УДК 621.396.676

© *В. А. Закревский*, *В. А. Пахотин*
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
v.pakhotin@mail.ru

# СОБСТВЕННЫЕ ШУМЫ БУКСИРУЕМОЙ КАБЕЛЬНОЙ СОВМЕЩЕННОЙ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

Рассмотрены результаты теоретических исследований низкочастотных (1—100 Гц) шумов, возникающих при буксировке кабельной антенны в воде. Исследована возможность приема акустических (сейсмических) сигналов с использованием кабельной низкочастотной радиоантенны. Показано, что при приеме радиосигналов доминируют электродные шумы, возникающие из-за влияния пульсаций турбулентного давления на параметры двойного электрического слоя на поверхности электрода. Рассмотрены причины и оценен уровень трибоэлектрического шума. Предложены пути повышения отношения сигнал/шум, основанные на новых решениях по конструкции элементов кабеля и электродов.

**Ключевые слова:** кабельные антенны, собственный шум, турбулентное давление, электродный шум.

*V. A. Zakrevskii*, *V. A. Pakhotin*
Ioffe Institute of RAS, Saint-Petersburg, Russia

# THE INTRINSIC NOISE OF TOWED CABLE COMBINED RECEIVING ANTENNA AND EVALUATION OF POSSIBILITIES OF ITS USE AS A SENSOR SEISMIC WAVES

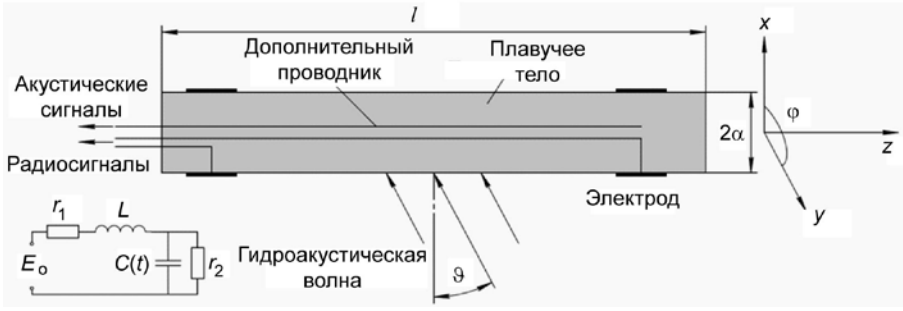
The results of theoretical studies of a low-frequency (1—100 Hz) noise arising from a towing of a cable antenna in water are described in the paper. The possibility of a detection of acoustic (seismic) signals using a cable low frequency radioantenna is considered. It is shown that the electrode noise dominates at the detection of radio signals. The noise occurs due to the influence of turbulent pulsations of pressure on the parameters of the electric double layer at the electrode surface. The reasons of triboelectric noise are considered, the noise level is estimated. The ways of improving the signal-to-noise ratio based on new decisions on design of the cable elements and electrodes are suggested.

**Key words:** cable antennas, noise, turbulent pressure, electrode noise.

В связи с использованием на судах протяженных заглубленных кабельных антенн для приема низкочастотных радиоволн [1—3], представляет интерес возможность их применения для регистрации акустических волн в море [4]. Расширение функциональных возможностей подобных антенн облегчено их конструкцией, представляющей собой по существу цилиндрический конденсатор, проводящий внутренний проводник которого изолирован от воды диэлектриком, имеющем плотность, обеспечивающую плавучесть всей антенне в целом. Роль внешней обкладки выполняет морская вода. Включение источника поляризующего напряжения между дополнительным изолированным проводником и водой превращает кабель в емкостной датчик акустических колебаний [5]. Однако параметры подобных антенн и, особенно собственные шумы, исследованы недостаточно.

