого каскада усилителя  $V_m$  и величины измерительного тока  $I$ :

$$\Delta R_{\min} = \frac{V_m}{I}. \quad (14)$$

Определяемая из геометрических соображений вероятность прохождения частицы



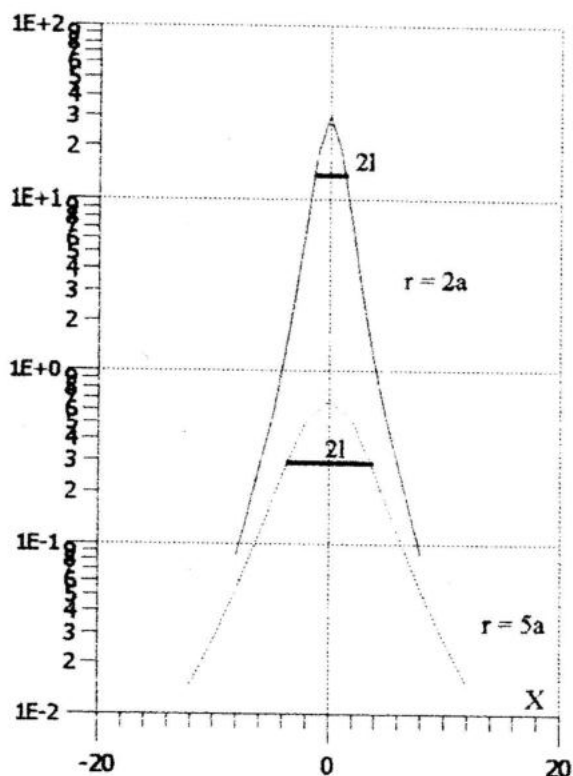


Рис. 2 – Форма импульса при прохождении частицы на прицельном расстоянии  $r = 2a$  и  $r = 5a$

пропорциональна прицельному расстоянию  $r$ :

$$\varphi(r)dr = \frac{2rdr}{r_{\max}^2} \quad (15)$$

Из соотношений (8), (12) и (15)

$$Mg_k \int_{-z}^{\infty} v(t)dt = \frac{\rho b^3}{3r_{\max}^2 U} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dr}{r^2} \approx \frac{\rho b^3}{3r_{\max}^2 r_{\min} U} \quad (16)$$

Средняя скорость отсчетов  $\alpha$  может быть выражена через массовую концентрацию взвесей в единице объема  $C$  и плотность частиц  $d$ :

$$\alpha = \frac{3Cur_{\max}^2}{8b^3 d} \quad (17)$$

Перемножая в соответствии с (10) выражения (16) и (17), получаем характеристику чувствительности прибора:

$$My(t) = \frac{\rho C}{8r_{\min} d} \quad (18)$$

Итоговое выражение не содержит скорости обтекания  $u$ , а также параметра  $r_{\max}$ . Отсутствует и явная зависимость от радиуса частицы  $b$ , поэтому в выражении (18)  $C$  может означать суммарную массовую концентрацию, если плотность  $d$  не зависит от размера частиц взвеси, как это имеет место для песка. Параметр  $r_{\min}$  в этом случае является тарировочным и, вообще говоря, может зависеть от гранулометрического состава взвеси.

Переходя к напряжению с помощью соотношения  $z(t) = Iy(t)$ , полагая  $r_{\min} = 2a$  и вводя коэффициент усиления  $K$ , получим:

$$Mz(t) = \frac{\rho CIK}{16ad} \quad (19)$$

Для расчета используем значения  $\rho = 0,385 \text{ ом} \cdot \text{м}$ ,  $C = 1 \text{ г/л}$ ,  $d = 2,65 \text{ кг/л}$ ,  $I = 0,5 \text{ мА}$ ,  $K = 10^3$ ,  $a = 0,05 \text{ мм}$ .

В результате получим  $Mz(t) = 45,4 \text{ мВ}$ . Это значение характеризует размах сигнала на выходе интегратора. Осреднение по множеству в приборе заменяется интегрированием по времени, поскольку процессы  $y(t)$  и  $z(t)$  считаются стационарными и эргодическими [7].

