
СТАТИСТИЧЕСКАЯ
РАДИОФИЗИКА

УДК 537.811

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОРСКОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ДАТЧИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2023 г. В. Г. Максименко*

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация*

**E-mail: max54@ms.ire.rssi.ru*

Поступила в редакцию 24.11.2022 г.

После доработки 07.12.2022 г.

Принята к публикации 25.12.2022 г.

Предложен метод повышения чувствительности электродного датчика, предназначенного для измерения напряженности сверхнизкочастотного электрического поля в морской воде. Показано, что за счет выбора размера и места расположения электродов на плоском диэлектрическом обтекателе шум движения, обусловленный буксировкой, у такого датчика может быть уменьшен в несколько раз, а чувствительность датчика повышена.

DOI: 10.31857/S0033849423110062, EDN: IHAZWW

ВВЕДЕНИЕ

Электродный датчик электрического поля, представляющий собой пару разнесенных на некоторое расстояние электродов, благодаря своей простоте нашел широкое применение при решении геофизических и связанных задач. Он используется для изучения строения земной коры и разведки полезных ископаемых на шельфе, а также в системах радиосвязи с глубоко погруженными исследовательскими объектами в океане [1–3]. При обследовании большой акватории датчик обычно буксируют за судном на кабель-тросе. При этом основной причиной, ограничивающей чувствительность электродного датчика, является специфический электродный шум движения, представляющий собой флуктуации потенциала электродов, возникающие вследствие движения электродов относительно жидкости. Величина шумового напряжения в выполненных нами экспериментах при движении датчика относительно жидкости была на 10...20 дБ больше, чем в состоянии покоя [4–6]. Экспериментально и теоретически установлена связь пульсаций напряжения между электродами датчика с пульсациями скорости жидкости относительно электродов [5–7]. Такие пульсации скорости могут возникать, например, вследствие вибраций буксирующего датчик кабель-троса, при пересечении датчиком турбулентных вихрей, возникающих в кильватерном следе буксирующего судна, и т.п. В работах [8, 9] предложено для уменьшения шума движения датчик выполнять в виде идентичных плоских секций, вращающихся вокруг общего геометрического центра. Однако сложность реа-

лизации существенно ограничивает применение такого датчика.

Цель работы — повышение чувствительности электродного датчика без усложнения его конструкции.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Как показано нами ранее [7], пульсации потенциала электрода относительно воды, т.е. электродный шум движения, определяются пульсациями потока диффузии кислорода на поверхность электрода. На поверхности буксируемого со скоростью V_0 плоского электрода формируется пограничный слой, для которого характерны значительные силы трения, замедляющие движение жидкости. Внутри пограничного слоя формируется диффузионный слой, характерный тем, что концентрация атомов кислорода в нем меняется от максимального значения на внешней границе диффузионного слоя до минимального, часто нулевого, значения на поверхности электрода. Пульсации скорости воды относительно электрода приводят к модуляции толщины диффузионного слоя, следовательно, и к пульсациям потока диффузии кислорода. По мере удаления от передней кромки электрода толщина как пограничного, так и диффузионного слоя растет, а ламинарное течение жидкости переходит в турбулентное. При турбулентном движении жидкости в пограничном слое флуктуации потока диффузии возрастают, что приводит к увеличению электродного шума. Необходимо создать условия обтекания, при которых пограничный слой на всей