Важнейшей характеристикой кабельной антенны является ее чувствительность. Задача о чувствительности кабеля сводится к нахождению аналитических зависимостей между внешним звуковым давлением и емкостью с одной стороны, и между емкостью и электрическим напряжением на ней — с другой. Кроме того, для определения чувствительности необходимо учесть гидродинамические шумы и тепловые шумы электрической цепи. Для нахождения связи между внешним давлением и смещением поверхности кабеля примем модель, в которой реальный кабель заменим тонким ограниченным стержнем. На рисунке представлена упрощенная конструкция антенны и ее электрическая схема. В рамках принятой модели уже получены формулы общего вида, определяющие зависимость между скоростью симметричных колебаний поверхности стержня $\upsilon_0(z)$ и параметрами гидроакустической плоской волны [6]:

$$\upsilon_0(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_{0n}}{Z_{0n} - Z_{0nn}} \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left[\frac{N\pi z}{l}\right]. \qquad (1)$$




Конструкция протяженной кабельной антенны и ее электрическая схема.

Аналогичное выражение для скорости смещений при изгибных колебаниях $\upsilon_1(z)$ имеет вид

$$\upsilon_1(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-G_{1n}}{Z_{1n} - Z_{1nn}} \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left[\frac{N\pi z}{l}\right]. \qquad (2)$$

В формулах (1), (2) $z$ — продольная координата; $l$ — длина кабеля; $n$ — целое число; $N$ — целое нечетное число; $G_{mn}$ — амплитуды давления собственных колебаний этого номера. $Z_{mn}$ можно назвать механическими импедансами стержня. $Z_{mnn}$ — импедансы излучения собственного колебания номера $mn$. Импедансы определяются физико-механическими характеристиками кабеля и жидкости. Внешнее давление и импеданс излучения зависят, в частности, от угла $\vartheta$. Формулы для перечисленных амплитуд и импедансов выражаются через цилиндрические функции и не приводятся из-за их громоздкости. Под действием внешнего давления диаметр кабеля будет изменяться относительно своего среднего значения $2a$. Обозначим это изменение радиуса $\Delta a(z)$. Поскольку $\Delta a(z) << a$, то емкость определяется выражениями

$$C(t) \approx C_0\left[1 + me^{i\omega t}\right],\ C_0 = 2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l / \ln(a/r_0), \qquad (3)$$

где $\varepsilon\varepsilon_0$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика кабеля; $r_0$ — радиус внутреннего проводника; $t$ — время; $\omega$ — круговая частота; $m$ — параметр (коэффициент) модуляции емкости:

$$m = \frac{\int_0^l \Delta a(z)dz}{al\ln\frac{a}{r_0}}.$$

Используя связь скорости и смещения $\Delta a(z) = -\upsilon_0(z)/i\omega$ и выражение для скорости смещения поверхности кабеля (1), получим

$$m = \sum_1^n \frac{G_{0n}}{N_n(Z_{0n} + Z_i)} \frac{2\sqrt{2}}{\pi a\omega\sqrt{l}\ln\frac{a}{r_0}}, \qquad (4)$$

где $Z_i = Z_{0nn}$. Анализ формулы (4) показывает, что при углах меньших одного градуса зависимость параметра модуляции от частоты практически отсутствует. Несмотря на достаточно сложную зависимость механических импедансов кабеля от его радиуса, эта зависимость приблизительно совпадает с зависимостью емкости кабеля от его диаметра. Поэтому при увеличении диаметра кабеля в два раза параметр модуляции уменьшается приблизительно в два раза. Важной характеристикой является модуль упругости материала $E$ плавучего тела. Поскольку механический импеданс $Z_{0n}$ прямо пропорционален $E$, то для повышения чувствительности кабеля к внешнему давлению, следует уменьшать модуль упругости плавучего тела.

