

УДК 629.5.017
С 60

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ АМПЛИТУД ВОЛН С УЧЕТОМ МЕТЕОПРОГНОЗА

О. И. Соломенцев, д-р техн. наук, проф.;
Ли Тхань Бин, асп.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Разработаны расчетные зависимости для определения обеспеченности расчетных амплитуд волн с учетом метеопрогноза. Использовано неасимптотическое краткосрочное распределение амплитуд для учета конечности амплитуд волн и нормальное распределение для ошибки прогноза.

Ключевые слова: амплитуда волн, неасимптотическое распределение, ошибки прогноза.

Анотація. Розроблено розрахункові залежності для визначення забезпеченості розрахункових амплітуд хвиль з урахуванням метеопрогнозу. Використано неасимптотичний короткостроковий розподіл амплітуд для обліку кінцівки амплітуд хвиль і нормальний розподіл для помилки прогнозу.

Ключові слова: амплітуда хвиль, неасимптотичний розподіл, помилки прогнозу.

Abstract. This paper presents some equations for determination of the supply of wave amplitudes taking into account the weather forecast. In which we use nonasymptotic short-term amplitude distribution to account for the finite of wave amplitude and a normal distribution for the error of the forecast.

Keywords: the amplitude of the waves, nonasymptotic distribution, error of the forecast.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В расчетах внешних волновых нагрузок, действующих на судно, применительно к судам неограниченного района плавания в качестве расчетных принимаются максимально возможные значения этих нагрузок. Для судов ограниченного района плавания к максимально возможным значениям указанных нагрузок вводятся соответствующие редуцированные коэффициенты [3]. Эти коэффициенты учитывают возможность смягчения параметров ветроволновых режимов, в функции которых находятся характеристики остойчивости и внешних волновых нагрузок на судно, из-за ограничения района плавания.

Однако существует и еще один фактор, позволяющий уточнить (смягчить) расчетные характеристики волновых (а в перспективе – также и ветровых) режимов. Как показывает опыт мореплавания, капитаны судов ограниченного района плавания принимают во внимание метеопрогнозы и все же стремятся переждать прогнозируемый шторм или обойти его. Поэтому при проектировании судна ограниченного района плавания в расчет его общей прочности и остойчивости, в принципе, оказывается возможным закладывать более мягкие характеристики волнения (а со временем также и ветра) в расчете на то, что капитан судна сможет воспользоваться данными метеопрогноза и обойти шторм. Определение расчетных характеристик волнения для судов ограниченного района плавания с учетом метеопрогноза и является решаемой в данной статье проблемой.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Из существующих работ основной интерес представляет исследование [8]. В соответствии с этой ра-

ботой в процессе эксплуатации судна ограниченного района плавания с использованием метеопрогноза составляется имитационная модель рейса и решения о начале рейса, укрытии судна в порту-убежище и о продолжении рейса принимаются на основании метеопрогноза (прогноза волнения). Здесь оказываются существенными такие особенности прогноза волнения, который получает судоводитель [8]:

прогноз дается в широком диапазоне значений отношения верхней и нижней границ: оно может составлять 1,3 и более;

прогноз относится к обширным акваториям, размеры которых могут быть намного больше, чем район пути между рассматриваемыми портами;

для одного и того же района моря (океана) и для одного и того же времени может существовать несколько прогнозов, разработанных разными странами;

в некоторых случаях прогнозируются характеристики ветра, а не волнения.

Указанные особенности приводят к тому, что под прогнозом волнения в работе [8] предлагается понимать «обобщенную его оценку, сделанную судоводителем на базе всей гидрометеорологической информации фактического и прогностического характера. Точнее, под прогнозом волнения... понимаем прогноз максимального волнения на некоторый промежуток времени...» [8, с. 4].