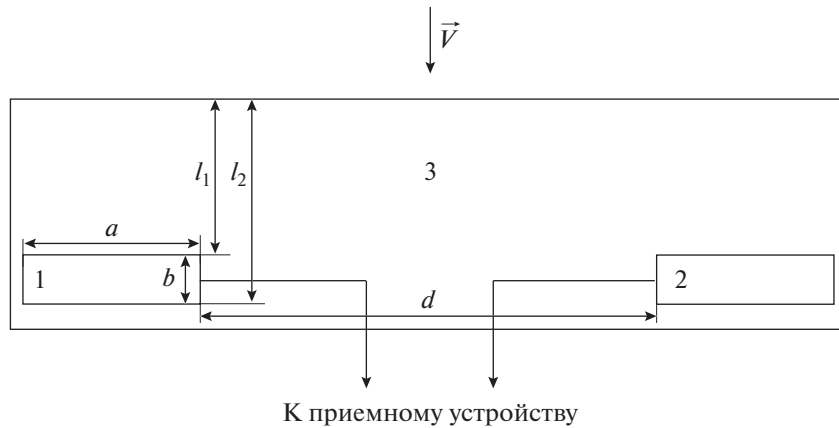


Рис. 1. Схема расположения электродов на обтекатель морского датчика: 1, 2 — первый и второй электроды, 3 — диэлектрический обтекатель; стрелкой показано направление набегающего потока жидкости.

поверхности электрода остается ламинарным. При этом толщина диффузионного слоя должна быть максимально возможной, поскольку это уменьшает градиент концентрации кислорода, что в свою очередь уменьшает скорость диффузии его к поверхности электрода и чувствительность датчика к пульсациям скорости потока. Для обеспечения ламинарности течения максимальное удаление задней границы электрода от передней кромки датчика не должно превышать некоторого критического значения $l_{кр}$. Расстояние $l_{кр}$ можно определить исходя из критического значения числа Рейнольдса. Если при определении числа Рейнольдса в качестве характерного размера взята толщина пограничного слоя δ_0 , а в качестве характерной скорости — скорость жидкости V_0 за пределами пограничного слоя, то $Re_{кр} = V_0 \delta_0 / \nu = 950$ (ν — кинематическая вязкость воды). Разные оценки толщины пограничного слоя отличаются в несколько раз. Для приведенного значения $Re_{кр}$ толщина пограничного слоя принимается равной [10]

$$\delta_0 = 1.72 \sqrt{\nu x / V_0}. \quad (1)$$

В этом случае расстояние $l_{кр}$ от передней кромки датчика составляет

$$l_{кр} = 3.05 \times 10^5 \nu / V_0. \quad (2)$$

При использовании датчика на глубинах до единиц сотен метров в умеренных широтах океана окружающая вода имеет температуру около 15°C и кинематическую вязкость $\nu = 1.1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. При скорости буксировки $V_0 = 5 \text{ м/с}$ получаем $l_{кр} = 6.7 \text{ см}$. В Черном море на глубине 100 м и более вода в любое время года имеет температуру 8°C и $\nu = 1.3 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что увеличивает $l_{кр}$ до 8 см. В полярных широтах океана, особенно в зимнее время, температура еще ниже, а вязкость

выше. Здесь значение $l_{кр}$ достигает 10 см и более. По другой оценке, толщина пограничного слоя равна

$$\delta_0 = 5 \sqrt{\nu x / V_0}, \quad (3)$$

а $Re_{кр} = 3.2 \times 10^5$, при этом за характерный размер принимается расстояние x от передней кромки [10]. Полагая $l_{кр} = x$, при $V_0 = 5 \text{ м/с}$ и $\nu = 1.1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, получаем $l_{кр} \approx 7 \text{ см}$, т.е. практически то же значение, что и выше. Эта величина является нижней оценкой расстояния до начала образования турбулентных вихрей.

Пусть электрод в виде прямоугольной плоской пластины встроен в диэлектрическую плоскую поверхность обтекателя так, что его передняя граница с длиной a параллельна передней кромке диэлектрической поверхности и отстоит от нее на расстояние l_1 , а задняя граница — на расстояние l_2 (рис. 1). Поток диффузии кислорода на электрод определяется по формуле [11]

$$I = \int_{l_1}^{l_2} a \frac{D c_0}{\delta(x)} dx, \quad (4)$$

где

$$\delta(x) \approx 3 \left(\frac{D}{\nu} \right)^{1/3} \sqrt{\nu x / V_0}$$

— толщина диффузионного слоя, которая существенно меньше толщины пограничного слоя, $D = 2.6 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент диффузии атомов кислорода, c_0 — концентрация кислорода в толще воды.