Электрическая схема акустической антенны представляет собой параметрический последовательный контур. Для того чтобы найти связь между параметром модуляции емкости кабеля и электрическим напряжением на ней $U_c(t)$, необходимо решить дифференциальное уравнение для контура, в котором емкость является функцией времени (3):

$$U_C'' + \frac{\omega_0^2 C + \omega_1(2C' + C_0\omega_2)}{\omega_1 C} U_C' + \frac{\omega_1 C'' + \omega_0^2 C' + C_0\omega_0^2(\omega_1 + \omega_2)}{\omega_1 C} U_C = \frac{C_0\omega_0^2 E_0}{C}. \qquad (5)$$

Уравнение (5) составлено для контура, в котором $L$ — индуктивность, $\omega_0$ — резонансная частота (для $C = C_0$), $E_0$ — ЭДС источника поляризующего напряжения, $r_1$ — активное сопротивление,

включенное последовательно с индуктивностью (оно включает в себя сопротивления индуктивности, кабеля и объема морской воды), $r_2$ — активное сопротивление, шунтирующее емкость (утечка), причем $\omega_1 = 1/(r_1 C_0)$, $\omega_2=1/(r_2 C_0)$. Благодаря малости параметра модуляции $m << 1$, уравнение (5) решается приближенно аналитически методом малого параметра в первом приближении [7]. Выражение для амплитуды напряжения на емкости будет равно

$$U_p = \frac{m_p E_0 \omega\omega_1 \sqrt{\left(\omega\omega_1\right)^2 + \omega_0^4}}{\left(\omega_1 + \omega_2\right)\sqrt{\left(\omega^2\omega_1\right)^2 + \omega^2\left[\omega_1^2\left(\omega_2^2 - 2\omega_0^2\right) + \omega_0^4\right] + \omega_0^4\left(\omega_1 + \omega_2\right)^2}}. \quad (6)$$

В этом выражении индекс $p$ соответствует определенному источнику давления. На резонансной частоте при условии, что добротность контура $Q >> 1$, $U_p = m_p E_0 Q$. Напряжение на емкости последовательного колебательного контура, генерируемое тепловым шумом $U_T$, определялось методом, изложенным в [8]. Пусть напряжение, развиваемое сигналом, равно $U_s$, а напряжение нетепловых шумов равно $U_{ns}$, тогда отношение сигнал/шум можно определить как

$$K = \frac{U_s}{\sqrt{U_{ns}^{\ 2} + U_T^{\ 2}}}. \quad (7)$$

Шумовое давление, создаваемое гребными винтами (при скоростях движения не превышающих 20 узлов), а также давление шумов моря в несколько раз меньше турбулентного шумового давления потока обтекания [9]. Для описания статистических характеристик турбулентного потока принято использовать понятие спектра мощности пульсаций турбулентного давления. Характерной особенностью этого спектра является сильная зависимость от скорости буксировки. Резкий спад в области высоких частот и насыщение в области низких частот обусловлены некогерентным воздействием отдельных пульсаций давления в области высоких частот и когерентным воздействием пульсаций в области низких частот. В результате большинство собственных шумов кабельной антенны будут нести отпечаток формы спектра мощности. Напряжения $U_s$ и $U_{ns}$ вычисляются с помощью (6) с тем отличием, что в первом случае параметр модуляции определяется давлением сигнала $P_s$, а во втором — среднеквадратичным турбулентным давлением $P_{tr}$.

Для того чтобы найти турбулентное давление выберем аппроксимирующую функцию для безразмерного спектра Виллмарта в виде [10]:

$$W(\omega) = a_1 \frac{\rho^2 u^3 \delta^*}{1 + \left(a_2 \frac{\omega\delta^*}{u}\right)^2}, \quad (8)$$

