

УДК 629.5.012.215

© О. В. Малышев¹, В. И. Эйдук¹, Д. Н. Кудрявцев²

¹Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург

²ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», Санкт-Петербург
eyduk@mail.ru

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПОМЕХИ ПРИДОННОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ УМЕРЕННОМ ВОЛНЕНИИ В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ

Данная работа направлена на создание математической модели для оперативной оценки параметров помехи придонного гидродинамического давления в прибрежной акватории в зависимости от характеристик умеренного поверхностного волнения. Получены соотношения для оценки спектров придонного гидродинамического давления, обусловленного турбулентностью, в зависимости от ее спектрального состава. Показано, что показатель степени спада спектров давления близок к «–2» и при отсутствии значимого поверхностного волнения помеха давления соответствует турбулентности со скоростью диссипации $\varepsilon \approx 10^{-7}–10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}^3$. Для условий умеренного поверхностного волнения получены регрессионная зависимость уровня турбулентной помехи давления от величины и частоты максимума спектра поверхностного волнения, а также регрессионная зависимость уровня низкочастотной части спектра поверхностного волнения от величины максимума спектра поверхностного волнения. Величины уровней низкочастотной части спектра поверхностного волнения не противоречат модели Фирсова—Рахманина. Предложена математическая модель спектра придонного гидродинамического давления в зависимости от параметров спектра поверхностного волнения и получены оценки коэффициентов модели. Модель учитывает составляющие помехи, создаваемые турбулентностью, низкочастотной областью спектра поверхностного волнения и частотной областью его максимума. Среднее отличие прогнозируемых и экспериментальных значений по всей выборке данных составило примерно 4 дБ. Выявление изменчивости коэффициентов модели в различных гидрофизических условиях требует проведения в дальнейшем систематических согласованных измерений поверхностного волнения и придонной помехи гидродинамического давления в акваториях, представляющих практический интерес.

Ключевые слова: гидродинамика, спектры придонного гидродинамического давления, турбулентность, спектры поверхностного волнения

O. V. Malyshev¹, V. I. Eyduk¹, D. N. Kudryavtsev²

¹Krylov State Research Centre, St.-Petersburg, Russia

²Kouznetsov Naval Academy, St.-Petersburg, Russia

PREDICTION OF HYDRODYNAMIC PRESSURE BOTTOM NOISE WITH MODERATE WAVES IN COASTAL WATERS

The present article aims at estimation of creating a mathematical model for urgent predicting the parameters of a bottom hydrodynamic pressure noise in coastal waters in depending on the spectrum of moderate surface waves. The proportions of estimating hydrodynamic pressure spectra, as a result of turbulence in dependence on its spectral composition are given. It is shown that average pressure spectra is close to «–2» power law and at the absence of significant surface waves pressure spectrum noise is corresponding to the turbulence with the dissipation rate $\varepsilon \approx 10^{-6}–10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}^3$. For the moderate surface waves conditions regression of turbulent pressure level dependence of the wave spectrum peak magnitude and frequency have been obtained. Regression of low-frequency level of the spectrum wave dependence of the wave spectrum peak magnitude has also been obtained. The data of the low-frequency level of the part of the surface wave spectrum don't contradict to the Firsov—Rakhmanin model. The mathematical model of hydrodynamic bottom pressure spectra depending on the parameters of the wave spectrum and estimation of model coefficients are proposed. The model takes into account turbulence noise, low-frequency wave noise and «area of the maximum» wave noise. The average difference

Малышев О. В., Эйдук В. И., Кудрявцев Д. Н. Оценка параметров помехи придонного гидродинамического давления при умеренном волнении в прибрежной акватории // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 2. С. 46—51.

Malyshev O. V., Eyduk V. I., Kudryavtsev D. N. Prediction of hydrodynamic pressure bottom noise with moderate waves in coastal waters. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 2, 46—51.

between predicted and experimental values for the full sample of data is close to 4 dB. Identification of variability of model coefficients under different hydrophysical conditions requires further systematic agreed measurements of surface waves and bottom pressure noise in water areas of practical interest.