С учетом описанных в [8] особенностей метеорологического прогноза представляется логичным, задавшись случайной погрешностью прогноза, использовать этот прогноз с учетом указанной погрешности при расчете внешних волновых нагрузок и остойчивости судна ограниченного района плавания. Указанная

проблема в работе [8], таким образом, не решена. Она является предметом рассмотрения в предлагаемой работе.

ЦЕЛЬЮ ДАННОЙ РАБОТЫ является разработка расчетных зависимостей для определения обеспеченности расчетных амплитуд волн для последующей оценки общей прочности и остойчивости проектируемого судна ограниченного района плавания с учетом метеопрогноза. При этом полагаем, что здесь не представляется возможным обойти анализ стационарного волнового режима, сразу переходя к долгосрочному распределению. В связи с этим в данной работе ограничиваемся только краткосрочными распределениями.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При анализе нерегулярного волнения общепринятым является применение для ординат волнения $\varphi_r(r)$ центрированного нормального распределения. Тогда закон распределения для амплитуд волнения $f_r(r)$ получается как закон распределения модуля двумерного вектора, обе компоненты которого распределены нормально (это закон Рэлея). Оба эти закона являются асимптотическими. Это означает, что область определения ординат волн r есть $-\infty < r < \infty$, а область определения амплитуд волн есть $0 < r < \infty$. Отсюда следует, что при использовании указанных законов возможно появление сколько угодно высоких волн с конечными (хотя и весьма малыми) вероятностями. Поскольку оба закона центрированные, то $\varphi_r(r) = \varphi_{r_0}(r, D_r)$ и $f_r(r) = f_{r_0}(r, D_r)$, где $D_r = 0,035h_3^2$ – дисперсия волновых ординат, а h_3 – высота волны 3%-й обеспеченности.

В то же время очевидно, что в реальности максимальные высоты волн h_{max} (или амплитуды волн $r_{max} = 0,5h_{max}$), которые может встретить судно в океане – независимо от того, пользуется судоводитель прогнозами погоды или нет, – всегда ограничены. Это обстоятельство, мало существенное при расчетах характеристик технической устойчивости проектируемого судна на волнении малой и средней интенсивности (здесь имеем дело с волнением, амплитуды которого $r \ll r_{max}$), может заметно исказить результаты в расчетах предельной устойчивости, когда амплитуды расчетного волнения приближаются к r_{max} . При использовании асимптотических распределений соответствующие интегральные законы $\Phi_r(r) = \int_{-\infty}^r \varphi_r(x) dx$ и $F_r(r) = \int_0^r f_r(x) dx$ достигают единицы только при $r \rightarrow \infty$. Но поскольку на практике всегда $r \leq r_{max}$, то в соответствии с этим должно быть $\Phi_r(r \leq -r_{max}) = 0$, $\Phi_r(r \geq r_{max}) = 1$ и $F_r(r \geq r_{max}) = 1$.

Это обстоятельство привело к появлению альтернативного подхода, связанного с применением

неасимптотических распределений [1,4,7]. В этом случае область определения ординат волн r есть $-r_{max} \leq r \leq r_{max}$, а область определения амплитуд $0 \leq r \leq r_{max}$. Вероятности появления волн с ординатами $r > |r_{max}|$ и с амплитудами $r > r_{max}$ строго равны нулю. Практическая реализация указанного подхода связана с применением для ординат волн распределения Пирсона типа I, приемлемость этого распределения может быть обоснована анализом экспериментальных волнограмм [1]. Соответствующее распределение для амплитуд, основанное на этих принципах, получено одним из авторов в [7]. В этом случае плотность вероятности ординат волнения $\varphi_r = \varphi_r(r, r_{max}, D_r)$ и плотность вероятности амплитуд волнения $f_r = f_r(r, r_{max}, D_r)$. При $r_{max} \rightarrow \infty$ распределение Пирсона типа I для ординат волнения переходит в нормальное распределение $\varphi_{r_0}(r, D_r)$ [4], и плотность распределения амплитуд волнения – в распределение Рэлея $f_{r_0}(r, D_r)$ [7]. Известны соотношения различных авторов (И.К. Бородай, Д.М. Ананьев, О.Е. Литонов), которые позволяют из общих соотношений гидродинамики установить зависимость $h_{max} = h_{3max}(h_{3max})$, где максимальная за несколько десятков лет высота волны 3%-й обеспеченности по тому или иному водному бассейну h_{3max} предполагается известной. Указанные предложения проанализированы и сопоставлены одним из авторов в работе [7], они приводят к близким результатам.