где $\delta^*$ — толщина вытеснения; $\rho$ — плотность воды, u — скорость обтекания (буксировки антенны). Турбулентное давление $P_0$ находится путем интегрирования спектра в конечной полосе частот. Путем подбора значений параметров $a_1$, $a_2$ можно добиться, чтобы спектр $W(\omega)$ практически совпадал со спектром, полученным экспериментально, для буксируемой кабельной антенны [11]. Проблема корректного использования полученных экспериментально спектров мощности пульсаций турбулентного давления являлась и является предметом исследований многих ученых. Авторы не нашли в литературе, как это делать для тонких длинных кабелей. Поэтому воспользовались предложением Петровского [12] использовать для корректировки спектра отношение радиуса корреляции к корню квадратному из площади приемника давления. Можно показать, что на низких частотах давление, создаваемое волной, совпадает с амплитудой колебаний всестороннего давления. В условиях гидростатического обжатия кабеля в качестве площади можно использовать всю боковую поверхность антенны. Для того чтобы определить усредненное турбулентное давление $P_{tr}$, необходимо $P_0$ умножить на коэффициент $R_k/S_c^{\ 0.5}$, где $S_c$ — площадь поверхности кабеля, а величина $R_k$ определяется радиусом корреляции пульсаций турбулентного давления и равна $R_k \le \pi V_c/(10\omega)$, где $V_c$ — конвективная скорость [12]. На низких частотах и невысоких скоростях буксировки конвективная скорость незначительно отличается от $u$. В рассматриваемых условиях даже на частотах порядка 1 Гц отношение радиуса корреляции к корню квадратному из площади кабеля будет меньше 0.1, поэтому компенсация всегда будет иметь место, что приведет к существенному снижению вклада турбулентной помехи.

Окончательно для узкой полосы частот $\Delta\omega$, заменив интегрирование произведением $W(\omega)\,\Delta\omega$, будем иметь

$$P_{tr} \approx \frac{R_k}{\sqrt{S_c}} \sqrt{W(\omega) \cdot \Delta\omega}\,. \qquad (9)$$

Кабельная антенна представляет собой сложное устройство, в котором сочетаются как проводящие, так и диэлектрические (полимерные) элементы, находящиеся в контакте. Кроме того, радиоантенна содержит металлические заводнители (электроды), находящиеся в контакте с морской водой, являющейся слабым электролитом. Электроды необходимы для приема радиосигналов. На границах раздела разнородных сред будут возникать скачки потенциала. Кроме того, в объеме полимера плавучего тела кабельной антенны (выполненного из вспененного полиэтилена) с помощью акустической диагностики обнаружены заметные электрические поля [13], возникающие вследствие разделения электрических зарядов в процессе изготовления или изгибов. При буксировке кабельной антенны возникают пульсации турбулентного потока, которые приводят к параметрическому изменению двойных электрических слоев на границах сред, а также перемещению жил кабельной антенны в объемных полях, что вызывает возникновение шумовых токов в сигнальной цепи антенны. Шумы, связанные с возникновением электрических полей в объеме кабеля получили название трибоэлектрических. Шумы, обусловленные процессами на электродах, называются электродными.

Исследованию электродных шумов движения посвящены немногочисленные работы, в которых проводились лабораторные экспериментальные исследования шума, генерируемого вращающейся мешалкой в ограниченном объеме подсоленной воды [14, 15]. В таких условиях сложно получить адекватные результаты. Турбулентное хаотическое гидродинамическое течение, которое возникает в замкнутой электрохимической ячейке при размешивании раствора электролита мешалкой, имеет сложный характер. Изменение скорости движения мешалки непредсказуемым образом изменяет свойства турбулентного давления. По этой причине величину тока, в этих условиях удается предсказать лишь на основе эмпирических соотношений [16, 17]. Тем не менее, в [15] на основе сравнительных опытов предложено использовать в качестве материала электрода нержавеющую сталь и другие химически стойкие металлы.