Key words: hydrodynamic, bottom hydrodynamic pressure noise spectra, turbulence, surface wave spectra.

Поле придонного гидродинамического давления, наряду с другими физическими полями (гидроакустическим, сейсмическим, магнитным), широко используют в многоканальных средствах обнаружения морских объектов, таких как неконтактные взрыватели донных мин. Отсутствие эффективных средств имитации этого поля существенно повышает их противотральную стойкость. В современных средствах обнаружения реализуют цифровые алгоритмы обработки сигналов, в том числе обеспечивающие способность адаптироваться к параметрам фоновой гидродинамической помехи. В связи с этим решение задач оценки и обеспечения скрытности морских объектов от обнаружения такими средствами (в том числе определение дистанций и скоростей движения, для которых вероятность обнаружения объекта будет достаточно мала) требует получения оценок параметров помех в конкретных гидрофизических условиях. Данная работа направлена на создание математической модели для оперативной оценки параметров помехи придонного гидродинамического давления в прибрежной акватории с учетом характеристик умеренного поверхностного волнения. В ходе работы был проанализирован ряд спектров придонного гидродинамического давления, в разное время полученных с использованием соответствующего средства измерений в морской проливной зоне на глубине 20 м и расстоянии 200 м от берега.

Причиной возникновения гидродинамической помехи являются движения морской среды, которые можно разделить на случайные, обычно описываемые турбулентными моделями, и более упорядоченные волновые. Для морской турбулентности характерны энергетические спектры с максимумами на «энергоснабжающих» частотах и степенным спаданием между такими зонами [1]. Для интервала плавуности (масштабы — единицы метров, частоты — сотые Гц) теоретически были предсказаны степенные спектры с показателем « $-11/5$ », для инерционного интервала (масштабы — дециметры, частоты — десятки Гц) традиционно считался справедливым закон Колмогорова со степенью « $-5/3$ ». В последнее время были предложены и проверены на практике более сложные модели, в которых скорость спадания спектра может изменяться, в основном, между « $-5/3$ » и « -2 », причем в большей части инерционного интервала может превалировать степень « -2 » [2, 3].

При отсутствии в рассматриваемом диапазоне частот энергоснабжающих интервалов спектр пульсаций турбулентной скорости со средним показателем степени спадания α_v можно записать в виде

$$G_v(\omega) = c_1 \cdot (\varepsilon u_T)^{2/3} \omega_s^{-5/3} \left(\frac{\omega}{\omega_s} \right)^{-\alpha_v}, \quad (1)$$

где ε — скорость диссипации турбулентной энергии на частоте ω_s , $c_1 \approx 0.48$. Для приповерхностного слоя моря, на мелководье, в приливных течениях и в шторм характерны $\varepsilon \approx (10^{-6} - 3 \cdot 10^{-4}) \text{ м}^2/\text{с}^3$ [1, 4]. Во многих случаях энергоснабжающими являются частоты приливных колебаний $f_0 \approx (2 - 4) \cdot 10^{-5} \text{ Гц}$, при моделировании предполагалось, что на более низких частотах спектральная плотность постоянна.

Для получения оценок параметров гидродинамического давления спектр (1) необходимо преобразовать. Пренебрегая вязкостью в рассматриваемом интервале масштабов, связь пространственных спектров изотропных пульсаций давления p и скорости v можно записать, как $G_p(k) = \rho_B^2 G_{v^2}(k)$ [5], где ρ_B — плотность воды. Используя модель «замороженной» турбулентности и соотношения для преобразования автокорреляционной функции стационарного гауссовского случайного процесса [6], можно получить временной спектр пульсаций давления в виде

$$G_p(\omega) = 4\rho_B^2 \int_0^\infty R_{vv}^2(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (2)$$

где R_{vv} — автоковариационная функция пульсаций скорости, связанная со спектром $G_v(\omega)$ соотношением Винера—Хинчина.