Анализируя логический смысл решаемой задачи, можно придти к выводу, что в данном случае возможно применение только неасимптотических распределений. Это объясняется тем, что метеопрогноз всегда представляет собой какую-то информацию по конкретной предельной высоте (амплитуде) волны, когда в соответствии с сутью прогноза появление более высоких волн предполагается (прогнозируется) либо в принципе невозможным, если прогноз рассматривается как безошибочный, либо возможным с некоторой достаточно малой вероятностью, если прогноз может содержать ошибки. Тогда основные соотношения будут [1, 4, 7]:

$$\varphi_r(\bar{r}) = C_{\varphi r} (1 - \bar{r}^2)^{q_r}, |\bar{r}| \leq 1; \quad \varphi_r(\bar{r}) = 0, |\bar{r}| > 1; \quad (1)$$

$$f_r(\bar{r}) = C_{f_r} \bar{r} (1 - \bar{r}^2)^{q_r}, 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad f_r(\bar{r}) = 0, \bar{r} < 0, \bar{r} > 1; \quad (2)$$

$$\bar{r} = \frac{r}{r_{max}}; \quad C_{\varphi r} = \frac{\Gamma(q_r + 1,5)}{\sqrt{\pi} \Gamma(q_r + 1)}; \quad C_{f_r} = 2(q_r + 1);$$

$$q_r = \frac{5K_r - 9}{2(3 - K_r)}; \quad K_r = \frac{3}{1 + \frac{1}{u_r^2}}; \quad u_r = \frac{r_{max}}{\sqrt{2D_r}}$$

При $K_r = 3$ распределение (1) переходит в нормальный закон [4], а распределение (2) – в закон Рэлея [7] – рис. 1. Для рассмотренной в работе [1] записи реального морского волнения автором этой работы было найдено, что $K_r \approx 2,46$. А соответствующие

интегральное распределение $F_r(r)$ и обеспеченность $P_r(r)$ амплитуд волнения (без учета прогноза) будут [7] (рис. 2):

$$F_r(\bar{r}) = \int_0^{\bar{r}} f_r(x) dx = 1 - (1 - \bar{r}^2)^{q_{r+1}}, 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad (3)$$

$$F_r(\bar{r}) = 1, \bar{r} \geq 1;$$

$$P_r(\bar{r}) = 1 - F_r(\bar{r}) = (1 - \bar{r}^2)^{q_{r+1}}, 0 \leq \bar{r} \leq 1; \quad (4)$$

$$P_r(\bar{r}) = 0, \bar{r} \geq 1.$$

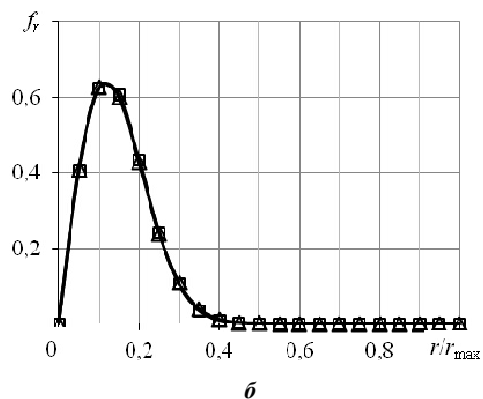
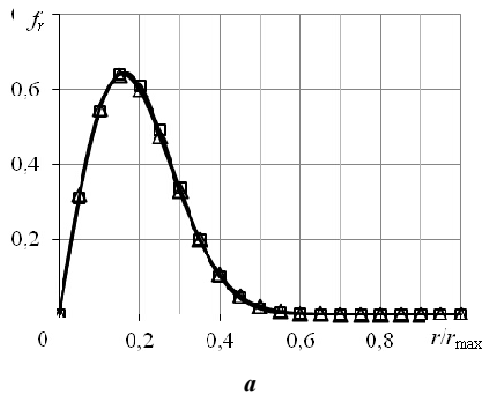