**6. Особенности структурной схемы измерителя концентрации взвеси.** В выражениях для чувствительности (18) и (19) удельное сопротивление воды  $\rho$  присутствует в качестве множителя, а значит, оно должно контролироваться и при тарировке, и в процессе измерений. Среднее значение электропроводности, ее флуктуации и концентрация взвесей могут быть одновременно измерены одним датчиком, при условии спектрального разделения этих сигналов. Канал средней электропроводности занимает при позиционных измерениях диапазон от нулевой частоты до частоты  $\sim 0,01 \text{ Гц}$  и не требует большого усиления сигнала. Пульсации электропроводности, которые обычно измеряются диапазоне от  $0,1 \text{ Гц}$  до  $10-20 \text{ Гц}$ , выделяются соответствующим полосовым фильтром и дополнительно уси-

ливаются. Специфический импульсный сигнал концентрации взвесей занимает еще более высокочастотную область, от  $\sim 30$  Гц до 1 кГц, и также должен быть выделен полосовым фильтром. Для восстановления постоянной составляющей импульсов перед интегрированием требуется вторичное детектирование. Схема прибора, в котором осуществляются указанные операции, приведена на рис. 3.

Здесь уместно замечание о величине измерительного тока  $I$  в выражении для чувствительности (20). Ограничение тока связано с перегревом измерительного объема вокруг точечного электрода малого диаметра. Такой перегрев в меньшей степени влияет на измерение средней электропроводности и является более существенным для ее пульсаций, из-за термоанемометрического эффекта. Если эти величины измерять отдельно, например, с помощью электрода большего диаметра, то в схеме измерения концентрации взвесей ток можно существенно увеличить, получая прямо пропорциональный выигрыш в чувствительности.

**7. Вероятностная структура сигнала и быстродействие прибора.** Количественная концентрация крупных частиц взвеси в единице объема намного меньше, чем мелких, но именно первые дают самый существенный вклад в объемную и массовую концентрацию. Прохождение крупных частиц через малый измерительный объем является редким событием даже при больших массовых концентрациях взвеси, характерных для придонного слоя в период штормов. Средняя скорость отсчетов  $\alpha$  из выражения (17) при  $C = 0,25$  г/л,  $u = 0,2$  м/с,  $b = 0,3$  мм,  $d = 2,65$  г/см<sup>3</sup> оставляет  $\alpha \approx 30$  имп/с.

Формально скорость отсчетов с уменьшением радиуса частицы должна расти как  $b^{-3}$ , но поскольку при этом уменьшается одновременно  $r_{\max}$  и массовая концентрация  $C$ , реально  $\alpha$  очень слабо зависит от радиуса  $b$ . Время интегрирования в этом случае, из-за необходимости достаточного сглаживания импульсов, по-видимому, не может быть меньше 0,5 с. Однако, с увеличением расстояния от дна, массовая концентрация взвеси при небольшом изменении фракционного состава уменьшается на порядок, и  $\alpha$  будет величиной  $\sim 3$  имп/с. Необходимое время интегрирования при этом уже сравнимо с периодом основной волны, и иссле-

дование корреляционных зависимостей внутри волнового периода становится невозможным.

Положение может спасти применение многоэлектродных датчиков. Поскольку даже для очень крупных частиц  $r_{\max}$  не превышает  $\sim 5$  мм, соответственно разные точечные электроды малого диаметра стано-

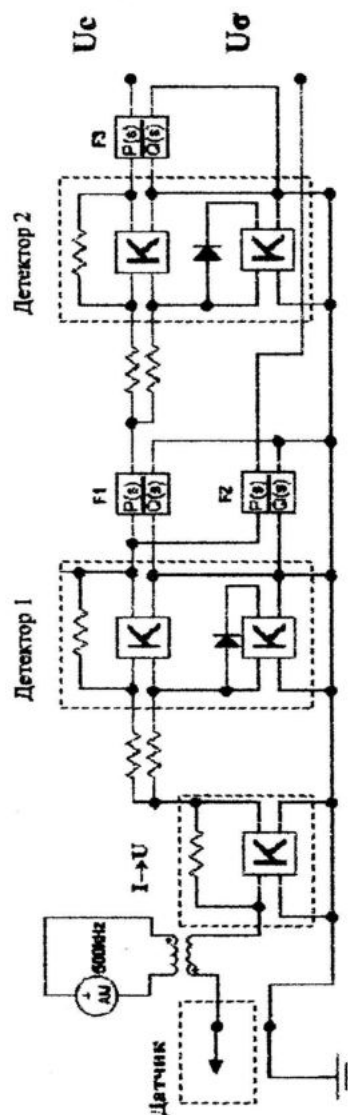


Рис. 3 - Структурная схема измерителя электропроводности и концентрации взвеси

вятся статистически независимыми, а возникающая вероятность повторного счета частиц при размещении электродов на поверхности шара невелика и может учитываться во время тарировки. Суммирование импульсов, например, от восьми точечных электродов позволит в такое же число раз уменьшить время интегрирования и полу-

чить достаточно высокочастотные флуктуации концентраций взвесей, для изучения их корреляции с волновыми движениями жидкости.

**8. Дополнительные возможности метода.** По аналогии с описанным в [3] методом флуктуаций при оптических измерениях концентрации взвесей, можно сделать кондуктометрический прибор двухканальным, т.е. измерять на ряду с первым моментом  $My(t) = \xi$  также и второй момент  $My^2(t)$ , в соответствии с выражением [7]:

$$My^2(t) = \xi^2 + \alpha Mg_k^2 \int_{-\infty}^{\infty} V^2(t) dt. \quad (20)$$

Если среднее значение  $\xi$ , как указывалось выше, явно не зависит от радиуса частицы взвеси  $b$ , то дисперсия сигнала оказывается пропорциональной  $b^3$ . В результате в таком двухканальном приборе, так же как и в оптическом методе флуктуаций, можно наряду с суммарной массовой концентрацией  $C$  определять и средний размер частиц взвеси. Для этого нужно в параллельном канале перед интегрированием импульсов выполнять операцию их возвышения в квадрат.

При измерениях *in situ* существует также принципиальная возможность получения функции распределения частиц взвеси по размерам, путем анализа амплитуд импульсов. Как следует из выражения (8), амплитуда зависит не только от размера частиц, но и от прицельного расстояния  $r$ . Среди всего множества импульсов нужно, таким образом, отобрать для анализа только те, которые проходят на фиксированном прицельном расстоянии  $r_0$ , а значит, имеют одинаковую геометрическую ширину

$$2l = \frac{\pi r_0}{2}. \quad \text{Поскольку реально может кон-}$$

тролироваться только временная ширина  $\Delta t$  зависящая в соответствии с (12) еще и от скорости обтекания  $u$ , требуется непрерывное отслеживание (измерение) и этого параметра. В отличие от счетчика Коултера, в котором геометрическая ширина импульсов и скорость частиц взвеси постоянны, для получения функции распределения по размерам при измерениях *in situ* нужно конструировать более сложное логически и комплексированное с измерителем мгновенной скорости течения устройство.

**9. Заключение.** Проведенный анализ показывает, что модификация кондуктометрического метода исследования концентраций взвесей для измерений *in situ*, базирующаяся на использовании точечного электрода малого диаметра, может применяться в комплексе с электромагнитным трехкомпонентным датчиком флуктуаций скорости течения.

Вариации скорости обтекания датчика и вероятностный разброс прицельных расстояний прохождения частиц взвеси мимо электрода не влияют на измеренные интегральные характеристики – суммарной концентрации и дисперсии ее флуктуаций.

Использование многоэлектродного датчика позволяет существенно повысить быстродействие прибора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дыкман В.З., Ефремов О.И. Электромагнитный датчик для измерения скорости течения // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь : ЭКОСИ – Гидрофизика, 2000. – С. 318-324.
2. Дыкман В.З., Ефремов О.И., Шака В.Т., Ханаев С.А. Измерительный комплекс для исследования процессов обмена в придонной области моря // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2001. – С. 31-40
3. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. – Л. : Гидрометеониздат, 1982. – 278 с.
4. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. – М. : Наука, 1985. – 400 с.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М. : Наука, 1982. – 620 с.
6. Седов Л.И. Механика сплошной среды, т. II – М. : Наука, 1984. – 560 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука, 1973. – 832 с.