Наклон спектров давления, рассчитываемых в соответствии с (2), оказывается близким к предполагаемым наклонам спектров пульсаций скорости, при этом уровень спектра давления зависит не только от скорости диссипации турбулентной энергии, но и от частоты энергоснабжения f_0 . На рис. 1

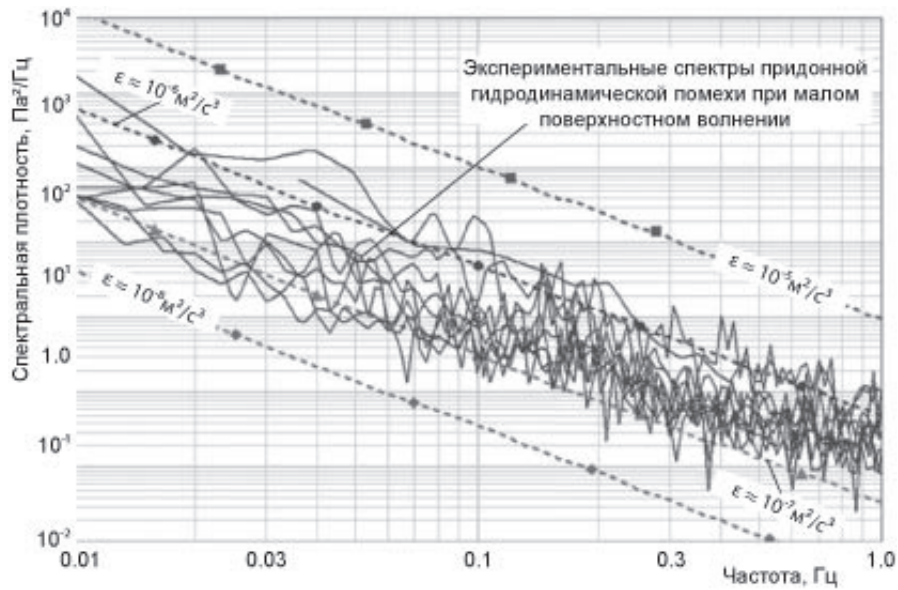


Рис. 1. Экспериментальные и теоретические спектры придонной гидродинамической помехи при малом волнении.

показаны рассчитанные с использованием (3) модельные спектры гидродинамического давления для $f_0 = 2.5 \cdot 10^{-5}$ Гц, $\alpha_v = 2$, $u_r = 0.1$ м/с, $\varepsilon = 10^{-7} - 10^{-4}$ м²/с³. Там же приведены несколько спектров помехи придонного гидродинамического давления, зарегистрированных при малом поверхностном волнении.

Как видно из рис. 1, экспериментальные спектры близки к модельным при оценках скорости диссипации турбулентной энергии $\varepsilon \approx 10^{-7} - 10^{-6}$ м²/с³, что соответствует ожидаемым в данном случае величинам. Таким образом, можно ожидать, что при малом волнении (ориентировочно до СКО поверхности 3—5 мм) спектр придонной гидродинамической помехи будет обусловлен турбулентностью и может быть приближенно получен, как

$$G_0(f) = k_0 \cdot f^{-\alpha_0}, \quad (3)$$

при $k_0 \approx 6 \cdot (10^{-3} - 10^{-2}) \text{ Па}^2 \text{ Гц}^{\alpha_0-1}$, $\alpha_0 \approx 2$, в качестве минимально ожидаемого значения можно принять $k_0^{\min} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^2 \text{ Гц}^{\alpha_0-1}$.