Электродный шум может возникать за счет изменения параметров двойного электрического слоя, в частности диэлектрической проницаемости воды под действием пульсаций турбулентного давления. Поскольку емкость двойного электрического слоя на границе электрод-вода $C_d$ приблизительно пропорциональна диэлектрической проницаемости воды $\varepsilon_w$, а напряжение на этой емкости также пропорционально $\varepsilon_w$, то изменение напряжения будет пропорционально $\Delta\varepsilon$ и $\Delta\mu$, где $\Delta\varepsilon$ — изменение $\varepsilon_w$, $\Delta\mu$ — разность электрохимических потенциалов материалов электрода и воды. Поскольку $\Delta\mu$ зависит от состояния поверхности материалов, то смысл имеют лишь оценочные значения. Используя связь диэлектрической проницаемости и плотности воды и зависимость между изменением давления $\Delta p$ и изменением плотности $\Delta\rho$ воды, можно рассчитать уровень электродного шума. При этом в качестве величины емкости конденсатора в эквивалентной схеме используется сумма емкостей $C_0$ и $C_d$, а в качестве поверхности рассматривается граница электрод-вода. Расчеты показывают, что уровень шумов резко возрастает с понижением частоты. Начиная с частоты разделения [12], напряжение шума перестает зависеть от частоты, что связано с превращением электрода в когерентный (точечный) приемник. Уровень электродного шума в значительной степени зависит от скорости буксировки. Для антенны с $l$ = 500 м на частоте 9 Гц при изменении скорости буксировки от 2 до 4 м/с для электродов с $\Delta\mu$ = 2 эВ длиной 0.1 м и диаметре 16 мм уровни шумов в полосе 1 Гц составляют от 10 до 65 нВ и значительно превосходят уровень теплового шума входных устройств радиоприемного устройства. Следует отметить, что уровни электродных шумов, рассчитанные по предлагаемой методике, хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в [3]. Для уменьшения электродного шума целесообразно уменьшать $\Delta\mu$, т. е. использовать электроды с работой выхода электрона близкой к работе выхода электрона воды (6 эВ). Некоторые типы нержавеющей стали имеют работу выхода электрона 5—5.6 эВ [18], что согласуется с выводами о возможности их использования, сделанными в [15].

Причины трибоэлектрического шума окончательно не выяснены. В [19] предложена модель электризации кабельной антенны, основой которой является учет пластической деформации элементов антенн, развивающейся под действием механических напряжений, например при буксировке в воде или намотке на лебедку. В конструкцию кабельной антенны входят полимерные элементы, испытывающие механические нагрузки, приводящие к их пластическому деформированию. Пластическая деформация сопровождается растяжением части макромолекул полимера и их разрывом по ионизационному механизму, учитывающему факт снижения энергии ионизации молекул при растяжении

межатомных связей. При ионизации происходит высвобождение электронов, которые переходят в воду и заряжают тонкий приповерхностный слой. Таким образом, при деформировании изоляции кабеля возможно формирование электрета, изменяющего чувствительность датчика к внешним механическим воздействиям. Для оценки уровня шума использована модель, в которой кабель является датчиком турбулентного давления. Пульсации давления пограничного слоя, которые возникают на обтекаемой водой поверхности кабеля, вызывают смещение его поверхности, т. е. вызывают изменение толщины приповерхностного заряженного слоя кабеля и паразитный ток в электрической цепи антенны. Выполнена оценка уровня шума, причиной возникновения которого является воздействие на диэлектрик механических напряжений и сделана оценка уровня этого шума и получено, что на частоте ~ 50 Гц уровень трибошума на несколько децибел превышает уровень теплового шума, составляющего ~ 1 нВ. При оценке уровня трибоэлектрического шума следует иметь в виду, что генерируемое в приповерхностном слое полимера напряжение передается через емкость кабеля, а не снимается с нее, как в случае поляризации всего объема кабеля внешним источником с напряжением поляризации $E_0$. Поэтому на частотах меньших ~ 20 Гц внутреннее сопротивление емкостной цепи становится относительно большим, а ток малым, поэтому трибоэлектрический шум можно не учитывать. Одной из мер, предотвращающих возникновение этой шумовой составляющей, является подбор материалов для кабельной антенны, которые заведомо имеют плохие электретные свойства [20]. Интересно, что внутренние электростатические поля превращают радиоантенну в приемник акустических сигналов без дополнительного источника поляризации.