Рис. 1. Плотность вероятности амплитуд волн на стационарном волновом режиме при высоте волны 3%-й обеспеченности $h_3 = 5$ м: а - $h_{\max} = 12$ м; б - $h_{\max} = 16$ м; Δ - Релей; \square - авторы

Соотношения (2)–(4) и дают основное соотношение для предлагаемой постановки задачи. Пусть прогноз волнения характеризуется прогнозируемой амплитудой волны r_n и среднеквадратической ошибкой прогноза δr_n . Выбор и обоснование расчетной величины δr_n будет выполнен авторами в одной из последующих работ. На основании центральной предельной теоремы теории вероятностей можно считать, что прогнозируемая амплитуда волны есть случайная величина, распределенная по нормальному закону с математическим ожиданием \bar{M}_n и с дисперсией $D_n = \delta r_n^2$. При этом математическое ожидание \bar{M}_n и выдается как прогноз.

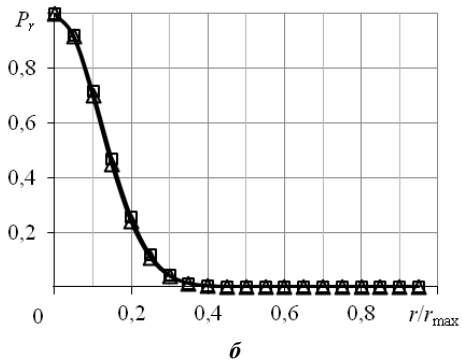
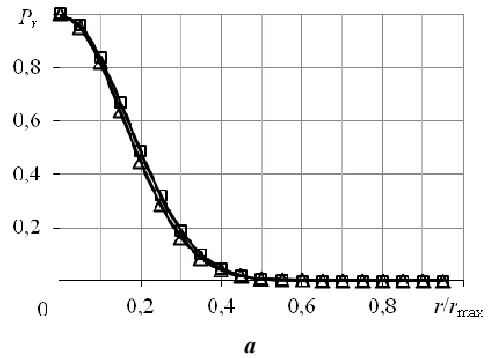


Рис. 2. Обеспеченность амплитуд волн при высоте волны 3%-й обеспеченности $h_3 = 5$ м на стационарном волновом режиме: а - $h_{\max} = 12$ м; б - $h_{\max} = 16$ м; Δ - Релей; \square - авторы

Применимость этой теоремы для данного случая можно обосновать тем, что среднеквадратическая ошибка прогноза связана с большим количеством не зависящих или слабо зависящих друг от друга факторов. Аналогичный подход используется в теории ошибок при проектировании судов также и в иных ситуациях [2]. Тогда плотность вероятности прогнозируемых амплитуд волн $f_n(r_n)$, $\bar{M}_n \leq r_n < \infty$ будет

$$f_n(r_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_n}} \exp\left[-\frac{(r_n - \bar{M}_n)^2}{2D_n}\right] \quad (5)$$

Предположим теперь, что в инструкции капитану судна содержится требование обходить районы, в которых он может встретить некоторую амплитуду волны r , большую полученной на основе прогноза амплитуды $[r_n]$. Предполагается также, что на практике это всегда возможно (сочетание упреждения прогноза по времени и скорости судна таково, что всегда позволяет это выполнить). При этом величина $[r_n]$ определяется на основе технико-экономического обоснования по схеме работы [6].