С увеличением интенсивности поверхностного волнения возрастает и уровень турбулентной составляющей. Анализ параметров спектров придонной гидродинамической помехи, зарегистрированных в той же прибрежной зоне при волнении до 2 баллов, показал, что они могут быть представлены в виде

$$G_{rw}(f) = k_{rw}(S_w^m, f_w^m) f^{-\alpha_{rw}} \quad (4)$$

при $\alpha_{rw} = 2.06 \pm 0.25 \approx \alpha_0$ (размерности G_{rw} — Па²/Гц, f — Гц). Прогнозные величины уровня k_{rw} при известных параметрах волнения могут быть получены с использованием регрессионного соотношения

$$k_{rw}(S_w^m, f_w^m) = k_{rw}^{(1)} (S_w^m)^{-k_{rw}^{(2)}} (f_w^m)^{k_{rw}^{(3)}},$$

где S_w^m — максимальная величина спектральной плотности поверхностного волнения (м²/Гц), f_w^m — частота, соответствующая этому максимуму (Гц), $k_{rw}^{(1)} \approx 0.016$, $k_{rw}^{(2)} \approx 7/2$, $k_{rw}^{(3)} \approx 1/2$. Проверка подтвердила значимость коэффициентов и полезность модели, соотношения экспериментальных и модельных величин k_{rw} показаны на рис. 2.

Полученная зависимость соответствует быстрому увеличению интенсивности турбулентности с волнением. Для сравнения на рис. 3 приведены данные работ [7, 8].

Спектры развитого поверхностного волнения традиционно моделируют с использованием зависимостей вида

$$S(\omega) = A \omega^{-k} \exp(-B \omega^{-n}), \quad (5)$$

где A, B, k, n — параметры, зависящие от условий волнообразования [9] (например, спектры Г. Неймана, В. Пирсона и Л. Московица, А. И. Вознесенского и Ю. А. Нецветаева и множество других). Такие модели

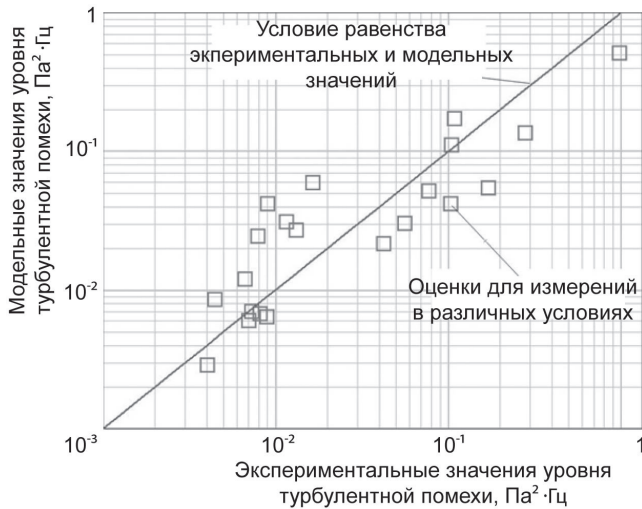


Рис. 2. Соотношение экспериментальных и модельных оценок величин уровня турбулентной помехи.

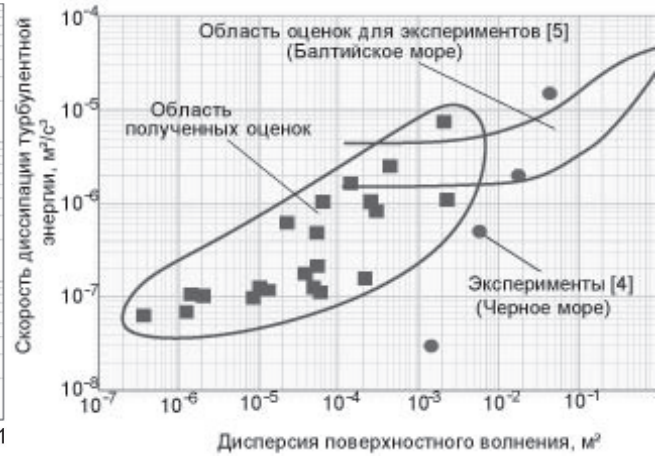


Рис. 3. Оценки скорости диссипации турбулентной энергии в зависимости от интенсивности поверхностного волнения.