Колебания кабеля происходят в геомагнитном поле, поэтому во всех проводящих элементах антенны генерируется геомагнитный шум. Для оценки уровня шума в этом случае необходимо использовать выражение (2), соответствующее изгибным колебаниям. Следует отметить, что резонансная частота механических колебаний кабеля, имеющего длину несколько сотен метров, при натяжении, составляющем $2\cdot10^4$ Н, не превышает 1 Гц. После интегрирования по длине кабеля получим

$$I_v = \int_0^l V_1(z)dz = \sqrt{2l}\cdot\frac{1-\cos(n\cdot\pi)}{n\cdot\pi}. \qquad (10)$$

Наводимая ЭДС выражается формулой

$$E_B = B\cdot P_{tr}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{-G_{1n}}{Z_{1n}-Z_{1nn}}I_v, \qquad (11)$$

где $B$ — индукция геомагнитного поля. Ее типичное значение для оценок: $B = 5\cdot10^{-5}$ Тл.

Поведение уровня рассматриваемого шума от частоты и скорости буксирования полностью определятся характером турбулентных пульсаций. Физико-механические параметры кабеля слабо влияют на уровень этого шума. Поэтому с этой составляющей собственного шума можно бороться путем уменьшения уровня турбулентных пульсаций давления в потоке обтекания. Уровень геомагнитного шума относительно невысок. В полосе 1 Гц на частоте 5 Гц при скорости буксировки 4 м/с его уровень составляет 0.5 нВ. Очевидно также, что при буксировке антенны вдоль меридиана, уровень геомагнитного шума будет наименьшим и доминируют другие составляющие шума.

Результаты расчета уровней шумов различной природы показывают, что все шумы приблизительно характеризуются частотной зависимостью типа $1/f$ и более высокой степенью от скорости буксировки. Разработанные аналитические методы расчета позволяют получить взаимосвязи исследуемых параметров и разработать предварительные рекомендации по совершенствованию элементов антенного устройства. По-видимому, заметное уменьшение вибраций кабельной антенны можно достигнуть, прибегнув к усложнению конструкции плавучего тела путем включения в его структуру спиральных диэлектрических проводов (спойлеров). Такие решения относительно давно используются в промышленном рыболовстве для уменьшения вибраций тросов тралов [21]. Однако целесообразность использования спойлеров в буксируемых антеннах требует отдельного исследования. Составляющую шума, связанную с электризацией изоляции, можно полностью устранить подбором материала плавучего тела. По-видимому, наибольшие трудности связаны с уменьшением электродного шума. Представляется важным предохранить двойной слой от воздействия турбулентных пульсаций. С этой целью можно изменить топологию распределения токов проводимости между сигнальным проводником кабеля и морской водой так, чтобы двойной слой создавался вне пределов пограничного слоя [15, 22]. Из-за структурной нестабильности системы электрод-вода уменьшить уровень электродного шума более чем на порядок, скорее всего не удастся.

На основе полученных данных был сделан расчет отношения сигнал/шум при приеме гидроакустических (сейсмических) сигналов на кабельную антенну с вышеуказанными размерами

при напряжении поляризации $E_0$ = 1000 В. Предварительно было проведено сравнение параметра модуляции емкости антенны при колебательном воздействии внешнего давления на кабель и волновым воздействии на него. Оказалось, что параметры модуляции при рассматриваемых воздействиях — одинаковые, что вполне соответствует диапазону рассматриваемых частот. Это позволило использовать полученные формулы (волнового воздействия) для расчета изменения параметрической емкости под действием пульсаций турбулентного давления. В результате было получено, что с помощью совмещенной антенны возможен прием ($K \geq 3$) при давлении гидроакустической волны с амплитудой 0.01 Па в полосе 0.01 Гц на частоте 2 Гц для скоростей буксировки, не превышающих 2 м/с, на частоте 10 Гц для скоростей буксировки, не превышающих 4 м/с. Достаточная чувствительность кабельной антенны позволяет использовать напряжение поляризации $E_0 < 1000$ В при достаточно высоком $K$. Для выработки четких инженерных рекомендаций по конструкции антенны необходимо провести дополнительные исследования, которые позволят ответить на многие конкретные вопросы по геометрии антенны и по типам полимерных материалов антенн, в том числе и антистатических. Важно, что подобные исследования позволяют обнаружить неочевидные меры по снижению уровня собственных шумов.

**References**


1. *Karnaushenko N. N.* The natural electromagnetic field of the seas and oceans at ELF. *Sevastopol,* 2001. 328 p. (in Russian).
2. *King R.* et al. Antennas in matter. *The MIT Press Cambridge, Massachusetts and London England,* 1981.
3. *Bernstein S. L.* et al. Long-distance communication at extremely low frequencies. *Proceedings of IEEE.* 62, 292—312.
4. *Sverdlin G. M.* Applied sonar, 2nd ed. *Leningrad, Sudostroyeniye,* 1990. 320 p. (in Russian).
5. *Pakhotin V. A., Voinov V. V.* Real sensitivity of combined towed cable receiving antenna. *Reports of the 1st Internat. Conf. «Research, development and application of high-tech industry» St.-Petersburg, Izdatelstvo Politekhnicheskogo Universiteta,* 2005. 3, 390—402 (in Russian).
6. *Lyamshev L. M.* Sound scattering by a thin rod of finite length. *Akust. Zh.* 1958, 4, 1, 51—58 (in Russian).
7. *Ėl'sgol'ts L. E.* Differential equations and the calculus of variations. *Moskva, Nauka,* 1965. 424 p. (in Russian).
8. *Robinson F. N. H.* Noise and fluctuations in electronic devices and circuits. *Oxford, England, Clarendon Press,* 1974. 246 p.
9. *Evtyutov A. P.* et al. Handbook of underwater acoustics. *Leningrad, Sudostroyeniye,* 1988. 549 p. (in Russian).
10. *Miniovich I. J* et al. Hydrodynamic sound sources. *Leningrad, Sudostroyeniye,* 1972. 480 p. (in Russian).
11. *Vinogradniy G. P.* et al. The spectral and correlation characteristics of a turbulent boundary layer on the flexible extended cylinder. *Mekh. zhidk. i gaza.* 1989, 5, 49—54.
12. *Petrovsky V. S.* Hydrodynamic problems of turbulent noise. *Leningrad, Sudostroyeniye,* 1966. 252 p.
13. *Lebedev S. M.* et al. The device for the acoustic sounding of electric field in solid dielectrics. *Instruments and Experimental Techniques.*1988, 6, 165—173.
14. *Akindinov V. V.* et al. Electromagnetic fields in seawater. *Journal of Communications Technology and Electronics.* 1976, 21, 5, 913—944.
15. *Maksimenko V. G.* Lowering the Intrinsic Noise of Electrode Electric Field Sensors Moving in Electrolyte. *Journal of Communications Technology and Electronics.* 2002, 47, 7, 809—813.
16. *Grafov B. M.* et al. Turbulent diffusion layer in electrochemical systems. *Moskva, Nauka,* 1990. 295 p.
17. *Grafov B. M.* et al. Self-similarity of turbulent electrochemical $1/f^3$-noise. *Electrochemistry.* 1999, 35, 6, 762—767.
18. *Fomenko V. S.* Emission properties of materials. *Naukova Dumka,* 1981. 339 p.
19. *Zakrevskii V. A., Pakhotin V. A.* Effect of mechanically induced ionization processes in polymer insulators on the noise of cable sensors of physical fields. *Journal of communications technology and electronics.* 2013, 58, 1, 56—61.
20. *Kaiser K. L.* Cable transient voltages due to microphonics. *J. Electrostatics.* 2007, 65, 12, 723—727.
21. *Perevoshchikov V. G.* et al. The effect of the winding spoilers on oscillations tug. *Voprosy sudostroyeniya, seriya Proyektirovaniye sudov.* 1982, 32, 138—141 (in Russian).
22. *Pakhotin V. A.* et al. Towed antenna cable. Patent 59327 RF BI. 2006, 34, 43.


Статья поступила в редакцию 29.04.2015 г.