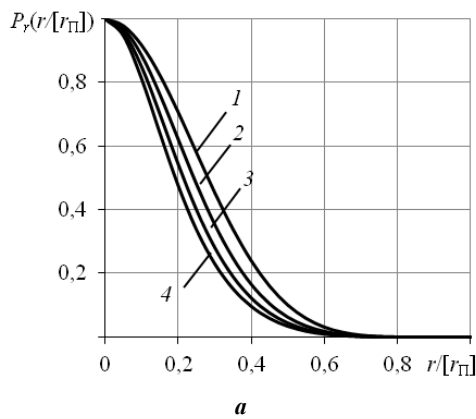
Далее делается следующее базовое допущение. Применяя соотношения (2)–(4), исходим из того, что судно ни при каких обстоятельствах не встретит волн, амплитуда которых превысит r_{\max} . Из этого условия определяются сначала внешние волновые нагрузки, а затем и размеры связей корпуса судна, обеспечивающих общую продольную прочность. Из тех же соображений можно определять и внешние воздействия,

определяющие интенсивность бортовой качки судна при расчете и нормировании его остойчивости.

Предположим теперь, что во всех случаях судно будет обходить все районы, для которых $r > [r_n]$. Тогда если прогноз безошибочен и $D_n = 0$, то можем заменить в соотношении (4) величину r_{max} на $[r_n]$ и величину $\bar{r} = \frac{r}{r_{max}}$ на $\bar{r}^* = \frac{r}{[r_n]}$.

Действительно, точно так же, как без прогноза с единичной вероятностью справедливо соотношение $\text{Вер}(r > r_{max}) = 0$, так и при безошибочном и полностью учитываемом прогнозе будет справедливо соотношение $\text{Вер}(r > [r_n]) = 0$. Здесь запись «Вер($a > b$)» читается как «вероятность события, состоящего в том, что $a > b$ ».

Иными словами, точно так же, как из-за свойств морского волнения не существует в природе и не могут появиться на пути судна волны с амплитудой, превышающей r_{max} , так и благодаря полному учету абсолютно точного прогноза на пути судна не будет волн, амплитуда которых превысила бы $[r_n]$.



Но на практике ошибки прогноза неизбежны. Поэтому величина прогнозируемой амплитуды волнения будет случайной. Обозначим случайную (случайность обусловлена здесь только ошибкой прогноза) прогнозируемую амплитуду волнения через r_n . Эта величина будет подчинена нормальному закону распределения (5) с выдаваемым как прогноз математическим ожиданием $M_n = [r_n]$ и с дисперсией $D_n = \delta r_n^2$.

Тогда обеспеченность $P_r(r)$ амплитуды волны с учетом полностью реализованного судоводителем (рис. 3), но имеющего среднеквадратическую погрешность $\delta r_n = \sqrt{D_n}$ прогноза определится по формуле полной вероятности как

$$P_r(r) = \int_{[r_n]}^{\infty} \left[1 - \left(\frac{r_*(r)}{r_n} \right)^2 \right]^{q_r+1} f_n(r_n) dr_n; \quad (6)$$

$$r_*(r) = r, r \leq r_n; r_*(r) = r_n, r > r_n;$$

$$f_n(r_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_n}} \exp \left[-\frac{(r_n - [r_n])^2}{2D_n} \right].$$

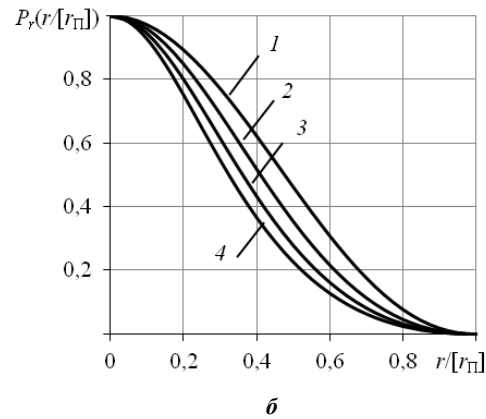


Рис. 3. Обеспеченность амплитуд волн на стационарном волновом режиме в предположении полной реализации прогноза судоводителем: а – $h_3 = 3$ м; б – $h_3 = 5$ м; 1 – $\delta r_n = 0,5$ м; 2 – $\delta r_n = 1,0$ м; 3 – $\delta r_n = 1,5$ м; 4 – $\delta r_n = 2,0$ м