во многих случаях обеспечивают адекватную аппроксимацию спектра морского волнения в области его максимума, в то же время их общей особенностью служит фактическое отсутствие спектральной плотности на частотах менее 0.1 Гц, то есть помеху волнения в наиболее важном для задач обнаружения гидродинамического поля кораблей диапазоне они не описывают. Наиболее известной моделью, учитывающей низкочастотный диапазон, является модель Фирсова—Рахманина, основанная на аппроксимации корреляционной функции волнения затухающей косинусоидой [10]. Спектр волнения в этом случае предполагается равным

$$S_{\Phi}(\omega) = 4m_0 \frac{\alpha(\alpha^2 + \beta^2)}{\beta^2 + 2\alpha^2} \cdot \frac{(\omega^2 + \alpha^2)}{\omega^4 + 2\omega^2(\alpha^2 - \beta^2) + (\alpha^2 + \beta^2)^2}, \quad (6)$$

где m_0 — дисперсия процесса, при этом предлагается справедливым $\alpha/\beta \approx 0.21$, а также $\beta \approx 0.82\bar{\omega}$ ($\bar{\omega}$ — средняя частота процесса). Вид спектров развитого поверхностного волнения для модели Фирсова—Рахманина и моделей вида (6) при различных скоростях ветра v_w показан на рис. 4.

На практике значимая низкочастотная часть в спектрах присутствует. Кроме того, в конкретных случаях (особенно в прибрежных районах) соотношения параметров спектра могут существенно отличаться от известных моделей, в том числе учитывающих продолжительность действия ветра и длину разгона. При прогнозировании гидродинамических помех предлагается рассматривать волнение, как сумму процессов в низкочастотной области и в области спектрального максимума. В области максимума при этом может быть использована модель вида

$$S_w(S_w^m, f_w^m, \delta_w, f) = S_w^m \exp \left[-\frac{(f - f_w^m)^2}{2\delta_w^2} \right],$$

параметры которой (высоту S_w^m , положение f_w^m и полуширину максимума δ_w) следует оценивать непосредственно в ситуации прогнозирования.

Для определения параметров помехи придонных волновых давлений необходимо учесть закономерность изменения поля давления с глубиной. Согласно законам гидродинамики, спектр волновых придонных давлений можно получить [11], как

$$G_w(H, f) = \gamma^2(H, f) S_w(f),$$

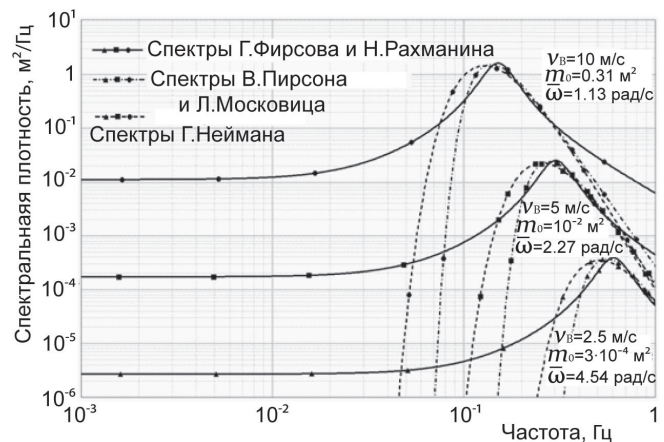


Рис. 4. Модели спектров развитого поверхностного волнения.

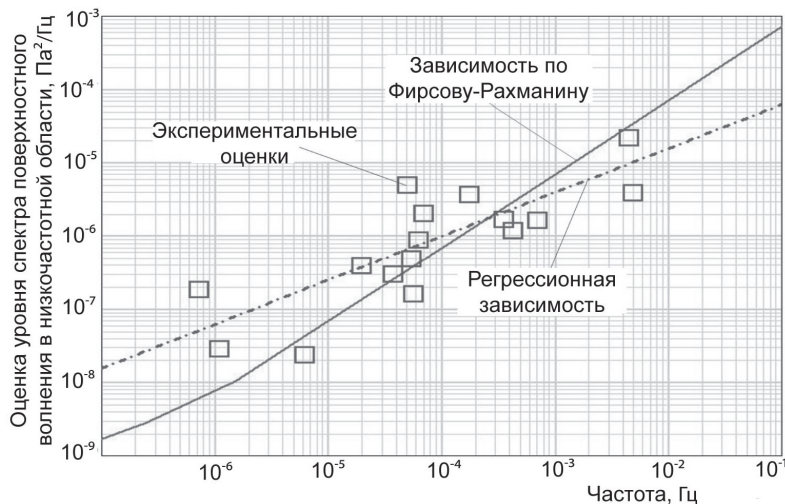


Рис. 5. Зависимость уровня низкочастотного спектра волнения от максимума спектра.

где H — глубина, $\gamma(H, f) = \rho_b g \text{ch}^{-1} [k(f)H]$, волновое число $k(f)$ определяется из соотношения $\text{th}[k(f)H] = (g(2\pi f)^2)/(k(f))$.

Низкочастотные составляющие спектра волнения в диапазоне 0.01—0.1 Гц оценивались как различия экспериментальных спектров и оценок турбулентного спектра давления вида (5) с учетом множителя $\gamma^2(\omega)$. Оценки не показали значимой величины показателя степени спада низкочастотного спектра и его зависимости от параметров волнения. Уровень низкочастотного спектра оказался значимо зависящим от величины максимума спектра S_w^m (рис. 5), так что низкочастотную волновую составляющую спектра волнения можно представить в виде

$$G_{uw}(H, f) = k_{uw}(S_w^m) \gamma^2(H, f),$$

где $k_{uw}(S_w^m) = k_{uw}^{(1)}(S_w^m)^{k_{uw}^{(2)}}$, полученные оценки параметров регрессии $k_{uw}^{(1)} \approx 2.5 \cdot 10^{-4}$, $k_{uw}^{(2)} \approx 3/5$ (размерности S_w^m и k_{uw} — $\text{м}^2/\text{Гц}$).

На рис. 5 показана также зависимость среднего уровня спектра в диапазоне 0.01—0.1 Гц от максимального уровня для модели Фирсова—Рахманина (6) (предполагалась справедливой зависимость $\bar{\omega} = 0.9m_0^{-1/5}$). Как видно, экспериментальные оценки при существенном разбросе в целом модели Фирсова—Рахманина не противоречат.

Суммарный модельный спектр придонного гидродинамического давления при наличии значимого поверхностного волнения в зависимости от его параметров может быть получен (рис. 6), как сумма вида

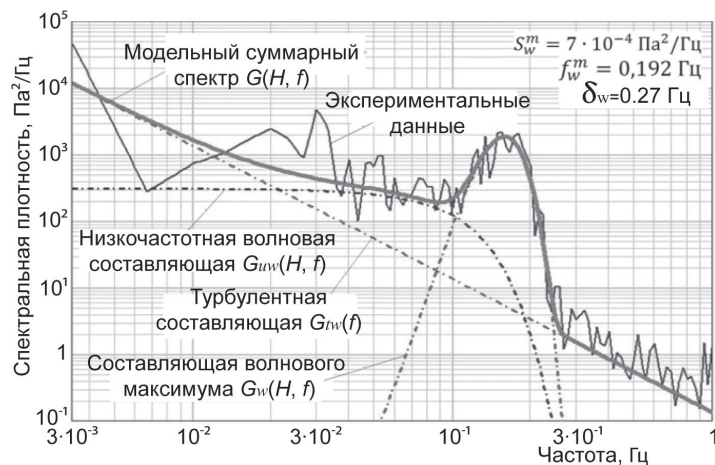


Рис. 6. Пример прогнозирования спектра придонного гидродинамического давления при $H = 20$ м.

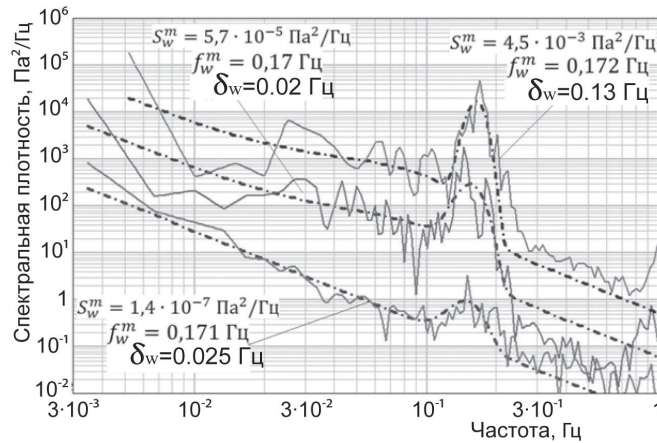


Рис. 7. Примеры соответствия экспериментальных и прогнозных спектров придонного гидродинамического давления.

$$G(H, f) = G_{tw}(f) + G_w(H, f) + G_{uw}(H, f) = k_{tw}(S_w^m, f_w^m) f^{-\alpha_{tw}} + \gamma^2(H, f) S_w(S_w^m, f_w^m, \delta_w, f) + \gamma^2(H, f) k_{uw}(S_w^m). \quad (7)$$

На рис. 7 показаны примеры соответствия модельных и экспериментальных спектров. Среднее отличие прогнозируемых и экспериментальных значений по всей выборке данных составило примерно 4 дБ.

Таким образом, предлагаемая модель (7) с учетом соотношений для $k_{tw}(S_w^m, f_w^m)$, $\gamma(H, f)$, $S_w(S_w^m, f_w^m, \delta_w, f)$ и $k_{uw}(S_w^m)$ позволяет с приемлемой точностью прогнозировать спектр помехи придонного гидродинамического давления, вызываемой малым или умеренным волнением (1—2 балла) в конкретной прибрежной акватории. Следует учитывать, что при малом волнении (СКО поверхности менее 3—5 мм) существенной может быть также турбулентная помеха (4), не связанная с волнением.

Можно предположить, что в различных акваториях вследствие изменчивости гидрофизических условий коэффициенты модели будут отличаться от полученных в данной работе. Выявление параметров такой изменчивости требует проведения систематических согласованных измерений параметров поверхностного волнения и придонной помехи гидродинамического давления в акваториях, представляющих практический интерес.

Литература

1. Физика океана. В 2 т. Т. 1. Гидрофизика океана / Под ред. А. С. Мониной. М.: Наука, 1978.
2. Tsugé S. The Kolmogorov Turbulence Theory in the Light of Six-Dimensional Navier-Stokes' Equation // Philosophy of Flow / Ed. by Nakagawa T.R.M. V. 10, Supplement, Royal White Mountains Academia Press, 19, 2013.
3. Osonphasop C., Nakagawa T.R.M. Novel Power Law of Turbulent Spectrum // Open Journal of Fluid Dynamics. 2014. 4. P. 140—153.
4. Belyaev V. S., Lyubimzev M. M., Ozmidov R. V. The rate off dissipation of turbulent energy in the upper layer off the ocean // J. Phys. Oceanogr. 1975. № 7. P. 499—505.
5. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Ч. 2. М.: Наука, 1967. 720 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1973.
7. Чухарев А. М., Ковалев Е. Н. Экспериментальная оценка скорости диссипации турбулентной энергии в слое волнового перемешивания // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Вып. 4. НАН Украины, МГИ, Севастополь, 2001. С. 53—58.
8. Морошкин К. В. О закономерностях изменения рассеивания (диссипации) энергии в стационарных ветровых течениях Балтийского моря // Тр. ИОАН. 1951. Т. 6. С. 49—58.
9. Проблемы исследования и математического моделирования ветрового волнения / Под ред. И. Н. Давидана. СПб.: Гидрометеиздат, 1995.
10. Екимов В. В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. Л.: Судостроение, 1966. 328 с.
11. Глуховской Б. Х. Исследование морского ветрового волнения. Л.: Гидрометеиздат, 1966.

Статья поступила в редакцию 14.02.2015 г.