Определим поток диффузии кислорода на электрод в двух случаях:

1) когда он установлен на диэлектрической поверхности, как указано выше

$$I_1 = ac_0 \frac{D^3}{3\nu^6} \sqrt{V_0} \int_{l_1}^{l_2} \frac{dx}{\sqrt{x}} = \frac{2ac_0 D^3}{3\nu^6} \sqrt{V_0 l_2} \left(1 - \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}\right). \quad (5)$$

2) и когда он установлен непосредственно на краю плоской поверхности диэлектрического обтекателя, так что его передняя граница совпадает с передней кромкой обтекателя со стороны набегающего потока жидкости –

$$I_2 = ac_0 \frac{D^3}{3\nu^6} \sqrt{V_0} \int_0^{l_2} \frac{dx}{\sqrt{x}} = \frac{2ac_0 D^3}{3\nu^6} \sqrt{V_0 l_2}. \quad (6)$$

Чувствительность датчика к пульсациям скорости потока или скорости буксировки в первом случае уменьшилась по сравнению со вторым во столько же раз, во сколько уменьшился поток диффузии кислорода на электрод, т.е. в

$$I_2/I_1 = 1/(1 - \sqrt{l_1/l_2}) \quad (7)$$

раз. Целесообразно при сохранении общей площади электрод делать более узким, отодвигая его переднюю границу от передней кромки диэлектрической пластины. При $l_1/l_2 = 0.25$ выигрыш в уменьшении чувствительности к пульсациям скорости составляет 2 раза, а при $l_1/l_2 = 0.8$ – уже около 10 раз. Дальнейшее увеличение отношения l_1/l_2 может привести к уменьшению площади электрода и увеличению доли тех шумов, которые не определяются пульсациями скорости буксировки.

Площадь электрода необходимо выбирать исходя из предельной чувствительности приемного устройства, которая определяется тепловым шумом датчика и собственным шумом предварительного усилителя приемного устройства. Предельная чувствительность приемного устройства с датчиком есть минимальная величина напряженности электрического поля сигнала, при которой отношение мощности сигнала к суммарной мощности теплового шума датчика и шума усилителя, приведенного ко входу приемного устройства, равно единице при оптимальном согласовании датчика. При полосе пропускания 1 Гц она определяется по формуле [12]

$$E_{\min} = \frac{1}{d} \sqrt{4kTR \left[F_{\text{тр}} + (F_{\text{ус. мин}} - 1) \sqrt{F_{\text{тр}}^2 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}} \right]},$$

где d – действующая длина датчика, $\tau = RC$ – постоянная времени датчика, R и C – активное сопротивление и емкость датчика в последовательной схеме замещения, $F_{\text{ус. мин}}$ – минимальный коэффициент шума усилителя, $F_{\text{тр}}$ – коэффициент шума трансформатора. Ориентируясь на чувствитель-

ность приемника с часто применяемым кабельным электродным датчиком, которая в полосе 1 Гц достигает долей нановольта на метр при длине активной части до 1000 м, положим $E_{\min} < 1$ нВ/м.

Определим размеры датчика, удовлетворяющего такому условию. Пусть датчик выполнен в виде диэлектрического обтекателя с плоской прямоугольной поверхностью, на которой установлены два плоских электрода (рис. 1). Прямоугольные электроды, выполненные из титана, имеют длину $a = 20$ см, ширину $b = 2$ см и расположены на расстоянии 2 м друг от друга, будучи встроены в пластину на одном уровне с ее поверхностью. Задняя граница электрода отстоит от передней кромки обтекателя на 8 см. Сопротивление датчика в этом случае в диапазоне частот 30...90 Гц составляет 4...5 Ом, а емкость 250...280 мкФ [13]. Действующую длину датчика можно считать равной 2 м, $\omega\tau \approx 0.4...0.6$. Не предъявляя слишком жестких требований к коэффициенту шума предварительного усилителя и входного трансформатора, согласующего датчик с предусилителем, полагаем $F_{\text{тр}} = 2$ дБ, $F_{\text{ус. мин}} = 2$ дБ. Предельная чувствительность для приемного устройства с таким датчиком имеет величину порядка 0.25 нВ/м, что удовлетворяет поставленному условию $E_{\min} < 1$ нВ/м. Выбранный размер электродов позволяет осуществить условие $l_1/l_2 = 0.75$, следовательно, добиться уменьшения в 7.5 раз чувствительности датчика к пульсациям скорости набегающего потока.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проверки правильности приведенных рассуждений выполнен эксперимент, в котором использована лабораторная установка, описанная в [6]. Она содержит стальной ящик-экран, в котором расположена измерительная ячейка с исследуемыми электродами, центробежный насос и диэлектрический трубопровод, по которому циркулирует электролит (раствор NaCl). Схема измерительной ячейки показана на рис. 2. Исследуемые электроды 1 и 2, выполненные в виде отрезков титановой проволоки диаметром 1 мм, встроены в диэлектрический цилиндр 3 диаметром 11 мм, отлитый из эпоксидной смолы. Вместе с цилиндром 3 они образуют электродный блок, который установлен на корпусе ячейки 4, изготовленном из органического стекла. Ячейка без воздушных пузырей заполнена электролитом, который через инжектор 5 по гибкому трубопроводу 6 подается в измерительную ячейку и отводится из нее с помощью уловителя потока 7. Электродвигатель центробежного насоса для уменьшения создаваемых им электромагнитных помех вынесен за пределы ящика-экрана. Для создания пульсаций потока жидкости электродвигатель насоса питается от

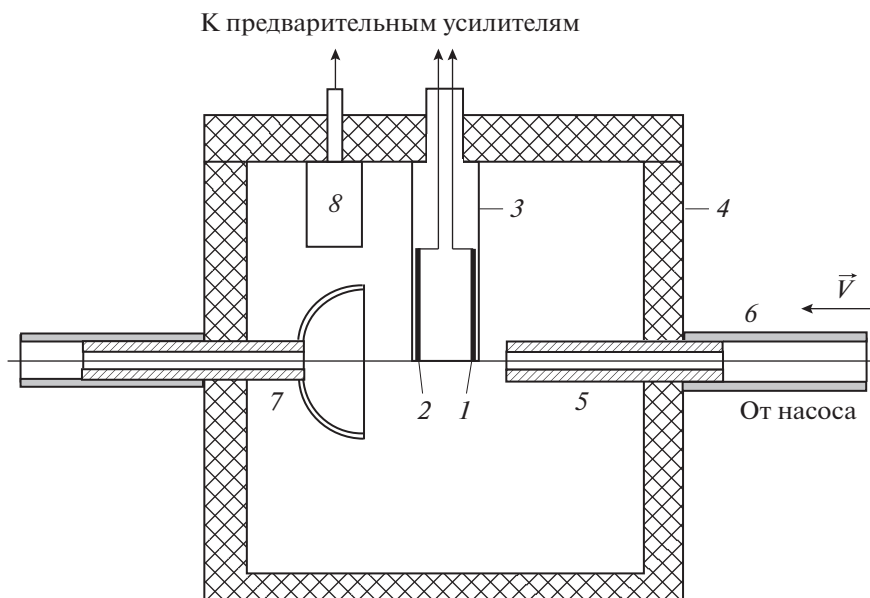


Рис. 2. Схема измерительной ячейки с электродами: 1, 2 — первый и второй электроды, 3 — диэлектрический цилиндр, 4 — корпус ячейки, 5 — инжектор, 6 — трубопровод, 7 — уловитель потока, 8 — опорный электрод.

аккумулятора через электронный ключ, который управляется импульсами, следующими с частотой 30...32 Гц, их скважность можно регулировать. Шлифованные торцы отрезков титановой проволоки, которые и являются собственно измерительными электродами, встроены в плоскую торцевую площадку диэлектрического цилиндра (рис. 3), на которую набегают поток электролита, имитирующего морскую воду, в один уровень с ее поверхностью. Электрод 1 находится на краю площадки на расстоянии 4 мм от инжектора. Электрод 2 на 10 мм отодвинут от электрода 1 по направлению потока, т.е. располагается на противоположном краю площадки. Так как центр электрода 2 удален от края площадки, на который набегают поток жид-

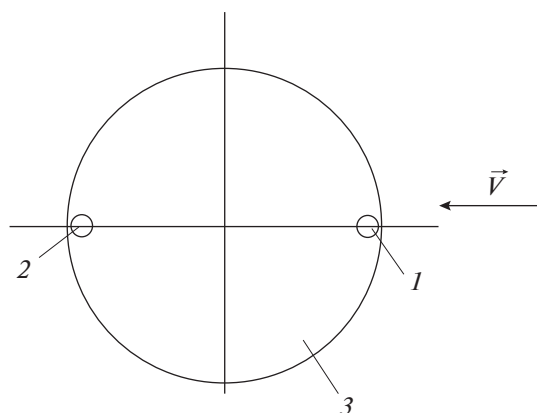


Рис. 3. Схема расположения электродов на торцевой площадке электродного блока: 1, 2 — первый и второй электроды.

кости, на расстояние в 10 раз большее, чем центр электрода 1, то чувствительность его к пульсации скорости в соответствии с (5) и (6) должна быть примерно в три раза меньше, чем у электрода 1. В качестве электролита использован раствор NaCl с концентрацией 4.5 г/л, средняя скорость потока жидкости в экспериментах составляла около 0.8 м/с. Она зависит от величины напряжения питания электродвигателя центробежного насоса и скважности импульсов, управляющих электронным ключом. Скважность выбиралась такой, чтобы пульсация скорости потока на частоте 31 Гц была хорошо заметна по характерному пику в спектре электродного шума. Величину пульсации скорости не измеряли, но по оценкам ее относительная величина составляла десятые доли процента. Шумовые напряжения, между каждым из электродов 1 и 2 и опорным электродом 8 (он расположен в той же измерительной ячейке в стороне от потока), усиленные предварительными и измерительными усилителями, поступали на два канала аналого-цифрового преобразователя E20-10 (фирма L-Card). Электрод 8 имеет большую площадь и выполнен из нержавеющей стали. Одновременно записывали серии из 20 реализаций шумового напряжения, с помощью программы L-Graf вычисляли амплитудные спектры реализаций, которые затем усреднялись по ансамблю. На рис. 4 и 5 в сопоставимом относительном масштабе показаны измеренные одновременно в отсутствие движения и при движении жидкости частотные спектры шумового напряжения электродов 1 и 2 на выходе измерительных усилителей в полосе 10...100 Гц. Приведенные спектры являются типичными для выполненных измерений.

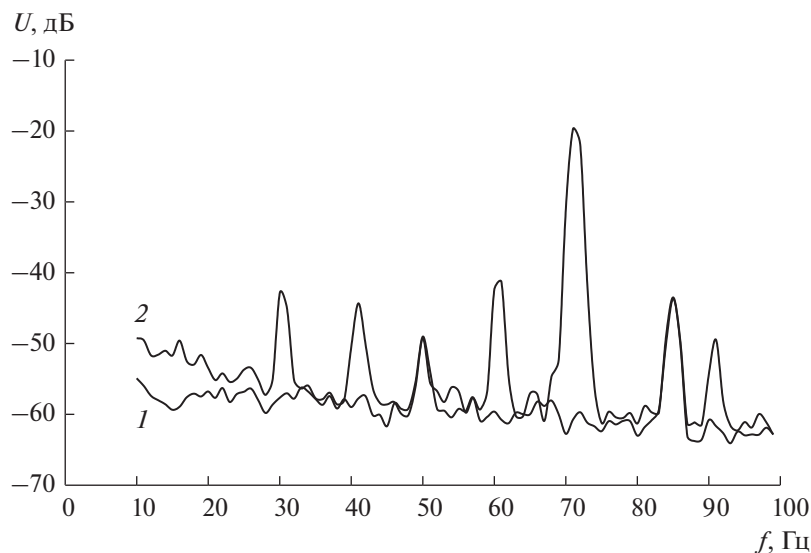


Рис. 4. Спектр шумового напряжения между первым и опорным электродом в отсутствие движения жидкости (1) и при движении жидкости (2).

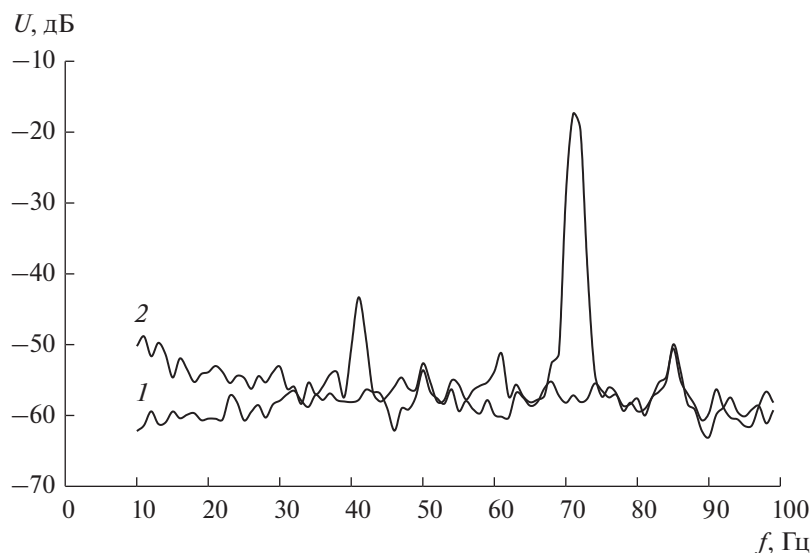


Рис. 5. Спектр шумового напряжения между вторым и опорным электродом в отсутствие движения жидкости (1) и при движении жидкости (2).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 4 представлен спектр шумового напряжения электрода 1 в отсутствие движения и при движении электролита. Спектр при движении электролита имеет изрезанный вид. Он имеет пики, расположенные на частотах 30, 61 и 91 Гц, соответствующих частоте пульсации средней скорости потока и ее гармоникам. Их высота на 12...18 дБ превышает средние значения спектральной плотности шума в окрестностях пиков. Спектр шумового напряжения электрода 2 (см. рис. 5) при движении электролита более гладкий. Пики на частотах 30, 61 и 91 Гц выражены слабо. Их высота на частотах 30 и 61 Гц на 10 дБ, а на частоте 91 Гц на 7 дБ ниже, чем в спектре электрода 1.

Полученный для электрода 2 выигрыш по шуму совпадает с расчетом, выполненным по формуле (7). Подобная картина наблюдалась во всех сеансах измерения. На всех измеренных автором спектрах электродного шума у электрода 2 высота пика на частоте пульсации скорости жидкости 30...31 Гц была на 7...13 дБ ниже, чем у электрода 1. Результаты эксперимента подтверждают правильность теории возникновения электродного шума, развитой ранее [7]. Эксперимент также подтвердил правильность предположения, что электродный шум движения датчика при его буксировке можно уменьшить в несколько раз выбором расположения электрода на плоской диэлектрической поверхности обтекателя. Однако следует иметь

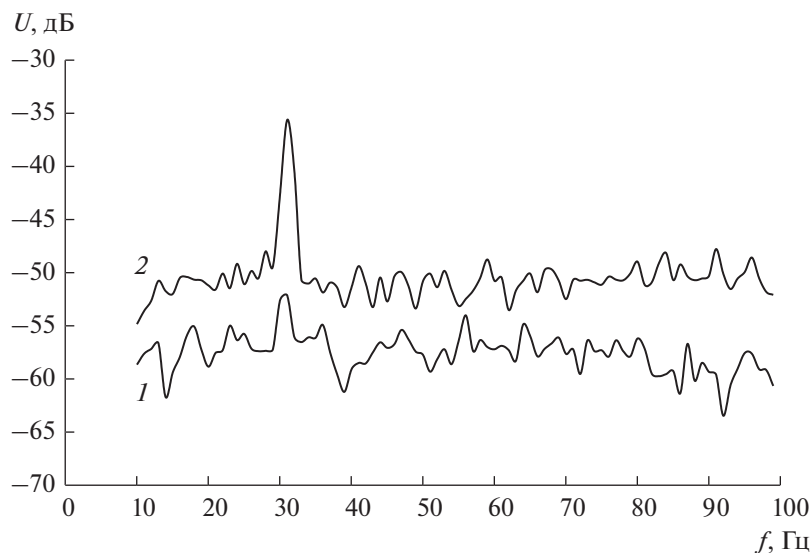


Рис. 6. Спектр напряжения на выходе датчика скорости жидкости при скорости 0.8 (1) и 1.1 м/с (2).

в виду, что при движении датчика в области с сильной турбулентностью, например при пересечении кильватерного следа, достичь существенного уменьшения шума движения вряд ли удастся.

Кроме пиков на частоте контролируемой пульсации скорости потока жидкости и ее гармониках, в спектрах на рис. 4 и 5 наблюдаются пики на других частотах. На частоте 50 Гц пик обусловлен проникновением в измерительный канал наводки от промышленной электрической сети. Пик на частоте 85 Гц присутствует в спектре электродного шума и при выключенном насосе, поэтому не связан с движением жидкости и представляет собой помеху неизвестного происхождения. Пики на частотах 41 и 71 Гц возникают только при работе центробежного насоса, приводящего жидкость в движение. При увеличении скорости вращения электродвигателя насоса эти пики смещаются в сторону более высоких частот. Высота этих пиков в спектрах шума электродов 1 и 2 практически одинакова. На рис. 6 показаны спектры напряжения с выхода датчика скорости жидкости, встроенного в трубопровод перед измерительной ячейкой, при двух скоростях движения жидкости. В спектре пульсаций скорости хорошо заметен пик на частоте работы электронного ключа 31 Гц, а на частотах 41 и 71 Гц пики не обнаружены. Следовательно, они представляют собой помеху от электродвигателя, возникающую из-за несовершенства экранирования измерительной ячейки. В промежутках между пиками оба электрода показывают близкие значения спектральной плотности шума. Спектры шума электродов 1 и 2 в отсутствие движения мало отличаются друг от друга. На частотах ниже 35 Гц спектральная плотность шума при движении электролита выше, чем в отсутствие движения, это превышение достигает 8...10 дБ на частоте

те 10 Гц. Исследуемые электроды находились в электролите более 60 сут. Как известно из [6], при уменьшении времени выдержки электродов в электролите указанное превышение существенно больше и заметно в более широкой полосе частот.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (№ 075-01133-22-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зимин Е.Ф., Кочанов Э.С. Измерение напряженности электрических и магнитных полей в проводящих средах. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой: Мат. Всерос. (с международным участием) научно-практического семинара. Апатиты: Геологический институт КНЦ РАН, 2014. Т. 1. 2015. Т. 2.
3. Бернштейн С.Л., Барроуз М.Л., Эванс Дж.Э. и др. // ТИИЭР. 1974. Т. 62. № 3. С. 5.
4. Максименко В.Г., Нарышкин В.И. // РЭ. 2003. Т. 48. № 1. С. 70.
5. Максименко В.Г. // РЭ. 2017. Т. 62. № 11. С. 1086.
6. Максименко В.Г. // Измерит. техника. 2017. № 9. С. 57.
7. Максименко В.Г. // РЭ. 2018. Т. 63. № 7. С. 720.
8. Максименко В.Г. // РЭ. 2021. Т. 66. № 5. С. 436.
9. Максименко В.Г. // РЭ. 2022. Т. 67. № 3. С. 268.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
11. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматлит, 1959.
12. Максименко В.Г. // РЭ. 2006. Т. 51. № 7. С. 786.