При безошибочном прогнозе, когда $\delta r_n = \sqrt{D_n} = 0$, величина r_n становится неслучайной и равной своему математическому ожиданию $[r_n]$, а обеспеченность $P(r)$ становится в этом случае равной

$$\tilde{N}_r(r) = (1 - \bar{r}^{*2})^{q_r+1}, 0 \leq \bar{r}^* \leq 1; P_r(\bar{r}^*) = 0, \bar{r}^* \geq 1. \quad (7)$$

Соотношения (6), (7) решают поставленную задачу при условии полной реализации судоводителем метеопрогноза.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны расчетные и графические (см. рис. 3) зависимости для определения обеспеченности расчетных амплитуд волн для последующей оценки общей прочности и остойчивости проектиру-

емого судна ограниченного района плавания с учетом метеопрогноза.

2. Решение поставленной в работе задачи возможно только на основе неасимптотического краткосрочного распределения амплитуд волн с фиксированным конечным верхним пределом амплитуды.

3. В качестве распределения, которое при бесконечном верхнем пределе переходит в распределение Рэлея (см. рис. 1, 2), можно принять зависимости, предложенные одним из авторов в работе [7].

4. В качестве закона распределения для ошибки прогноза в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятности может быть принято нормальное распределение.

5. Выбор и обоснование среднеквадратичной ошибки прогноза должны стать предметом последующих исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Алешин, И. К.** Влияние ограниченности реальных случайных процессов волнения и ветра на вероятностные характеристики качки и устойчивости судов в условиях шторма [Текст] / И. К. Алешин // Малотоннажное судостроение : сб. науч. трудов НКИ. – Николаев : НКИ, 1988. – С. 80–89.
- [2] **Базилевский, С. А.** Теория ошибок, возникающих при проектировании судов [Текст] / С. А. Базилевский. – Л. : Судостроение, 1964. – 262 с.
- [3] **Мельников, А. М.** Требования к общей прочности судов ограниченного района плавания [Текст] / А. М. Мельников // Труды ЦНИИ морского флота. – Л. : Транспорт, 1983. – Вып. 280. – С. 19–28.
- [4] **Некрасов, В. А.** Устойчивость нелинейной бортовой качки судна на регулярном и нерегулярном волнении [Текст] / В. А. Некрасов // Гидродинамика корабля : сб. науч. трудов НКИ. – Николаев : НКИ, 1989. – С. 24–37.
- [5] **Соломенцев, О. И.** Об одной задаче параметрической оптимизации [Текст] / О. И. Соломенцев // Украинский аэрокосмический журнал. – Николаев, 2008. – Вып. 2. – С. 58–76.
- [6] **Соломенцев, О. И.** Анализ волновых нагрузок в Правилах по скоростным судам ряда классификационных обществ [Текст] / О. И. Соломенцев // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв : НУК, 2009. – № 5. – С. 18–27.
- [7] **Соломенцев, О. И.** Нормирование волновых нагрузок, действующих на судно, с учетом конечности их максимальных значений [Электронный ресурс] / О. И. Соломенцев // Електронне видання «Вісник НУК». – Миколаїв : НУК, 2010. – № 4. – Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [8] **Шац, В. Н.** Нормирование допустимых условий эксплуатации судов смешанного плавания методами имитационного моделирования и факторного анализа [Текст] / В. Н. Шац // Судостроение. – 1991. – № 5. – С. 3–6.

© О. И. Соломенцев, Лі Тхань Бін

Надійшла до редколегії 26.04.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов