

Л. М. НОГИН

ОСТОЙЧИВОСТЬ СУДНА И ЕГО ПОВЕДЕНИЕ НА ВЗВОЛНОВАННОМ МОРЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОРСКИХ СУДОВ

Часть вторая

*Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
судостроительных вузов*

У 3424/52



ИЗДАТЕЛЬСТВО
СУДОСТРОЕНИЕ
ЛЕНИНГРАД
1967



В книге, представляющей собой продолжение первой части курса проектирования судов, вышедшей в 1964 г., вопросы устойчивости и мореходности судна рассматриваются в практическом аспекте: так, как они встали перед проектировщиком при выборе элементов проектируемого судна. Наряду с теорией вопроса приводятся результаты экспериментальных исследований моделей различных факторов на поведении судна в условиях регулярного и нерегулярного волнения.

Последнее прикладное направление работы авторов выделено из области теории корабля, теории управляемости, статической теории волнения и статической теории качки, но в которых основано заложено, приводятся чаще всего без вывода.

Книга является учебным пособием для студентов кораблестроительных вузов и может быть использована при разработке курсовых и дипломных проектов. Она может служить полезной инженером кораблестроения, работа которых связана с проектированием судов.

ОТ АВТОРА

Предлагаемая вниманию читателей книга представляет собой продолжение первой части курса проектирования судов, опубликованной в 1964 г. Подробно первой части курса, посвященной методам проектирования судов, эта книга написана на основе соответствующих глав учебника, изданного в 1956 г.

В книге, носившей прикладной характер, основное внимание уделено вопросу о выборе элементов проектируемого судна с учетом требований, предъявляемых к устойчивости и мореходности морских судов. Методический аппарат, развитый в первой части курса, позволяет использовать в начальных стадиях разработки проекта сведения об устойчивости и мореходности, приведенные в этой книге. Вопросы непотопляемости, выбора заднего борта и ходкости автор предполагает изложить в том же аспекте, что и вопросы, рассмотренные в настоящей книге, в третьей части курса проектирования судов.

Поскольку термин «мореходность» не получил общего признания, уместно отметить, что в соответствии с предложением, содержащимся в статье автора [1956 б], под мореходностью в книге понимается комплекс свойств, характеризующих поведение судна на волнованном море. Эти свойства определяются показателями качки судна, величиной потери скорости от действия волн и ветра, соотношением между мощностью механизмов, которую удается развить на волнованном море, и нормальной мощностью механизмов, вертолетностью заливания открытых палуб и бризгообразования, интенсивностью гидродинамических ударов (слеминга) на волнованном море, степенью устойчивости на курсе в этих условиях и т. п. Не следует смешивать понятия мореходность и мореходные качества. Под мореходными качествами понимаются весь комплекс свойств судна, изучаемых в теории корабля (плавуемость, устойчивость, непотопляемость, ходкость и др.).

Книга написана в предположении, что читатель, приступающий к изучению теории проектирования судов, знает статику корабля, учение о ходкости судна и частично теорию качки, как это предусмотрено учебным планом и программами кораблестроительных институтов. Это позволило избежать дублирования названных курсов, однако оказалось необходимым дополнительно отразить в книге некоторые результаты, полученные на протяже-

ни последних 10—15 лет в статистической теории качки и в спектральных исследованиях морского волнения. Эти сведения приведены в книге без выводов, наряду с краткими сведениями из теории вероятностей, необходимыми для понимания последующего изложения.

Целесообразность рассмотрения в курсе проектирования судов этих вопросов можно обосновать следующими соображениями. В настоящее время при выборе элементов проектируемого судна мореходность сопоставляемых вариантов судна оценивают, призывая во внимание только их ходовые качества на возмущенном море. Делается это условно, путем введения в расчеты средних коэффициентов, которые не учитывают достаточно их особенностей отдельных вариантов судна, на гидрометеорологических условиях, в которых оно будет эксплуатироваться.

Используя в ранних стадиях проектирования статистическую теорию качки и результаты экспериментальных исследований качки, можно получить наглядное и достаточно точное представление о поведении сопоставляемых судов на возмущенном море: о их ходкости, амплитудах качки, заливаемости и слезинге как пра изменяющиеся условия эксплуатации, так и в среднем за весь срок службы судна. Тем самым открывается возможность обоснованно учитывать особенности отдельных вариантов судна при определении их экономических показателей и выборе наиболее целесообразного решения.

Книга предназначена служить учебным пособием для студентов кораблестроительных институтов. Практические данные, приведенные в книге, в частности статистические данные о ветре и морском волнении, не являясь учебным материалом, позволяют использовать книгу в качестве пособия при разработке студентами курсовых и дипломных проектов. Автор надеется, что книга заинтересует также инженеров, работающих в области проектирования судов.

Пользуясь случаем, автор приносит благодарность за ценные замечания А. В. Вронскому, просмотревшему рукопись книги, С. Н. Блаженко, В. В. Луровскому и В. В. Семелову-Там-Шанскому, просмотревшим некоторые разделы рукописи, и всем лицам, принявшим участие в обсуждении рукописи на заседаниях кафедры проектирования судов Ленинградского ордена Ленина кораблестроительного института.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- \bar{y} — средняя судна.
 c, c_{0p} — фактом и орбитальной скоростью волн.
 β_1, β_m — безразмерные коэффициенты поперечной гидродинамической силы в шпанделях.
 c_0 — безразмерный коэффициент поперечной гидродинамической силы.
 D — подвесное устройство судна и дисперсия случайных волнений и функций.
 $D_{\omega}, D_{\dot{\omega}}$ — дисперсия углов и угловых скоростей бортовой качки.
 $D_{\omega}, D_{\dot{\omega}}$ — дисперсия относительных вертикальных перемещений судна в продольной плоскости.
 E — энергия волны и средней квадрат амплитуды амплитудного процесса.
 F, F_{max} — ордината и максимальная ордината безразмерного спектра волнения.
 F_T — число Фруда.
 f — высота надводного борта.
 f_0 — надводный борт в каком-либо поперечном сечении судна.
 f_1, f_2 — коэффициенты внутреннего трения смутных (грубых) действительной и идеальной (усложненной), определенных с учетом действия сил вязкости.
 g — ускорение силы тяжести.
 h — метеоцентрическая высота.
 h_0, h_{cp} — высота волны (из фобриков).
 h_{cp} — среднее значение метацентрической высоты судна на продольном волнении.
 I, I_x — моменты инерции масс судна относительно продольной и вертикальной осей.
 I_0, I_2 — то же с учетом присоединенного момента инерции.
 K — безразмерный коэффициент квадратичного сопротивления бортовой качки.
 k_0, k_1 — коэффициенты дифференциала килевой и вертикальной качки по М. Д. Хаскину.
 L — длина судна, лавальный размер.
 $L = L_0^{1,0}$ — относительная длина судна.
 L, L_{max} — восстанавливающее плечо и максимальное восстанавливающее плечо судна.
 L_0 — восстанавливающее плечо формы.
 L_{0p} — плечо кренящего момента.
 $L_{0p}^{(1)}, L_{0p}^{(2)}$ — максимальные восстанавливающие плечи судна на первом и втором волнах.
 L_{cp} — среднее восстанавливающее плечо на продольном волнении.
 L_0 — расстояние центра давления ветра над центром давления воды.

M ; $M_{\text{ср}}$ — масса судна в критический момент.
 m — масса частицы грунта и мера осадочности.
 m_x ; m_y — моменты и центральные моменты порядка n случайной функции или случайной функции.
 K — коэффициент сопротивления деформации кавитации.
 N — число вихревых и число перевернутых волнограмм с нулевой длиной в данном промежутке времени.
 $n^{(1)}$ — число перевернутых вихревых волнограмм.
 P ; p — вероятность события.
 P_1 ; p — угол и тангенциальный ускорение гребных винтов.
 P — сила давления ветра и грузонапряженность.
 $P_{\text{дв}}$ — мощности.
 p — удельное давление ветра вес груза в частном грузе.
 p — импульсивная нагрузка.
 R — архимедовый метацентрический радиус.
 R — критическая составляющая сопротивления дрейфу.
 r ; r_n — ординаты и амплитуды волн.
 r_1 ; r_2 — энергетич. и гравитационный радиусы инерции массы судна.
 S — смещение поперечной судни или волны.
 S_x ; S_y — проекция широтной и продольной части судна на диаметрально-поперечную плоскость.
 S_x ; S_y — энтальпия дисперсии волновых ординат и энергетический спектр волнения.
 S_x — энергетический спектр вертикальной качки.
 S_x ; S_y ; S_z — плотность дисперсии итерационных ординат и углов качки.
 S_x ; S_y ; S_z — координаты волн при координатных кривых углах.
 S_x ; S_y — координаты преломления скорости на волнении и относительных вертикальных перемещений судна.
 T — осадка судна.
 t — промежуток времени.
 u ; u_0 — скорость судна и скорость ветра, м/сек.
 $u_{\text{ср}}$; $u_{\text{ср}}$ — максимальная и средняя скорость ветра в порыве.
 u — скорость дрейфа.
 V — объемное подвешивание.
 v ; v_0 — скорость судна и ветра, узлы.
 v — лавинное ускорение при бортовой качке.
 v_0 — лавинное ускорение при килевой качке в момент кавитации.
 W — нагрузка, вероятность, коэффициент сопротивления квадратной волне.
 x ; x_0 — координаты точки и центра тяжести груза, измеренные по горизонтальному.
 z ; z_0 — ординаты и амплитуды вертикальной качки.
 z — возмущение центра тяжести над осевой плоскостью.
 z_0 — возмущение центра тяжести судна над центром тяжести судна.
 z — возмущение горизонтальной составляющей давления ветра над грузовой палубой.
 z — возмущение критической составляющей сопротивления дрейфу над центром тяжести судна.
 Φ ; Φ_0 — вероятностная функция.
 Φ_0 ; Φ_0 — вероятностная функция вертикальной, бортовой и килевой качки.
 Φ_0 ; Φ_0 — вероятностная функция относительных вертикальных колебаний судна и вертикальных перемещений на волнении.
 Ω — угловая скорость волнения.
 ω — курсовой угол и коэффициент волноты грузовой палубы.

α — угол перевертывания (угол между свободной поверхностью сыпучего груза и плоскостью горизонтальной палубы).
 β — угол между свободной поверхностью сыпучего груза и вертикальной плоскостью.
 $\beta_{\text{ср}}$; $\beta_{\text{ср}}$ — углы естественного откоса сыпучего груза, находящегося в состоянии покоя и движения (пересыпания).
 β_0 — угол покоя сыпучего груза (в зависимости от поставленного задания определяется, что $\beta_0 = \beta_{\text{ср}}$ или $\beta_0 = \beta_{\text{дв}}$).
 $\beta_{\text{дв}}$ — динамический (условный) угол покоя сыпучего груза, определенный с учетом действия сил инерции.
 $\beta_{\text{мин}}$; $\beta_{\text{макс}}$ — минимальное и максимальное значение угла покоя.
 γ — фазовый угол суммарных вертикальных колебаний судна и угловый вес воды.
 ΔR ; ΔP ; ΔW — приращение сопротивления, упора и мощности.
 $\Delta \omega$ — интервал частот.
 ΔM ; ΔJ_z ; ΔJ_y — приращенная масса воды и приращенные моменты инерции массы.
 δ — коэффициент общей полноты.
 δ_1 ; δ_2 — фазовые углы бортовой, килевой и вертикальной качки.
 δ_0 ; δ_0 — фазовый угол бортовой и килевой качки, килевой и вертикальной качки соответственно.
 δ_{0-1} — разность фаз между суммарными вертикальными колебаниями судна и колебаниями волн.
 Δx_0 ; Δz_0 — приращение координат центра тяжести судна.
 Δx_0 ; Δz_0 — приращение координат центра тяжести груза.
 Δl ; Δl_0 — изменение составляющей плеча волны и формы.
 ξ — ширина сектора.
 ξ ; ξ_0 — ординаты и амплитуды суммарных вертикальных перемещений судна относительно поперечности волны.
 ξ_0 ; $\xi_0^{(1)}$ — наибольшее (полное) погружение судна в воду и дальнее поперечное сечение и в поперечной плоскости.
 ξ_0 ; $\xi_0^{(1)}$ — вертикальные составляющие скорости обтекания судна с поперечностью волны в данном поперечном сечении и в поперечной плоскости.
 θ ; θ_0 — углы и амплитуды бортовой качки.
 θ_0 — амплитуду бортовой качки при резонансе.
 θ_0 ; θ_0 — амплитуды угловых скоростей и ускорений при бортовой качке.
 θ_0 — углы крена и углы равновесия судна с сыпучим грузом.
 $\theta_{\text{макс}}$ — максимальный возмущенный угол крена при перевертывании груза.
 $\theta_{\text{мин}}$; $\theta_{\text{макс}}$ — углы, соответствующие максимуму и минимуму остойчивости.
 θ_0 — амплитуда качки.
 η_1 ; η_2 — редуцированные коэффициенты при бортовой, килевой и вертикальной качке.
 η — углы груза и дальн. объема отоса.
 η ; $\eta^{(1)}$; $\eta^{(2)}$ — множители и выровненные редуцированные коэффициенты при килевой и вертикальной качке.
 λ ; λ_0 — длина надиной волны и средняя длина волны при нерегулярном волнении.
 $\lambda_{\text{макс}}$; $\lambda_{\text{макс}}$ — длина волны, несущая наибольшую нагрузку, и максимальная длина волны в частотном секторе волнения.
 $\lambda_{\text{рез}}$ — резонансная длина волны.
 $\lambda_{\text{ср}}$; $\lambda_{\text{ср}}$ — приращенная масса и приращенный момент инерции воды.
 μ_1 ; μ_2 — безразмерные коэффициенты погружения бортовой, килевой и вертикальной качки.

превращается по сути дела в случайное событие. Поэтому понятие случайной величины можно трактовать как дальнейшее развитие понятия случайного события.

Суммой двух событий называют событие, которое сводится к выполнению либо первого события, либо второго события, либо обоих событий вместе. По аналогии с этим суммой нескольких событий называют событие, содержанием которого является хотя бы одно из этих событий.

Пусть вероятность нескольких несовместных событий (события $A_1; A_2; \dots; A_n$) будет $p_1; p_2; \dots; p_n$. Тогда вероятность того, что произойдет хотя бы одно из этих событий, выражается равенством

$$P = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (1.01)$$

Формула (1.01) выражает теорему сложения вероятностей, согласно которой вероятность одного из нескольких несовместных событий равна сумме их вероятностей.

Допустим в качестве примера, что в урне содержится n белых, l — красных и k синих шаров, которые выкаывают не глядя. Пусть, кроме того, $m = 10$, $n = 7$ и $k = 3$. Тогда вероятность вынуть красный шар и цветной (т. е. красный или синий) шар равна соответственно

$$P_1 = \frac{n}{n+l+k} = \frac{7}{10+7+3} = 0,35;$$

$$P_2 = \frac{n+k}{n+l+k} = 0,5.$$

Произведением двух событий называют событие, состоящее в совместном выполнении обоих событий. Сказанное можно отнести к нескольким событиям или группе, каждая из которых состоит из нескольких событий.

Согласно первой теореме разложения вероятностей вероятность сложного события, состоящего из нескольких, но зависящих друг от друга событий, равна произведению их вероятностей. В соответствии с этим, сохраняя прежние обозначения, можно написать

$$P = p_1 p_2 \dots p_n \quad (1.02)$$

В частности, если $p_1 = p_2 = \dots = p_n$, то

$$P = p^n.$$

Сохраняя прежние данные, найдем на основании формулы (1.02), что вероятность вынуть два раза подряд цветной шар, если вынутый в первый раз шар возвращен в урну,

$$P = \frac{(n+k)^2}{(n+l+k)^2} = 0,25.$$

Согласно второй теореме умножения вероятностей вероятность сложного события, состоящего из двух простых, зависящих друг от друга событий, равна вероятности одного из этих событий, умноженной на условную вероятность второго события. Под последней понимается вероятность, подсчитанная в предположении, что первое событие произошло. Этот результат может быть выражен формулой

$$P = p_1 p_2 (A_2/A_1),$$

где $p_2 (A_2/A_1)$ — условная вероятность события A_2 .

Возвращаясь к рассмотрению примера, найдем, что вероятность вынуть первый раз цветной шар

$$P_1 = \frac{n+k}{n+l+k} = 0,5.$$

Вероятность же вынуть второй раз цветной шар, если вынутый ранее цветной шар не возвращается в урну

$$P_2 = \frac{n+k-1}{n+l+k-1} = 0,472.$$

Поэтому при новой постановке задачи полная вероятность вынуть два раза подряд цветной шар (если вынутый в первый раз цветной шар не возвращен в урну) выражается цифрой

$$P = p_1 p_2 = 0,236.$$

§ 2. ПЛОТНОСТЬ ВЕРоятНОСТИ И ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Пусть случайная дискретная величина x принимает ряд частных значений $x_1; x_2; \dots; x_n$, которым соответствует вероятность $p_1; p_2; \dots; p_n$. Обозначив в общем случае вероятность буквой P , можно записать исходную предпосылку так:

$$P(x = x_1) = p_1; P(x = x_2) = p_2; P(x = x_n) = p_n.$$

причем

$$p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1.$$

Функция, показывающая, с какой вероятностью случайная дискретная величина принимает те или иные значения (в данном случае $x = x_1; x_2; \dots; x_n$), называется функцией распределения этой величины.

Вероятность частных значений случайной непрерывной величины¹ характеризуют плотностью вероятности. Под последней понимают функцию

$$f(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{dp}{dx},$$

где $\Delta p = f(x) \Delta x$ — вероятность того, что случайная величина окажется в данном интервале Δx , или, иначе говоря, в интервале между x и $x + \Delta x$. Гистограмма (рис. 1) эта вероятность выразится площадью, имеющей основание Δx и простирающейся от оси абсцисс до кривой распределения, т. е. кривой, выражающей графически функцию $f(x)$.

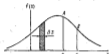


Рис. 1. Плотность вероятности.

Функция $f(x)$ называется *интервальной функцией* (или просто *функцией*) *распределения непрерывной случайной величины*. Функция $F(x)$ есть неотрицательная, неубывающая функция своего аргумента. Если интегрирование производится в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, то на плюс бесконечности

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1.$$

На минус бесконечности функция распределения равна нулю.

Плотность и функция распределения достаточно полно характеризуют случайную величину. В частности, она позволяет рассчитать вероятность того, что случайная величина окажется в тех или иных заданных пределах, и решать ряд других задач аналогичного характера. Пусть, например, надо определить вероятность нахождения величины x в интервале между $x = x_1$ и $x = x_2$. Обозначив вероятность этого события через $P(x_1 < x < x_2)$, можно написать (рис. 1)

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = F(x_2) - F(x_1).$$

Часто вместо функции распределения пользуются функцией

$$F_1(x_2) = 1 - F(x_1) = P(x_1 < x < \infty) = \int_{x_1}^{+\infty} f(x) dx,$$

¹ В дальнейшем затронутый вопрос рассматривается лишь для непрерывных случайных величин.

выражающей так называемую *облекомость* значения $x = x_1$, или, иначе говоря, вероятности превышения этого значения.

Для получения наглядного представления о повторяемости события строят *эмбограммы* (рис. 2), состоящие из ряда прямоугольников. Ширина прямоугольника определяется числом интервалов, на которые разбивается диапазон изменения исследуемой величины. Высота каждого прямоугольника пропорциональна числу значений исследуемой величины x (выраженных обычно в процентах или долях полного числа наблюдений), приходившихся на один интервал.

Если функция плотности распределения составляется графически с гистограммой, отражающей практические закономерности, то ординаты кривой $f(x)$ умножаются на ширину интервала

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{n},$$

где x_{max} — x_{min} — диапазон изменения величины x ; n — число интервалов.



Рис. 2. Гистограмма.

§ 2. МОМЕНТЫ И ДРУГИЕ ЧИСЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУЧАЙНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Моментом и центральным моментом порядка n непрерывной случайной величины x называют соответственно интегралы

$$m_n = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n f(x) dx, \quad m'_n = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_0)^n f(x) dx,$$

где x_0 — среднее значение или, иначе говоря, математическое ожидание случайной величины.

Если дискретная случайная величина принимает значения $x = x_i$ с вероятностями $p = p_i$, то ее математическое ожидание

$$x_0 = \frac{x_1 p_1 + x_2 p_2 + \dots + x_n p_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} = \sum_{i=1}^n x_i p_i,$$

так как $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. Для непрерывной случайной величины, вероятность которой $p = f(x) dx$, математическое ожидание

$$x_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx = m_1.$$

Таким образом, математическое ожидание представляет собой момент первого порядка.

Существует связь между понятием математическое ожидание (среднее значение) случайной величины и среднее арифметическое значение случайной величины (в статистическом аспекте). Связь заключается в том, что по мере увеличения числа наблюдаемых значений случайной величины ее среднее арифметическое значение приближается к математическому ожиданию, подобно тому как частота события по мере увеличения числа опытов приближается к вероятности.



Рис. 3. Мода и медиана.

представляет собой средний квадрат отклонений случайной величины от ее среднего значения, или, иначе говоря, дисперсию D_x случайной величины. Дисперсия, наряду со среднеквадратичным отклонением

$$\sigma = \sqrt{D_x},$$

представляет собой важную характеристику случайной величины.

Модой называется наиболее вероятное значение случайной величины, соответствующее для непрерывных величин максимуму кривой распределения (точка x_{mod} на рис. 3).

Под медианой понимается значение случайной величины, соответствующее точке на оси абсцисс кривой распределения, в которой площадь, ограниченная этой кривой, делится пополам (точка x_1 на рис. 3). Для медианы

$$p(x < x_1) = p(x > x_1).$$

Иначе говоря, вероятность того, что случайная величина окажется больше или меньше медианы, одинакова.

Наряду с математическим ожиданием, дисперсией, среднеквадратичным отклонением, модой и медианой пользуются и другими статистическими характеристиками случайной величины. Отметим следующие характеристики:

\bar{x} — среднеквадратичное значение случайной величины x , которое [см. формулу (1.03)] выражается через средний квадрат случайной величины x зависимостью $\bar{x} = \sqrt{m_2}$;

x_N — максимальное значение случайной величины из N возможных значений (например, при сотне измерений x_{100});

x_p — значение случайной величины, обеспеченность которого равна $k\%$ (например, при трехпроцентной обеспеченности x_{97});

$x^{(p)}$ — среднее из p максимальных значений случайной величины. (Число p выражается в относительных единицах. Пример: $x^{(0.5)}$ — среднее из $1/2$ максимальных значений.)

§ 4. НОРМАЛЬНОЕ И НОРМАЛЬНО-ЛОГАРИФИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

В дальнейшем изложении применяются законы распределения Гаусса (нормальное распределение), Гальтона (нормально-логарифмическое распределение) и Рэлея.

Нормальное распределение имеет в теории вероятностей наибольшее общее значение. По этому закону распределяется случайная величина, не подвергавшаяся какому-либо систематическому воздействию, если ее колебания вызваны рядом случайных обстоятельств, каждое из которых оказывает примерно одинаковое влияние. Распределение характеризуется функцией плотности вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x}} \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2}{2D_x} \right], \quad (1.04)$$

где, как и ранее, D_x — дисперсия случайной величины x , а x_0 — ее математическое ожидание.¹

Плотность вероятности, распределенную по нормальному закону, выражают также равенством

$$f(x) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \exp \left[-h^2 (x - x_0)^2 \right], \quad (1.05)$$

где h — мера точности, связанная с дисперсией зависимостью

$$h^2 = \frac{1}{2D_x}.$$

Кривая распределения по нормальному закону (рис. 4) симметрична. При x , стремящимся к $\pm\infty$, кривая асимптотически приближается к оси абсцисс. Максимальная ордината кривой

$$f'(x)|_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x}} = \frac{h}{\sqrt{\pi}}$$

соответствует точке с абсциссой $x = x_0 = m_1$. При $x_0 = 0$, т. е., когда среднее значение случайной величины равно нулю, ма-

¹ Под $\exp(x)$ понимается e^x . Символ \exp означает показатель степени (экспонент).

исемум кривой распределения лежит на оси ординат. С изменением математического ожидания кривая распределения перемещается вдоль оси абсцисс, не меняя своего вида.

Как это видно из рис. 4, чем больше параметр λ , тем больше вероятность среднего и близких к нему значений возмущающей величины.

С вероятностью $p = 0,997$ можно утверждать (правило трех сигм), что при нормальном распределении отклонение r случайной величины от ее среднего значения не превышает



Рис. 4. Распределение Гаусса.

где, как и ранее, σ — среднеквадратичное отклонение.

Последнее равенство, как приближенное, действительно и при других законах распределения.

При нормально-логарифмическом распределении нормально распределается не случайная величина, а ее логарифм.

Функция плотности вероятности нормально-логарифмического распределения выражается равенствами

$$f(\ln x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{\ln}}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \ln_0)^2}{2D_{\ln}} \right]; \quad (1.06)$$

$$f(x) = \frac{1}{x \sqrt{2\pi D_{\ln}}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \ln_0)^2}{2D_{\ln}} \right], \quad (1.07)$$

где \ln_0 — среднее значение логарифма x , D_{\ln} — его дисперсия.

Функции $f(x)$ и $f(\ln x)$ связаны зависимостью

$$f(x) = \frac{1}{x} f(\ln x). \quad (1.08)$$

При нерегулярном волнении по нормальному закону распределяются мгновенные значения ординат волнового профиля и углов качки. По нормально-логарифмическому закону во многих случаях распределяется случайная величина, если суммируются результаты наблюдений за длительный промежуток времени, исчисляемый годами (например наблюдения над размерами воли в данной точке или в данном бассейне).

§ 8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЛЕЯ

По закону Рэлея распределяются значения радиуса вектора

$$z = \sqrt{x^2 + y^2}$$

точки с координатами x и y , если последние представляют собой случайные величины, распределенные нормально. Приближенно

закону Рэлея подчиняются также распределение амплитуд качки и при условиях, указанных в § 6, амплитудных значений ординат волнового профиля.

Обезразличность по плотности вероятности распределения Рэлея равны соответственно

$$F_1(z) = 1 - F(z) = \exp \left(-\frac{z^2}{2D_z} \right); \quad (1.09)$$

$$f(z) = \frac{z}{D_z} \exp \left(-\frac{z^2}{2D_z} \right),$$

причем $z \geq 0$, так как $f(z)$ — неотрицательная функция. Под D_z понимается дисперсия величины z .

Математическое ожидание распределения по закону Рэлея выражается через дисперсию зависимостью

$$z_0 = \sqrt{\frac{\pi}{2} D_z} = 1,25 \sqrt{D_z}. \quad (1.10)$$

Кривая распределения, соответствующая этому закону (рис. 5), достигает своего максимального значения (моды)

$$f_{\max} = \frac{0,606}{\sqrt{D_z}} = \frac{0,257}{z_0} \quad (1.11)$$

при абсциссе

$$z = \sqrt{D_z} = 0,8 z_0.$$

Равенство (1.10) позволяет исключить дисперсию из формул (1.09) и представить их в виде

$$F \left(\frac{z}{z_0} \right) = \frac{\pi}{2} \frac{z}{z_0} \exp \left(-\frac{\pi}{4} \frac{z^2}{z_0^2} \right); \quad (1.12)$$

$$F_1 \left(\frac{z}{z_0} \right) = \exp \left(-\frac{\pi}{4} \frac{z^2}{z_0^2} \right). \quad (1.13)$$

На основании формулы (1.12) вероятность того, что случайная величина окажется в заданном интервале Δ (z/z_0), можно выразить равенством

$$F \left(\frac{z}{z_0} \right) \Delta \left(\frac{z}{z_0} \right) = \frac{\pi}{2} \frac{z}{z_0} \exp \left(-\frac{\pi}{4} \frac{z^2}{z_0^2} \right) \Delta \left(\frac{z}{z_0} \right). \quad (1.14)$$

Значения функции $F_1(z)$ и функции

$$z_0 f \left(\frac{z}{z_0} \right) = \frac{\pi}{2} \frac{z}{z_0} \exp \left(-\frac{\pi}{4} \frac{z^2}{z_0^2} \right) \quad (1.15)$$

в зависимости от безразмерного отношения z/z_0 приведены в табл. 1.



Рис. 5. Распределение Рэлея.

Таблица 1

Значения функций $\alpha_0' \left(\frac{x}{x_0} \right)$ и $F_1 \left(\frac{x}{x_0} \right)$ (%), вычисленные по формулам (1.10) и (1.18)

$\frac{x}{x_0}$	$\alpha_0' \left(\frac{x}{x_0} \right)$	$F_1 \left(\frac{x}{x_0} \right)$	$\frac{x}{x_0}$	$\alpha_0' \left(\frac{x}{x_0} \right)$	$F_1 \left(\frac{x}{x_0} \right)$
0	0	100,0	1,75	25,0	9,1
0,25	37,4	95,2	2,00	13,5	4,3
0,50	64,7	82,2	2,25	6,7	1,9
0,75	75,7	64,3	2,50	2,9	0,8
1,00	71,5	45,6	2,75	1,0	0,3
1,25	57,7	29,4	3,00	0,4	0
1,50	46,1	17,0	3,25	0,1	0

§ 4. СЛУЧАЙНЫЕ ФУНКЦИИ

Случайной называют функцию, которая, непрерывно изменяясь в зависимости от времени или других аргументов, может принимать тот или иной вид, заранее неизвестный. Конкретный вид, принимаемый функцией в результате опыта, называется ее реализацией. Каждая реализация представляет собой неслучайную функцию.

Случайную функцию можно рассматривать как отображение случайной величины, непрерывно изменяющейся в процессе опыта. При фиксированных значениях аргумента она превращается в случайную величину, которая, в отличие от случайной функции, может принимать в результате опыта одно единственное заранее неизвестное значение.

Если аргументом случайной функции является время, то такую функцию называют *случайным* или *стохастическим* процессом. Различают *нестационарные* и *стационарные* (установившиеся) стохастические процессы. Под последними понимают процессы, протекающие однородно во времени, имеют вид непрерывных случайных колебаний около некоторого среднего значения.

Характеристики стационарных случайных процессов не зависят от момента, с которого начинается отсчет времени.

Математическое ожидание случайной функции представляет собой неслучайную среднюю функцию, около которой располагаются конкретные реализации случайной функции. Для каждого значения аргумента случайной функции математическое ожидание равно математическому ожиданию соответствующего сечения случайной функции.

Дисперсией случайной функции называется неслучайная функция того же аргумента, выражающая закон изменения дисперсии.

Для каждого значения аргумента она характеризует разброс возможных реализаций случайной функции.

Приведенные определения иллюстрируются рис. 6, на котором показаны реализации случайной функции $X(t)$ и ее математическое ожидание $m_x(t)$.

Если какой-либо случайный колебательный процесс представляется в виде суммы гармонических колебаний (гармоник) со случайными амплитудами, то спектр процесса называется функцией, описывающая распределение амплитуд отдельных гармоник по частотам. Спектр считается узким, если он обладает резко выраженным максимумом.

Расчеты кривых на нерегулярном изображении основаны на предполо-

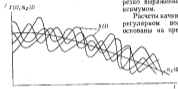


Рис. 6. Реализация и математическое ожидание случайной функции.

жения, что в течение ограниченного промежутка времени (в среднем около 2—3 час.) можно рассматривать возмущение как случайный стационарный колебательный процесс с узким спектром. Подробное рассмотрение ширины спектра рассмотрено в § 11 главы второй.

Остановимся на вопросе (рис. 7) о распределении мгновенных значений функции $x = f(t)$, выражающий такой процесс, и амплитудных значений этой функции $x_0 = f(t)$.

Как отмечалось, мгновенные значения ординат волнового профиля распределяются по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю (кривая плотности вероятности симметрична относительно оси ординат). То же относится и к мгновенным значениям углов качки, если, как это принято, исключать из рассмотрения крен, вызванный ветром. Поэтому для рассматриваемых процессов можно представить формулу (1.04) после подстановки $x_0 = 0$ и изменения обозначений в виде

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \exp\left(-\frac{z^2}{2D}\right), \quad (1.16)$$

где D — дисперсия ординат колебательного процесса. Так как математическое ожидание процесса равно нулю, то

$$D = \bar{z}^2, \quad (1.17)$$

где \bar{z} — средний квадрат мгновенных ординат. Среднее же значение абсолютных мгновенных ординат выражается формулой

$$z_0 = \sqrt{2\pi D} \approx 2,50\sqrt{D}. \quad (1.18)$$

Что же касается амплитудных значений процесса z_a , то, как отмечалось, при достаточно узком спектре, они распределяются по закону Рэлея

$$f(z_a) = \frac{z_a}{D} \exp\left(-\frac{z_a^2}{2D}\right), \quad (1.19)$$

где z_a — амплитуды колебаний.

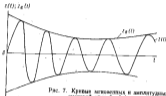


Рис. 7. Кривые мгновенных и амплитудных значений случайной функции.

Средние амплитуды процесса и средние квадраты амплитуд $E = \bar{z}_a^2$ (иначе говоря, дисперсия амплитуд) связаны с дисперсией ординат колебательного процесса зависимостями¹

$$(z_a)_0 = \sqrt{\frac{\pi}{2} D} = 1,25\sqrt{D}; \quad (1.20)$$

$$E = 2D. \quad (1.21)$$

Введя в формулу (1.19) вместо дисперсии ординат дисперсию амплитуд, можно представить функцию плотности вероятности распределения Рэлея в виде

$$f(z_a) = \frac{2z_a}{E} \exp\left(-\frac{z_a^2}{E}\right). \quad (1.22)$$

Если дисперсия ординат или амплитуд рассматриваемого процесса известна, то амплитуды колебаний любой статистической категории $(z_a)_{cr}$ определяются по одной из формул

$$(z_a)_{cr} = c_0\sqrt{D}; \quad (z_a)_{cr} = c_1\sqrt{E}, \quad (1.23)$$

¹ Если речь идет о колебательном процессе вытекания, то, как показано в § 9 главы второй, дисперсия E представляет собой удвоенную плотность энергии волны.

где $\sqrt{D} = \bar{z}$ и $\sqrt{E} = \bar{z}_a$ — среднеквадратичные значения ординат и амплитуд процесса, а c_0 и c_1 — численные коэффициенты, связанные зависимостью

$$c_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} c_0 = 0,707c_0.$$

В отечественной практике амплитуды колебаний характеризуют большей частью их обеспеченностью в процентах. В этом случае коэффициент c_0 в равенстве

$$(z_a)_{cr} = c_0\sqrt{D}$$

определяется по формуле

$$c_0 = \sqrt{-2 \ln k},$$

где k — обеспеченность, выраженная в процентах.

Соотношения между коэффициентами

$$c_0 = \frac{(z_a)_{cr}}{\sqrt{D}}; \quad c_1 = \frac{(z_a)_{cr}}{\sqrt{E}};$$

$$c_2 = \frac{(z_a)_{cr}}{(z_a)_0}.$$

где $(z_a)_0$ — средняя амплитуда, выражаются следующими коэффициентами:

%k	0,5	1,0	3,0	4,0	14,0	49,5	91,0
c_0	3,25	3,04	2,64	2,55	1,97	1,25	1,00
c_1	2,30	2,15	1,87	1,80	1,39	0,88	0,71
c_2	2,60	2,44	2,12	2,04	1,54	1,00	0,80

Отметим, что $(z_a)_{0,95} \approx z_a^{0,95}$, а $(z_a)_{0,95}$ и $(z_a)_{0,95}$ равны соответственно средней амплитуде $(z_a)_0$ и моде $(z_a)_{mod}$.

Значения коэффициента c_0 указаны более подробно в табл. 2, составленной главным образом на основе данных, приведенных в работе А. Н. Шмырева, В. А. Мореншлатт и С. Г. Исаевой [1961].¹

В табл. 3 и 4 приведены значения коэффициентов

$$c_3 = \frac{z_a^{(r)}}{\sqrt{E}}; \quad c_4 = \frac{(z_a)_N}{\sqrt{E}}; \quad c_5 = \frac{(z_a)^{(r)}}{\sqrt{E}}.$$

Напомним (см. § 3), что коэффициент c_3 выражает в относительных единицах средние амплитуды колебаний из r максимальных амплитуд, а коэффициенты c_4 и c_5 — максимальные амплитуды

¹ Ссылка на литературу в тексте книги содержит фамилию авторов, год опубликования работы и в случае необходимости (если в том же году были опубликованы и другие работы автора) действительные буквенные индексы.

Таблица 2
 Значения отклонения $\sigma_3 = \frac{\sigma_{3\%}}{\sqrt{N}}$ в зависимости от обеспеченности аналога

P%	σ_3	P%	σ_3	P%	σ_3
0,1	3,70	10,0	2,15	80,0	1,01
0,5	3,25	14,0	1,97	81,0	1,00
1,0	3,04	20,0	1,79	70,0	0,85
2,0	2,79	30,0	1,56	80,0	0,67
3,0	2,64	40,0	1,36	90,0	0,45
4,0	2,55	46,5	1,25	95,0	0,32
5,0	2,44	50,0	1,18	100,0	0

Таблица 3
 Значения отклонения $\sigma_3 = \frac{\sigma_{4\%}}{\sqrt{N}}$ в зависимости от часа взятых аналогов

P	σ_3	P	σ_3	P	σ_3
0,010	2,38	0,300	1,45	0,700	1,10
0,050	1,99	0,333	1,42	0,800	1,03
0,100	1,80	0,400	1,35	0,900	0,963
0,200	1,59	0,500	1,26	1,000	0,888
0,250	1,52	0,600	1,18	—	—

Таблица 4
 Значения отклонения $\sigma_3 = \frac{(\sigma_0)_N}{\sqrt{N}} = \sigma_3 = (\sigma_0)^{(N)}$

N	σ_3	σ_3	N	σ_3	σ_3
1	0,89	0,71	100	2,28	2,17
2	1,15	1,08	200	2,43	2,32
5	1,46	1,37	500	2,61	2,51
10	1,68	1,58	1000	2,74	2,64
20	1,87	1,78	2000	2,86	2,77
50	2,12	2,01	5000	3,02	2,93

и моду при числе наблюдений N . Обе таблицы заимствованы из работы М. С. Лонге-Хиггинса (M. S. Longuet-Higgins) [1952].

Из приведенных данных вытекают следующие эквивалентные значения индекса $k\%$; (p); N , которые приводят приблизительно к одинаковым значениям статистической амплитуды колебаний

k%	0,5	1,0	3,0	4,0	14,0	46,5
(p)	0,010	0,030	0,070	0,100	0,333	1,0
N	100	50	20	15	5	1,0

В отечественной практике принято характеризовать волнение высотой волн с обеспеченностью в 3%. Иностранцы же ученые в качестве такого аналога чаще всего принимают среднюю высоту $\frac{1}{2}$ наиболее высоких волн, что соответствует высоте волн с обеспеченностью в 14%. Они считают, что при такой оценке волнения визуальные и инструментальные наблюдения приводят приблизительно к одинаковым результатам. Наряду с этим за границей волнение характеризуют также максимальной высотой набегающих волн, под которой понимается средняя высота $\frac{1}{10}$ наиболее высоких волн. Она соответствует приблизительно высоте волн с обеспеченностью в 4%.

§ 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В этой главе мы приводим данные о ветре и волнении, необходимые при изучении мореходных качеств и прочности судна. Начинать изложение с краткой справки о состоянии вопроса.

Распределение скоростей ветра в морях и океанах изучено сравнительно полно. Недостаточно исследован, однако, вопрос о колебаниях скорости и направления ветра вблизи морской поверхности в течение коротких промежутков времени, сопоставимых с периодом собственных поперечных колебаний судна. То же самое можно сказать о перепадах скоростей ветра по фронту на участке, сопоставимом с длиной судна. Поэтому мы можем судить о динамичности ветрового давления, воспринимаемого судном, лишь на основании косвенных соображений и данных единичных наблюдений.

Работы, посвященные изучению морского волнения, в большей степени удовлетворяют потребностям кораблестроения. В зависимости от характера их относят к одному из следующих направлений: гидродинамическому, энергетическому, статистическому и спектральному.

Первое направление образует исследование, в которых изучается структура волн в идеальной жидкости на глубокой и мелкой воде без учета влияния, вызывающих волнение. Основные результаты, получаемые в этой области, сводятся к установлению зависимостей, связывающих элементы волны (например, зависимости между длиной волны, ее периодом и скоростью переноса профиля волны). В настоящее время развитие гидродинамической теории волн на глубокой воде можно считать завершенным.

В работах, относящихся к энергетическому направлению, вопросы зарождения, роста и затухания волн изучают, рассматривая энергетический баланс, участвующей энергии, передаваемую ветром волнению, работу внутренних сил трения и рассеивание энергии. Принимаются во внимание: скорость ветра, продолжительность его действия и район (расстояние от наветренного берега). Хотя задача решается для идеализированных условий (скорость ветра считается постоянной по величине и направле-

нию), энергетический метод позволяет уточнить эмпирические способы определения размеров ветровых волн.

Основные исследования в области статистики волн посвящены изучению краткосрочных и рожимых (долгосрочных) функций распределения элементов волн.

В работах, относящихся к спектральному направлению, ветровое волнение рассматривается как стационарный случайный процесс, который можно представить в виде суммы большого числа элементарных гармонических колебаний. Связь между амплитудами элементарных колебаний или дисперсией волновых фронтант, с одной стороны, и частотами гармоник, — с другой стороны, описывается функциями, называемыми соответственно энергетическим спектром и функцией спектральной плотности дисперсии. Они характеризуют распределение энергии волнения по отдельным гармоникам.

Такие частотные спектры используются в океанографии для составления прогнозов ветрового волнения. Они же являются основой расчетов качки и прочности судна на нерегулярном волнении.

Обзор работ, посвященных изучению морского волнения, можно найти в вводной статье Ю. М. Крылова, помещенной в сборнике «Ветровые волны» [1962] (см. список литературы).

§ 2. СКОРОСТИ ВЕТРА И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

Скорость ветра на море выражают либо в единицах измерения скорости либо в баллах. Второй способ зародился в то время, когда о силе ветра судили глазомерно по состоянию водной поверхности и другим внешним признакам. Отметки в качестве примера следующие признаки пятибалльного ветра: вытягиваются и подолзает большие флаги; ветер переносит легкие предметы; волны принимают хорошо выраженную форму; посылку образуются ебарашки.

Соотношение между скоростью и балльностью ветра фиксируется ветровой шкалой. Первая такая шкала была составлена в 1802 г. Бофорта. В дальнейшем предлагались и другие аналогичные шкалы, которые по-прежнему называли шкалами Бофорта. В настоящее время в Советском Союзе действует шкала, принятая Международной метеорологической комиссией в 1926 г. Она приведена в табл. 5, в которой указаны средние скорости ветра и скорости в шкале для высоты 6 м над уровнем моря. В таблице наряду с этой шкалой приведена шкала, заимствованная из работы Роула (Roll H. U.) [1958].

Ветры возникают вследствие неравномерности атмосферного давления. Разность давлений в соседних районах приводит к тому, что воздух движется из области более высокого давления в область, отличающуюся меньшим давлением.

Таблица 5

Баллы	Наименование ветра	Шкала, действующая в СССР		По Роулу
		средние скорости, м/сек	скорости в шторм, м/сек	
0	Штиль	0—0,5	1,0	0
1	Тихий	0,5—1,7	3,2	0,5—1,5
2	Легкий	1,8—3,3	6,2	2,1—3,1
3	Слабый	3,4—5,2	9,6	3,6—5,1
4	Умеренный	5,3—7,4	13,6	5,6—7,7
5	Сильный	7,5—9,8	17,8	8,2—10,8
6	Сильный	9,9—12,4	22,2	11,3—13,9
7	Крепкий	12,5—15,2	26,8	14,4—17,0
8	Очень крепкий	15,3—18,2	31,6	17,5—20,0
9	Шторм	18,3—21,5	36,7	21,1—24,2
10	Сильный шторм	21,6—25,1	42,0	24,7—28,3
11	Жесткий "	25,2—29,0	47,5	28,8—32,4
12	Ураган	>29,0	>53,0	>32,4

Штормовые ветры возникают преимущественно в областях с пониженным атмосферным давлением (циклонах). Циклонические ветры (их также называют циклонами) представляют собой воздушные вихри диаметром от нескольких сот метров до 2—3 км. Воздух в циклонах вращается по спиралям в направлении от периферии к центру. Особенно большой силы достигают тропические циклоны, к числу которых принадлежит дальневосточные тайфуны, вост-индские ураганы, а также орканы, наблюдаемые в южной части Индийского океана.

Тайфуны зарождаются в Тихом океане севернее Австралии, между Марьянскими, Каролинскими и Филиппинскими островами. Вначале тайфуны движутся на северо-запад, а затем, приближаясь к берегам Азии, поворачивают на северо-восток к Япон-ке. Иногда в теплые месяцы тайфуны несколько отклоняются на запад, проникают в Желтое море, а затем движутся на север к Охотскому морю.

Вост-индские ураганы, зарождающиеся в Мексиканском заливе или несколько восточнее, движутся вначале на северо-запад, а затем поворачивают на северо-восток. Нередко в сфере их действия оказываются юго-восточные штаты США.

Южнокитайские орканы бушуют в сороковых (тремизах) широтах.

Сильные штормы наблюдаются и в умеренных широтах, особенно в Северной Атлантике.

Скорость ветра (арашательная) в тропических тайфунах в среднем равна 50 м/сек. При тайфунах особенно большой силы скорость ветра достигает 70 м/сек и в исключительных случаях 80—90 м/сек. В Северной Атлантике лишь в единичных случаях скорость ветра достигает 50—60 м/сек, а обычно во время штормов ураганной силы она не превосходит 35—45 м/сек. Скорости ветра в тайфунах значительно превосходят скорости перемещения тайфунов.

В тропической части Атлантического океана наблюдается ежегодно в среднем 12—13 ураганов, а в бассейне Тихого океана — около 20 тайфунов.

В областях с повышенным атмосферным давлением (антициклонах) господствует большей частью хорошая погода. Сильные ветры, достигающие иногда штормовой силы (18—20 м/сек), наблюдаются здесь лишь в районах, граничащих с циклонами.

В работе, опубликованной Регистром СССР (см. «Справочные данные...», [1962]), приведены подробные данные о повторяемости ветров на морях, омывающих берега Советского Союза. Данные сгруппированы по отдельным районам моря и отдельным месяцам. Выборочные цифры, заимствованные из этой работы, приведены в табл. 6. Они характеризуют среднюю повторяемость ветра в процентах на основании данных многолетних наблюдений на судах и береговых гидрометеорологических станциях.

Скорости ветра: v_1 , которые можно ожидать один раз на протяжении года, и v_{20} , которые можно ожидать один раз на протяжении 20 лет, выражаются следующими цифрами, м/сек:

Море	v_1	v_{20}
Берингово	38	58
Охотское	37	58
Японское	36	53
Балтийские и Белое	29	40
Черное	25	35

Эти данные, заимствованные из работы Л. Е. Анапольской [1961], были получены путем обработки результатов многолетних наблюдений отечественных береговых станций.

В Северной Атлантике наибольшей повторяемостью (24%) отличаются ветры силой в 5 баллов (8—11 м/сек). Обеспеченность ветров со скоростями, превышающими 20 м/сек, равна приблизительно 5%. Более подробные данные о повторяемости скоростей ветра в океанах можно найти в работе, изданной Регистром СССР (см. «Справочные данные...», [1965]).

Таблица 6
Порывистость ветра (%) на шхерах, омывающих берега
Советского Союза

Таблица 6

Море	Скорости ветра, м/сек				
	0-5	6-10	11-15	16-20	>20
Балтийское	49	39	—	10	3
Баренцево	36	34	—	22	4
Белое	43	36	—	18	3
Каспийское	—	—	89	10	1
Лаптеево	—	—	88	10	2
Восточно-Сибирское	—	—	92	6	1
Чукотское	—	—	88	11	1
Берингово	46	29	—	15	10
Охотское	47	32	—	14	7
Японское	55	29	—	12	4
Тихоокеанский пролив	63	21	—	11	5
Черное	59	32	—	8	2
Азовское	56	35	—	8	1
Котлинское	60	30	—	8	2

§ 3. СТРУКТУРА ВЕТРА

Ветер дует порывами. На порывы длительностью около нескольких десятков секунд накладываются порывы, длящиеся 5—10 сек. На последние накладываются порывы еще меньшей продолжительности. Одновременно с изменением скорости ветра изменяется в некоторых пределах и его направление.

Общие представления о характере изменения скорости ветра во времени дает диаграмма, приведенная на рис. 8. На диаграмме приняты следующие обозначения: u — мгновенная скорость ветра, u_0 — минимальная скорость ветра в порыве; \bar{u} — среднее по площади вращения ветра в порыве на протяжении характерного промежутка времени t_0 ; $u_{cp} = u_0 + \Delta u$ — средняя скорость в порыве. Вопрос о выборе значения величины t_0 рассмотрен ниже.

Порывистость ветра по скорости и направлению обуславливается турбулентностью воздушного потока, который является разнообразными и беспорядочно перемещающимися вихрями. Орбитальные скорости вихря в каждой его точке геометрически складываются с поступательной скоростью потока. Это и является причиной пульсации мгновенной результирующей скорости ветра,

измеряемой анемометром. Колебания же давления ветра в точке на поверхности тела обуславливаются изменениями как скорости, так и направления ветра.

Скорости ветра, указанные в табл. 6, даны для высоты над уровнем океана $z_0 = 6$ м. В зависимости от высоты скорость ветра изменяется по логарифмическому закону

$$\frac{u_z}{u_a} = \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_a}{z_0}}, \quad (2.01)$$

где u_z (u_a) — скорости ветра на уровнях z и z_a ; a — коэффициент, характеризующий шероховатость подстилающей поверхности.

Если в основу расчетов принимается скорость ветра на уровне $z_0 = 5$ м, то при $a = 0,05$ см отношение u_z/u_0 выражается следующими цифрами:

z	2	1	3	5	10	15	20	30
u_z/u_0	0,83	0,94	1,00	1,08	1,13	1,15	1,20	

Показывая подобными данными, следует учитывать, что логарифмический закон изменения скорости ветра по высоте выведен для больших порывов осреднения показаний анемометра (в 10 и более минут). Л. Р. Ахметин [1963 г.] показал, что в отдельные моменты времени скорость ветра в нижерасположенной горизонтальной плоскости может быть больше, чем в вышележащей.

Колебания скорости ветра обычно характеризуют коэффициентом порывистости, под которым понимается отношение средней или максимальной скорости в порыве к средней действительной скорости ветра. В спутникованных работах эти скорости определяются по экспериментальным кривым колебания скорости ветра, однако термины средняя скорость в порыве, максимальная скорость в порыве, средняя действительная скорость ветра понимаются неодинаково. Этим можно объяснить то, что подобные статистические исследования приводят нередко к противоречивым результатам.

При изучении вопроса о величии сил, действующих на судно в свежую погоду, представляется целесообразным исходить не из коэффициента порывистости ветра, а из отношения средней

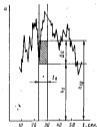


Рис. 8. Изменение скорости ветра во времени.

скорости в порыве u_p на протяжении характерного промежутка времени t_0 (см. рис. 8) и его минимальной скорости u_0 . Коэффициент

$$k = \frac{u_p}{u_0} = 1 + \frac{\Delta u}{u_0} \quad (2.02)$$

можно рассматривать как коэффициент динамичности по скорости ветра.

Изменение давления ветра, вызванное изменением его скорости и направления на протяжении порыва, обусловлено действием сил инерционной и жерационной аэродинамики. Вопрос об определении этих сил рассмотрен теоретически в работе К. К. Феденского и С. М. Белоцерковского [1954] применительно к аэродинамическим сооружениям. Вследствие отсутствия необходимых статистических данных жерационные силы (в рассматриваемом случае они не играют существенной роли) в дальнейшем изложении не принимаются во внимание. Кроме того, предполагается, что динамическое воздействие ветра на судно может быть учтено с достаточной точностью по диаграмме устойчивости. Для этого удобно ввести в рассмотрение коэффициент динамичности по давлению

$$k_p = \frac{p_m}{p_0} = 1 + \frac{\Delta p}{p_0}, \quad (2.03)$$

где p_m — среднее (удельное) давление в порыве; p_0 — статическое (удельное) давление ветра.

При таком подходе к решению задачи естественно предполагать, что условное внезапно приложенное давление $p_p - p_0$ эквивалентно динамическому воздействию на судно давления ветра, изменяющегося по реальному закону. Это допущение позволяет определять угол наклона судна под влиянием ветра, суммируя углы наклона, вызванные статической и динамической составляющей давления.

Давление p_p определяется по формуле

$$p_p = C_p \frac{\rho}{2} u_0^2$$

где C_p — коэффициент поперечной аэродинамической силы; ρ — плотность воздуха.

Давление же p_0 можно определять интегрированием кривой

$$p = C_p' \frac{\rho}{2} u^2 \quad (2.04)$$

и осреднением результатов на протяжении характерного промежутка времени t_0 , как это показано на рис. 8. В этом случае коэффициент аэродинамической силы C_p' рассматривается как перемен-

ная величина, зависящая от угла между вектором мгновенной скоростью ветра и диаметральной плоскостью судна.

Для грубых подсчетов можно пользоваться формулой

$$k_p = k_0 \left(1 + \frac{\Delta u}{u_0}\right)^2 = k_0 k^2, \quad (2.05)$$

где k_0 — множитель, учитывающий влияние изменения направления ветра.

Для конкретизации понятия характерный промежуток времени будем исходить из допущения, что порыв začínает быстро нарастать, когда угол крена судна на наветренный борт достигает максимума. Кроме того, будем считать, что при определении коэффициента динамичности можно ограничиться рассмотрением явления до момента максимального наклонения судна на подветренный борт. Влияние резонанса не будем учитывать, считая, что тройной резонанс (судно—волны—ветер) маловероятен. В этих предположениях при современном состоянии вопроса естественно принять в качестве характерного промежутка времени

$$t_0 = \frac{1}{2} \tau \approx \frac{1}{2} \tau_1,$$

где τ — период бортовой качки судна, в среднем равный (при нерегулярном волнении) периоду собственных поперечных колебаний τ_1 .

С. Н. Боговещенский [1965] исследовал сложную в известной мере задачу о действии внезапно приложенного шакала на судно, плавающее на такой воде. Он заявил, что в этом случае крен нарастает на протяжении промежутка времени $t = 0,6 \tau_1$. Это соотношение мало отличается от предложенного.

Допустим, что линеаризованный закон изменения скорости ветра в порыве выражается равенством

$$u = u_0 + at, \quad (2.06)$$

в котором коэффициент a , характеризующий быстроту нарастания скорости ветра (ускорение ветра), может быть найден (см. рис. 8) по формуле

$$a = 2 \frac{u_p - u_0}{t_0} = \frac{4u_0}{\tau_1}. \quad (2.07)$$

Из формулы (2.07) следует, что

$$\frac{\Delta u}{u_0} = \frac{1}{4} a \frac{\tau_1}{u_0}.$$

Если среднее ускорение ветра известно, то при принятых упрощениях коэффициент динамичности ветра по скорости задается по формуле

$$k = 1 + \frac{1}{4} a \frac{u_1}{u_0} \quad (2.08)$$

вытекающей из равенства (2.02).

Естественно, что среднее ускорение ветра зависит от промежутка времени t_p , принятого в основу осреднения, однако опубликованные данные позволяют установить лишь средние цифры для отдельных частных случаев. Судя по материалам, при-

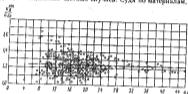


Рис. 9. Коэффициент порывистости ветра $u_{max}^{0.1}/u_0$.

веденным в книге Н. В. Колобова [1951], а данными других авторов скорость воздушного потока при сильном ветре может, по-видимому, возрастать в течение секунды на 1–2 м/сек. В работе В. Г. Сизова и В. С. Большакова [1963] указываются меньшие цифры, однако они были получены для малых скоростей ветра. Верхнюю границу ($u_0 = 15$ м/сек) соответствовали порывы с продолжительностью, исчисляемой долями секунды. Динамическое воздействие таких порывов пренебрежимо мало.

Вероятно, в общем случае минимальная скорость ветра в порыве незначительно превосходит среднюю длительную скорость. Поэтому есть основания ожидать, что коэффициенты динамичности ветра окажутся несколько меньшими коэффициентов порывистости, если скорости, характеризующие величину порыва, определяются в одинаковых предположениях.

Обратимся теперь к рассмотрению некоторых практических данных о коэффициентах порывистости.

На рис. 9, воспроизведенном из работы М. Ямагато (M. Yamagato) [1959], отмечены значения коэффициента порывистости $k_1 = \frac{u_{max}^{0.1}}{u_0}$, где $u_{max}^{0.1}$ — максимальная скорость ветра в порыве, u_0 — средняя длительная скорость ветра. Эти данные были получены

при исследовании порывистости различных видов ветра, включая тайфуны. В среднем коэффициент порывистости оказался равным 1,22. При больших скоростях ветра ($u_{max} = 30$ –46 м/сек) и продолжительности порывов, представляющих практический интерес, разброс точек оказался минимальным. Максимальные значения коэффициента порывистости равны приблизительно $k_1 = 1,4$ при $u_{max} = 20$ м/сек и $k_1 = 1,3$ при $u_{max} = 30$ м.

В табл. 7 приведены выборочные значения коэффициентов порывистости $u_{gr}/u_{ав}$, полученные И. Д. Андреевым [1959] путем обработки данных наблюдений в Колтушах (Ленинградская область), на Финском заливе и в полуострове. Скорость $u_{ав}$ определялась на протяжении одного часа. Для сильных ветров ($u_{ав} = 30$ –40 м/сек) коэффициенты порывистости И. Д. Андреева незначительно отличаются от аналогичных коэффициентов, полученных М. Ямагато, несмотря на разную структуру этих коэффициентов.

При обработке записей колебания ветра Л. Р. Ахютин [1964] отнес коэффициент порывистости $u_{max}/u_{ав}$ к средней скорости за промежутки 6,5 мин. Скорость же u_{max} он определял как максимальную скорость в порыве любой продолжительности (а не на протяжении определенного промежутка времени). Составляя полученные результаты с цифрами других авторов, Л. Р. Ахютин пришел к выводу, что в расчетах устойчивости целесообразно исходить из значений коэффициента порывистости, линейно убывающего от $k_1 = 1,6$ при силе ветра в 6 баллов до $k_1 = 1,3$ при двенадцатibalльном ветре.

Н. П. Голтаев [1957] вычислял коэффициенты порывистости как отношение $u_{gr}/u_{ав}$, где $u_{ав}$ — средняя скорость ветра на протяжении 10 мин. Под скоростью же u_{max} понималась средняя из максимальных скоростей ветра, подсчитанных для более коротких промежутков времени. Коэффициент порывистости рассматривался как функция от числа промежутков ($n = 1$ –600), на которые разбивался десятиминутный интервал.

Ниже приводятся (выборочно) цифры, характеризующие зависимость коэффициентов Н. П. Голтаева от продолжительности элементарных промежутков времени в секундах

$t = 1$	2	4	10	30
$k_1 = 1,06$	1,10	1,12	1,17	1,20

Таблица 7
Коэффициенты порывистости ветра по И. Д. Андрееву

Средняя скорость ветра, м/сек	При значениях t_p , сек.		
	2	5	10
10	1,44	1,41	1,38
20	1,36	1,32	1,31
30	1,29	1,27	1,26
40	1,26	1,24	1,23

Как показывают исследования Н. П. Гонтарева [1957], И. Д. Андреева [1959], Л. Р. Аксюткина [1963 б] и др., отклонения скорости ветра от ее среднего значения распределяются по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю. При таком распределении наиболее вероятны средние значения порывов. Однако вероятность того, что наблюдаемые порывы будут больше средних, может оказаться сравнительно высокой. Так, например, из упомянутой работы Н. П. Гонтарева следует, что при скорости ветра $v_{доп} = 34$ м/сек и длительности промежуточной времени $t_0 = 1$ сек. наиболее вероятными были коэффициенты порывистости в пределах $k_2 = 1,0-1,1$. Вероятность же того, что коэффициенты порывистости окажутся больше чем $k_1 = 1,1$ и $k_2 = 1,2$, выражалась соответственно цифрами $P = 40,1\%$ и $P = 15,5\%$.

С другой стороны, следует учесть, что при проверке устойчивости судна обычно исходят из очень неблагоприятного сочетания внешних условий, вероятность которого незначительна. Этим на первый взгляд можно оправдать исследование коэффициентов порывистости по их среднему значению.

На практических данных, рассмотренных выше, следует, что в настоящее время нельзя назвать убедительных цифр, характеризующих динамичность ветра в предположениях, основанных на предположении, соответствующих потребностям кораблестроения. Можно лишь отметить, что, несмотря на различные подходы к обработке экспериментальных данных, коэффициенты порывистости, полученные в ряде работ, оказались близкими $k_1 = 1,3$ (при больших скоростях ветра). По-видимому, для судов со средними значениями периода собственных поперечных колебаний можно в первом приближении принять, что при скоростях ветра около 30 м/сек коэффициенты динамичности близки $k = 1,2$.

Дополнительные сведения о структуре ветра и о воздействии его на судно можно найти в работе В. Г. Зиньковского-Горбаченко [1965 б].

§ 4. ПРИМЕРЫ СИЛЬНЫХ ШТОРМОВ И УРАГАНОВ

В дополнение к приведенным в § 2 статистическим данным о скоростях ветра, которые наблюдаются на различных морях и океанах, ниже дается описание некоторых сильных штормов и ураганов.

Жесточай ураган обрушился 5 декабря 1929 г. на берега Англии.¹ Скорость ветра в отдельных пунктах достигала 36-42 м/сек. Ураган бушевал на протяжении нескольких дней. К 8 декабря скорость ветра увеличилась и доходила в некоторых пунктах до 55 м/сек.

Во время шторма потеряла аварию около 600 судов, из которых погибло несколько десятков. В числе погибших судов: плавучий док водоизмещением около 11 000 м, пароход «Ада» водоизмещением 8000 м, пароход «Колумби» водоизмещением 5600 м и другие сравнительно большие суда. Повреждения получили пароходы «Бронен» ($D = 4600$ м), «Берегагардия» и «Балтик» ($D = 24 000$ м).

В это время (7 декабря) в Бискайском заливе находились три линейных корабля «Парижская коммуна» и крейсер «Профиетер», совершавшие практическое плавание. По словам участника похода, волны были высотой в 10 м и длиной 100 м. Времени у линейного корабля качка доходила до 38°, на крейсере — больше 40°. Через вентиляционные шахты массы воды вливали в каютгарии. Водооливные средства не могли справиться с водой, палубы заливались волной, до башни зарывались в воду. Вельботы и шестеры были разбиты и смесены водой за борт, волнами была разрушена часть палубы. После трехсуточной борьбы со штормом корабли пришли в порт назначения.

В начале сентября 1961 г. на южное побережье США обрушился ураган под названием «Карла».² Он зародился 6 сентября в районе Карибского моря. Ураган сопровождался сильными дождями и грозями. Скорость ветра достигала 225 км/час (62 м/сек). Ураганом был почти полностью разрушен город Гальвестон на северо-западном побережье Мексиканского залива.

Почти одновременно на Атлантическом океане бушевали ураганы «Бесса» и «Добби» несколько меньшей силы.

Тайфун «Амелла» возник 4 сентября 1961 г. в районе Маршалловых островов. Двигаясь на запад, тайфун достиг острова Тайвань 12 сентября. Очень пострадал город Тайбей, в котором было разрушено 800 домов.

Несколько южнее места зарождения этого тайфуна 8 сентября возник тайфун «Нэнси». Вначале он двигался параллельно пути, пройденному упомянутым ранее тайфуном, но 13 сентября, не доходя до Филиппинских островов, повернул на север. 16 сентября он достиг берегов Японии, а 18 сентября процесс пошел над Камчаткой.

Скорость ветра в тайфуне «Нэнси» превышала 300 км/час (83 м/сек). Особенно пострадали от тайфуна Японские острова. Здесь погибло около 150 человек, ранено было 2000 человек. Разрушено 450 тысяч домов и 400 мостов и дамб. Многие районы оказались затопленными.

По силе ветра и причиненным разрушениям этот тайфун подобен тайфуну «Веря», который обрушился на Японию в сентябре 1959 г.

До этого в Японии были зарегистрированы особенно сильные тайфуны в сентябре 1954 г. и сентябре 1956 г. Во время первого

¹ Описание шторма дается с сокращениями по книге Л. Ф. Тетова [1935].

² Ураганом и тайфуном дают жесткое определение.

из них в пролив Цугару затонул крупный пассажирский пароход, на котором находились четыре скорых поезда и более 1100 пассажиров. Во время тайфуна пострадало около 4900 судов, из них 880 судов затонуло, 130 выброшено на берег и 250 пропало без вести. Вероятно, в основном это были мелкие рыболовные суда.

Во время тайфуна 1956 г. скорость ветра достигала 72 м/сек. На рис. 10, заимствованном из книги С. Тамия и С. Мотора (S. Tamia and S. Motora) [1960], воспроизведена запись скорости

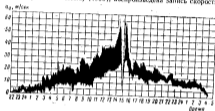


Рис. 10. Колебания ветра в тайфуне.

ветра при прохождении тайфуна у берегов Японии 17 сентября 1945 г. Рисунок дает представление о характере изменения средней скорости ветра, его возмущенности и штилевой области в центральной части тайфуна.

§ 4. СООТНОШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛНЫ

Согласно гидродинамической теории волн с малой амплитудой, распространяющихся на глубокой воде, элементы волны связаны следующими соотношениями:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = 1,25 \sqrt{\lambda}; \quad (2.09)$$

$$c = \frac{g\lambda_s}{2\pi} = 1,56\tau_s,$$

где c , λ , τ_s — фазовая скорость, длина и период волны. Под фазовой скоростью понимается скорость перемещения профиля волны.

Из формул (2.09) следует, что

$$\left. \begin{aligned} \tau_s &= \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} = 0,80 \sqrt{\lambda} = \frac{\lambda}{c}; \\ \lambda &= \frac{g}{2\pi} \tau_s^2 = 1,56\tau_s^2; \\ \lambda &= \frac{2\pi g}{\sigma^2} = \frac{61,6}{\sigma^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

где σ — частота волны.

Частицы воды движутся по орбитам, радиусы которых убывают по мере увеличения расстояния от поверхности воды. Орбитальная скорость частицы $c_{ор}$ вблизи поверхности воды меньше фазовой скорости c , как это показывает равенство

$$c_{ор} = \frac{\pi}{k_s} h_s = \pi \frac{h_s}{\lambda} c, \quad (2.11)$$

где h_s — высота волны, h_s/λ — крутизна волны.

Полная энергия волны, приходящаяся на участок с шириной, равной единице, определяется равенством

$$E = \frac{1}{8} \gamma h_s^2 \lambda, \quad (2.12)$$

где $\gamma = \rho g$ — удельный вес воды.

В системе координат с осью абсцисс, расположенной на уровне тихой воды, волновой профиль выражает косинусоидой

$$r = r_0 \cos \left(2\pi \frac{x}{\lambda} - \sigma t \right). \quad (2.13)$$

Будем считать, что положительные направления осей координат расположены вверх и направо от начала координат. Тогда в начальный момент времени $t = 0$ для точки с абсциссой $x = 0$ имеем $r = r_0$ и, следовательно, ось ординат проходит через вершину волны.

Как это следует из формулы (2.13), угол волнового склона

$$\varphi = \frac{dr}{dx}$$

в точке с абсциссой x выражается зависимостью

$$\varphi = -2\pi \frac{r_0}{\lambda} \sin \left(2\pi \frac{x}{\lambda} - \sigma t \right). \quad (2.14)$$

Введем в формулу (2.14) максимальный угол волнового склона

$$\varphi_0 = \frac{2\pi r_0}{\lambda} = \frac{r_0 \sigma^2}{g}, \quad (2.15)$$

можно представить ее в виде

$$\varphi = -\varphi_0 \sin \left(2\pi \frac{x}{\lambda} - \sigma t \right) = \varphi_0 \cos \left(2\pi \frac{x}{\lambda} - \sigma t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.16)$$

Из формулы (2.13) и (2.16) следует, что вертикальные колебания волнового профиля и колебания угла волнового склона разнятся по фазе на 90° .

§ 4. ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Ветровые волны вызываются действием ветра на водную поверхность. Они возникают в виде ряби уже при скоростях ветра 0,6–0,8 м/сек. С увеличением скорости ветра размеры волн быстро возрастают.

В начальной стадии развития волн (при неизменной скорости ветра) их высота растет быстрее, чем длина. На протяжении этого периода крутизна волн, т. е. отношение их высоты к длине, может теоретически достигать значения $\frac{h_0}{\lambda} = \frac{1}{7}$. Практически, однако, волны круче 1/10 наблюдаются редко.

Второй период развития волн, на протяжении которого их длина растет быстрее высоты, характерен постепенным уменьшением отношения h_0/λ .

В процессе развития волн их фазовая скорость возрастает по мере роста волн. Отношение фазовой скорости c к скорости ветра u , служит показателем степени развития волн. Это дало основание назвать отношение c/u возрастом волн.

Энергия ветра передается волкам двумя путями: нормальными давлению и касательными напряжениями. Последние оказывают воздействие на орбитальное движение частиц воды. Специалисты в большинстве своем предполагают, что процесс передачи энергии не прекращается после того, как скорость ветра сравняется с фазовой скоростью волн, поскольку орбитальная скорость меньше фазовой. Из этого делается вывод, что скорость распространения волн (фазовая скорость) может превышать скорость ветра.

Считая, что крутизна волны однозначно определяется ее возрастом, Г. Свэдруп и В. Мунк [1951] дали графическую интерпретацию зависимости $h_0/\lambda = f(c/u_0)$ на основе экспериментальных данных. Из кривой, предложенной этими авторами, следует, что предельному возрасту волн $c/u_0 = 1,4$ соответствует крутизна $h_0/\lambda = 1/45$.

В дальнейшем другие авторы получили ряд аналогичных кривых. Некоторые из них, предложенные советскими учеными, представлены на рис. 1) совместно с кривой Г. Свэдрупа и В. Мунка. Рисунок, заимствованный из работы Л. Ф. Титова [1960], показывает, что при достижении скорости ветра крутизна волн убывает по мере увеличения их длины. Если же сопоставляются волны

одинаковой длины, то с увеличением скорости ветра крутизна волн возрастает.

Некоторые ученые, и в том числе В. В. Шулейкин [1960], считают, что фазовая скорость волны не может превышать скорость ветра. В качестве предельного возраста волны В. В. Шулейкин, основываясь на развитой им теории, назначает цифру $(c/u_0)_{\max} = 0,82$. По В. В. Шулейкину закон изменения крутизны волн, после того как она достигает максимума, выражается формулой

$$\frac{h_0}{\lambda} = 0,04 + 0,103 \left(\frac{h_0}{\lambda} \right)^{10},$$

где $\lambda_0 = \lambda f(u_0)$ — длина волны, соответствующая стадии наибольшей крутизны. В пределе по В. В. Шулейкину $h_0/\lambda = 1/23$.

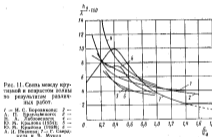


Рис. 11. Связь между крутизной и возрастом волн по результатам различных работ.

1 — Г. Свэдруп и В. Мунк; 2 — Л. П. Беринг; 3 — В. А. Забова; 4 — Ю. М. Крайнов (1954); 5 — Ю. М. Крайнов (1958); 6 — А. И. Петелин; 7 — В. В. Шулейкин и В. Мунк.

При данной скорости ветра размеры волн определяются либо продолжительностью ветра, либо его разгоном.

Под разгоном ветра понимают длину участка водного бассейна, над которым ветер дует примерно в одинаковом направлении и приблизительно с одинаковой скоростью. Каждому разгону соответствует определенный минимальный промежуток времени t_{\min} , при котором ветер заданной силы может вызвать в конце разгона волны, имеющие наибольшую возможную высоту. Если фактическая продолжительность ветра t меньше t_{\min} , высота волн будет определяться промежутком времени t , который в этом случае накладывает ограничение на развитие волн. При $t > t_{\min}$ высота волн зависит от разгона F .

Сказанное может быть пояснено следующим примером.

Таблица 8

Элементы волн в зависимости от скорости ветра и разгона

V, м/с	u ₀ = 5 м/сек			u ₀ = 10 м/сек			u ₀ = 15 м/сек			u ₀ = 20 м/сек			u ₀ = 25 м/сек					
	h _{max} · 10 ³ м	λ · 10 ³ м	h _{max} / λ	h _{max} · 10 ³ м	λ · 10 ³ м	h _{max} / λ	h _{max} · 10 ³ м	λ · 10 ³ м	h _{max} / λ	h _{max} · 10 ³ м	λ · 10 ³ м	h _{max} / λ	h _{max} · 10 ³ м	λ · 10 ³ м	h _{max} / λ			
20	0,6	0,7	0,8	0,9	3,4	1,5	1,3	1,4	4,2	2,1	1,7	1,8	4,5	2,0	2,6	3,1	4,7	1,2
30	0,7	0,8	0,9	1,0	4,4	3,7	2,0	2,2	5,2	3,9	2,6	3,0	5,5	3,4	3,7	4,5	5,6	2,4
40	0,8	1,0	1,2	1,4	5,0	4,0	2,8	3,0	6,0	4,3	3,0	3,5	6,3	3,6	4,3	5,1	6,5	3,1
50	0,9	1,0	1,2	1,4	5,0	4,0	2,8	3,0	6,0	4,3	3,0	3,5	6,3	3,6	4,3	5,1	6,5	3,1
60	0,9	1,0	1,2	1,4	5,0	4,0	2,8	3,0	6,0	4,3	3,0	3,5	6,3	3,6	4,3	5,1	6,5	3,1
70	0,9	1,0	1,2	1,4	5,0	4,0	2,8	3,0	6,0	4,3	3,0	3,5	6,3	3,6	4,3	5,1	6,5	3,1
80	0,9	1,0	1,2	1,4	5,0	4,0	2,8	3,0	6,0	4,3	3,0	3,5	6,3	3,6	4,3	5,1	6,5	3,1
90	0,9	1,0	1,2	1,4	5,0	4,0	2,8	3,0	6,0	4,3	3,0	3,5	6,3	3,6	4,3	5,1	6,5	3,1
1000	0,9	1,0	1,2	1,4	5,0	4,0	2,8	3,0	6,0	4,3	3,0	3,5	6,3	3,6	4,3	5,1	6,5	3,1

Допустим, что ветер дует в течение незначительного промежутка времени над большим участком океана. Естественно, что в этом случае определяющее значение для развития волн имеет время t . С другой стороны, если ветер дует над небольшим сектором, высота волн определяется не продолжительностью ветра, а исключительно расстоянием от наветренного берега.

Фактический разгон ветра обычно меньше максимального возможного по географическим признакам. Редко и притом в отдельных бассейнах он достигает 1000 км, а большей частью не превосходит 200—300 км. Продолжительность же ветра, более или менее постоянного по скорости и направлению, обычно не превосходит 30—40 час., если скорость ветра меньше 15 м/сек. При большей скорости ветра продолжительность его уменьшается.

Если вешние склоны не диметрируют развитая волна, они достигают максимальных размеров, соответствующих данной силе ветра. Для определения зависимости высоты волн от скорости ветра была предложена ряд формул, большая часть которых представлена в виде

$$(h_k)_{\text{max}} = \frac{k}{g} u_0^2$$

где k — численный коэффициент. Предлагаемые значения коэффициента k изменяются в широких пределах. В качестве предположительной цифры можно назвать $k \approx 0,25$, если понимать под $(h_k)_{\text{max}}$ высоту значительных волн $h^{(10)}$.

В табл. 8 указаны соотношения между скоростью ветра u_0 , разгоном F , продолжительностью роста волн t_{max} с одной стороны, и элементами волн (высотой h_{max} и λ_{max} , периодом T_{max}) — с другой стороны. Таблица дана ввиду из работы, изданной Регистром СССР (1962). Написанная группой специалистов, она основана на экспериментальных данных и расчетах.

В расчетах общей прочности обычно исходят из предположения, что условная длина волны равна длине судна λ , следовательно, скорость волны, входящая в отношение σ/λ , является заданной величиной. Кроме того, считают, что условная высота волн однозначно связана с их длиной соотношением вида

$$h_k = k \lambda^m,$$

где m — показатель степени, который в формулах, предложенных рядом авторов, изменяется в пределах $m = 0,50—0,75$.

Из формулы следует, что крутизна волн уменьшается при увеличении их длины. Это предположение согласуется с данными рис. 11, если скорость ветра рассматривается как постоянная нормируемая величина. Судя по рисунку, приемлемые результаты можно получить, приняв $m = 20—22$ м/сек.

Выше, когда речь шла о скорости ветра, предполагалось, что на протяжении рассматриваемого времени она остается постоянной.

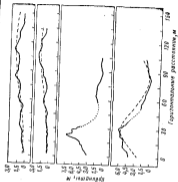


Рис. 13. Профили волн разной крутизны.



Рис. 12. Конфигурация штормовой волны высотой 9 м.

В действительности же, как отмечалось, ветер дует порывами разной силы и продолжительности. Каждый порыв вызывает свои особые последовательности волн, причем наряду с волнами, вызванными местными ветрами, часто наблюдаются волны, вызванные действием ветров, дующих в других районах. Поэтому во время сильных ветров складывается взаимодействие волн различных периодов и размеров, распространяющихся в различных направлениях. Интерференция и перекрещивание волн осложняют топографию волнового моря, поверхность которого большей частью имеет мало общего с так называемым регулярным волнением.

Вследствие отмеченных обстоятельств профили трехмерной волновой поверхности далеки от классических троякообразных волн. Форма таких профилей не подчиняется видимым закономерностям, однако можно отметить, что их поперечный сдвиг круче наветренного. Общее представление о нерегулярном волнении можно получить при рассмотрении рис. 12 и 13, построенных Шумахером в результате обработки стереофотограмми. Цифрами на рис. 12, отображающей топографию волнового моря, отмечены высоты волн. Профили волн показаны на рис. 13.

После прекращения ветра короткие волны затухают быстрее длинных и неправильное волнение постепенно превращается в более или менее регулярную зыбь. Особенно провальным характер имеют волны мертвой зыби, под которой понимают зыбь при полном штиле. Профиль зыби мало отличается от троякообразной. Затухая, зыбь становится все менее крутой.

§ 7. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЛНЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О НЕМ

Как и в предыдущем параграфе, мы ограничимся лишь рассмотрением волн на глубокой воде, вызванных действием ветра. Волны классифицируют по стадиям развития, типу и форме.

По стадиям развития различают развивающееся, установившееся (полное развитие) и затухающее (после снижения скорости ветра) волнение.

По типу различают ветровое волнение, которое может быть развивающимся или установившимся; зыбь, соответствующую стадии затухания волнения, и смешанное волнение, состоящее из ветровых волн и зыби. Как отмечалось, ветровое волнение состоит из волн, разнообразных по размерам и форме. Волны зыби отличаются более правильным характером. Наибольшим сходством отличается мертвая зыбь, распространяющаяся при полном штиле.

В зависимости от формы волн различают двухмерное и трехмерное волнение. Двухмерные волны характеризуются их длиной и высотой, так как гребни волн предполагаются прямолинейными.

К числу двумерных волн относится мертвая зыбь при длительном существовании.

Интенсивность волнения характеризуют баллами. В табл. 8 указаны соотношения между балльностью волнения и высотой волн по принятой в Советском Союзе шкале Главного управления гидрометеорологической службы 1954 г. Табличные цифры характеризуют океанские волны с обеспеченностью 3%. Баллы ветра, соответствующие баллам волнения, даны по действующей ранее шкале.

Таблица 8

Шкала волнения			
Баллы ветра	Баллы волнения	$h_{3\%}, м$	Характеристика волнения
1	1	0—0,25	Слабое
2—3	2	0,25—0,75	Умеренное
4	3	0,75—1,25	Значительное
5	4	1,25—2,0	"
6	5	2,0—3,5	Сильное
7	6	3,5—6,0	"
8—9	7	6,0—8,5	Очень сильное
10	8	8,5—11,0	" "
11—12	9	$\geq 11,0$	Исключительное

Отнесем распределение Рэлея к амплитудам видимых волн. Тогда, введя в формулу (1.13) относительную высоту волн h/h_0 , где h_0 — их средняя высота, можно выразить обеспеченность распределения Рэлея зависящейю

$$F_1\left(\frac{h}{h_0}\right) = \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{h}{h_0}\right)^2\right]. \quad (2.17)$$

При этом формула (1.14), выражающая вероятность того, что относительная высота волн окажется в заданном интервале h/h_0 , представится в виде

$$f\left(\frac{h}{h_0}\right) \Delta\left(\frac{h}{h_0}\right) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{h}{h_0^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{h}{h_0}\right)^2\right] \Delta\left(\frac{h}{h_0}\right). \quad (2.18)$$

На рис. 14 наряду с кривыми, выражающими обеспеченность относительной высоты волн $F_1\left(\frac{h}{h_0}\right)$ и функцию $f\left(\frac{h}{h_0}\right)$, приведена кривая обеспеченности относительной высоты волн, построенная по данным Я. Г. Вилеского и Б. Х. Глуховского [1957]. Эти данные были получены путем обработки 42 лет запис показаний волнографа и их осреднения. Всего было зарегистрировано на

морях Советского Союза 5500 волн. Максимальные расхождения между отношениями h/h_0 , соответствующими одинаковой обеспеченности, достигали 11%, однако в среднем расхождения не превосходили 4—6%.

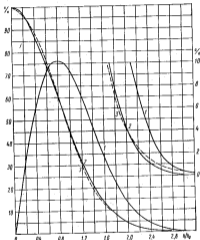


Рис. 14. Теоретическая кривая (1) относительной вероятности $\Delta f(h/h_0)$, а также теоретическая (2) и практическая (3) кривые обеспеченности $F_1(h/h_0)$.

Рис. 14 показывает, что в рассматриваемом случае теоретическая и практическая кривые мало отличаются друг от друга.

Кривые обеспеченности относительной высоты волн позволяют установить, как распределяется высота волн, составляющих волнение, если известна их средняя высота. Кроме того, воспользовавшись этой кривой, можно по известной высоте волн данной

обеспеченности найти высоту волн любой другой обеспеченности. В качестве примера отметим, что по практической кривой коэффициент для перехода от высоты волн обеспеченностью 5% к высоте волн обеспеченностью 1% равен приблизительно

$$\frac{h_{1\%}}{h_{5\%}} = \frac{h_{1\%}}{h_5} \cdot \frac{h_5}{h_5} = \frac{2,45}{1,90} = 1,28.$$

По теоретической кривой мы бы получили $\frac{h_{1\%}}{h_5} = 1,24$.

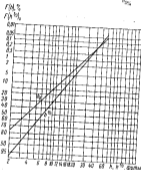


Рис. 15. График функций долгосрочного распределения высоты волн в Северной Атлантике.

Распределение показателей волнения, измеренных в данной точке водной поверхности на протяжении длительного времени (в течение года или нескольких лет), называется долгосрочным или режимным. Функция долгосрочного распределения, отличающаяся большой стабильностью, подчиняется нормально-логарифмическому закону распределения (см. § 4 главы первой). Приблизительно к одинаковым результатам приводят долгосрочные наблюдения, проводимые в различных пунктах данного бассейна, не отличающиеся значительно по режимам волнения. В качестве примера на рис. 15 приведен логарифмический график функций долгосрочного распределения высоты всех волн

и значительных волн $h^{(0,9)}$, построенный по данным наблюдений в Северной Атлантике. Рисунок заимствован из работы Н. Х. Джаксера и Р. Л. Брукса (N. H. Jaxera and R. L. Brooks) (1959).

В табл. 10 указана повторяемость (в среднем за год) высоты волн трехпроцентной обеспеченности, а также максимальная высота и длина волн в морях, омывающих Советский Союз. Она составлена на основе подробных таблиц, приведенных в отмеченной выше работе Регистра СССР, и характеризует наиболее бурные районы каждого моря.

Таблица 10

Повторяемость высот волн (%) в морях, омывающих Советский Союз

Море	Высота волн h_3 , м							h_{max} , м	L_{max} , м
	0-1,2	1,2-2	2-3	3-3	3-5	5-7	> 7		
Балтийское	75	11	8	—	5	1	0	7	95
Береговое	53	14	13	—	15	4	1	11	180
Балое	70	13	10	—	6	1	0	7	—
Каспийское	—	—	—	89	8	2	1	8	156
Дальневосточное	—	—	—	95	5	1	0	6	104
Восточно-Сибирское	—	—	—	95	5	0	0	6	37
Чукотское	—	—	—	90	8	2	0	7	127
Берингово	45	19	16	—	11	5	3	12	210
Охотское	51	10	15	—	9	4	2	11	190
Японское	62	15	11	—	8	3	1	9	150
Тихоокеанский арктический	62	16	11	—	5	2	0	8	—
Черное	80	10	5	—	3	2	0	7	110
Азовское	95	4	1	—	0	0	0	3	—
Каспийское	73	10	10	—	6	1	0	7	100

Подробные данные о распределении высоты волн трехпроцентной обеспеченности и частотно-периода волн в океанах по месяцам и в среднем за год приведены в книге (1965), изданной Регистром СССР. Авторы отмечают, что сведения о повторяемости высот волн, которые содержатся в книге, получены в основном расчетным путем, а данные наблюдений использованы главным образом для проверки расчетных методов. Результаты сделанной работы сгруппированы по 27 зонам, которые разделяются на 96 районов. Выборочные данные, заимствованные из этой работы, помещены в табл. 11. В таблице приняты следующие

Повторность высот океанских волн, %

Таблица 11

Океан	Зоны	При высоте волн $h_{\text{вн}}$, м						
		0-2,0	2,0-3,5	>3,5	3,5-6,0	>6,0	6,0-8,5	>8,5
Ac*	I	45	36	—	18	—	—	—
	II	26-45	30-36	—	21-29	—	2	—
	III	33-39	29-37	—	11-24	—	3-8	1-2
	IV	26-47	27-32	0-5	4-13	0-1	1-4	0-1
	V	28-71	25-32	—	4-9	0-1	—	—
Ab	VI-VII	60-81	17-30	2-9	—	0-1	—	—
Ao	VIII	51-78	21-33	3-6	6-14	0-2	—	—
	IX	29-35	36-37	—	23-27	—	—	—
	X	17-28	35-37	—	28-34	—	5-7	0-1
Ac	I-II	73	19	—	7	1	—	—
Ab	III-IV	46-62	8-38	0-2	9-16	0-1	—	—
Ao	V	32-62	29-38	—	9-25	0-1	2-5	—
	VI	27-33	36-38	—	24-28	—	5-7	—
	VII	15-28	35-37	—	28-34	—	6-12	1-4
Ac	I	67	21	—	10	—	—	—
	II	40-45	24-37	—	10-21	1-2	2	—
	III	41-60	31-35	—	9-30	1-4	2-4	0-1
	IV	39-75	22-32	3-8	7-9	0-1	2	—
	V	64-78	20-30	2-6	—	—	—	—
Ab	VI-VII	68-83	17-27	1-6	—	—	—	—
Ao	VIII	57-65	14-34	1-9	6-8	—	—	—
	IX	43-44	35-36	—	18-19	—	2-3	—
	X	17-26	35-37	—	20-34	—	7-11	1-3

* A, B, T — Атлантический, Индийский и Тихий океаны соответственно;
с, в — северные и южные полушария соответственно; и — экваториальные районы.

обозначения: А — Атлантический океан; И — Индийский океан; Т — Тихий океан; с — северное полушарие; ю — южное полушарие; э — экваториальные районы. Зоны перенумерованы римскими цифрами. Повторность высоты волн дается в среднем за год. Если в зону входит несколько районов, в таблице приводятся две цифры, характеризующие минимальную и максимальную повторность высоты волн по районам.

В Атлантическом океане южные границы зон проходят приблизительно так:

- I — от Лабрадорского побережья ($\varphi = 58^\circ$ с. ш.) через Исландию к северу Скандинавии;
- II — по линии Галифакс (Канада) — Бретань;
- III — от $\varphi = 35^\circ$ с. ш. на западе до $\varphi = 43^\circ$ с. ш. на востоке;
- IV — от $\varphi = 8^\circ$ с. ш. на западе до $\varphi = 15^\circ$ с. ш. на востоке;
- V — по параллели $\varphi = 5^\circ$ с. ш.;
- VI-VII — от мыса Рон на западе к линии экватора на востоке;
- VIII — по параллели $\varphi = 35^\circ$ ю. ш.;
- IX — от $\varphi = 45^\circ$ ю. ш. на западе до $\varphi = 40-41^\circ$ на востоке.

Зоны Индийского океана ограничены с юга так:

- I-II — по параллели $\varphi = 9-10^\circ$ с. ш.;
- III-IV — по параллелям $\varphi = 13-14^\circ$ ю. ш.;
- V — по параллели $\varphi = 35^\circ$ ю. ш.;
- VI — от $\varphi = 40^\circ$ ю. ш. на западе до $\varphi = 45^\circ$ ю. ш. на востоке;
- VII — по параллели $\varphi = 55^\circ$ ю. ш.

Южные границы зон Тихого океана очерчены так:

- I — по параллелям $\varphi = 57-58^\circ$ с. ш.;
- II — от $\varphi = 40^\circ$ с. ш. на западе до $\varphi = 50^\circ$ с. ш. на востоке;
- III — от $\varphi = 29^\circ$ с. ш. на западе до $\varphi = 35^\circ$ с. ш. на востоке;
- IV — от $\varphi = 25^\circ$ с. ш. на западе до $\varphi = 10^\circ$ с. ш. на востоке;
- V — по параллелям $\varphi = 4-5^\circ$ с. ш.;
- VI-VII — от $\varphi = 10^\circ$ ю. ш. на западе до $\varphi = 2^\circ$ ю. ш. на востоке;
- VIII — от $\varphi = 37-38^\circ$ ю. ш. на западе до $\varphi = 33-35^\circ$ ю. ш. на востоке;
- IX — по параллели $\varphi = 45^\circ$ ю. ш.;
- X — по параллели $\varphi = 35^\circ$ ю. ш.

Из таблицы следует, что высота океанских волн большей частью не превосходит 3,5 м и лишь в редких случаях наблюдаются волны выше 6,0 м. Из других работ можно усмотреть, что максимальная высота волн, наблюдающаяся при продолжительных штормах ураганной силы в северных частях Атлантического и в Тихом

Распределение высоты и длины волн в Северной Атлантике, промилле

океанах, крайне редко превосходит 15—16 м. Обычно же при тропических тайфунах и ураганах в умеренных широтах высота волн не превосходит 14 м.

По Северной Атлантике более подробные сведения о распределении высоты, длины и крутизны волн можно найти в статистической исследовании Х. Ролла (H. Roll) [1958]. Исследование Х. Ролла основывается на данных наблюдений десяти гидрометеорологических судов (суда погоды А—М) в 1950—1953 гг. В табл. 12, занимающей из этой работы, указана частота в промилле появления волн длиной статистической высоты $A^{(0.01)}$ и длины. Из таблиц, составленной путем усреднения данных наблюдений всех десяти судов, следует, что за протяжении рассматриваемого времени чаще всего наблюдались волны длиной 39—75 м и высотой около 1,5 м. Не намного меньше частота появления волн той же длины и высотой около 2 м.

Обеспеченность волн высотой 5 м и выше составляла 8,2%. Частота появления волн высотой 10 м и выше не превосходила 0,2%. Волны высотой 15 м наблюдались лишь в единичных случаях. Их обеспеченность составляла около 0,01%.

Х. Ролл отмечает, что длина ветровых волн обычно не превосходит 150 м. Более длинные волны представляют собой большей частью зыбь, возникающую в процессе затухания ветрового волнения.

Судя по табличным данным, обеспеченность волн длиной 180 м и выше составляла 3,4%. Частота же появления волн длиной 264 м и выше не превосходила 0,9%. Волны длиной свыше 620 м наблюдались крайне редко. Обеспеченность таких волн равна 0,1%.

Частоту появления волн длиной крутизны Х. Ролл характеризует следующими цифрами.

Крутизна	Частота, %	Крутизна	Частота, %
Крутизна 1/7	0,3	1/25—1/45	16,4
1/7—1/15	5,7	1/45—1/25	11,4
1/15—1/25	35,5	1/25—1/35	8,8
1/25—1/35	36,6	Менее 1/35	12,9

Как отмечалось, приведенные выше цифры характеризуют Северную Атлантику в целом. Наиболее бурный район этого бассейна — его восточная часть — может быть охарактеризован данными о судне J, расположенном в пункте с координатами: 20° западной долготы и 52° северной широты. Составляет суммарные данные, приведенные в табл. 12, с аналогичными данными, относящимися к этому судну, отнесены следующие цифры, характеризующие распределение длины волн в процентах:

A	0—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60
Судно А—М	18,0	36,7	30,7	11,3	2,4	0,9
Судно J	2,1	35,5	31,6	17,2	2,9	0,5

Высота волн	При длине волн в промиллах								Сумма
	0—30	30—70	70—125	125—180	180—264	264—620	620—452	452—460	
0—0,25	3,1	0,3	0,1	0,1	0	0	0	0,4	4,0
0,25—0,75	42,9	17,1	3,8	2,5	1,2	0,1	0	0,5	68,1
0,75—1,25	71,9	65,4	18,3	5,8	1,7	0,3	0	0,3	162,8
1,25—1,75	36,8	94,7	40,3	8,8	1,4	0,1	0	0,4	182,5
1,75—2,25	15,6	75,3	53,7	14,3	1,1	0,2	0,1	0,3	160,6
2,25—2,75	4,4	46,9	47,9	13,0	2,9	0,3	0,1	0,1	116,0
2,75—3,25	3,1	28,1	42,8	13,5	2,1	0,6	0,1	0,1	90,4
3,25—3,75	1,2	15,4	30,3	11,0	2,8	0,3	0,1	0,1	61,0
3,75—4,25	0,7	7,3	17,7	8,0	1,5	0,6	0	0,1	36,1
4,25—4,75	0,3	6,7	17,5	9,4	1,9	0,3	0	0	35,3
4,75—5,25	0,1	2,8	8,7	8,2	0,8	0,5	0,1	0	18,2
5,25—5,75	0,1	2,3	6,7	4,3	0,4	0,2	0,1	0,1	11,4
5,75—6,25	0,1	1,7	6,4	4,5	0,8	0,4	0,1	0	14,0
6,25—6,75	0	1,1	3,0	2,5	0,7	0,2	0,1	0	8,2
6,75—7,25	0	0,2	2,5	2,2	0,7	0,1	0	0,1	5,8
7,25—7,75	0,4	1,9	2,0	0,7	0,1	0	0	0,1	5,2
7,75—8,25	0,5	1,6	2,0	0,6	0	0,1	0	0	4,8
8,25—8,75	0,2	1,0	1,5	0,4	0,1	0	0,1	0	3,3
8,75—9,25	0	0,7	0,7	0,4	0,1	0	0	0	2,1
9,25—9,75	0,2	0,9	1,5	1,0	0,4	0,1	0	0	4,1
9,75—10,25	0	0,2	0,1	0,1	0	0	0	0	0,4
10,25—10,75	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,5
10,75—11,25	0,1	0	0,1	0	0	0	0	0	0,3
11,25—11,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,75—12,25	0	0,1	0,4	0	0	0	0	0	0,5
12,25—12,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12,75—13,25	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0,1
13,25—13,75	0	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0,2
13,75—14,25	0	0	0	0	0,1	0,1	0	0	0,1
14,25—14,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14,75—15,25	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0,1
Сумма	179,8	266,8	205,8	113,1	24,3	5,4	1,1	2,7	1000,0

Частоту же появления волн данной высоты можно охарактеризовать такими цифрами в процентах:

λ (м)	0-0,25	0,25-1,25	1,25-1,75	1,75-2,25	2,25-4,25
Суда А-М	0,49	23,0	34,3	30,6	0,7
Судно J	0,02	10,0	30,2	25,8	14,1

Отметим, кроме того, что волны, идущие с западных румбов (квадранты SW и NW) и среднее отличаются большей высотой и длиной, чем волны, перемещающиеся в других направлениях.

На рис. 16-18 воспроизведены гистограммы X. Ролла, характеризующие распределение высоты, периода и крутизны видимых волн в зависимости от силы ветра. Стрелками на рисунках отмечены цифры, соответствующие математическому ожиданию. Буквами B и n обозначены соответственно балльность ветра и число наблюдений. В дополнение к гистограммам прилагаем также следующие цифры X. Ролла, характеризующие наибольшую повторяемость элементов волн:

Баллы $A^{(1)}$, n	$\frac{\lambda}{\lambda}$, %	Баллы $A^{(2)}$, n	$\frac{\lambda}{\lambda}$, %	Баллы $A^{(3)}$, n	$\frac{\lambda}{\lambda}$, %
0	0,5	6	1,5	6	2,5
1	1,0	5	1,5	7	3,0
2	1,0	6	1,5	8	4,5
3	1,0	6	1,5	9	4,5
4	1,5	6	2,5	10	9,5
5	2,0	6	2,5	11	9,5

Эти данные показывают, что в тех случаях, когда явление рассматривается при порывистой скорости ветра, крутизна волн возрастает с увеличением их длины (сравните с данными § 6).

В качестве пояснения к гистограммам отметим, что данные X. Ролла, относящиеся к крутизне волн, в известной мере условны, поскольку они определялись как отношение двух величин (высоты и длины волн), из которых каждая была получена путем усреднения результатов большого числа индивидуальных измерений. Кроме того, при определении длины волн по их периоду не учитывалось влияние нерегулярности волнения (см. § 11 этой главы). Отметим, наконец, что данные о высоте волн относятся к значительным волнам, а те время как длины волн характеризуют средние соотношения.

По своему характеру гистограммы, приведенные на рис. 16 и 17, схожи с аналогичными гистограммами, построенными по данным краткосрочных наблюдений. Последние дают представление о степени нерегулярности волнения. Высокие диаграммы Рэлеяского типа, охватывающие узкий интервал исследуемых величин, соответствуют волнению, которое представляется более или менее регулярным. По мере усиления нерегулярности волнения гистограммы становятся шире и ниже.

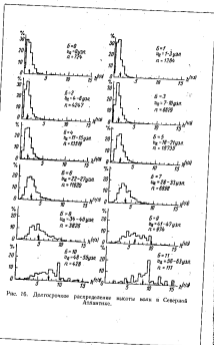


Рис. 16. Гистограммы распределения высоты волн в Северном Атлантике.

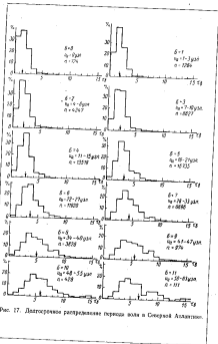


Рис. 17. Длительное распределение периодов волн в Северной Атлантике.

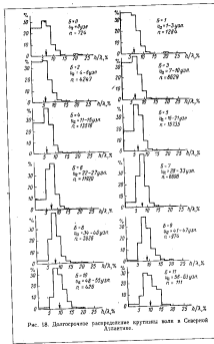


Рис. 18. Длительное распределение высоты волн в Северной Атлантике.

Нерегулярность волнения усиливается по мере увеличения буйливости ветра. Объясняется это тем, что при возникновении более длинных волн сохраняются частично короткие волны, вследствие чего состав водных волн становится менее однообразным.

§ 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

Морское волнение отображают совокупностью элементарных волн, которые распространяются в различных направлениях независимо друг от друга. Ограничимся рассмотрением двухмерного волнения. В этом случае колебание уровня воды в данной точке водной поверхности можно выразить суммой колебаний

$$r(t) = \sum_0^{\infty} (A_i \cos \sigma_i t + B_i \sin \sigma_i t), \quad (2.19)$$

где A_i и B_i — независимые случайные величины с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсиями

$$D(A_i) = D(B_i) = D_i,$$

одинаковыми для каждой пары случайных амплитуд с соответствующими индексами. Общую дисперсию функции $r(t)$ можно определить по формуле

$$D = \sum_0^{\infty} (\cos^2 \sigma_i t + \sin^2 \sigma_i t) D_i = \sum_0^{\infty} D_i,$$

как сумму дисперсий всех элементарных гармоник. Поэтому для того, чтобы сделать рассмотряемую задачу определенной, достаточно задать распределение плотности дисперсии

$$\frac{D_i(\sigma)}{d\sigma} = S_r(\sigma), \quad (2.20)$$

приходящейся на интервал $d\sigma$. Функция $S_r(\sigma)$, описывающая это распределение, называется спектральной плотностью дисперсии. Суммарная дисперсия процесса

$$D = \int_0^{\infty} S_r(\sigma) d\sigma \quad (2.21)$$

выражается площадью, ограниченной кривой $S_r(\sigma)$ и осями координат.

Получается также другим способом отображение морского волнения, основывающееся на уравнении

$$r(t) = \sum_0^{\infty} (r_i) \cos(\sigma_i t + \delta_i), \quad (2.22)$$

которое, как известно, связано с уравнением (2.19) соотношениями

$$(r_i) = \sqrt{A_i^2 + B_i^2};$$

$$\operatorname{tg} \delta_i = \frac{B_i}{A_i}.$$

Разность фаз δ_i в уравнении (2.22) рассматривается как случайная величина, которая с равной вероятностью может принимать любые значения в пределах $\delta = 0 \rightarrow 2\pi$. Связь же между амплитудами элементарных колебаний и частотами задается зависимостью

$$\frac{d_i^2(\sigma)}{d\sigma} = S_r(\sigma), \quad (2.23)$$

где $S_r(\sigma)$ — функция, выражающая закон распределения плотности квадрата амплитуд по частотам. Она называется эмпирическим спектром волнения.

В дальнейшем наряду с терминами «энергетический спектр» и «спектральная плотность дисперсии» будем пользоваться обобщающим термином «частотный спектр», опуская индекс в обозначениях спектра.

Из формул (2.22) и (2.23) следует, что при $d\sigma \rightarrow 0$

$$r(t) = \int_0^{\infty} \cos(\sigma t + \delta) \sqrt{S_r(\sigma)} d\sigma. \quad (2.24)$$

Средний квадрат амплитуд элементарных гармоник, или, иначе говоря, дисперсия амплитуд,

$$E = \int_0^{\infty} S_r(\sigma) d\sigma \quad (2.25)$$

выражается площадью, ограниченной энергетическим спектром и осями координат. Дисперсия E , как это следует из формулы (1.21), равна удвоенной дисперсии D , и поэтому

$$S_r(\sigma) = 2S(\sigma). \quad (2.26)$$

Это значит, что ординаты энергетического спектра превосходят в два раза ординаты кривой спектральной плотности дисперсии.

Так как удельная энергия единичной волны, приходящаяся на единицу площади извольнованного моря, равна

$$\mathfrak{E}_i = \frac{1}{2} \rho g (r_i)^2, \quad (2.27)$$

то для волнения в целом можно написать

$$\mathfrak{E} = \frac{1}{2} \rho g \int_0^{\infty} S_r(\sigma) d\sigma.$$

Иначе говоря,

$$\exists - \frac{1}{2} \rho g E - \rho g D, \quad (2.28)$$

где $\rho g = \gamma \approx 1 \text{ м/м}^3$ — удельный вес воды.

Из формулы (2.28) следует, что функции $S_r(\sigma)$ и $S_{rr}(\sigma)$, выражая распределение по частотам плотности дисперсии ординат $r(t)$ и плотности дисперсии амплитуд $r_a(t)$, характеризуют в то же время распределение плотности энергии аэродинамического моря.

Частотные спектры и связанные с ними величины имеют следующие размерности (в настоящем случае под L и T понимаются единицы измерения длины и времени):

$$\left. \begin{aligned} |S(\sigma)| &= L^2 T; \\ |S(\sigma) d\sigma| &= L^2; \\ |r(t)| &= [\sqrt{S(\sigma) d\sigma}] = L. \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Моментом частотного спектра порядка n будем называть выражение

$$m_n = \int_0^\infty \sigma^n S(\sigma) d\sigma.$$

Зная частотный спектр волнения $S(\sigma)$, нетрудно планметрированием или численным интегрированием определить момент нулевого порядка по формуле

$$m_0 = \int_0^\infty S(\sigma) d\sigma, \quad (2.30)$$

которая обобщает формулы (2.21) и (2.25). После этого амплитуда волн любой статистической категории находится в долях среднеквадратичной ординаты или амплитуды $\sqrt{m_0}$ по формулам и таблицам, приведенным в § 6 главы первой.

Средний период волн в данной точке морской поверхности, измеренный по точкам пересечения кривой $r = f(t)$ с нулевой линией выражается равенством

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}, \quad (2.31)$$

где m_2 — момент частотного спектра второго порядка. Момент второго порядка определяется по формуле

$$m_2 = \int_0^\infty \sigma^2 S(\sigma) d\sigma \quad (2.32)$$

путем планметрирования или численного интегрирования кривой $\sigma^2 S(\sigma)$.

Дополнительные сведения об определении средних значений периода и длины набегающих волн приведены в § 12.

§ 9. ЧАСТОТНЫЕ СПЕКТРЫ ВОЛНЕНИЯ

Частотные спектры, применяющиеся в океанографии и кораблестроении, строятся в зависимости либо от характеристик волнения либо от внешних условий, вызывающих волнение. К первой группе принадлежит спектры, предлагаемые в Советском Союзе А. И. Вознесенским — Г. А. Фирсовым, Г. А. Фирсовой, Ю. М. Крыловым и др., а за границей — Ч. Л. Врейншейдером. Ко второй группе относятся спектры Г. Неймана, Х. Ролла — Г. Филлера, С. С. Стрекалова и др., являющиеся функцией от одной лишь скорости ветра, спектр Д. Дербинайра, зависящий от скорости ветра и района, и др.

В дальнейшем изложении приводится в окончательном виде лишь спектры Г. Неймана и А. И. Вознесенского — Г. А. Фирсова. Более подробные сведения о спектральных методах исследования и отображении морского волнения можно найти в Трудях Океанографической комиссии АН СССР (см. сб. «Ветровые волны», 1960), сборнике переводных статей «Ветровые волны» (1962) и ряде других работ, частично отмеченных в дальнейшем изложении.

Спектр Г. Неймана, обоснование которого можно найти в работе В. Д. Пирсона (1962), выражается формулой

$$S_{nn}(\sigma) = \frac{\epsilon}{\sigma^5} \exp \left[-2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^4 \right], \quad (2.33)$$

где v_n — скорость ветра, м/сек; ϵ — численный коэффициент, равный $2,4 \text{ м}^3/\text{сек}^2$.

Спектр, предложенный Г. Нейманом, был получен теоретически путем применительно к волне развитому волнению. Такое волнение, характерное тем, что зюгеря, передаваемая волнам, равна рассеивающейся энергии, встречается редко, а обычно приходится иметь дело с развивающимся или затухающим волнением. Однако Г. Нейман считает, что, отскакив (2.33) области низких и высоких частот, можно пользоваться им также для описания развивающегося и затухающего волнения. Эта рекомендация обосновывается рядом соображений.

Х. Ролл (H. U. Roll) (1958) указывает, что высоты волн, найденные по спектру Г. Неймана, согласуются со статистическими данными о Северной Атлантике лишь при силе ветра в 5 баллов. При более слабом ветре высота реальных волн превосходит теоретическую, а при более сильном ветре — меньше теоретической. Объясняется это тем, что в первом случае сказывается влияние зюб, возникшей ранее. Если же сила ветра превосходит 5 баллов,

волнение не успевает развиться полностью либо вследствие ограниченности разгона либо вследствие недостаточной продолжительности ветра.

Численный коэффициент в формуле (2.33) был получен в предположении, что скорость ветра и высота волн связаны зависимостью

$$h^{0.11} = 9.0 \cdot 10^{-3} u_a^{2.6}, \quad (2.34)$$

где $h^{0.11}$ — средняя высота волн от числа 1/10 наиболее высоких волн; u_a — скорость ветра, м/сек.

При переходе к волнам с трехпроцентной обеспеченностью формула (2.34) принимает вид¹

$$h_{0.97} = 9.35 \cdot 10^{-3} u_a^{2.5}, \quad (2.35)$$

Таблица 13

Ординаты кривых спектральной плотности волновых ординат по модифицированному спектру Г. Неймана

σ сек/м	При высоте волн $h_{0.97}$, м							
	0.25	0.75	1.25	2.00	3.50	6.00	8.50	11.0
0.20								
0.30								
0.40								
0.50								
0.60								
0.70	0							
0.80	0.0009	0.0238						
0.90	0.0036	0.0296	0.1512					
1.00	0.0074	0.0324	0.1790	0.4440				
1.10	0.0115	0.0371	0.1928	0.3360	0.5473			
1.20	0.0146	0.0402	0.1998	0.2500	0.3790	0.6320		
1.30	0.0166	0.0426	0.1968	0.1872	0.2642	0.3066	0.340	
1.40	0.0092	0.0198	0.0492	0.0433	0.1361	0.1917	0.2090	0.226
1.50	0.0034	0.0083	0.0384	0.0353	0.0995	0.1297	0.1499	0.156
2.00	0.0011	0.0029	0.0144	0.0194	0.0246	0.0286	0.0305	0.032
2.50	0.0001	0.0009	0.0053	0.0064	0.0075	0.0082	0.0086	0.009
3.00	0.0007	0.0017	0.0021	0.0024	0.0027	0.0028	0.0029	0.003

¹ В иностранных работах высоту таких волн называют максимальной.

² Формулы (2.34) и (2.35) противостоят формулам ряда других авторов, считавших, что высота волн развится отрывом волны пропорционально квадрату скорости ветра.

Используя это соотношение, Н. Н. Рахманов представил формулу (2.33) после подстановки $S_p = 0.55 \sigma^2$ в виде

$$S_p(\sigma) = \frac{2.4}{\sigma^8} \exp \left[-\frac{4.58}{\sigma^2 (\lambda_{0.97})^{0.6}} \right], \quad (2.36)$$

Ординаты модифицированного спектра Г. Неймана указаны в табл. 13, а на рис. 19 приведена диаграмма, дающая представление

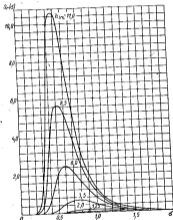


Рис. 19. Ординаты кривых спектральной плотности волновых ординат по Г. Нейману.

ние о характере кривых, соответствующих формуле (2.36). Таблица и рисунок заимствованы из работы А. И. Вознесенского и Г. А. Фирсова [1957].

Частота σ_m , соответствующая максимуму спектра Г. Неймана, и его средняя частота σ_0 связаны со скоростью ветра зависящими

$$\sigma_m = 0,815 \frac{U}{v_g}; \quad \sigma_0 = 1,18 \frac{U}{v_g}, \quad (2.37)$$

и поэтому

$$\sigma_m = 0,707 \sigma_0, \quad (2.38)$$

Из формул (2.35) и (2.37) следует, что

$$k_{c1} \sigma_0^2 = \text{const},$$

где k_{c1} — высота видимых волн любой статистической категории. Введя в последнюю формулу (см. § 12) вместо частоты среднюю длину видимых волн $\lambda_0 = k/\sigma_0^2$, где k — численный коэффициент, найдем

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_0} = \text{const} \lambda^{2.35}. \quad (2.39)$$

Таким образом, для волнения, описываемого спектром Г. Неймана, высота волн возрастает быстрее их длины.

Частотный спектр, предложенный А. И. Вознесенским и Г. А. Фирсовым [1956], выражается формулой

$$S_f(\sigma) = \frac{2}{\pi} D \sigma_0 \frac{\sigma^2 + \beta^2}{\sigma^2 + 2\beta\sigma + \beta^2}. \quad (2.40)$$

Он определяется дисперсией волновых ординат D и постоянными α , β , которые связаны с постоянной β_0 соотношениями

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= \alpha_0^2 - \beta_0^2; \\ \beta^2 &= \alpha_0^2 + \beta_0^2. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Вместо дисперсии можно ввести в формулу (2.40) высоту волн любой статистической категории, и в частности высоту волн с трехпроцентной обеспеченностью, для которой (см. § 6 главы первой)

$$D = 0,143 (0,56 \beta_0)^4. \quad (2.42)$$

Постоянная β_0 равна приблизительно частоте σ_m , соответствующей максимуму спектра. Постоянная α_0 характеризует степень нерегулярности волнения (ширину спектра). Чем больше нерегулярность волнения, тем больше отношение α_0/β_0 . Регулярному волнению соответствует $\alpha_0 = 0$.

Анализируя практические данные о морском волнении, Н. И. Размаини [1958] и [1960] нашел, что в среднем

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 1,44 (\beta_{0N})^{-1.4}; \\ \alpha_0 &= 0,21 \beta_0. \end{aligned} \quad (2.43)$$

По А. И. Вознесенскому и Ю. А. Незаветану [1963] средняя частота σ_0 рассматриваемого спектра выражается через частоту, при которой спектральные кривые достигают максимума, зависящую

$$\sigma_0 = 1,22 \sigma_m = 1,22 \sigma_m. \quad (2.44)$$

Из формул (2.43) и (2.44) следует, что

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0,172 \sigma_m; \\ \beta_0 &= 0,82 \sigma_m. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Те же формулы показывают, что равенство (2.39), полученное ранее для спектра Г. Неймана, действительно также и для спектра А. И. Вознесенского — Г. А. Фирсова.

Рассматриваемый частотный спектр нетрудно привести к безразмерному виду

$$S_f\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) = \frac{\sigma_0}{D} S_f(\sigma). \quad (2.46)$$

При изменении отношения σ/σ_0 от нуля до $\sigma/\sigma_0 = 3,0$ функция $S_f(\sigma/\sigma_0)$ принимает следующие значения:

σ/σ_0	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9
$S_f(\sigma/\sigma_0)$	0,16	0,18	0,20	0,22	1,23	1,76	1,42
σ/σ_0	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	2,5	3,0
$S_f(\sigma/\sigma_0)$	0,88	0,37	0,16	0,10	0,05	0,02	0,01

Эти цифры можно использовать при построении спектральных кривых $S_f(\sigma)$ по заданной высоте волн трехпроцентной обеспеченности. Предварительно необходимо определить дисперсию D по формуле (2.42), постоянную β_0 — по формуле (2.43) и среднюю частоту σ_0 — по формуле (2.44). После этого ординаты и абсциссы кривых спектральной плотности волнения найдутся по формулам

$$S_f(\sigma) = \frac{D}{\sigma_0} S_f\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right); \quad \sigma = \sigma_0 \frac{\sigma}{\sigma_0}.$$

На рис. 20 приведены кривые спектральной плотности, построенные по формуле (2.40) для четырех значений высоты волн трехпроцентной обеспеченности. Рисунок заимствован из книги [1961] А. Н. Швырева, В. А. Моренцимайт и С. Г. Нальниной [1961].

Частотный спектр А. И. Вознесенского — Г. А. Фирсова составлен на рис. 21 с модифицированным спектром Г. Неймана при высоте волн $\lambda_{0N} = 6,0$ м. Из рисунка следует, что оба спектра при высоте волн друг от друга по величине максимальной ординаты отличаются друг от друга до степени максимальной ординаты. Максимумы же спектров А. И. Вознесенского — Г. А. Фирсова сдвинуты в направлении больших частот до степени спектра Г. Неймана.

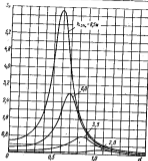


Рис. 20. Кривые спектральной плотности волновых пакетов по А. И. Вознесенскому и Г. А. Фарсову.

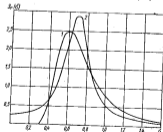


Рис. 21. Сопоставление энергетических спектров Г. Неймана (1) и А. И. Вознесенского — Г. А. Фарсова (2) при $k_{20} = 6,0$ м.

В заключение остановимся на некоторых особенностях спектра А. И. Вознесенского и Г. А. Фарсова.

Изменяя значения постоянных в формуле (2.36), можно использовать этот спектр для образования различных пакетов, устанавливаемых и затухающего волнения. Обычно, однако, в расчетах пакеты принимают указанные выше значения постоянных α_0 и β_0 , соответствующие средним условиям.

Как это следует из рис. 19, спектральные кривые А. И. Вознесенского и Г. А. Фарсова имеют конечные значения при частоте $\omega = 0$. Это представляется недостатком спектра, поскольку волны бесконечно большой длины в принципе не должны фигурировать в частотном спектре. В интервале очень больших частот спектральные кривые также противоречат действительным закономерностям.

Отмеченные недостатки не сказываются существенно при расчетах пакеты, так как сомнительные значения спектральной плотности дисперсии сосредоточены в интервалах частот, которым соответствуют малые количества волновой энергии. При этом эти частоты далеки от резонансной частоты.

§ 10. СОПОСТАВЛЕНИЕ БЕЗРАЗМЕРНЫХ СПЕКТРОВ ВОЛНЕНИЯ С ПРАКТИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ

В работе [1963] А. И. Вознесенский и Ю. А. Нещетков сопоставили ряд частотных спектров волнения с практическими данными, собранными на протяжении экспедиционного плавания в Северной Атлантике на судне «Куйбышев ГЭС». Во время плавания (апрель—июнь 1961 г.) характеристика волнения на пути следования изменялась в следующих пределах:

Высота зюль средняя	$k_0 = 0.41-1.04$ м
Дисперсион параметр	$D = 0.04-0.85$ м
Средняя частота	$\omega_0 = 0.65-1.40$ сек ⁻¹
Относительная ширина спектра	$\sigma_{\omega}/\omega_0 = 0.40-0.80$
Максимальная относительная ширина спектра	$F_{\max} = 1.45-3.35$

Частотные спектры Г. Неймана, Ч. Л. Бретанейдера, А. И. Вознесенского—Г. А. Фарсова, Д. Дербанайра и др. были приведены к безразмерному виду

$$P = \frac{S(\sigma)\alpha_0}{D} = f\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right).$$

Ограничимся рассмотрением первых трех спектров, которые выражаются следующими формулами.

Спектр Г. Неймана

$$\frac{S(\sigma)\alpha_0}{D} = 33,2 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^4 \exp\left[-3\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right)^2\right];$$

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_0} = 0,707; \quad P_{\max} = 1,65.$$

Спектр Ч. Бретшайдера

$$\frac{S(f)\alpha}{\sigma} = 7,14 \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^2 \exp\left[-1,23 \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^4\right]; \quad \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 0,712; \\ F_{max} = 2,04$$

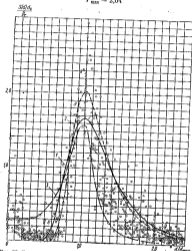


Рис. 22. Составление безразмерных спектров волнения Г. Неймана (1); Ч. Л. Бретшайдера (2) и А. И. Вознесенского — Г. А. Фирсова (3) с экспериментальными данными.

Спектр А. И. Вознесенского и Г. А. Фирсова

$$\frac{S(f)\alpha}{\sigma} = 0,284 \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^2 - 1,91 \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^4 + 1,09 \right]^{-1}; \quad \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 0,82; \\ F_{max} = 1,58.$$

На рис. 22, который повторяет с некоторыми упрощениями аналогичный рисунок, приведенный в рассматриваемой работе, отмеченные выше спектры составлены с практическими данными, собранными во время экспедиции (на оригинальной диаграмме, простирающейся до $\sigma/\sigma_0 = 3,5$, нанесены еще две спектральные кривые).

Рисунок показывает, что различия в гидродинамической обстановке на море, не учитывавшиеся в аналитических спектрах, и погрешности эксперимента привели к значительному разбросу практических точек. Наличие ординат, отличных от нуля в области очень низких частот, и в частности при $\sigma = 0$, естественно объяснить погрешностями, возникающими при обработке записей волнения.

Из трех составленных спектральных кривых ниже других расположилась кривая А. И. Вознесенского — Г. А. Фирсова. Авторы рассматриваемой работы отмечают, что в отличие от практических закономерностей эта кривая приводит к некоторому перераспределению энергии из области высоких частот в область низких частот.

§ 11. УЧЕТ ШИРИНЫ СПЕКТРА

Шириной спектра называется показатель, характеризующий степень концентрации энергии в районе максимума частотного спектра волнения. Чем меньше ширина спектра, тем более резким становится пик частотной кривой. Большими же значениями этого показателя соответствуют пологие частотные кривые.

С другой стороны, ширина частотного спектра возрастает по мере усиления нерегулярности процесса. Поэтому рассматриваемый показатель характеризует одновременно и степень нерегулярности волнения.

Сказанное можно пояснить рис. 23, на котором приведены две кривые $r = f(t)$, отображающие процесс волнения. Верхняя кривая более симметрична относительно нулевой линии и отличается большей стабильностью периодов колебаний, чем нижняя кривая. Она соответствует волнению с узким спектром. Нижняя же кривая, изменяющаяся менее закономерно, соответствует волнению с широким спектром.

Верхняя кривая имеет только положительные экстремумы, образованные волнностью в сторону нулевой линии. Нижняя кривая имеет как положительные, так и отрицательные экстремумы, обозначенные на рисунке знаками плюс и минус.

О степени нерегулярности волнения можно судить по отношению средних периодов колебаний, измеренных по вершинам кривой, к средним периодам, измеренным по точкам пересечения этой кривой с нулевой линией. Мы будем обозначать их соответственно

символами τ_a и τ_b (см. рис. 23). Эти периоды выражаются через моменты частотного спектра

$$m_a = \int_0^{\tau_a} \sigma^4 S(\sigma) d\sigma$$

формулами

$$\tau_a = 2\pi \sqrt{\frac{m_a}{\sigma_0^4}}; \quad \tau_b = 2\pi \sqrt{\frac{m_b}{\sigma_0^4}}$$

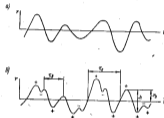


Рис. 23. Колесики уровня воды при регулярном волнении с углом (а) и иррегулярном (б) спектре.

и поэтому

$$\frac{\tau_a}{\tau_b} = \sqrt{\frac{m_a}{m_b}} \quad (2.47)$$

Ширину спектра принято выражать равенством

$$\epsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_a}{\tau_b}\right)^2} \quad (2.48)$$

в соответствии с которым вещественные значения рассматриваемого показателя изменятся в пределах $\epsilon = 0 - 1,0$.

Формула (2.47) позволяет выразить ширину спектра через моменты частотных кривых зависящую

$$\epsilon = \sqrt{1 - \frac{m_a^2}{m_b^2}} \quad (2.49)$$

Ширину частотного спектра выражают также формулой

$$\epsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{\tau_a}{\tau_b}\right)^2} \quad (2.50)$$

где $n_a = 2l_a/\tau_a$ — среднее число пересечений кривой $r = f(t)$ с нулевой линией за достаточно большой промежуток времени l_a ; $n_b = 2l_b/\tau_b$ — число экстремумов, приходящихся на тот же промежуток времени.

Из определения следует, что

$$\frac{n_a}{n_b} = \frac{\tau_b}{\tau_a}$$

К тем же результатам приводит формула

$$\epsilon = \sqrt{1 - (1 - 2x)^2} \quad (2.51)$$

где $x = n^{-1}n_0$ — отношение числа отрицательных экстремумов к общему числу экстремумов.

Как это следует из геометрических соображений,

$$n_0 = n_a - 2n^{-1}$$

что и определяет тождественность формул (2.50) и (2.51).

Формулой (2.49) пользуются для определения ширины волнового спектра, если аналитическое выражение частотной кривой известно. Формулы же (2.48), (2.50) и (2.51) позволяют определить ширину спектра по экспериментальной кривой $r = f(t)$.

Если $\tau_a = \tau_b$ (иначе говоря $n_a = n_b$; $n^{-1} = 0$), то $\epsilon = 0$, что соответствует предельно узкому спектру. При $\tau_a \rightarrow \infty$; $n_a \rightarrow 0$ ширина спектра теоретически достигает наибольшего значения $\epsilon = 1,0$. Этот предельный случай не имеет реального значения, так как для осуществления сформулированных условий необходимо, чтобы кривая $r = f(t)$ располагалась полностью выше или ниже нулевой линии.

Рассмотрим в качестве примера нижнюю кривую на рис. 23, для которой $n_a = 16$; $n_b = 8$; $n^{-1} = 4$. По формуле (2.50) ширина спектра получается равной

$$\epsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{3}{16}\right)^2} = 0,865.$$

К той же цифре приводит формула (2.51) после подстановки $x = \frac{4}{16} = 0,25$.

Судя по опубликованным экспериментальным данным, при смешанном волнении и зыбе ширина волнового спектра изменится в пределах $\epsilon = 0,3 - 0,8$. При установившемся ветровом волнении эти пределы несколько сближаются. Спектр волнения считается узким, если $\epsilon < 0,4$.

Вернемся теперь к вопросу определения высоты волн той или иной статистической категории по нулевому моменту спектральной плотности волнения или энергетического спектра.

Формулы, приведенные для этой цели, как отмечалось в § 9, можно представить в обобщенной форме

$$\left(\frac{k}{T}\right)_{cr} = c\sqrt{V\sigma_0}, \quad (2.52)$$

где c — численный коэффициент, значения которого указаны в § 6 главы первой. Строго говоря, эти данные получены лишь для процессов, подчиняющихся закону распределения Рэлея. Между тем, как отмечалось, высота волн распределяется по закону Рэлея лишь при узком спектре. По мере же увеличения ширины спектра распределение высоты волн приближается к нормальному.

Д. Е. Кертрайт и М. С. Лонге нашли, что формулы типа (2.52) можно применять и при рассмотрении волнения с широким спектром, если ввести в них поправочный множитель

$$k = \sqrt{1 - \epsilon^2}. \quad (2.53)$$

Тот же множитель авторы предлагают ввести в формулы (2.10), связывающие длину и период (или частоту) регулярных волн, после чего выходящими формулами

$$\lambda_0 = \frac{4\pi V_0^2}{2\pi} = \frac{2kV_0}{\sigma_0}$$

можно пользоваться для определения средней длины нерегулярных волн по их среднему периоду или частоте.

В аналогичных формулах, полученных некоторыми авторами исходя из других соображений, добавочный множитель рассматривается как величина постоянная. По А. И. Вознесенскому (для чисто случайного процесса) $k = 2/3$, а по В. Д. Парсону $k = 2/3$. Х. Рада (H. U. Rold) [1958] считает, что коэффициент, предложенный В. Д. Парсоном, занижен и что для зыби и молодого ветрового волнения $k \approx 1,0$.

§ 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Вопрос о бортовой качке возникает перед проектировщиком в двойном аспекте, поскольку от нее зависит как остойчивость, так и морозодность судна. Действительно, бортовая качка приводит к значительному снижению остойчивости судна, плавающего на наволнованном море, по сравнению с его остойчивостью на тихой воде. С другой стороны, чрезмерная начальная остойчивость ухудшает показатели бортовой качки, что крайне неблагоприятно сказывается на комфортабельности и эксплуатационных качествах судна. В некоторых случаях резкая качка может поставить под угрозу безопасность плавания, например на грузовых судах вследствие смещения груза.

На пассажирских судах выбор начальной поперечной метacentрической высоты в значительной мере подчиняют требованиям комфортабельности и экономичности судна. Необдуманно большая начальная остойчивость приведет к необходимости увеличивать на этих судах производительность успокоителей качки и устанавливать их в тех случаях, когда при меньшей метacentрической высоте можно было бы отказаться от успокоения качки.

На промышленных судах параметры бортовой качки в немалой степени обуславливают эффективность промысла. Замечено, например, что траулеры с хорошими показателями качки могут еще промысливать при ветре в 7—8 баллов. Траулеры же, отличающиеся вследствие чрезмерной начальной остойчивости порывистой каткой, принуждены прекращать промысел уже при ветре в 6 баллов. Сказанное о бортовой качке может быть частично отнесено к килевой и вертикальной качке. Действительно, значительные продольные колебания судна, подобно поперечным, ухудшают условия использования судна, особенно если они сопровождаются заваливанием открытых палуб. На мирных судах при продольной качке наблюдаются сильные удары воды о корпус судна, которые приводят иногда к местным нарушениям прочности корпуса. Продолжные колебания снижают скорость судна в свежую погоду, что ухудшает его экономические показатели.

Килевая качка, вызывающая большие линейные ускорения в районах судна, удаленных от его центра тяжести, может стать опаснее скручивания на самокручении пассажира, как и бортовая качка. Кроме того, она вызывает иногда смещение грузов, расположенных в оконечностях судна.

Для поддержания на минимальном уровне мореходности судна отключается неблагоприятной бортовой или продольной качкой, приходится чаще обычного прибегать к искусственному снижению скорости хода или изменению курса. Это отрицательно сказывается на рентабельности судна.

Теория корабля позволяет определять путем детальных расчетов важнейшие показатели, характеризующие поведение данного судна на возмущенном море. Этот путь не может быть использован в начальных стадиях разработки проекта, когда элементы судна являются искомыми величинами. Поэтому в настоящей и двух следующих за ней главах приводятся сведения о влиянии различных факторов на поведение судна в условиях регулярного и нерегулярного волнения, необходимые при определении элементов проектируемого судна. Они основываются на известных теоретических положениях и опубликованных экспериментальных данных. Наряду с такими данными приводятся простейшие формулы теории качки, которые могут применяться в начальных стадиях проектирования.

Из общих соображений, посвященных изучению поведения судна на возмущенном море, в дальнейшем изложении использованы курсы С. Н. Вайсберга [1954], Г. Е. Павленко [1935], И. Г. Хановича [1947], справочник С. Н. Вайсберга [1950], а также книги Б. В. Корвина-Круковский (B. W. Korwin-Konkowski) [1951] и Г. Воссера (G. Vossler) [1952]. Исследования, посвященные отдельным вопросам, отмечены в дальнейшем указанием.

§ 2. ПЕРИОДЫ СОБСТВЕННЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ СУДНА

Поперечные колебания. Период собственных колебаний судна при бортовой качке выражается формулой

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{I_1}{\Delta g}} = 2\pi \frac{r_1}{V \Delta g}, \quad (3.01)$$

где D — водоизмещение судна; h — начальная поперечная метацентрическая высота; r_1 — радиус инерции массы судна с учетом присоединенной массы воды; I_1 — момент инерции массы судна (относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести), вычисленный с учетом присоединенного момента инерции.

Момент инерции

$$I_1 = I_0 + \Delta I_1$$

определяется как сумма собственного момента инерции массы судна и присоединенного момента инерции ΔI_1 .

Присоединенный момент инерции

$$\Delta I_1 = a I_0,$$

где $a = f(\beta, L/B, B/T)$ определяют в долях собственного момента инерции. Если судно не имеет скуловых килей, для ориентировочных расчетов принимают

$$a = 0,2 + 0,15\beta.$$

Скуловые кили несколько увеличивают присоединенный момент инерции, однако на периоде собственных колебаний это сказывается мало.

Более полные данные об учете присоединенной массы воды можно найти в курсе С. Н. Вайсберга [1954], книгах Г. Воссера и Б. В. Корвина-Круковский, отмеченных в предыдущем параграфе, работах В. В. Луговского — Ю. И. Фадеева [1953], В. В. Луговского [1954].

Поскольку численно $g^{0,5} \approx \pi$, период собственных поперечных колебаний может быть подсчитан по формуле

$$T_1 = \frac{2r_1}{V k_1},$$

в которой вследствие произведенных сокращений размерность обеих частей равности равна единице.

Для приближенной оценки величины $2r_1$ были предложены следующие формулы:

$$2r_1 = k_1 B \sqrt{1 + \frac{h^2}{B^2}}, \quad (3.02)$$

$$2r_1 = k_2 B \sqrt{1 + 4 \frac{r_1^2}{B^2}}, \quad (3.03)$$

$$2r_1 = k_3 B, \quad (3.04)$$

где k_1 , k_2 и k_3 — практические коэффициенты; r_1 — отстояние центра тяжести судна от килей.

Коэффициенты k_1 и k_2 более стабильны, чем коэффициент k_3 , однако вследствие простоты формулы (3.04) она широко используется для приближенной оценки периода T_1 .

Коэффициент k_1 для военных кораблей и гражданских судов выражается приближительно следующими цифрами:

$$k_1 = 0,6 - 0,7.$$

По Дуэру, предложенному формулы (3.03).

$$k_2 = 0,58$$

с учетом, как отмечалось, присоединяемого момента инерции, однако в отечественной практике эту формулу применяют в предположении, что она учитывает влияние лишь собственного момента инерции судна.

Значения коэффициента k не выходят обычно из следующих пределов:

Пассажирские суда	0,75—0,85
Грузовые суда	0,70—0,80
Линейные с валубами грузов	0,80—0,85
Траулеры	0,76—0,80
Мелкие промышленные суда	0,70—0,82

Поскольку радиус инерции массы судна сравнительно быстро возрастает с увеличением его линейных размеров, на малых судах даже при умеренных значениях поперечной метацентрической высоты период собственных поперечных колебаний меньше, чем на больших судах. Некоторое представление о характерных случаях дает следующая ориентировочная таблица значений периода собственных поперечных колебаний различных судов (сек.):

Пассажирские суда	30 000—50 000 м	20—28
Линейные	25 000 м	16—20
Грузовые суда	8000—10 000 м	13—18
в полном грузу		
в балласте		9—14
Траулеры, буксиры		7—10
Мелкие промышленные суда		7—8
		5—6

Естественно, что отступление от средних значений τ_0 довольно значительно вследствие больших колебаний в цифрах, характеризующих начальную остойчивость односторонних судов.

Введем понятие о безразмерных периодах собственных поперечных колебаний по радиусу инерции и ширине судна

$$\tau_1^{(1)} = \tau_0 \sqrt{\frac{R}{L}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{L}{R}}}; \quad \tau_1^{(2)} = \tau_0 \sqrt{\frac{B}{L}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{L}{B}}} \quad (3.05)$$

Воспользовавшись этими соотношениями, можно представить относительную метацентрическую высоту a в виде зависимости

$$\frac{a}{L} = \left[\frac{2\pi}{\tau_1^{(1)}} \right]^2; \quad \frac{a}{B} = \left[\frac{2\pi}{\tau_1^{(2)}} \right]^2 \quad (3.06)$$

Безразмерные периоды $\tau_1^{(1)}$ и $\tau_1^{(2)}$ представляют собой два равноценных критерия подобия качки,¹⁾ которыми можно пользоваться и в качестве показателей при сопоставлении судов и оценке вероятного поведения их на возмущаемом море. Из фор-

мулы (3.06) следует, что для той цели периоды $\tau_1^{(1)}$ и $\tau_1^{(2)}$ можно заменить более удобными показателями в виде относительной метацентрической высоты h/L , или h/B .

Наряду с периодами $\tau_1^{(1)}$ и $\tau_1^{(2)}$ мы будем пользоваться также безразмерным периодом ω безразмерной частотой свободных поперечных колебаний, отнесенными к длине судна, которые выражаются формулами

$$\tau_1^{(1)} = \tau_0 \sqrt{\frac{R}{L}} = \tau_1^{(2)} \sqrt{\frac{B}{L}}; \quad (3.07)$$

$$\omega^{(1)} = \frac{2\pi}{\tau_1^{(1)}} \sqrt{\frac{L}{R}} = \omega \sqrt{\frac{L}{R}}$$

Продольные колебания. Переходя к шквовой качке, отметим, что соответствующей ей период собственных колебаний судна выражается формулой

$$\tau_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{D(R-a)}} \quad (3.08)$$

где R — продольный метацентрический радиус; a — возвышение центра тяжести судна над центром величины; I_0 — момент инерции массы судна относительно центральной поперечной оси, вычисленный с учетом присоединенного момента инерции. Момент инерции I_0 выражается через собственный момент инерции массы судна I_0 и момент присоединенной массы воды ΔI_0 равенством

$$I_0 = I_0 \left(1 + \frac{\Delta I_0}{I_0} \right) \quad (3.09)$$

Преобразуем величину a по сравнению с R , перепишем формулу (3.08) так:

$$\tau_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{DR}} = 2\pi \frac{r_0}{\sqrt{gR}} \quad (3.10)$$

где r_0 — продольный радиус инерции массы судна с учетом присоединяемого момента инерции, который определяется по формуле

$$r_0 = \sqrt{\frac{I_0}{D}}$$

Выраза момент инерции I_0 и метацентрический радиус R соответственно формулами Г. Е. Паленко и А. П. Фан-дер-Флита

$$I_0 = 0,07 \frac{\sigma}{g} DL^3 \quad (3.11)$$

$$R = \frac{1}{140} \frac{\sigma^2 L^3}{g^2} \quad (3.12)$$

¹⁾ См. часть I, гл. II [1964].

можно представить равенство (3.18) в виде

$$\tau_{\psi} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g} \frac{\delta}{\alpha} T \left(1 + \frac{\Delta J_{\psi}}{J_{\psi}}\right)}, \quad (3.13)$$

где $\Delta J_{\psi}/J_{\psi}$ — коэффициент присоединенного момента инерции. Г. Е. Павленко предложил определять его по формуле

$$\frac{\Delta J_{\psi}}{J_{\psi}} = \frac{1}{\beta - 2\alpha} \left(\frac{\beta}{\alpha} - \alpha \right) \frac{B}{T}. \quad (3.14)$$

Для той же цели можно предложить формулу

$$\frac{I_{\psi} + \Delta J_{\psi}}{J_{\psi}} = 1,27\alpha^{0,5} \left(\frac{\beta}{T} \right)^{0,5}, \quad (3.15)$$

которая позволяет выразить момент инерции I_{ψ} , вычисленный с учетом присоединенного момента инерции, формулой

$$I_{\psi} = 0,089 \frac{\alpha^{1,5}}{\delta} \left(\frac{\beta}{T} \right)^{0,5} D L^3, \quad (3.16)$$

Соответствующий ей относительный радиус инерции будет

$$\kappa_{\psi} = \frac{r}{L} = 0,3\alpha^{0,75} \left(\frac{\beta}{T} \right)^{0,25}. \quad (3.17)$$

Воспользовавшись вместо формулы (3.14) формулой (3.15), можно выразить период собственных продольно-угловых колебаний равенством

$$\tau_{\psi} = 2,3\pi \sqrt{\frac{1}{g} \frac{\delta}{\alpha} T \left(\frac{\beta}{T} \right)^{0,5}}. \quad (3.18)$$

Для ориентировочных расчетов пользуются формулой

$$\tau_{\psi} = k_2 \sqrt{T}, \quad (3.19)$$

где в среднем $k_2 = 2,45$ для судов в полном грузу. Для грузовых судов в балластном пробеге можно принимать $k_2 = 2,8$.

Если в балластном пробеге осадка $T_0 = 0,5T$, то периоды собственных продольно-угловых колебаний в балласте и полном грузу относятся как

$$\frac{\tau_{\psi}}{\tau_{\psi}^0} = \frac{2,80}{2,45} \sqrt{0,5} \approx 0,8.$$

Безразмерный период собственных продольно-угловых колебаний выражает соотношением

$$\tau_{\psi}^{(1)} = \tau_{\psi} \sqrt{\frac{L}{T}}, \quad (3.20)$$

которое в соответствии с формулой (3.13) можно представить в виде

$$\tau_{\psi}^{(1)} = 2\pi \sqrt{\frac{\delta}{g} \frac{T}{L} \left(1 + \frac{\Delta J_{\psi}}{J_{\psi}}\right)}, \quad (3.21)$$

С другой стороны, из (3.19), (3.12) и (3.16) вытекает следующая формула для определения относительного периода продольно-угловых собственных колебаний

$$\tau_{\psi}^{(1)} = 7,07\delta^{0,5} \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\beta}{T} \frac{T}{L} \right)^{0,25}. \quad (3.22)$$

Учитывая, что $L^3/BT = \delta P^3$, где $P^3 = L^3/V$ — куб относительной длины судна, можно представить последнюю формулу также в виде

$$\tau_{\psi}^{(1)} = 7,07 \left(\frac{\delta}{\alpha} \right)^{0,25} P^{0,75}. \quad (3.23)$$

Приняв для транспортных судов $\delta/\alpha = 0,88$, для траулеров $\delta/\alpha = 0,67$ и для быстрозаходных судов $\delta/\alpha = 0,70$, можно заменить формулу (3.23) упрощенной формулой

$$\tau_{\psi}^{(1)} = c P^{0,75}, \quad (3.24)$$

где для транспортных судов $c = 6,8$, для быстрозаходных судов $c = 6,5$ и для траулеров $c = 6,4$.

Из формул (3.19) и (3.20) вытекает следующая упрощенная формула для определения относительного периода продольно-угловых собственных колебаний

$$\tau_{\psi}^{(1)} = k_2 \sqrt{\frac{T_0}{L}}. \quad (3.25)$$

На рис. 24 приведена диаграмма Г. Воссера (G. Vossers) [1962], предназначенная для определения периода $\tau_{\psi}^{(1)}$ в зависимости от отношения L^3/BT и характера обвода носовой оконечности судна. По своему построению диаграмма согласуется с формулой (3.22) и численно приводит к сравнительно близким результатам.

Для иллюстративного расчета примем $\chi = \delta/\alpha = 0,89$; $\alpha = 0,78$. Тогда значения периода $\tau_{\psi}^{(1)}$ выражаются следующими цифрами:

L^3/BT	50	100	150	200	250
По формуле (3.22)	2,40	2,60	1,80	1,68	1,58
По графику	2,40	2,60	1,75	1,65	1,55

Вертикальные колебания. Период собственных вертикальных колебаний судна выражается формулой

$$\tau_{\psi} = 2\pi \sqrt{\frac{D + \Delta D}{gV}}, \quad (3.26)$$

где S — площадь грузовой палубы, ΔD — вес присоединенной массы воды.

Формула (3.26) приводится к виду

$$\tau_z = 2\pi \sqrt{\frac{1}{g} \frac{\delta}{\alpha} T \left(1 + \frac{\Delta D}{D}\right)}, \quad (3.27)$$

где по Г.Е. Павленко

$$\frac{\Delta D}{D} = 0,85 \frac{\alpha}{1 + \alpha} \frac{B}{T}.$$

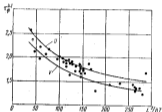


Рис. 25. Кривые $\chi_{\phi}^{(L)} = f\left(\frac{L}{B}\right)$ по Г. Воссеру.

Кривые U и V на диаграмме относятся к U-образным и V-образным обводам.

Составляя формулы (3.13) и (3.27), для продольно-угловых и вертикальных колебаний найдем

$$\left(\frac{\tau_z}{\tau_{\phi}}\right)^2 = \frac{1 + \frac{\Delta D}{D}}{1 + \frac{1}{\gamma}}.$$

Численные расчеты показывают, что приблизительно

$$\tau_z = (1,04 + 1,05) \tau_{\phi},$$

и потому формулами, предназначенными для определения периода τ_{ϕ} , можно пользоваться после изменения численного коэффициента и для определения периода τ_z . В частности, для ориентировочных расчетов достаточно хорошее приближение дает формула

$$\tau_z = k_2 \sqrt{T}, \quad (3.28)$$

где $k_2 = 2,55$ для судов в полном грузу. Для грузовых судов в балластном пробеге $k_2 = 2,9$. Как и для продольно-угловых колебаний,

$$\tau_z \approx 0,8\tau_{\phi},$$

где τ_{ϕ} — период собственных вертикальных колебаний судна в балластном пробеге.

В качестве безразмерного периода собственных вертикальных колебаний пользуются соотношением

$$\tau_z^{(L)} = \tau_{\phi} \sqrt{\frac{g}{L}}.$$

Для грубых прикидок можно принять

$$\tau_z^{(L)} = k_3 \sqrt{\frac{g}{L}}.$$

Случай кратности периодов собственных поперечных и продольных колебаний. Если период поперечных колебаний превосходит в целое число раз периоды τ_{ϕ} или τ_z , возникает резонанс, который сказывается неблагоприятно на качке судна. В основном приходится считаться со случаями, когда

$$\tau_x = 2,0\tau_{\phi}; \quad \tau_y = 2,0\tau_z.$$

Эти равенства после подстановки значений τ_{ϕ} , τ_z по формулам (3.01), (3.13) и (3.27) приводят к следующим зависимостям, характеризующим неблагоприятные сочетания относительной метacentрической высоты и элементов судна:

$$\frac{h}{B} = \frac{1}{16} k^2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{B}{T} \frac{1}{1 + \frac{1}{\gamma}};$$

$$\frac{h}{B} = \frac{1}{16} k^2 \frac{\alpha}{\delta} \frac{B}{T} \frac{1}{1 + \frac{\Delta D}{D}}. \quad (3.29)$$

Пусть $k = 0,75$; $\alpha/\delta = 1,1$; $B/T \approx 2,5$ и в соответствии с формулой Г. Е. Павленко отношение $\Delta D/D = 0,91$. Тогда собственные поперечные и вертикальные колебания судна будут соответствовать условиям резонанса при относительной метacentрической высоте $h/B = 0,05$. Эта цифра не выходит из пределов общепринятых значений отношения h/B для многих типов судов.

Приведенные данные показывают, что при проектировании судна нужно считаться с отмеченным явлением и проверять выбранные элементы по формулам (3.29).

§ 1. РЕЗОНАНСНЫЕ КУРСОВЫЕ УГЛЫ

Вопрос об условиях, при которых колебания судна попадают в резонанс с колебаниями волны, рассматривается в настоящем параграфе применительно к регулярному волнению. При нерегулярном волнении судно подвергается воздействию волн различной частоты, что сказывается на резонансных соотношениях. Вопрос о резонансе на нерегулярном волнении рассмотрен в § 4.

Формулы (2.10) позволяют определить соотношения, при которых судно, идущее лавгом к волне, попадает в резонанс. В подобных условиях совместное действие синхронной волны и ветра может повлиять на положение судна в тяжелое положение, если оно потеряет способность управления вследствие аварии рулевого привода или выхода из строя машинной установки.

Как это следует из упомянутых формул, периоды волн длиной $\lambda = 20-300$ м выражаются следующими цифрами:

λ	20	50	100	140	180	220	260	300
T_s	3,6	6,2	8,0	9,5	10,7	11,9	12,9	13,9

При рассмотрении условий резонанса между поперечными колебаниями судна и колебаниями волны обычно учитывают лишь волны длиной до 180 м, поскольку более длинные волны встречаются редко. Для закрытых морей можно ограничиться верхним пределом в 60-80 м.

Учитывая, что близость резонанса заметно сказывается, когда отношение T_s/T_s лежит в пределах 0,7-1,3, можно сделать вывод, что, выходясь лавгом к волне, судно с периодом собственных колебаний менее 12 сек. имеет шанс оказаться в резонансе с синхронной океанской волной. При периоде собственных колебаний в 14 сек. вероятность попадания в условия резонанса мала, а при периоде колебаний более 16 сек. такая возможность почти исключается.

В общем случае, при косых курсовых углах судна по отношению к волне, условия резонанса во время бортовой, килевой и вертикальной качки определяются известными соотношениями

$$T = T_s = T_s \left| \frac{c}{c + \lambda \cos \alpha} \right|, \quad (3.30)$$

где T_s — кажущийся период волны (период встречи с волной); c — скорость волны; α — скорость судна; α — курсовой угол; или, иначе говоря, угол, образующий векторами скорости судна и волны ($\alpha = 0$, если судно идет наперту волне, $\alpha = 180^\circ$, если судно идет на попутном волнении). Под T понимается один из периодов собственных колебаний судна: поперечных, продольно-угловых или вертикальных. В формуле (3.30) принимаются во внимание лишь абсолютные значения дробного множителя.

Угол, под которым волны набегают на судно (рис. 26), строго говоря, отличается от курсового угла α на величину угла дрейфа θ .

Последний возрастает по мере уменьшения скорости хода и длины волны. В дальнейшем, однако, когда речь идет о показателях качки при косых курсовых углах, влияние дрейфа не учитывается.

Исключив из формулы (3.30) скорость волны $c = gT_s/2\pi$ и учтя условия резонанса соотношением $T/T_s = \alpha$, найдем, что косинус курсового угла, при котором сказывается резонанс, определяется формулой

$$\cos \alpha = \frac{g}{2\pi} \frac{T_s}{\alpha} \left[\alpha \left(\frac{T_s}{T} \right)^2 - \frac{T_s}{T} \right], \quad (3.31)$$

где $\alpha = 1,0$ соответствует точно резонансу. Коэффициенты $\alpha = 0,7$ и $\alpha = 1,3$ соответствуют границам резонансной зоны.



Рис. 26. Связь скорости курсовых углов.

Формула (3.31), если ввести в нее вместо скорости g , выраженной в ж/сек, скорость v , выраженную в узлах, приводится к виду

$$\cos \alpha = 3,04 \frac{T_s}{\alpha} \left[\alpha \left(\frac{T_s}{T} \right)^2 - \frac{T_s}{T} \right], \quad (3.32)$$

Когда речь идет о точном резонансе, удобнее пользоваться формулой

$$\cos \alpha = 2,43 \frac{V \lambda}{T} \left(\frac{0,8 V \lambda}{T} - 1 \right), \quad (3.33)$$

которая позволяет определить резонансные курсовые углы в функции длины волны, скорости судна и периода его собственных колебаний.

Формулы (3.31), (3.32) и (3.33) позволяют построить резонансные диаграммы. Впервые такие диаграммы были применены Ротом (Roth) [1932] при анализе вопроса о причинах являющейся мореходности являющихся крейсеров, вступивших незадолго до этого в строй. В дальнейшем аналогичные диаграммы были предложены в Советском Союзе В. Г. Власовым, С. Н. Благовещенским, Л. М. Ногидом и Ю. В. Ремизом, а за границей Г. Бекером.

На рис. 26 приведены диаграммы, построенные по формуле (3.33) для четырех периодов собственных колебаний судна.

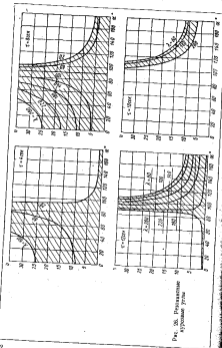


Рис. 26. Резонансные кривые углов

На двух нижних диаграммах этого рисунка не показаны кривые, соответствующие $\lambda = 20$ м, так как они почти сливаются с кривыми, построенными для $\lambda = 60$ м. Это следует иметь в виду при сопоставлении заштрихованных площадей диаграмм.

Заштрихованные площади диаграмм дают представление о вероятности попадания судна в условия резонанса при данных волн, вышедших отражение на рисунке. Для пояснения этой особенности диаграмм допустим условно, что любые курсовые углы α , как равным образом и волны любой длины, из отмеченных на рисунке, обладают одинаковой широтностью. Тогда вероятность резонанса с одной из таких волн определится отношением заштрихованной части диаграммы ко всей ее площади. Хотя в общем случае эта закономерность не является точной, все же можно считать, что по мере возрастания заштрихованной площади вероятность резонанса увеличивается.

Воспользуемся этим свойством диаграмм для оценки ожидаемого поведения судов, отличающихся периодом собственных поперечных колебаний T_0 .

На основании данных, приведенных на рис. 26, можно ожидать, что чаще всего в условиях резонанса будут оказываться суда с периодом $T_0 = 8$ сек., так как на диаграмме, соответствующей этому периоду, заштрихованный участок имеет наибольшую площадь. При увеличении периода T_0 и в меньшей степени при его уменьшении вероятность резонанса снижается. При $T_0 \geq 16$ сек. вероятность резонанса очень незначительна.

С другой стороны, при увеличении периода T_0 сверх $T_0 = 8$ сек. резонанс наступает при более острых курсовых углах, что способствует снижению амплуазующего момента и резонансных амплитуд качки. Так, например, для судов со скоростью $v = 15$ узл. резонанс с волнами длиной $\lambda = 60-180$ м наступает при курсовых углах $\alpha = 135-142^\circ$, если $T_0 = 16$ сек., и при $\alpha = 42-107^\circ$, если $T_0 = 8$ сек. Интервалы резонансных курсовых углов равны в первом случае $\Delta\alpha = 7^\circ$, а во втором случае $\Delta\alpha = 65^\circ$.

Для данного курсового угла протяженность интервала скоростей, при которых возможен резонанс, убывает, а сами скорости возрастают по мере увеличения периода собственных поперечных колебаний судна. Так, например, для волн длиной $60-180$ м при курсовом угле $\alpha = 120^\circ$, резонансные скорости не выйдут из пределов $v = 20-23$ узл., если $T_0 = 16$ сек., и $v = 7-18$ узл., если $T_0 = 8$ сек.

В целом следует признать, что для сравнительно больших судов ($T_0 \geq 8$ сек.) поведение судна в условиях резонанса должно улучшаться по мере увеличения периода собственных поперечных колебаний. Так же обстоит дело и с малыми судами ($T_0 < 8$ сек.) при встрече с волнами сравнительно малой длины. В качестве примера уместно отметить, что если $\lambda = 20$ м, $v = 10$ узл. и $T_0 = 4$ сек., то резонансный курсовой угол составляет $\alpha = 95^\circ$.

Если же $\tau_0 = 8$ сек., то для всех прочих одинаковых условий судно попадает в резонанс лишь при курсовом угле $\alpha = 130^\circ$.

Исключение из общего правила составляют мелкие суда, встречающие длинные волны. В частности, например, для десятиузлового судна с периодом $\tau_0 = 4$ сек. резонанс невозможен, если длина волн превосходит $\lambda = 60$ м. При той же скорости хода судно с периодом $\tau_0 = 8$ сек. попадает в резонанс с волнами длиной $\lambda = 20-160$ м при курсовых углах $\alpha = 30-115^\circ$. Собственные продольные колебания даже крупных судов редко превосходят 8 сек. Поэтому сказанное выше об условиях резонанса при бортовой качке мелких судов действительно и при рассмотрении продольной качки сравнительно крупных судов.

Пронормируем преимущества, к которым приводит снижение периода собственных продольных колебаний, следующим примером:

Пусть два судна длиной 150 м с периодами собственных продольно-угловых колебаний $\tau_0 = 4$ сек. и $\tau_0 = 8$ сек. следуют курсом $\alpha = 0^\circ$ и могут развивать скорость до 20 узл. Для первого судна при скорости хода 10-20 узл. длина резонансных волн равна приблизительно $\lambda = 60-80$ м, чему соответствует отношение $\lambda/L = 0,4-0,5$. Столь короткие волны, как это показано в дальнейшем изложении, не могут вызвать заметной килевой качки. Для второго судна в том же интервале скорости длина резонансных волн лежит в пределах $\lambda = 170-230$ м, причем $\lambda/L = 1,1-1,5$. При такой относительной длине волны судно подвержено сильной продольной качке на встречном волнении.

Таким образом, в отношении килевой качки (то же самое относится к вертикальной качке, поскольку периоды τ_0 и τ_y мало отличаются друг от друга) преимущество имеют суда с малыми периодами собственных колебаний.

Переходя к вопросу о резонансной зоне, отметим, что, как это следует из формул (3.31) и (3.32), курсовой угол, соответствующий резонансу, определяется однозначно отношением периода собственных колебаний судна к его скорости и к отношению периода волны к периоду собственных колебаний. Поэтому для графического воспроизведения последней формулы можно было бы ограничиться построением трех диаграмм, соответствующих трем рассматриваемым значениям коэффициента α , однако для большей наглядности целесообразно строить диаграммы применительно к отдельным частям значений параметра τ_0/v . Такие диаграммы, построенные по формуле (3.32) для четырех значений отношения τ_0/v , представлены на рис. 27 и 28. Заштрихованные области диаграмм соответствуют зонам курсовых углов

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{гн}0,7} - \alpha_{\text{гн}1,3}$$

¹ Более полной комплекции резонансных диаграмм можно найти в работе автора [1924].

(вычисленных при $\alpha = 0,7$ и $\alpha = 1,3$), внутри которых при соответствующих значениях отношения τ_0/v сказывается явление резонанса. Пунктиром на рассматриваемых диаграммах нанесены вспомогательные кривые $\tau_0/v = f(\alpha, \lambda)$ для волн различной длины. Пунктирные кривые позволяют определить отношение τ_0/v по заданным значениям α и λ . Приняв $\tau_0/v = 1,0$, можно определить по пунктирным кривым также периоды волн.

Отмеченные выше рисунки позволяют сделать следующие выводы (для определенности относим их к поперечным колебаниям).

Зона резонансных курсовых углов $\Delta\alpha = \alpha_{\text{гн}0,7} - \alpha_{\text{гн}1,3}$, обращаясь в нуль при $\tau_0/v = 0$, увеличивается при возрастании этого отношения. В соответствии с этим суда с большим периодом собственных поперечных колебаний имеют меньшие шансы попасть в условия резонанса, чем суда с малым периодом собственных поперечных колебаний. Кроме того, по сравнению с последним они могут быть легче выведены из резонанса путем меньшего изменения курсового угла или скорости хода.

При наиболее неблагоприятных для каждой диаграммы значениях τ_0/v зона резонансных курсовых углов $\Delta\alpha$ возрастает с увеличением отношения τ_0/v , а следовательно, при заданном периоде τ_0 — с уменьшением скорости.

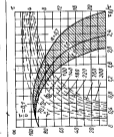
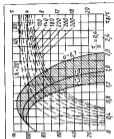


Рис. 27. Проницаемость [зона резонанса] каждой зоны отнесенных к периоду собственных колебаний $\tau_0/v = 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0, 6,0, 8,0, 10,0, 15,0, 20,0, 30,0, 40,0, 50,0, 60,0, 80,0, 100,0$.

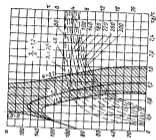
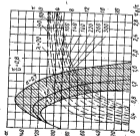


Рис. 28. Протяженность резонансной зоны при отношении $\tau_0/\tau_1 = 0,8$ и $v/v_0 = 1,2$.

— кривая для $\Delta x = 180^\circ$
 - - - - - кривая $\Delta x = 180^\circ$



Поэтому в отношении протяженности резонансной зоны более быстроходные суда оказываются в лучшем положении, чем суда с меньшей скоростью хода.

Для судов с большим периодом собственных поперечных колебаний, как это показывают пунктирные кривые, при изменении длины волны в широком диапазоне отношение τ_0/τ_1 колеблется в узких пределах, соответствующих благоприятным условиям резонанса. С уменьшением τ_1 пределы изменения τ_0/τ_1 увеличатся и сместятся в неблагоприятном направлении. Так, например, для $\lambda = 20-300$ м и высоты $\tau_0/\tau_1 = 0,16-0,58$, если $\tau_0 = 24$ сек. Для тех же длин волн $\tau_0/\tau_1 = 0,6-2,4$ в случае уменьшения периода собственных поперечных колебаний до $\tau_1 = 6$ сек.

В качестве примера определим пределы резонансных курсовых углов для крупного пассажирского судна с периодом $\tau_0 = 22$ сек. и скоростью $v = 27,5$ узла, а также малого судна с периодом $\tau_0 = 8$ сек. в предположении, что скорость последнего в штормовых условиях падает до 6,7 узла. Этим судам соответствуют отношения

$$\frac{\tau_0}{\tau_1} = \frac{22,0}{27,5} = 0,8;$$

$$\frac{\tau_0}{\tau_1} = \frac{8,0}{6,7} = 1,2.$$

Рассмотрим поставленную задачу в предположении, что суда плавают на штормовой океанской волне, имеющей длину $\lambda = 100$ м.

По пунктирным кривым на рис. 28 найдем, что поставленным условиям при $\tau_0 = 22$ и 8 сек. соответствуют отношения

$$\frac{\tau_0}{\tau_1} = 0,36;$$

$$\frac{\tau_0}{\tau_1} = 1,0.$$

При найденных соотношениях между τ_0 , τ_1 и v протяженность резонансной зоны определяется следующими цифрами:

$$\alpha = 118-133^\circ;$$

$$\alpha = 0-180^\circ.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае резонансная зона для судна с большим периодом свободных колебаний не превышает 15° и судоводителю придется лишь избежать курсовых углов в пределах $118-133^\circ$. При тех же внешних условиях второе судно не сможет выйти из резонанса ($\Delta x = 180^\circ$) и потому попадет в весьма тяжелые условия.

В этой связи заметим, что каждому типу судна соответствуют характерные пределы значений τ_1 и v , которые в каждом частном

случае не могут быть изменены в значительной степени по усмотрению проектировщика. Поэтому присущие данному типу судна значения τ_0 и α практически ограничивают его эксплуатационные возможности, определяя либо предельное волнение, при котором судно еще сохраняет достаточные мореходные качества, либо бассейны, в которых оно может плавать.

Указания, приведенные в настоящем параграфе, можно резюмировать так.

Для улучшения мореходности судна при бортовой качке выгодно увеличивать период собственных поперечных колебаний τ_0 относительно крупных судов и уменьшать его, если речь идет о мелких судах. Условие же, соответствующее резонансу при продольной качке, становится более благоприятным при уменьшении периода собственных продольно-угловых и вертикальных колебаний судна.

Увеличение скорости хода сказывается благоприятно на резонансных соотношениях при бортовой качке. При продольной же качке условия резонанса улучшаются по мере снижения скорости хода.

§ 4. РЕЗОНАНС ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Наличие в энергетическом спектре нерегулярного волнения волн различной частоты (а следовательно и длины) приводит к значительному расширению резонансных курсовых углов как при бортовой, так и при продольной качке. На последней спектральная плотность волнения снижается также и потому, что продольная качка в значительной мере зависит от относительной длины волны λ/L .

В главе пятой показано, что на встречном волнении амплитуда ξ суммарных вертикальных перемещений носовой оконечности судна относительно волны, достигшие большей частью максимума в интервале относительной $\lambda/L = 1,0-1,3$, не выходит из допустимых пределов при $\lambda/L > 2,0$ и быстро снижаются при $\lambda/L < 0,9$.

Поскольку от амплитуд ξ зависит зависимость судна, снижается, потеря скорости на взволнованном море, а также линейные ускорения в оконечностях, интервал относительных длин волны $\lambda/L = 0,9-2,0$ должен рассматриваться как неблагоприятный при ходе судна на встречном регулярном волнении, особенно в резонансной зоне. То же относится к нерегулярному волнению, если волны с относительной длиной, лежащей в отмеченных пределах, играют существенную роль в волновом спектре.

Таким образом, для оценки вероятного поведения судна на встречном нерегулярном волнении нужно выяснить, при какой относительной длине волны λ/L реализуется условие $\tau_{\text{Фр}} = \tau_{\text{с}}$,

соответствующее резонансу.¹ Если резонанс наступает в интервале неблагоприятных относительных длин, необходимо дополнительно установить, при какой бальности моря в волновом спектре повалится и играют существенную роль также волны.

Остановимся сначала на первом вопросе.

Для получения в более удобном виде зависимости, связывающей скорость судна, отношение $v_{\text{Фр}}/v_{\text{с}}$ и относительную длину волны, которые соответствуют резонансу при встречном волнении, можно воспользоваться формулой (3.30), которая при $\alpha = 0$ дает²

$$\tau_{\text{с}} = \frac{\lambda}{v + c},$$

в соответствии с чем

$$\frac{\tau_{\text{Фр}}}{\tau_{\text{с}}} = \frac{v_{\text{Фр}}}{v} (v + c) = \frac{v_{\text{Фр}}}{v} \left(v + \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \right). \quad (3.34)$$

Заметим, что отношение v/c связано с числом Фруда соотношением

$$\frac{v}{c} = v \sqrt{\frac{2\pi}{g\lambda}} = v \sqrt{\frac{2\pi}{g}} \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = Fr \sqrt{\frac{2\pi}{g} \frac{1}{\lambda}},$$

в соответствии с чем

$$Fr = 0,4 \frac{v}{c} \sqrt{\frac{\lambda}{L}}. \quad (3.35)$$

Разделив обе части равенства (3.34) на $\sqrt{g\lambda}$, можно представить его в виде

$$Fr = \frac{1}{\sqrt{g\lambda}} \frac{v_{\text{Фр}}}{v_{\text{с}}} \frac{\lambda}{L} - 0,4 \sqrt{\frac{\lambda}{L}}. \quad (3.36)$$

В последней формуле под

$$\frac{v_{\text{Фр}}}{v_{\text{с}}} = \frac{v_{\text{Фр}}}{v_{\text{с}}} \sqrt{\frac{\lambda}{L}}$$

появятся безразмерные периоды собственных колебаний при килевой или вертикальной качке, отнесенные к длине судна.

Для условий резонанса при $\tau_{\text{Фр}} = \tau_{\text{с}}$ формула (3.36) дает

$$Fr = \frac{1}{\sqrt{g\lambda}} \frac{\lambda}{L} - 0,4 \sqrt{\frac{\lambda}{L}}. \quad (3.37)$$

¹ Под $\tau_{\text{Фр}}$ понимается период $\tau_{\text{Фр}}$, если речь идет о килевой качке, и период $\tau_{\text{в}}$, если речь идет о вертикальной качке. Независимо от этого при определенных резонансных соотношениях, как и ранее, предполагается, что $\tau_{\text{Фр}} = \tau_{\text{с}} = 1/2 (\tau_{\text{Фр}} + \tau_{\text{в}}) = \tau_{\text{Фр}}$.

² Вопрос о резонансе при попутном волнении не рассматривается, так как он не имеет в настоящем случае большого практического значения.

Периоды $\tau_{\text{кр}}^{(L)}$, рассматриваемые как известные характеристики судна, могут быть исключены из формулы (3.37) при помощи приближенных зависимостей, связывающих периоды $\tau_{\text{кр}}$ и $\tau_{\text{кр}}^{(L)}$ с элементарными судна. Так, например, в соответствии с формулой (3.19) и (3.28)

$$\tau_{\text{кр}} - \tau_{\text{кр}}^{(L)} \approx 2,5 \frac{L}{T_0}$$

получим

$$\tau_{\text{кр}}^{(L)} = 2,5 \sqrt{\frac{T_0}{L}} \approx 7,8 \sqrt{\frac{T}{L}} \quad (3.38)$$

и, следовательно,

$$\frac{L}{T} = 60,7 [\tau_{\text{кр}}^{(L)}]^{-2} \quad (3.39)$$

Формулы (3.13) и (3.27) позволяют получить более точные зависимости

$$\frac{\tau_{\text{кр}}^{(L)}}{\tau_{\text{кр}}} = 2\pi \frac{\delta}{\alpha} \frac{T}{L} \frac{L}{\lambda} \left(1 + \frac{\delta T}{T}\right) \times \left(1 + \frac{\alpha}{\sigma}\right)^2$$

$$\frac{\tau_{\text{кр}}^{(L)}}{\tau_{\text{кр}}} = 2\pi \frac{\delta}{\alpha} \frac{T}{L} \frac{L}{\lambda} \left(1 + \frac{\delta D}{D}\right) \times \left(1 + \frac{\alpha}{\sigma}\right)^2 \quad (3.40)$$

Рис. 23. Условия резонанса на продольном волнении.

Г — грузовое судно; Р — нефтяное судно; Т — танкер; К — артиллерийское судно; Э — эскадренный миноносец; С — сейнер.

Для балластного прогиба формулы (3.38) и (3.39) принимают вид

$$\tau_{\text{кр}}^{(L)} \approx 8,95 \sqrt{\frac{T_0}{L}}; \quad \frac{L}{T_0} = 80 [\tau_{\text{кр}}^{(L)}]^{-2} \quad (3.41)$$

На рис. 29 представлены резонансные кривые $Fr = f\left[\tau_{\text{кр}}^{(L)}, \frac{\lambda}{L}\right]$, построенные по формуле (3.37), и вспомогательные кривые L/T ; $L/T_0 = f\left[\tau_{\text{кр}}^{(L)}\right]$, построенные по формулам (3.39) и (3.41). В аналогичной графике Е. В. Льюиса (Е. V. Lewis) [1955] вместо периода $\tau_{\text{кр}}^{(L)}$ фигурирует период $\tau_{\text{кр}}^{(L)}$, а вместо отношения L/T и L/T_0 — относительная длина судна, которую можно было бы в данном случае ввести в рассмотрение дополнительно, воспользовавшись формулой (3.24).

Е. В. Льюис рассматривает область, ограниченную кривыми $\lambda/L = 1,0$ (вместо $\lambda/L = 0,9$) и $\lambda/L = 2,0$, как зону критической

мореходности.¹ Меньшие относительные длины волн он относит к докритической, а большие — к закритической зоне. По Г. Воссеру (G. Vossers) [1962] критическая зона ограничена снизу кривой, соответствующей отношению $\lambda/L = 0,8$.

Возвращаясь к рис. 29, отметим, что на диаграмме нанесены точки, соответствующие судам различных типов. Характеристики этих судов указаны в табл. 14. Их относительные периоды $\tau_{\text{кр}}^{(L)}$ определялись исходя из отношения L/T .

Таблица 14

Характеристики судов, отмеченных на рис. 29

Тип судна	Обозначение	$R_{\text{дв}}$, л	L , м	T , м	$\frac{L}{T}$	$\tau_{\text{кр}}^{(L)}$, узлы	Fr
Грузовое	Г	1 140	70,0	3,80	18,0	12,5	0,351
Нефтяное	Р	4 290	118,0	6,54	18,0	19,0	0,249
Грузовое	Г	16 000	156,0	9,72	16,0	15,0	0,342
Нефтяное	Н	28 600	188,0	10,38	18,1	18,2	0,218
Пассажирское	П	—	192,0	9,10	21,1	23,0	0,274
Танкер	Т	170	39,1	2,89	13,5	10,0	0,283
Сейнер	С	60	30,0	2,54	11,8	9,0	0,269
Китобой	К	30	57,4	4,38	13,1	16,5	0,360
Эскадренный миноносец	Э	111,6	111,6	5,20	21,3	38,7	0,445

Диаграмма показывает, что мореходность всех рассматриваемых судов является критической (по терминологии Льюиса). Точки, соответствующие китобойю, сейнеру, танкеру и эскадренному миноносцу, расположились ближе к верхнему, а точки, соответствующие грузовым судам, — ближе к нижнему краю критической зоны. При неизменном курсовом угле можно перевести рассматриваемые суда из критической в докритическую зону путем резкого снижения скорости хода и соответствующего ей числа Фруда (для пассажирского судна от 0,27 до 0,14, а для сейнера — от 0,27 до 0,02).

Нетрудно связать цифры, полученные по резонансному графику, с состоянием погоды и моря. Для этого, в частности, можно воспользоваться данными Г. Неймана, согласно которым длины волн, содержащих наибольшее количество энергии λ_{max} ,

¹ Правильнее было бы говорить о зоне, неблагоприятной для мореходности судна.

к наиболее крупных волн λ_{max} выражаются в зависимости скорости ветра и балльности моря так:

Скорость ветра, узлы	Балльность моря	λ_{min}	λ_{max}
8,5—13,5	2	18—46	38—92
13,5—16,0	3	46—66	92—132
16,0—19,0	4	66—88	132—174
19,0—24,0	5	98—147	174—288
24,0—28,0	6	147—203	288—377
28,0—34,0	7	203—286	376—477

Рассмотрим в качестве примера поведение небольшой траулер длиной 50 м. Для подобных судов неблагоприятное действие встречного волнения складывается особенно сильно в тех случаях, когда длины резонансных волн лежат в пределах $\lambda_{\text{рез}} = (0,9 \pm 2,0) L = 45$ —100 м.

В рассматриваемом случае условие $\lambda_{\text{рез}} < \lambda_{\text{max}}$ реализуется уже при состоянии моря в 2 балла, которому соответствует максимальная длина волн $\lambda_{\text{max}} = 38$ —92 м. При четырехбалльном волнении интервал неблагоприятных резонансных длин волн $\lambda_{\text{рез}}$ совпадает примерно с длиной волн $\lambda_{\text{max}} = 66$ —98 м, расположенных в районе максимума энергетического спектра и содержащих наибольшее количество энергии.

В подобных условиях траулер будет испытывать особенно сильную качку. При дальнейшем увеличении балльности моря отношение $\frac{\lambda_{\text{рез}}}{\lambda_{\text{max}}}$ будет убывать, что создаст тенденцию к уменьшению амплитуд качки, однако, по-видимому, и при пятибалльном волнении траулер будет отличаться плохой мореходностью.

Таким образом, для рассматриваемого судна сила волнения, соответствующая критической зоне мореходности может быть оценена 2—5 баллами.

Аналогичные рассуждения приводят к выводу, что крупное грузовое судно длиной 150 м окажется в тяжелых условиях при волнении силой более 4—5 баллов. При волнении в 6—7 баллов неблагоприятный интервал резонансных волн $\lambda_{\text{рез}} = 140$ —300 м приблизительно совпадает с интервалом волн $\lambda_{\text{max}} = 147$ —386 м, обладающих наибольшей энергией.

В заключение остановимся на вопросе о мерах, способствующих повышению мореходности судна на встречном волнении.

В принципе можно улучшить поведение пресекательного судна на взволнованном море путем увеличения скорости хода. Так, например, сейнер, отмеченный на рис. 29, окажется в критической зоне после увеличения скорости хода, если соответствующее ей число Фруда возрастет с 0,27 до 0,32. Той же цели можно достичь путем увеличения периода $T_{\text{Ф}}$. Для сейнера это может быть достигнуто за счет увеличения отношения длины к осадке в $L/T \approx 12$ до $L/T \approx 10$, а также в известной мере путем увеличения коэффициента вертикальной полноты.

Путь одновременного увеличения скорости судна и его осадки представляется в известной мере перспективным при пресекательности судов, мореходность которых, при принятии в настоящее время соотношениях, приближается к критической зоне. Сказанное относится в основном к быстрходным промысловым судам и быстрходным судам некоторых других типов. Практические трудности ограничивают возможность использования этого пути уже в настоящее время.

Для улучшения поведения на взволнованном море транспортных судов, которых на рис. 29 соответствуют точки, расположенные дальше от критической зоны, выгодно увеличивать отношение L/T , что приводит к возрастанию длины судна и уменьшению осадки. Одновременно уменьшается период $T_{\text{Ф}}$ и (при $\rho = \text{idem}$) число Фруда. В конечном счете точки, соответствующие этим судам, перемещаются на диаграмме влево и вниз. Уменьшение коэффициента вертикальной полноты также сопровождается некоторым снижением периода $T_{\text{Ф}}$.

Поскольку удлинение судна приводит к утолщению корпуса и увеличению трудоемкости постройки судна, возможности целесообразно использовать этот путь ограничены. Более перспективным представляется путь удлинения судна при одновременном увеличении водонепроницаемости и грузоподъемности (или пассажиропропускности), если это оправдывается экономическими соображениями.

§ 6. СОПРОТИВЛЕНИЕ БОРТОВОЙ КАЧКЕ

Амплитуды качки в значительной мере зависят от сопротивления волн колебательному движению судна. В соответствии с этим в настоящем параграфе рассматривается вопрос о влиянии элементов и устойчивости судна на сопротивление качке.

Момент сопротивления бортовой качке складывается из моментов сопротивления трения, вихреобразования, волнового, а также момента подъемных сил, возникающих в основном на выступающих частях. Волновое сопротивление, связанное с затратами энергии на образование волн, возникающих при качке судна, пропорционально угловой скорости бортовых колебаний. Вихревое сопротивление, а также сопротивление, связанное образованием подъемных сил, изменяется пропорционально квадрату угловой скорости. Сопротивление трения, — же имеющее существенное значение при качке судна в натуральных условиях, уменьшается при медленных колебаниях пропорционально угловой скорости в степени, близкой к первой, а при относительно больших угловых скоростях — приблизительно пропорционально квадрату угловой скорости.

Приобретая влияние сил поперечного натяжения, имеющих существенное значение лишь в модельном эксперименте при

недостаточных размерах модели, можно выразить момент сопротивления качки двулучной формулой

$$M(\dot{\theta}) = -2N\dot{\theta} \pm W\dot{\theta}^2,$$

где $2N$ и W — коэффициенты пропорциональности, зависящие от соотношений главных размерностей, коэффициентов теоретического чертежа, возмущения центра тяжести судна и других величин; $\dot{\theta}$ — угловая скорость.

Для упрощения расчетов обычно применяют одну из приведенных формул

$$M(\dot{\theta}) = -2N\dot{\theta}; \quad M(\ddot{\theta}) = \pm W\dot{\theta}^2. \quad (3.42)$$

Коэффициентам $2N$ и W соответствуют безразмерные коэффициенты затухания в уравнениях линейной и квадратичной качки

$$2\mu = \frac{2N}{T_0\omega} = \frac{2N}{\sqrt{I_y}D\omega}; \quad K = \frac{W}{T_0}, \quad (3.43)$$

где $\omega = 2\pi/T_0 = \sqrt{Dg/I_y}$ — частота собственных колебаний судна.

Из формулы (3.43) следует, что для увеличения коэффициента 2μ выгодно уменьшать начальную остойчивость судна. При постоянных же значениях D и k увеличение момента инерции массы судна, хотя и сопровождается уменьшением частоты ω , но в конечном счете приводит к снижению коэффициента 2μ .

В линейное уравнение качки можно вводить как коэффициенты $2N$ и 2μ , так и коэффициенты W и K . Те и другие коэффициенты связаны известными зависимостями

$$2N = 0,85W\theta_0 \sigma, \\ 2\mu = 0,85K\lambda \sigma, \quad (3.44)$$

где θ_0 — амплитуда колебаний; σ — частота, которая при регулярном волнении равна частоте волны; $\lambda = \sigma/\omega$.

Коэффициенты 2μ и K зависят от коэффициентов δ и α , отношения B/T и L/B , относительного периода собственных поперечных колебаний, вместо которого обычно вводят в рассмотрение и соответствия с формулами (3.05) и (3.06) эксцентриситетную высоту. Коэффициент 2μ зависит, кроме того, от амплитуды качки.

Для определения безразмерных коэффициентов сопротивления качке в зависимости от относительной метацентрической высоты был предложен ряд формул, полученных опытным путем. Конечно, они приводят не к одинаковым результатам, но в совокупности показывают, что коэффициенты сопротивления увеличиваются по мере сжатия относительной метацентрической высоты. Остановимся на некоторых из этих формул.

В. А. Морепаньшт предположила определить коэффициент 2μ исходя из соотношения

$$2\mu = 2\mu^1 \frac{B}{k},$$

где μ^1 — коэффициент, зависящий только от формы судна. Судя по испытаниям, проведенным в бассейне Ленинградского кораблестроительного института для транспортных и промысловых судов (подробнее см. ниже), более обоснована аналогичная зависимость

$$2\mu = 2\mu^1 \left(\frac{B}{k}\right)^{0,5}. \quad (3.45)$$

Г. Воссере (G. Vossers) [1962] пользуется безразмерным соотношением

$$\mu_0 = \frac{N \sqrt{gB}}{g\theta_0^2 D},$$

которое приводится к виду

$$\mu_0 = \mu \frac{r_1}{B} \left(\frac{k}{B}\right)^{0,5},$$

где r_1 — поперечный радиус инерции массы судна с учетом приподнятой массы воды.

Таким образом, по Г. Воссере

$$\mu = \mu_0 \frac{B}{r_1} \left(\frac{B}{k}\right)^{0,5},$$

что согласуется с формулой (3.45).

В. В. Семенов-Тен-Шанский предложил определить коэффициенты затухания качки исходя из соотношения

$$K = K^{IV} \left(\frac{r_1}{B}\right)^{0,25}, \quad (3.46)$$

поскольку для моделей, которые были испытаны в бассейне ЛКИ, коэффициент K^{IV} почти не зависит от амплитуды качки.

На рис. 30 и 31 представлены номограммы, позволяющие определять коэффициент K^{IV} для транспортных и промысловых судов. Номограммы, построенные по данным испытаний в бассейне ЛКИ, заимствованы из работ В. В. Луговского и Фадеева [1963] и В. В. Луговского [1964]. Номограммы показывают, что сопротивление качке возрастает с увеличением коэффициента δ , а также с увеличением коэффициента α и отношения B/T .

При неизменном возмущении центра тяжести судна увеличение отношения B/T сопровождается возрастанием начальной метацентрической высоты и уменьшением периода собственных поперечных колебаний судна. Поскольку это обстоятельство сказывается на качке сильнее, чем увеличение коэффициента K^{IV} ,

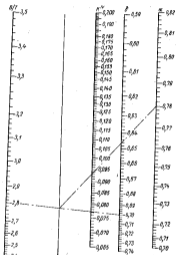


Рис. 30. Номограмма для определения коэффициента деформации транспортных судов.

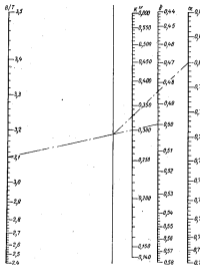


Рис. 31. Номограмма для определения коэффициента деформации промышленных судов.

возрастание отношения B/T приводит в конечном счете к увеличению амплитуд бортовой качки.

Судовые килы значительно увеличивают коэффициенты затухания, вследствие возрастания составляющей сопротивления, пропорциональной квадрату угловой скорости. В меньшей степени снижается брусковый киль. Сопротивление киле возрастает при входе валубы в воду.

Сопротивление качке быстро возрастает с увеличением скорости хода, в основном за счет волнового сопротивления, пропорционального, как отмечалось, угловой скорости поперечных колебаний судна. Г. В. Соболев [1958] вывел следующую теоретическую формулу, выражающую приращение безразмерного коэффициента сопротивления на ход судна

$$\Delta Z_p = \frac{0,29Fr}{\delta \left(\frac{\theta}{T} - 1 \right) \left(\frac{\delta}{B} \frac{\lambda}{B} \right)^{0,5}}, \quad (3.47)$$

Формула Г. В. Соболева приводится к виду

$$\Delta(2\mu) = \frac{0,29Fr}{\frac{\lambda}{B} \delta \left(\frac{\theta}{T} - 1 \right) \omega^{(1)}},$$

где $\omega^{(1)}$ — безразмерная частота собственных поперечных колебаний, отнесенная к длине судна. Частота $\omega^{(1)}$ выражается равенством

$$\omega^{(1)} = \omega \sqrt{\frac{L}{g}},$$

Некоторые иностранные авторы выражают приращение коэффициента демпфирования качки в зависимости от параметра

$$\xi = \frac{\omega^2 L}{2g} = \frac{1}{2} [\omega^{(1)}]^2,$$

который представляет собой модифицированное выражение безразмерной частоты $\omega^{(1)}$.

§ 4. БОРТОВАЯ КАЧКА НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

В дальнейшем изложении мы будем основываться на так называемом укороченном линейном уравнении бортовой качки абсолютных координатах. Будучи достаточно точным для целей, преследуемых в настоящей книге, укороченное уравнение

$$I \ddot{\theta} + 2N \dot{\theta} + D \theta = q_{\theta} D \lambda \sin \sigma t \quad (3.48)$$

приводит к простым расчетным схемам, дающим наглядное представление о влиянии различных факторов на показатели качки.

В формуле (3.48) приняты следующие обозначения: θ — угловые перемещения судна; σ — частота волны; t — время; $q_{\theta} =$

приведенный угол волнового склона. Последний определяется в зависимости от действительного угла волнового склона φ_0 по формуле

$$\varphi_{\theta} = \kappa_1 \varphi_0 \sin \alpha, \quad (3.49)$$

где κ_1 — редуцированный коэффициент, который, если судно движется лавом к волне, учитывает влияние конечности осадки и ширины судна по сравнению с длиной волны. При косых курсах коэффициент κ_1 учитывает также адекватные изменения угла волнового склона по длине судна.

Установившиеся вынужденные колебания судна выражаются равенством

$$\theta = \theta_0 \sin(\sigma t + \delta_0), \quad (3.50)$$

в котором амплитуда θ_0 и фазовый угол δ_0 , если исходить из уравнения (3.48), оказываются равными

$$\theta_0 = \frac{q_{\theta}}{\sqrt{(1-\sigma^2)^2 + 4\mu^2 \sigma^2}}, \quad (3.51)$$

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \frac{2\mu\sigma}{1-\sigma^2}, \quad (3.52)$$

где $\mu = \sigma/\omega$.

Поскольку численные значения коэффициента μ малы, из формулы (3.51) следует, что пикант резонанса

$$\theta_0 \approx \frac{q_{\theta}}{1-\sigma^2},$$

и, следовательно, в этом случае амплитуда бортовой качки определяется в основном отношением частоты волны к частоте собственных колебаний судна. Вблизи же резонанса

$$\theta_0 = \frac{q_{\theta}}{2\mu\sigma}, \quad (3.53)$$

и, таким образом, при $\mu \approx 1,0$ основное значение имеет коэффициент сопротивления качке.

Остановимся подробнее на резонансных соотношениях, поскольку зависимость, характеризующая качку в условиях резонанса, дает общее представление о влиянии некоторых факторов на поведение судна при неблагоприятных условиях плавания.

Из формул (3.50) и (3.53) следует, что при резонансе амплитуды угловых перемещений, скоростей и ускорений равны соответственно

$$\theta_m = \frac{q_{\theta}}{2\mu}; \quad \dot{\theta}_m = \sigma \theta_m = \frac{2\pi}{T} \theta_m; \quad (3.54)$$

$$\ddot{\theta}_m = -\sigma^2 \theta_m = -\frac{4\pi^2}{T^2} \theta_m$$

Формулы (3.54) можно представить также в виде

$$\begin{aligned} \theta_{\alpha} &= 2\pi \frac{\Phi_{\text{в}}}{\tau_{\text{в}}} \frac{J_1}{2N}; \\ \dot{\theta}_{\alpha} &= 4\pi^2 \frac{\Phi_{\text{в}}}{\tau_{\text{в}}} \frac{J_1}{2N}; \\ \ddot{\theta}_{\alpha} &= -8\pi^3 \frac{\Phi_{\text{в}}}{\tau_{\text{в}}} \frac{J_1}{2N}. \end{aligned} \quad (3.55)$$

Как это следует из формулы (3.54), увеличение относительной метацентрической высоты, сопровождающееся снижением коэффициента 2μ , приводит к возрастанию амплитуды качки θ_{α} . Амплитуды же угловых скоростей и ускорений возрастают как с увеличением амплитуды θ_{α} , так и по мере уменьшения периода собственных поперечных колебаний судна $\tau_{\text{в}}$. При одинаковом коэффициенте сопротивления $2N/l$, как это следует из формулы (3.55), все три рассматриваемых показателя качки быстро увеличиваются с уменьшением периода $\tau_{\text{в}}$, или, иначе говоря, с возрастанием начальной остойчивости судна.

Вводя в первую из формул (3.54) вместо 2μ коэффициент K , мы бы получили на основании формулы (3.44)

$$\theta_{\alpha} = 1,09 \sqrt{\frac{\Phi_{\text{в}}}{K}}. \quad (3.56)$$

В § 3 мы рассмотрели вопрос о влиянии изменения отношения $\tau_{\text{в}}/\tau_{\text{в}}$ на резонансный курсовой угол. Одновременно с изменением курсового угла изменяется и приведенный угол волнового склона $\Phi_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}} \Phi_0 \sin \alpha$, определяющей в значительной мере амплитуду качки. Воспользуемся формулой (3.31), приняв ее (для случая $\alpha = 1$) к виду

$$\cos \alpha = \frac{v}{2\lambda} \frac{\tau_{\text{в}}}{v} \left(\frac{\tau_{\text{в}}}{\tau_{\text{в}}} - 1 \right), \quad (3.57)$$

и рассмотрим на частном примере, как влияет изменение периода собственных поперечных колебаний судна на приведенный угол волнового склона. Пусть $\lambda = 100$ м; $\tau_{\text{в}} = 8$ сек.; $v = 15$ узл.; $\alpha = 7,71$ м/сек. Кроме того, для упрощения задачи будем условно считать, что независимо от курсового угла и других условий $K_0 = 1,0$ и, следовательно,

$$\Phi_{\text{в}} = \Phi_0 \sin \alpha. \quad (3.58)$$

Задавась рядом значений периода $\tau_{\text{в}}$, вступило с помощью формул (3.57) и (3.58) получим следующие соотношения:

$\tau_{\text{в}}$, сек.	5	7	8	9	12	15	18	21
α , град.	14	68	90	100	123	139	154	180
$\Phi_{\text{в}}/\Phi_0$	0,24	1,00	1,00	0,98	0,84	0,65	0,41	0

Полученные цифры показывают, что в условиях резонанса увеличение периода собственных поперечных колебаний сверх $\tau_{\text{в}} = \tau_{\text{в}}$ приводит к дополнительному снижению амплитуд качки вследствие уменьшения приведенного угла волнового склона. Уменьшение периода $\tau_{\text{в}}$ может привести к положительным результатам лишь для мелких судов, отличающихся малыми значениями периода собственных поперечных колебаний.

Физиологическое действие качки определяется в основном вертикальными линейными ускорениями, вызванными совместным действием бортовой, килевой и вертикальной качки. В связи с этим остановимся на вопросе об относительных линейных ускорениях \ddot{y} , возникающих при резонансной бортовой качке в условной точке, расположенной на расстоянии $0,5B$ от диаметральной плоскости. При рассмотрении этого вопроса воспользуемся формулами (3.54), из которых третья дает

$$\frac{\ddot{y}}{g} = \frac{0,58B}{g} = \frac{2\sigma^2}{g} \frac{B}{\tau_{\text{в}}} \theta_{\alpha}$$

Учитывая, что на основании формулы (3.05)

$$\frac{v^2}{g^2} = \frac{1}{K^2} \frac{B}{H},$$

можно выразить линейные ускорения равенством

$$\frac{\ddot{y}}{g} = \frac{2}{K^2} \frac{B}{H} \theta_{\alpha}, \quad (3.59)$$

из которого следует, что в условиях резонанса линейные ускорения при бортовой качке пропорциональны амплитуде качки и относительной метацентрической высоте $\frac{B}{H}$.

В качестве примера определим отношение амплитуд и линейных ускорений двух вариантов судна и предположим, что они сохраняют рейсы в условиях резонанса с волной, длина и период которой равны $\lambda = 80$ м, $\tau_{\text{в}} = 7,15$ сек. Судна имеют следующие элементы, установленные расчетом:

Срок.	B	H	$\tau_{\text{в}}$	$\frac{B}{H}$	σ^2
I	16,7	1,15	12	0,049	134
II	13,4	1,85	10	0,101	121

Отношение амплитуд качки определяем по формуле (3.56) в предположении, что коэффициент затухания выражается равенством

$$K = K^{IV} \left(\frac{B}{H} \right)^{IV}$$

и, следовательно,

$$\frac{\varphi_0^{(2)}}{\varphi_0^{(1)}} \sqrt{\frac{\varphi_{0p}^{(1)} \left(\frac{A_1}{B_1}\right)^{0,25} \left(\frac{B_1}{A_1}\right)^{0,25}}{\varphi_{0p}^{(2)}}} = 1,15.$$

Аналогично находим отношение линейных ускорений

$$\frac{\ddot{z}_0}{\ddot{z}_1} = \frac{A_1}{A_2} \frac{B_2}{B_1} \frac{\sigma_0^{(1)}}{\sigma_0^{(2)}} = 1,68.$$

Таким образом, при принятых предположениях, уменьшение периода собственных поперечных колебаний на 17%, вызванное увеличением относительной метацентрической высоты на 46%, привело к возрастанию амплитуды качки приблизительно на 15% и линейных ускорений приблизительно на 70%.

§ 7. ПРОДОЛЬНАЯ КАЧКА НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Как известно, установившиеся колебания судна при килевой и вертикальной качке можно выразить зависимостями

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 \cos(\sigma_x t + \delta_\varphi); \\ z &= z_0 \cos(\sigma_z t + \delta_z), \end{aligned} \quad (3.60)$$

где φ_0 и z_0 — амплитуды качки; $\sigma_x = 2\pi/T_x$ — кажущаяся частота волны; δ_φ и δ_z — фазовые углы по отношению к измелению волнового профиля в поперечном сечении, проходящем через центр тяжести судна.

Если амплитуды и фазовые углы килевой и вертикальной качки известны, нетрудно составить уравнения суммарных вертикальных перемещений судна относительно неподвижной горизонтальной плоскости и относительно поверхности волны

$$S^{(2)} = f(x, t);$$

$$z^{(1)} = f(x, t),$$

где x — абсцисса рассматриваемой точки, и определить фазовый угол между вертикальными колебаниями судна и колебаниями волны. Дифференцируя же $S^{(2)}$ и $z^{(1)}$, приходим к уравнению, характеризующему линейные скорости и ускорения точек судна.

Так создается математический аппарат, который позволяет исследовать удары судна о воду (явление сляминга), построить кривые эволюционности судна и рассмотреть некоторые другие задачи.

В настоящем параграфе даются общие указания о решении уравнений продольной качки. Дополнительные сведения о зависимости, сляминга, потере скорости на изолированном море приведены в главе пятой.

В расчетах продольной качки, базирующихся на теории А. Н. Крылова и упрощениях Г. Е. Павленко, амплитуды килевой и вертикальной качки судна, идущего вразрез волне определяются по формулам

$$\varphi_0 = \varphi_0 \kappa_\varphi P_\varphi = \varphi_0 \kappa_\varphi^{(1)} P_\varphi;$$

$$z_0 = z_0 \kappa_z P_z = z_0 \kappa_z^{(1)} P_z,$$

где φ_0 и z_0 — угол волнового склона и амплитуда волны и $\kappa_\varphi = -\kappa_\varphi^{(1)}$ и $\kappa_z = \kappa_z^{(1)}$ — редуцированные коэффициенты для угла волнового склона и амплитуды волны, учитывающие распределение давлений в волне и размеры волн. Они представляют собой функции вида

$$\kappa = f\left(\frac{T}{\lambda}, \frac{\delta}{\alpha}\right) = f\left(\frac{L}{\lambda}, \frac{T}{L}, \frac{\delta}{\alpha}\right);$$

$$\kappa_\varphi^{(1)} = f_\varphi\left(\frac{L}{\lambda}, \alpha\right);$$

$$\kappa_z^{(1)} = f_z\left(\frac{L}{\lambda}, \alpha\right).$$

Графики для определений этих функций можно найти в курсах теории корабля и справочных изданиях.

Частные значения функций

$$P_\varphi = f_1\left(\frac{\sigma_\varphi}{\omega}, \delta_\varphi\right);$$

$$P_z = f_2\left(\frac{\sigma_z}{\omega}, \delta_z\right),$$

где δ_φ и δ_z — коэффициенты демпфирования килевой и вертикальной качки, определяются расчетом. Согласно гидродинамической теории продольной качки М. Д. Хаскинца

$$\delta_\varphi = \frac{1}{2} \rho \sigma \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 f_3 \kappa_\varphi^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right) \kappa_\varphi \left(\frac{L}{\lambda}\right);$$

$$\delta_z = \frac{1}{2} \rho \sigma \frac{2\pi}{\lambda} \delta \kappa_z^2 \left(\frac{T}{\lambda}\right) \kappa_z \left(\frac{L}{\lambda}\right),$$

где $\kappa_\varphi^2 (T/\lambda)$; $\kappa_z (L/\lambda)$; $\kappa_\varphi (L/\lambda)$ — коэффициенты, определенные по графикам, которые можно найти в курсах качки корабля и оригинальной работе М. Д. Хаскинца.

Из приведенных формул следует, что в конечном счете амплитуды килевой и вертикальной качки зависят от отношений T_0^2/L_0 , T_0/L_0 , L_0/L , δ/α , коэффициента σ и других величин.

Перейдем теперь к вопросу об определении суммарных вертикальных перемещений судна и разности фаз между этими колебаниями и колебаниями уровня воды в рассматриваемом сечении.

Примем, что начало связанной с судном системы координат расположено в его центре тяжести. Ось x направим горизонтально в нос, а ось z — вверх. Кроме того, для упрощения расчетов формул будем исходить из предположения, что центр тяжести судна расположен в плоскости грузовой ватерлинии.

Если амплитуды и фазовые углы килевой и вертикальной качки известны, то величина суммарных вертикальных перемещений корпуса $S^{(0)}$ в поперечном сечении, расположенном на расстоянии x от центра тяжести, найдется по формуле

$$S^{(0)} = \psi_{\text{к}} x \cos(\sigma_0 t + \delta_{\psi}) + z_0 \cos(\sigma_0 t + \delta_z). \quad (3.61)$$

Заменив в равенстве (3.61) носкусы сумм их значениями по известным тригонометрическим формулам и после обозначения

$$\begin{aligned} A &= \psi_{\text{к}} x \cos \delta_{\psi} + z_0 \cos \delta_z; \\ B &= \psi_{\text{к}} x \sin \delta_{\psi} + z_0 \sin \delta_z, \end{aligned} \quad (3.62)$$

нетрудно получить

$$S^{(0)} = A \cos \sigma_0 t - B \sin \sigma_0 t. \quad (3.63)$$

Формула (3.63) преобразуется в одночлен

$$S^{(0)} = S_0^{(0)} \cos(\sigma_0 t + \gamma) \quad (3.64)$$

после подстановки

$$A = S_0^{(0)} \cos \gamma; \quad B = S_0^{(0)} \sin \gamma. \quad (3.65)$$

Из формулы (3.65) вытекает, что

$$S_0^{(0)} = \sqrt{A^2 + B^2}; \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{B}{A}. \quad (3.66)$$

После подстановки в равенства (3.65) вместо A и B их значений по формулам (3.62) нетрудно получить

$$S_0^{(0)} = \sqrt{\psi_{\text{к}}^2 x^2 + z_0^2 + 2\psi_{\text{к}} z_0 \cos(\delta_{\psi} - \delta_z)}; \quad (3.67)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\psi_{\text{к}} x \sin \delta_{\psi} + z_0 \sin \delta_z}{\psi_{\text{к}} x \cos \delta_{\psi} + z_0 \cos \delta_z}. \quad (3.68)$$

Уравнение волнового профиля (см. § 4 главы второй) выражается равенством

$$r = r_0 \cos\left(\sigma_0 t \pm 2\pi \frac{x}{\lambda}\right), \quad (3.69)$$

в котором знак плюс относится к встречному волнению.

Из формулы (3.69) следует, что при переходе к новым фазовым углам, измеренным не по колебаниям воды у центра тяжести судна,

а по колебаниям в точке, расположенной от него на расстоянии x , фазовый угол суммарных вертикальных колебаний в формуле (3.64) окажется равным

$$\delta_0 = \gamma \pm 2\pi \frac{x}{\lambda}. \quad (3.70)$$

Для построения кривых заливаемости (рис. 32)

$$\zeta_{\text{з}} = T + r - S^{(0)},$$

характеризующих полное погружение в воду произвольных поперечных сечений судна в рассматриваемые моменты времени, можно пользоваться формулами (3.64) и (3.69), которые имеют

$$\zeta_{\text{з}} = T + r_0 \cos\left(\sigma_0 t \pm 2\pi \frac{x}{\lambda}\right) - S_0^{(0)} \cos\left(\sigma_0 t \pm 2\pi \frac{x}{\lambda} + \gamma\right). \quad (3.71)$$

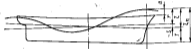


Рис. 32. Схема к расчету продольной килевой.

Часто можно ограничиться рассмотрением колебаний (абсолютных или относительных) носового перпендикуляра. В подобных случаях, если для упрощения допустить, что центр тяжести судна расположен на миделе и, следовательно, $x = L/2$, то расчетные формулы (3.64), (3.67), (3.68) и (3.71) принимают вид

$$\begin{aligned} S &= S_0 \cos(\sigma_0 t + \delta_0); \\ S_0 &= \sqrt{\frac{L^2}{4} \psi_{\text{к}}^2 + z_0^2 + L\psi_{\text{к}} z_0 \cos(\delta_{\psi} - \delta_z)}; \\ \delta_0 &= \gamma + \pi \frac{L}{\lambda}; \\ \operatorname{tg} \gamma &= \frac{\frac{1}{2} L\psi_{\text{к}} \sin \delta_{\psi} + z_0 \sin \delta_z}{\frac{1}{2} L\psi_{\text{к}} \cos \delta_{\psi} + z_0 \cos \delta_z}; \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$\zeta_{\text{з}}^{(0)} = T + r_0 \cos\left(\sigma_0 t \pm \pi \frac{L}{\lambda}\right) - S_0 \cos\left(\sigma_0 t \pm \pi \frac{L}{\lambda} + \gamma\right). \quad (3.73)$$

Формулы (3.72) и (3.73) показывают, что фазовые углы килевой и вертикальной качки могут в большей степени скланиваться на заливаемости судна, чем амплитуды качки.

Остановимся теперь на вопросе о линейных ускорениях, возникающих при продольной качке.

Из формулы (3.60) следует, что амплитуды скоростей и ускорений килевой качки на регулярном волнении, когда период вынужденных колебаний равен кажущемуся периоду волны, выражаются равенствами

$$\dot{\psi}_0 = \sigma \psi_0; \quad \ddot{\psi}_0 = \sigma^2 \psi_0; \quad \dot{\psi}_* = \dot{\psi} \frac{L}{2} = \frac{4\pi^2}{T^2} \frac{L}{2} \psi_0 \quad (3.74)$$

где $\dot{\psi}_*$ — линейные ускорения на носовом и кормовом перпендикулярах.

Сопоставив последнее равенство с аналогичной формулой для бортовой качки, найдем для условий резонанса, когда $\tau_n = \tau_{\phi}$ и $\psi_n = \psi_{\phi}$,

$$\frac{\tau_n}{2} = \frac{L}{2V} \frac{V_n^2}{V^2} \frac{\psi_{\phi}}{\psi_n} \quad (3.75)$$

Приблизительно $\tau_n = 2\tau_{\phi}$, и, хотя максимальные амплитуды бортовой качки превосходят в несколько раз амплитуды килевой качки, линейные ускорения $\dot{\psi}_*$ в оконечностях значительно превосходят ускорения σ на бортах.

Ускорения, соответствующие вертикальной качке и суммарным перемещениям S , могут быть найдены по формулам, аналогичным приведенным выше. Дифференцируя же формулу (3.73), приходим к уравнению

$$\dot{S}_0 = -r_0 \sigma_n \sin\left(\sigma_n t + \pi \frac{L}{\lambda}\right) + S_0 \sigma_n \sin\left(\sigma_n t + \pi \frac{L}{\lambda} + \gamma\right), \quad (3.76)$$

которое позволяет определить линейную скорость перемещения носовой оконечности судна по отношению к волне. От этой скорости зависят импульсные силы, возникающие при ударах судна о воду.

§ 8. ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ КАЧКИ

В §§ 6 и 7 приведены формулы, позволяющие подсчитать вертикальные ускорения при бортовой и продольной качке, если известны амплитуды и периоды качки. Ускорения в оконечностях судна должны определяться с учетом взаимодействия вертикальной и килевой качки, а в районе мидель-шпангоута — с учетом взаимодействия вертикальной и бортовой качки.

Судя по практическим данным, приведенным в работе В. Мёккеля (W. Möckel) [1960], на судах типа траулеров максимальные вертикальные ускорения (перегрузки) в оконечностях на встречном волнении достигают значений $\dot{a}/g = 0,75-0,80$ при ветре силой 7—8 баллов. В районе миделя при силе ветра 8—9 бал-

лов и курсовом угле $\alpha = 90^\circ$ были отмечены перегрузки $\dot{a}/g = 0,33$. В качестве максимальной цифры для малых промысловых судов Мёккель называет перегрузку в оконечностях, равную $\dot{a}/g = 1,0$.

По-видимому для транспортных судов перегрузки в оконечностях большей частью не превосходят $\dot{a}/g = 0,5$, а в средней части судна $\dot{a}/g = 0,3$. На пассажирских, а также на судах некоторых других типов устанавливают усилители бортовой качки. Устройства же для уменьшения продольной качки не выжили еще из стадии первоначальных исследований.

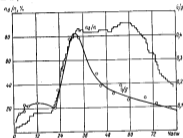


Рис. 38. Число пассажиров, заблудших морской болезнью, в зависимости от вертикальных ускорений и продолжительности пребывания в море.

Опубликованные данные о влиянии ускорений, возникающих при качке, на человеческий организм, основываются большей частью на изучении самочувствия пассажиров на крупных пассажирских судах. Общий вывод, к которому приводит подобное исследование, сводится к тому, что вертикальные ускорения становятся более или менее заметными в интервале перегрузок $\dot{a}/g = -0,005-0,010$. При $\dot{a}/g = 0,05$ и $\dot{a}/g = 0,10$ ускорения воспринимаются пассажирами как неприятные и очень неприятные, а при $\dot{a}/g > 0,2$ — как невыносимые.

Ускорения оказывают тем большее влияние, чем больше период колебаний. Поэтому при одинаковых ускоренных бортовой качке склоняется сильнее на самочувствии пассажиров, чем продольная качка.

На рис. 33 приведена диаграмма, заимствованная из книги Г. Воссера (G. Vossers) [1962], на которой для одного из рейсов пассажирского судна приведены в функции времени наряду с кривой вертикальных ускорений кривая, выражающая в процентах число пассажиров, заболевших морской болезнью. В течение первых 20 час. с начала рейса линейные ускорения не превосходили $\dot{a}/g = 0,1$, а число больных пассажиров достигало в среднем 20%. При ухудшении погоды и увеличении ускорений до $\dot{a}/g = 0,4$ число больных возросло до 80%. Оно оставалось на уровне 80—90% в течение 24 час., несмотря на то, что ускорения постепенно снижались до $\dot{a}/g = 0,15$.

Лица, принадлежащие к судовому составу, с течением времени привыкают в большей или меньшей степени к качке, однако в открытых морях часто испытывают недомогание в виде головных болей, тошноты, усталости, когда качка сопровождается значительными ускорениями.

Некоторые данные по этому вопросу приведены в упомянутой книге Г. Воссера.

КАЧКА СУДНА НА ПЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

§ 1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

А. Н. Крылов [1951] рассмотрел механизм качки на нерегулярном волнении в предположении, что в этих условиях собственные колебания судна не затухают. Исследование А. Н. Крылова основывается на численных расчетах бортовой качки. В основу расчетов легли выбранные произвольно значения периодов тринадцати последовательных волн, амплитуда которых сохранялась постоянной. Для каждой новой волны начальные условия, а именно углы наклона судна и угловой скорости вращения, принимались равными полученным для конца прохождения предыдущей волны. Расчеты показали, что даже незначительная нерегулярность волнения оказывает существенное влияние на характер качки. Этот вывод имел большое практическое значение, несмотря на то, что постановка задачи не отражала с достаточной точностью характер волнения и сущность проблемы.

В принципе можно найти общий интеграл уравнения качки на нерегулярном волнении, если возмущающий момент представлен в виде суммы членов той же структуры, что и возмущающий момент в уравнении линейной качки на регулярном волнении. Учитывая это обстоятельство, Г. Е. Павленко [1931] при исследовании нерегулярной качки применил разложение волнового профиля в ряд Фурье. Общего значения такой способ решения задачи не имеет.

Ю. А. Крутков [1934], реализуя предложение А. Н. Крылова, применил для решения аналогичной задачи теорию вероятностей.

В конце 40-х и начале 50-х годов успехи, достигнутые в области изучения спектральной структуры ветрового волнения, рассматриваемого как стационарный случайный процесс, явились толчком для дальнейшего развития теории качки на нерегулярном волнении. В работе [1963] А. П. Воробьев использовал эту теорию для расчета статистических характеристик качки.

В законченном виде статистическая теория качки на нерегулярном волнении изложена в работах М. Сен-Дени — В. И. Пирсона (M. St. Denis and W. J. Pierson) [1953] и А. И. Воиновского — Г. А. Фирсова [1966]. Последнюю дополняет работа Н. Н. Рак-

машина [1958], установившего, как отмечалось, значения постоянных в аналитическом выражении частотного спектра волнения, принятых А. И. Вознесенским и Г. А. Фирсовым. В работе [1957] А. Н. Тупышев использовал при рассмотрении качки судна на нерегулярном волнении метод исследования флюктуаций, применяющийся в радиотехнике.

В настоящее время статистическая теория качки широко используется в практических расчетах. Она применяется также в исследованиях заливчивости, slamming, остойчивости и прочности судов.

Более подробные сведения по истории вопроса можно найти в работе Г. А. Фирсова [1957].

§ 2. РАСЧЕТЫ БОРТОВОЙ, КИЛЕВОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАЧКИ

Частотные спектры вертикальной качки. Как отмечалось, ветровое волнение отображает либо энергетическим спектром

$$S_w(\sigma) = \frac{r_w^2(\sigma)}{\Delta\sigma}, \quad (4.01)$$

либо функцией спектральной плотности дисперсии волновых ординат

$$S_r(\sigma) = \frac{D(\sigma)}{\Delta\sigma}, \quad (4.02)$$

где $r_w(\sigma)$ — амплитуда элементарных волн; D — дисперсия волновых ординат; $\Delta\sigma$ — интервал частот волнения.

Рассмотрим вначале вопрос о построении частотной кривой амплитуд вертикальной качки в предположении, что волнение отображено функцией (4.01). При этом будем исходить из очевидного тождества

$$\frac{r_w^2(\sigma_1)}{\Delta\sigma} = \frac{r_w^2(\sigma_1)}{\Delta\sigma} \frac{r_k^2(\sigma_1)}{r_w^2(\sigma_1)}, \quad (4.03)$$

где $r_k(\sigma_1)$ — амплитуда единичного колебания с частотой σ_1 . После суммирования килевых формул (4.03) приводит к зависимости

$$S_{kw}(\sigma) = S_w(\sigma) \Phi_k^2(\sigma). \quad (4.04)$$

В формулу (4.04) функция

$$S_k(\sigma) = \frac{r_k^2(\sigma)}{\Delta\sigma} \quad (4.05)$$

представляет собой искомый спектр вертикальных колебаний при линейном процессе. Функция же

$$\Phi_k(\sigma) = \frac{r_k(\sigma)}{r_w(\sigma)} \quad (4.06)$$

выражает закон изменения коэффициента динамичности. Ее называют передаточной функцией.

Если волнение отображено функцией (4.02), то кривую спектральной плотности мгновенных ординат $z(\sigma)$ вертикальной качки

$$S_z(\sigma) = \frac{D_z(\sigma)}{\Delta\sigma} \quad (4.07)$$

по аналогии с формулой (4.04) можно выразить равенством

$$S_z(\sigma) = S_w(\sigma) \Phi_z^2(\sigma), \quad (4.08)$$

поскольку, как указано в главе второй, $S_{zz}(\sigma) = 2S_z(\sigma)$ и, следовательно, $S_{zz}(\sigma) = 2S_z(\sigma)$.

В дальнейшем изложении мы будем исходить из предположения, что волнение задано функцией $S_w(\sigma)$.

Формулы (4.04) и (4.08), являющиеся основными в расчетах качки, можно вывести также из общей теории корреляции стационарных случайных процессов, согласно которой

$$S_{z_{in}}(\sigma) = \Phi^2 S_{w_{in}}(\sigma),$$

где $S_{w_{in}}$ и $S_{z_{in}}$ — спектральные плотности входного и выходного процессов; Φ — передаточная функция.

В настоящем случае под входным и выходным процессом следует понимать соответственно волнение и качку судна. Передаточная же функция представляет собой коэффициент динамичности качки на регулярном волнении.

Частотные спектры бортовой и килевой качки. По аналогии с формулой (4.03) для единичного колебания бортовой качки можно написать

$$\frac{r_b^2(\sigma_1)}{\Delta\sigma} = \frac{r_b^2(\sigma_1)}{\Delta\sigma} \frac{r_b^2(\sigma_1)}{r_b^2(\sigma_1)}$$

Учитывая, что на основании формулы (2.13)

$$r_b^2(\sigma_1) = \frac{r^2}{\sigma_1^2} \varphi_b(\sigma_1),$$

где $\varphi_b(\sigma_1)$ — угол волнового склона при частоте волны σ_1 , находим

$$\frac{r_b^2(\sigma_1)}{\Delta\sigma} = \frac{r^2(\sigma_1)}{\Delta\sigma} \frac{r_b^2(\sigma_1)}{r_b^2(\sigma_1)} \frac{\sigma_1^2}{r^2}. \quad (4.09)$$

В последней формуле отношение $\theta_1(\sigma_1)/\Psi_1(\sigma_1)$ представляет собой коэффициент динамичности, соответствующей частоте σ_1 . Аналогичное выражение можно записать для продольно-угловых колебаний. В конечном счете, суммируя колебания, получаем для бортовой качки судна, расположенного лагом к набегающему волнам, и килевой качки судна без хода на продольном волнении (при линейных процессах)

$$S_b(\sigma) \sim S_c(\sigma) \frac{\Psi_b^2(\sigma)}{\Psi_c^2(\sigma)} \frac{\sigma^2}{\sigma^2} = S_c(\sigma) \Phi_b^2(\sigma); \quad (4.10)$$

$$S_\Phi(\sigma) = S_c(\sigma) \frac{\Psi_b^2(\sigma)}{\Psi_c^2(\sigma)} \frac{\sigma^2}{\sigma^2} = S_c(\sigma) \Phi_b^2(\sigma), \quad (4.11)$$

где $S_b(\sigma)$ и $S_\Phi(\sigma)$ — функции распределения дисперсия мгновенных углов качки; $\Phi_b(\sigma)$ и $\Phi_\Phi(\sigma)$ — передаточные функции бортовой и килевой качки, которые выражаются через коэффициенты динамичности качки формулами

$$\Phi_b(\sigma) = \frac{\Psi_b(\sigma)}{\Psi_c(\sigma)} \frac{\sigma^2}{\sigma^2};$$

$$\Phi_\Phi(\sigma) = \frac{\Psi_b(\sigma)}{\Psi_c(\sigma)} \frac{\sigma^2}{\sigma^2}.$$

Формулы размерности.³ Обозначим единицы измерения для промежутков времени и углов буквами L , T , α . В этих обозначениях, как отмечалось в § 10 главы второй, размерность частотных спектров волнения выражается формулой

$$|S_r(\sigma)| = |S_\sigma(\sigma)| = L^2 T.$$

Аналогично можно выразить размерность частотных спектров качки равенствами

$$|S_z(\sigma)| = L^2 T;$$

$$|S_\Phi(\sigma)| = |S_\Psi(\sigma)| = \alpha^2 T,$$

а для передаточных функций написать

$$|\Phi_b(\sigma)| = 1;$$

$$|\Phi_\Phi(\sigma)| = |\Phi_\Psi(\sigma)| = \alpha L^{-1}.$$

Углы волнового склона и угловые амплитуды выражаются в радианах.

Определение передаточных функций. Формулы (4.08), (4.10), (4.11) являются расчетными. Функции $S_c(\sigma)$, отображающие

³ См. часть I, гл. II [1964].

в этих формулах волнение, предполагаются известными. При определении же коэффициентов динамичности обычно исходят из предположения, что сопряженные качке пропорционально угловым скоростям при вращательном движении и линейной скорости при вертикальных колебаниях. В этом случае передаточные функции выражаются формулами

$$\left. \begin{aligned} \Phi_b(\sigma) &= \frac{\kappa_b}{\sqrt{\left(1 - \frac{\sigma^2}{\omega_z^2}\right)^2 + 4\mu_z^2 \frac{\sigma^2}{\omega_z^2}}}; \\ \Phi_\Phi(\sigma) &= \frac{\kappa_\Phi \sigma^2}{\sigma \sqrt{\left(1 - \frac{\sigma^2}{\omega_z^2}\right)^2 + 4\mu_z^2 \frac{\sigma^2}{\omega_z^2}}}; \\ \Phi_\Psi(\sigma) &= \frac{\kappa_\Psi \sigma^2}{\sigma \sqrt{\left(1 - \frac{\sigma^2}{\omega_\Phi^2}\right)^2 + 4\mu_\Phi^2 \frac{\sigma^2}{\omega_\Phi^2}}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

В формулах (4.12) приняты следующие обозначения:

κ_z ; κ_Φ ; κ_Ψ — редукционные коэффициенты;

μ_z ; μ_Φ ; μ_Ψ — безразмерные коэффициенты затухания качки;

ω_z ; ω_Φ ; ω_Ψ — частоты собственных колебаний судна.

Из вышесказанного следует, что ординаты частотных спектров качки можно определить как произведения ординат частотного спектра волнения и передаточной функции. Рассчитывая ординаты последней, необходимо задаться рядом значений частоты σ и определить соответствующие им длины волн $\lambda = 2\pi g/\sigma^2$. Затем по графикам, имеющимся в курсах качки, для каждой частоты находят редукционные коэффициенты

$$\kappa_i = f\left(\frac{\lambda}{B}, \frac{\lambda}{T}, \alpha, \chi\right)$$

и по одной из формул (4.12) подсчитываются ординаты соответствующей передаточной функции. Для этой же цели можно воспользоваться также формулами, выведенными в предположении, что сопряженные качке пропорционально относительным скоростям колебательного движения.

Определение статистических характеристик качки. В дальнейшем изложении мы ограничимся рассмотрением бортовой качки. Расчетные формулы для килевой и вертикальной качки аналогичны формулам для бортовой качки.

После определения ординат частотной кривой $S_b(\sigma)$ подсчитывают путем планиметрирования или численного интегрирования дисперсию процесса

$$D_b = \int_0^{\infty} S_b(\sigma) d\sigma.$$

Амплитуды качки любой статистической категории определяются по формуле

$$(\theta_{\text{кв}})_{\sigma} = c \sqrt{D_{\theta}}$$

аналогичной формулам, которыми пользуются при определении статистических амплитуд внешних волн. Численные значения коэффициентов c принимаются по данным, приведенным в § 6 главы первой.

Для определения средней частоты вынужденных колебаний бортовой качки

$$(\omega_k)_{\sigma} = \sqrt{\frac{D_{\omega}}{D_{\theta}}} \quad (4.13)$$

необходимо дополнительно подсчитать ординаты спектральной кривой угловых ускорений

$$S_{\dot{\theta}}(\sigma) = \sigma^4 S_{\theta}(\sigma)$$

и соответствующую ей дисперсию

$$D_{\dot{\theta}} = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} S_{\dot{\theta}}(\sigma) d\sigma.$$

Формула (4.13) выражает частоту колебаний, измеренную по нулевым точкам кривой $\theta_{\text{кв}} = f(t)$.

В отличие от ветрового волнения качку судна можно рассматривать в большинстве случаев как процесс со сравнительно узким спектром ($\kappa = 0,2-0,5$). Объясняется это тем, что судно реагирует в основном лишь на действие элементарных волн, способных вызвать значительную качку. Поэтому при определении статистических характеристик качки обычно не учитывают значения ширины спектра. По-видимому, это приводит к некоторому завышению амплитуд качки — приблизительно на 5—10%.

Учет скорости хода и курсового угла. Приведенные выше данные позволяют рассчитать бортовую качку судна, расположенного лозгом к набегающим волнам, и продольную качку неподвижного судна на встречном или попутном волнении. При построении кривых спектральной плотности продольной качки влиять скорости хода можно учесть путем замены в знаменателях первой и третьей формул (4.12) частоты волны σ на кажущуюся частоту $\sigma_{\text{к}}$. В числителе третьей формулы нужно оставить истинную частоту, поскольку она сохраняется в результате перехода от ординат качки к углам качки.

При расчете бортовой качки судна, движущегося на косом курсовом угле α , наряду с такой заменой следует умножить коэффициент динамичности на синус курсового угла. После этого спектр

бортовой качки судна на косых курсовых углах будет

$$S_{\theta}^{\alpha}(\sigma) = \frac{\sigma^4 \theta_{\text{кв}}^2 \sin^2 \alpha S_{\theta}(\sigma)}{\sigma^2 \left[\left(1 - \frac{\sigma_{\text{к}}^2}{\sigma^2}\right)^2 + 4\theta_{\text{кв}}^2 \frac{\sigma_{\text{к}}^2}{\sigma^2} \right]} \quad (4.14)$$

Эти спектры представляют собой частные случаи условного «псевдоспектра» А. И. Вознесенского [1958]. Другой, более громоздкий способ учета скорости хода в расчетах продольной качки на продольном волнении сводится к перестроению частотного спектра волнения путем перехода к новым частотам.

Приближенные способы расчета качки. В работах А. И. Вознесенского — Г. А. Фирсова (Wosnienskiy A. I. and Firsov G. A.) [1957], В. В. Лугозского [1964], Н. В. Семьяникова [1963] развиты приближенные способы расчета бортовой качки судна на нерегулярном волнении.

§ 3. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

В табл. 15 в качестве примера определены ординаты частотных кривых $S_{\theta}(\sigma)$ и $S_{\dot{\theta}}(\sigma)$. В основу расчета принята кривая коэффициентов динамичности $\theta_{\text{кв}}/\varphi_{\text{к}}$, представленная на рис. 34. Эта

Таблица 15

Расчет ординат частотных кривых $S_{\theta}(\sigma)$ и $S_{\dot{\theta}}(\sigma)$

σ	$\frac{\theta_{\text{кв}}}{\varphi_{\text{к}}}$	$\theta_{\text{кв}}$	$\theta_{\text{кв}}^2$	2σ	$4\sigma^2$	σ^4	$16S_{\dot{\theta}}$
0,4	1,36	0,93	0,027	0	0	0,16	0
0,5	1,76	0,90	0,081	0,368	0,020	0,25	0,008
0,6	2,59	0,86	0,202	0,968	0,022	0,36	0,012
0,7	4,00	0,81	1,529	1,314	1,740	0,49	0,262
0,8	2,46	0,77	0,890	1,224	1,180	0,64	0,735
0,9	1,28	0,73	0,300	1,128	0,526	0,81	0,272
1,0	0,80	0,78	0,120	0,996	0,128	1,00	0,125
1,1	0,52	0,68	0,090	0,672	0,054	1,21	0,085
1,2	0,36	0,62	0,041	0,500	0,021	1,44	0,030
1,3	0,27	0,58	0,025	0,374	0,009	1,79	0,016
1,4	0,20	0,44	0,015	0,270	0,004	1,96	0,008
1,5	0,15	0,38	0,012	0,190	0,002	2,25	0,004
Σ	—	—	—	—	3,833	—	2,167
$\Delta \sigma \Sigma$	—	—	—	—	0,383	—	0,216

кривая, зависящая от курса качки С. Н. Благовещенского [1954], рассчитана в предположении, что сопротивление качки пропорционально относительной угловой скорости колебания судна. Она относится к судну со следующими элементами: $LBT = 49,1 \times 9,0 \times 3,68 \text{ м}^2$; $D = 936 \text{ м}$; $\tau_0 = 8,63 \text{ сек.}$; $\omega_0 = 2\pi/\tau_0 \text{ сек.}^{-1} = 0,727 \text{ сек.}^{-1}$.

Расчет выполнен применительно к модифицированному спектру волнения Г. Неймана в предположении, что высота волн с трехпроцентной обеспеченностью равна $H_{97} = 3,5 \text{ м}$.

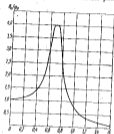


Рис. 34. Кривая коэффициента демпфирования бортовой качки.

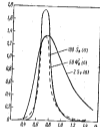


Рис. 35. Квадраты передаточной функции. Частотные спектры волнения и бортовой качки.

В табл. 15 приведены также умноженные в 100 раз значения дисперсий мгновенных углов и угловых скоростей качки

$$100 D_1 = 100 \sum S_1(\sigma) \Delta\sigma;$$

$$100 D_2 = 100 \sum S_2(\sigma) \Delta\sigma,$$

где $\Delta\sigma = 0,1$ — интервал частот, по которому ведется интегрирование.

Кривые $2S_1(\sigma)$; $50\Phi_1^2(\sigma)$ и $100S_2(\sigma)$ представлены на рис. 35.

Дисперсии углов качки и угловых скоростей, как это следует из таблицы, равны соответственно

$$D_1 = \frac{0,383}{100} \text{ радиан}^2 = 12,6 \text{ градуса}^2;$$

$$D_2 = \frac{0,316}{100} \text{ радиан}^2 \cdot \text{сек}^{-2} = 7,1 \text{ градуса}^2 \cdot \text{сек}^{-2}.$$

Амплитуды качки средней и с обеспеченностью в 3 и 0,5% равны

$$a_3^{(1)} = 1,25 \sqrt{D_1} = 4,4';$$

$$a_{0,5}^{(1)} = 2,64 \sqrt{D_1} = 9,4';$$

$$a_{0,5}^{(2)} = 3,25 \sqrt{D_2} = 11,5'.$$

Средняя частота и средний период качки выразятся следующими цифрами:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D_0}{D}} = 0,693;$$

$$\tau_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 9,0 \text{ сек.}$$

§ 4. НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КАЧКИ

Расчеты ходкости судна. Прращения сопротивления ΔR , упора ΔP и мощности ΔW при движении судна с постоянной скоростью хода на регулярном волнении приблизительно пропорциональны квадрату амплитуды волн. Поэтому в исследованиях ходкости судна приращение этих показателей, вызванное волнением, выражают отношениями $\Delta R/r_0^2$, $\Delta P/r_0^2$ и $\Delta W/r_0^2$. Значения этих соотношений в зависимости от различных факторов можно найти в главе пятой.

Если есть кривая, характеризующая изменение одной из следующих величин: $R + \Delta R$; $P + \Delta P$; $W + \Delta W$ — в функции скорости судна или числа Фруда, легко определить скорость хода, соответствующую данной мощности механизма.

Переходя к рассмотрению аналогичной задачи в условиях нерегулярного волнения, допустим для определенности, что требуется найти статистические значения приращения мощности $(\Delta W)_{97}$. Для этого необходимо построить частотный псевдоспектр приращения мощности

$$S_W(\sigma) = S_r(\sigma) \Phi_W^2(\sigma),$$

в котором передаточная функция выражается отношением

$$\Phi_W(\sigma) = \frac{V \Delta W}{r_0}(\sigma).$$

После этого приращения $(\Delta W)_{97}$ данной статистической категории определяется в зависимости от дисперсии

$$D_W(\sigma) = \int S_W(\sigma) d\sigma,$$

так, как это было указано в предыдущих параграфах.

В подобных расчетах целесообразно основываться на значениях превращения сопротивления, упора или мощности, полученных экспериментально путем испытания моделей на регулярном волнении. Такие материалы приведены в главе пятой.

Примеры расчета буксировочной мощности судна на нерегулярном волнении, основанные на результатах испытаний моделей в условиях регулярного волнения, можно найти в работах В. А. Саана (W. A. Saana) [1961] и Н. И. Герасима, И. И. Ван-ден-Боша и В. Бейельмана (N. J. Gerritsma, I. van den Bosch, W. Beukelman) [1961].

Используя метод, рассмотренный в § 5 этой главы, можно определить долгосрочное распределение мощности силовой установки судна, соответствующее постоянной скорости хода, или скорости хода при заданном режиме работы механизмов.

Расчеты дальности в качестве показателя дальности принимают величину

$$\Delta l = l_n - (l_{\text{акт}})_n$$

где l_n — высота надводного борта в характерном поперечном сечении (у носового переборщика или несколько в корму от него); $(l_{\text{акт}})_n$ — статистическое значение относительных амплитуд суммарных вертикальных перемещений рассматриваемого поперечного сечения.

Амплитуды измеряются относительно поверхности набегающих волн так, как это показано на рис. 32 и 55. Предполагается, что судно принимает воду на палубу, если $\Delta l < 0$.

Подсчитав значения амплитуд $(l_{\text{акт}})_n$, различной обеспеченности, нетрудно определить обеспеченность той амплитуды, при которой $\Delta l = 0$. Численно она равна частоте заливания палубы набегающей волной.

Для определения амплитуд $(l_{\text{акт}})_n$ необходимо построить псевдоспектры относительных вертикальных перемещений носовой оконечности

$$S_{\xi}^2(\sigma) = S_{\xi}(\sigma) \Phi_{\xi}^2(\sigma),$$

где $\Phi_{\xi}(\sigma)$ — передаточная функция. Ординаты последней представляют собой коэффициенты динамичности

$$\frac{\xi}{\xi_n} = f(\sigma_n),$$

соответствующие регулярному волнению и исправленные с помощью редуцированных коэффициентов.

Амплитуды $(l_{\text{акт}})_n$ определяются в зависимости от дисперсии

$$D_{\xi} = \int_{\sigma} S_{\xi}^2(\sigma) d\sigma$$

по формулам, приведенным ранее.

Значения отношения ξ_n/λ_n для регулярного волнения можно определить расчетом так, как это указано в § 7 главы третьей. Целесообразнее, однако, если есть подходящие материалы, основываться на экспериментальных данных. Такие данные можно частично найти в главе пятой. Там же приведены кривые, характеризующие зависимость судна на нерегулярном волнении, построенные на основе экспериментальных данных, полученных в условиях регулярного волнения.

Методом, описанным в § 5 этой главы, можно построить кривые долгосрочного распределения заливаемости судна.

§ 5. ДОЛГОСРОЧНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧКИ

Как отмечалось (см. § 9 главы второй), функция долгосрочного распределения показателей волнения (на протяжении года или нескольких лет) отличается большой стабильностью и под-

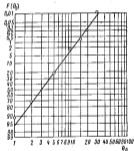


Рис. 36. График функции долгосрочного распределения размахов бортовой качки судна «Омамак».

чиняются нормально-логарифмическому закону. То же самое можно сказать и о долгосрочном распределении показателей качки. В качестве примера на рис. 36 и 37 приведены графики функций долгосрочного распределения размахов бортовой и килевой качки судна береговой охраны США «Омамак». Рисунки зани-

ствования из работы Н. Х. Джаспера и Р. Л. Брука (N. H. Jasper and R. L. Brooks) (1959).

Функции долгосрочного распределения показателей качки можно представить в виде суммы функций краткосрочного распределения. Последние определяются путем расчета качки судна исходя из возможных сочетаний внешних условий. Можно воспользоваться для этой цели также данными испытаний моделей на регуляторах волнания.

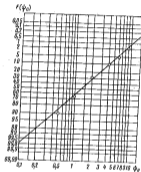


Рис. 27. График функции долгосрочного распределения размахов килевой качки судна «Юлиана».

При суммировании функций краткосрочного распределения каждая из них берется с весом, равным частоте появления соответствующих ему сочетаний внешних условий. Такими внешними условиями, определяющими качку, являются частотный спектр волнения, зависящий от высоты волн данной статистической категории (например от $h_{3\%}$), скорость судна v , курсовой угол θ судна по отношению к волнению.

Условием учитывать снижение скорости судна, вызванное ветром и волнением, непосредственно в расчетах качки. Это позволяет рассматривать вероятную скорость судна как скорость на такой воде, соответствующую данным условиям нагрузки, с учетом лишь коррозии и обростания наружной обшивки. Вероят-

ность скорости хода, заданной так, можно установить исходя из предпологаемых условий эксплуатации судна.

В тех случаях, когда есть данные, позволяющие судить о том, как распределяется направление перемещения воды по пути следования судна, вероятность данного курсового угла ρ_k определяется расчетом. Если необходимые данные для такого расчета отсутствуют, можно исходить из предположения, что при умеренном волнении все курсовые углы по отношению к волне равновероятны. При очень сильном волнении положение судна латом к волне маловероятно.

Обозначим символом $\rho_k^{(k)}$, где $k = 1; 2; 3 \dots$ — вероятность появления воды данной статистической категории той или иной высоты. Для бассейнов, в которых предполагается эксплуатировать судно, эту вероятность можно установить на основе статистических данных.

Пусть, кроме того, $\rho_i^{(j)}$ — вероятность данной скорости хода при i -ой высоте волн, а $\rho_k^{(j)}$ — вероятность данного курсового угла при рассматриваемых высоте волн и скорости хода, причем $j = 1; 2; 3 \dots; i = 1; 2; 3 \dots; k = 1; 2; 3 \dots$

При принятых предположениях рассматриваемые события не зависят друг от друга. Поэтому вероятность одновременного наступления этих событий (см. § 1 главы первой) найдется как произведение вероятностей

$$\rho_{kl} = \rho_k^{(k)} \rho_l^{(l)} \rho_k^{(j)}$$

Допустим в качестве примера, что требуется рассмотреть возможные сочетания внешних условий при одной высоте волн, двух скоростях хода и двух курсовых углах. В этом случае подлежащие рассмотрению комбинация ρ_{kl} будут

$$\rho_{kl}^{(1)} \rho_{kl}^{(2)}; \rho_{kl}^{(1)} \rho_{kl}^{(2)}; \rho_{kl}^{(1)} \rho_{kl}^{(2)}; \rho_{kl}^{(1)} \rho_{kl}^{(2)}$$

Введем обозначения:

x — рассматриваемый показатель качки (например амплитуды качки, приращение мощности на извлеченном море и пр.);

N — число рассматриваемых сочетаний внешних условий;

ρ_{kl} — число размахов качки, отнесенное к единице времени (например к одному часу), при рассматриваемом сочетании условий;

λ — общее число размахов качки за протяжении того же промежутка времени;

D_{kl} — дисперсия краткосрочного распределения углов качки. Тогда функция долгосрочного распределения величин x итерантся формулой

$$F_x = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \rho_{kl} \rho_{kl} \exp\left(-\frac{x^2}{2D_{kl}}\right), \quad (4.15)$$

в которой общее число размахов определяется равенством

$$n = \sum_{i=1}^M \rho_{wi} \rho_{wi}$$

Расчетная схема для определения произведений $\rho_{wi} \rho_{wi}$ приведена в табл. 16 для одной статистической высоты волны, двух скоростей хода и курсовых углов, изменяющихся через 45° . Дале

Таблица 16

Схема определения вероятности одновременного наступления событий, определяющих качку судна

Статистическая характеристика высоты волны $H_{0.1}$ Вероятность ее появления ρ_0										
Скорость v_1 Вероятность $\rho_0^{(1)}$	α_1 $\rho_0^{(1)}$				α_2 $\rho_0^{(1)}$					
	0	45	90	135	180	0	45	90	135	180
Курсовой угол α Вероятность $\rho_0^{(2)}$	$\rho_0^{(1)}$	$\rho_0^{(2)}$	$\rho_0^{(3)}$			$\rho_0^{(4)}$	$\rho_0^{(5)}$			
$\rho_{w1} = \rho_0^{(1)} \rho_0^{(2)} \rho_0^{(3)}$ ρ_{w2} $\rho_{w1} \rho_{w2}$										

нейший ход решения задачи сводится к определению частотных спектров показавшей качки $S_{w1}(x)$ исходя из частотных спектров волнения $S_0^{(i)}(\sigma)$. После этого дисперсии показателей качки, соответствующие рассматриваемым сочетаниям внешних условий, находятся по формуле

$$D_{w1} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{w1}(x) dx.$$

Число колебаний n_{w1} определяется делением промежутка времени на средние периоды качки. Для бортовой качки, как это показано в § 14 главы пятой, эти периоды можно принимать равными периодам собственных поперечных колебаний.

При построении функции $F(x)$ удобно пользоваться логарифмической сеткой.

РЕГУЛЯРНОЕ ВОЛНЕНИЕ

§ 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Закономерности, определяющие продольную качку на встречном и попутном волнении, отличаются большей сложностью, чем закономерности, характеризующие бортовую качку судна, движущегося лавом к волне. Объясняется это прежде всего тем, что при продольной качке становится приемлемым допущение о малости размеров судна по сравнению с размерами волны, из которого можно исходить в первом приближении при рассмотрении бортовой качки. С другой стороны, продольная качка в большей степени зависит от скорости судна, чем чисто бортовая, поскольку на продольном волнении кажущийся период волны зависит не только от элемента последней, но и от скорости хода. Этим определяются некоторые особенности представления материалов о продольной качке, рассмотренные ниже.

Коэффициенты динамичности ψ_0/ψ_0 и τ_0/τ_0 килевой и вертикальной качки, являясь функциями отношений λ/L , τ_{01}/τ_{02} , μ/σ , зависят также от показателей, характеризующих форму судна и распределение веса по его длине. Из трех отмеченных отношений уместно выделить отношение μ/σ , которое можно заменить числом Фруда, поскольку в соответствии с формулой (3.35)

$$Fr = 0,4 \frac{v}{c} \sqrt{\frac{\lambda}{L}}.$$

С другой стороны, как показывает формула (3.36), число Фруда связано с относительной длиной волны и отношением τ_{01}/τ_{02} зависимостями

$$Fr = \frac{1}{\tau_{01}} \frac{\tau_{02}}{\tau_{02}} \frac{\lambda}{L} = 0,4 \sqrt{\frac{\lambda}{L}},$$

$$\tau_{01}^{(1)} = \tau_{02} \sqrt{\frac{\lambda}{L}}.$$

Поэтому при представлении практических данных, характеризующих продольную качку, можно не исключать в число пара-

метров, используемых для построения результирующих диаграмм, одну из следующих величин: M/L , $\tau_{\text{ф}}/\tau_{\text{с}}$, Fr . Чаще всего показателем качки выражают либо в функции отношения M/L и $\tau_{\text{ф}}/\tau_{\text{с}}$, либо в функции отношения M/L и числа Фруда.

Кривые коэффициентов динамичности строятся как в относительных, так и в абсолютных координатах.

§ 2. ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСА, ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ХОДА НА ПРОДОЛЬНОЮ КАЧКУ

Близость резонанса существенно сказывается на продольной качке в интервале отношений $\tau_{\text{ф}}/\tau_{\text{с}} = 0,8-1,2$. Вне этого интервала коэффициенты динамичности продольной качки относительно малы. Максимумы же коэффициентов динамичности обычно несколько отклоняются от отношения $\tau_{\text{ф}}/\tau_{\text{с}} = 1,0$. Объясняется это в основном тем, что скорость хода, от которой при $\lambda = \text{const}$ зависит кажущийся период волны, складывается одновременно и из коэффициента демпфирования (а следовательно и из амплитуды) продольной качки.

Относительная длина волны также оказывает значительное влияние на продольную качку. Формально это можно объяснить тем, что редуцированные коэффициенты $\chi_{\text{в}} = \chi_{\text{в}}^{(1)}$ и $\chi_{\text{д}} = \chi_{\text{д}}^{(1)}$, которыми пользуются в расчетах продольной качки для перехода от действительных элементов волны к расчетным, зависят от отношения M/L . От этого же отношения зависят и коэффициенты демпфирования $K_{\text{в}}$ и $K_{\text{д}}$.

Заметим, что редуцированные коэффициенты $\chi_{\text{в}}$ и $\chi_{\text{д}}$ возрастают с увеличением отношения M/L . Поэтому увеличение относительной длины волны создает тенденцию к возрастанию коэффициентов динамичности килевой и вертикальной качки. С другой стороны, как это следует из гидродинамической теории продольной качки, коэффициенты демпфирования $K_{\text{в}}$ и $K_{\text{д}}$ также возрастают с увеличением отношения M/L . Это сказывается на коэффициентах динамичности в противоположном направлении.

Вопрос осложняется тем, что при $M/L = \text{const}$ редуцированные коэффициенты и коэффициенты демпфирования качки зависят от коэффициентов полноты α , β , γ .

Экспериментальные данные показывают, что по мере увеличения отношения M/L коэффициенты динамичности $\psi_{\text{ф}}/\psi_{\text{с}}$ и $z_{\text{ф}}/z_{\text{с}}$ значительно возрастают. При $M/L > 1,2-1,5$ этот процесс либо значительно замедляется либо на кривых коэффициентов динамичности образуются максимумы. Объясняется это тем, что при больших значениях отношения M/L продольная качка теряет в известной мере свой демпфирующий характер и в предельных амплитудах $\psi_{\text{ф}}/\psi_{\text{с}}$ и $z_{\text{ф}}/z_{\text{с}}$ определяются условиями статического равновесия. При этом для поперечного сечения, проходящего через центр тяжести судна, вертикальные колебания совпадают по фазе с коле-

баниями воды, а угловые колебания сдвигаются по фазе на 90° .

Амплитуды $z_{\text{ф}}/z_{\text{с}}$ суммарных вертикальных колебаний формируются по отношению к поверхности волны обычно достигают максимума в интервале отношений $M/L = 1,0-1,3$. При значениях отношения M/L , превышающих 1,5-1,6, продольная качка на встречном регулярном волнении становится более для менее благоприятной в отношении заглаженности открытых палуб, slamming и потери скорости¹.

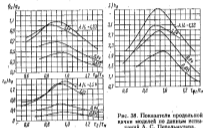


Рис. 38. Показатели продольной качки входной по данным испытаний А. С. Перельмутера.

Наглядное представление о влиянии рассмотренных факторов на показатели продольной качки дают рис. 38-43.

На рис. 38 приведены крайние коэффициенты динамичности $\psi_{\text{ф}}/\psi_{\text{с}}$; $z_{\text{ф}}/z_{\text{с}}$; $S_{\text{в}}/K_{\text{в}}$, заимствованные из работы А. С. Перельмутера (1946). Кривые построены в функции отношения $\tau_{\text{ф}}/\tau_{\text{с}}$ для четырех значений относительной длины волны по данным испытаний сглазированной плоской модели на регулярном волнении. Элементы модели $L = 2,34$ м; $B = 0,312$ м; $D = 37,8$ м; $S = 0,485$ м²; $\tau_{\text{с}} = 0,80$ сек.; $\tau_{\text{ф}} = 0,86$ сек.

В рассматриваемом частном случае амплитуды килевой качки и суммарных колебаний форштевя оказались максимальными при $M/L = 1,33$, в то время как при вертикальной качке наиболее неблагоприятным оказалось отношение $M/L = 1,54$. Отношения $\tau_{\text{ф}}/\tau_{\text{с}}$ соответствующие максимумам коэффициентов динамичности, несколько отличаются от единицы.

¹ Как отмечалось (см. § 4 главы третьей), при нерегулярном волнении эта неблагоприятная зависимость M/L расширяется.

Рис. 39 и 40 характеризуют килевую и вертикальную качку грузового судна «Лукуга» ($L/B = 136,0-18,7-8,9$; $D = 9000$ т) на встречном волнении в балластном пробеге ($D = 8770$ т). Расчеты выполнены из работы Г. Аэртсенга (G. Aertssen) [1963]. Первый из них содержит кривые ψ_0/φ_0 ; $z_0/r_0 = f(Fr)$ при λ/L в качестве параметра, построенные на основе результатов модельных испытаний на регулярном волнении, на втором — по данным натурных испытаний построены кривые $\psi_0/\varphi_0 = f(\lambda/L)$ и $z_0/r_0 = f(\lambda/L)$ при скоростях хода в качестве параметра ($D = 8770$ т).

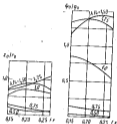


Рис. 39. Кривые ψ_0/φ_0 и z_0/r_0 по модельным испытаниям (судно «Лукуга»).

дольной качки в условиях резонанса. Второй из показателей Г. С. Чувицкого в зависимости от отношения ψ_0/φ_0 и L/λ можно выразить формулой

$$\psi_0 \frac{L}{\lambda} = \psi_0 \frac{\lambda}{r_0} \frac{L}{\lambda} = \alpha \frac{\psi_0}{\varphi_0} \frac{L}{\lambda},$$

и, следовательно,

$$\frac{\psi_0}{\varphi_0} = \frac{1}{\alpha} \frac{\lambda}{L} \left(\psi_0 \frac{L}{\lambda} \right). \quad (5.01)$$

На рис. 41 наряду с кривыми Г. С. Чувицкого приведена кривая коэффициента динамичности ψ_0/φ_0 , пересчитанная по формуле (5.01). Г. С. Чувицкий не оговаривает условий применимости предложенной им диаграммы. По-видимому, качественно она достаточно хорошо отражает общие закономерности (в условиях резонанса и переменной скорости хода), однако коэффициенты динамичности зависят в известной мере и от формы судна.

При испытании моделей коэффициенты динамичности достигали максимума в интервале отношений $\lambda/L = 1,25-1,50$ в зависимости от числа Фруда. В натурных же условиях экстремальные точки кривых ψ_0/φ_0 оказались в зависимости от скорости хода в интервале значений отношения $\lambda/L = 1,1-1,3$, а максимальные значения z_0/r_0 соответствовали отношениям $\lambda/L \approx 1,5$.

В работе Г. С. Чувицкого [1960] приведены кривые коэффициента z_0/r_0 и $\psi_0 L/\lambda_0$, полученные путем систематических расчетов амплитуд про-

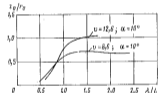
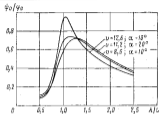


Рис. 40. Кривые ψ_0/φ_0 и z_0/r_0 в рейс теплохода «Лукуга» Аэртсенга — Нью-Йорк.

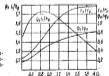


Рис. 41. Коэффициенты динамичности в условиях резонанса по Г. С. Чувицкому.



Рис. 42. Фазовые углы в градусах при резонансе по Г. С. Чувицкому.

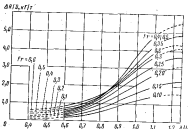


Рис. 43. Дополнительное удельное сопротивление воды при движении быстроводного судна на встречном волнении по А. И. Вознесенскому и Г. А. Фирсову.

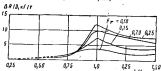


Рис. 44. Дополнительное удельное сопротивление воды при движении транспортного судна на встречном волнении по В. Я. Такаеву и В. С. Швакову.

Рис. 38 и 41 позволяют определить также амплитуды суммарных продольных колебаний судна при помощи формул, приведенных в § 7 главы третьей.

Как отмечалось, суммарные вертикальные перемещения носовой оконечности судна ξ , измеренные относительно профиля волны, в значительной степени зависят от сдвига фаз $\delta_{1,τ}$ — между колебаниями судна и волны и $\delta_{2,τ}$ — между продольно-угловыми и вертикальными колебаниями судна. При всех прочих одинаковых условиях наиболее неблагоприятен фазовый угол $\delta_{1,τ} = 180^\circ$, при котором во время нисходящего движения носовой оконечности форштевень и поверхность волны движутся навстречу друг другу. Неблагоприятно складывается также увеличение сдвига фаз между килевой и вертикальной качкой.

На рис. 42, заимствованном из упомянутой выше работы, приведены кривые фазовых углов $\delta_{1,τ}$; $\delta_{2,τ} = f(\lambda/L)$, рассчитанные Г. С. Чувицким для условий резонанса на встречном волнении. Судя по этой диаграмме, наиболее неблагоприятные условия по фазовому углу $\delta_{1,τ}$ для судов, рассмотренных Г. С. Чувицким, создавались при отношении $\lambda/L = 0,9$. Этому сочетанию длины судна и длины волны соответствовал и относительно неблагоприятный фазовый угол $\delta_{2,τ} = 50^\circ$.

При отношениях λ/L , превышающих 1,5–1,6, колебания судна и воды сочетались благоприятно.

О влиянии отношения λ/L на дополнительное сопротивление воды ΔR при движении судна на встречном регулярном волнении можно судить по рис. 43–44, на которых приведены экспериментальные кривые $\Delta R/D = f(\lambda/L)$. Рис. 43, заимствованный из работы А. И. Вознесенского и Г. А. Фирсова [1956], относится к быстроводному судну с коэффициентом полноты $\delta = 0,502$; $\alpha = 0,775$ и отношением $B/T = 2,85$. Кривые, приведенные на этом рисунке, были построены по данным испытаний моделей на регулярном волнении при отношении $\lambda_p/\lambda = 1/20$.

Диаграмма на рис. 44 заимствована из работы В. Я. Такаева и В. С. Швакова [1959]. Она построена в соответствии с результатами испытаний модели транспортного судна, имеющего коэффициент общей полноты $\delta = 0,70$ и отношение $B/T = 2,3$.

Эти и другие качественные материалы показывают, что дополнительное сопротивление воды на встречном волнении достигает обычно максимума при отношении $\lambda/L = 1,0$ –1,2. С увеличением относительной скорости хода дополнительное сопротивление возрастает.

Дополнительные данные о возрастании сопротивления, упора и мощности силовой установки на регулярном волнении приведены в дальнейшем изложении.

Вопрос о причинах, обуславливающих это явление, рассмотрен в ряде работ и в частности в курсе Л. М. Ногата [1962].

§ 3. ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСОВОЙ НАГРУЗКИ

Распределение весовой нагрузки по длине судна влияет на килевую качку в той мере, в какой оно сказывается на величине продольного момента инерции массы судна I_x . Косвенным образом распределение нагрузки оказывает влияние и на вертикальную качку, так как продольно-угловые и вертикальные колебания судна зависят друг от друга.

С увеличением продольного момента инерции массы судна уменьшается безразмерный коэффициент демпфирования качки.



Рис. 45. Приращение мощности, необходимое для поддержания постоянной скорости хода, в зависимости от относительного радиуса инерции $\chi_2 = r_x/L$ по Г. Воссерсу и В. А. Свааю.

ψ_0/ψ_0_0 и χ_2/r_x . Если же $L/L_0 > 1,0$, наблюдается обратная картина, причем одновременно резко возрастает мощность и упор, необходимые для поддержания постоянной скорости хода.

На рис. 45 приведены кривые, выражающие необходимое приращение относительной мощности буксировки

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta W L}{\gamma V^2 L^2}$$

в функции относительного радиуса инерции $\chi_2 = r_x/L$ (ΔW — абсолютное приращение мощности; r_x — амплитуда волны). Кривые, заимствованные из работы Г. Воссерса и В. А. Свааю (G. Vossers and W. A. Swaan) [1960], были получены путем испытаний модели с обводами судна «Вектор». Использованные кривые построены по результатам испытаний на волне длиной $\lambda = 1,25L$ при крутизне волн $A_w/\lambda = 0,02$. Числа Фруда, соответствующие скорости буксировки модели, изменялись в пределах $Fr = 0,10-0,22$. Рисунок показывает, что увеличение момента инерции массы судна крайне неблагоприятно сказывается на его ходовых качествах.

§ 4. ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБЩЕЙ ПОЛНОТЫ И СООТНОШЕНИЙ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Вопрос о влиянии изменения элементов транспортных судов на показатели продольной качки рассмотрен в работе Г. Воссерса, В. А. Свааю и Х. Риккена (G. Vossers, W. A. Swaan, H. Rijkm) [1961]. Данные, приведенные в этой работе, были получены путем испытаний серии моделей, отличаются коэффициентом δ и отношениями L/B и L/T . В основу исследования приняты модели серии 60 с коэффициентами общей полноты, изменяющимися в пределах $\delta = 0,60-0,80$, в дополнительная модель с коэффициентом $\delta = 0,55$. В процессе испытаний менялся скорость буксировки, курсовой угол α и относительная длина волны. Относительный радиус инерции $\chi_2 = r_x/L$ сохранялся постоянным и равным 0,24, несмотря на то, что в действительных условиях эта величина изменяется в зависимости от коэффициентов полноты судна.

Полученные результаты были частично использованы в книге Г. Воссерса (G. Vossers) [1962], из которой заимствована диаграмма, воспроизведенная на рис. 46. Диаграмма содержит кривые показателей качки, построенные в функции отношения L/L_0 для верного волнения, числа Фруда 0,15, коэффициентов общей полноты $\delta = 0,55$ и 0,80, отношений $L/T = 11,00$; 14,25; 24,00 и отношений $L/B = 5,5$; 8,5. На диаграмме по оси ординат отложены коэффициенты динамичности ψ_0/ψ_0_0 ; z_0/r_x ; χ_0/r_x и приращение относительной упора

$$\Delta p = \frac{\Delta W L}{\gamma V^2 L^2}$$

(Δp — приращение абсолютного упора), необходимого для поддержания постоянной скорости хода.

Остановимся на некоторых вопросах, представляющих интерес в свете рассматриваемой диаграммы.

Увеличение коэффициента δ , а с ним и коэффициента α и $\chi = \delta/\alpha$ сопровождается, как показывают формулы (3.18) и (3.27), возрастанием периодов τ_0 и τ_x . Такое же влияние на периоды собственных колебаний судна оказывает уменьшение отношения L/T при $L = \text{const}$. Этим можно объяснить то, что на рисунке максимумы кривых z_0/r_x и ψ_0/ψ_0_0 смещены в сторону возрастающих значений L/L_0 при увеличении коэффициента δ и уменьшении отношения L/T .

Возрастание коэффициентов α и χ сопровождается уменьшением как редуционных коэффициентов χ_0 и χ_x , так и коэффициентов демпфирования A_0 и A_x . В настоящем случае преобладающее значение получали редуционные коэффициенты, так как модель с большим коэффициентом δ имела меньшие амплитуды качки.

Возможно, что такая закономерность характерна только для судов с U-образными спантоутами.

Натурные испытания судов показывают, что по мере увеличения коэффициента общей полноты $\delta = 0,72-0,73$ мощность, необходимая для поддержания постоянной скорости хода, резко возрастает. Между тем в рассмотренном случае при увеличении коэффициента общей полноты с $\delta = 0,55$ до $\delta = 0,80$ приращение упора оказалось незначительным. Это можно объяснить тем, что при принятой постановке испытаний не могло проявиться влияние увеличения относительного радиуса кривизны массы судна $\kappa_2 = r_2/L$, который, как отмечалось, нормально возрастает с увеличением коэффициента общей полноты.

В рассматриваемых испытаниях изменение отношения L/B не оказывало существенного влияния на коэффициенты демпфирования ψ_0/ψ_2 и κ_0/κ_2 . В большей степени влияло отношение L/T , связанное с отношением λ/T зависимостью:

$$\frac{\lambda}{T} = \frac{\lambda}{L} \frac{L}{T}$$

По мере увеличения отношения λ/T при $\lambda/L = \text{const}$ возрастает как коэффициент κ , входящий множителем в выражения редуцированных коэффициентов κ_0 и κ_2 , так и коэффициент демпфирования качки. В данном случае в большей степени сказалось, по-видимому, сопротивление качке,

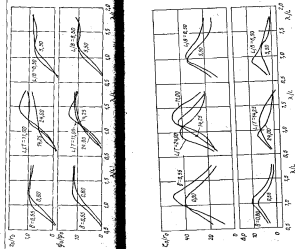


Рис. 46. Влияние коэффициента δ и отношения L/B к L/T на показатели ψ_0/ψ_2 , κ_0/κ_2 и δ_0/δ_2 в относительном волне Фруда $Fr = 0,15$ (по Г. Виссеру, В. А. Скану и Х. Райнсу).

поскольку с увеличением отношения L/λ амплитуд качки снижались.

Более подробную информацию о влиянии числа Фруда, относительной длины волны и отношения L/λ на амплитуды вертикальных перемещений носовой оконечности по отношению к поверхности воды содержит рис. 47, заимствованный из того же источника. Рисунок дает наглядное представление об условиях, способствующих возникновению slamming и зарыванию судна в набегающие волны (см. § 8 и 9 этой главы).

Кривые, представленные на рисунке, построены для восточного волнения по данным испытаний моделей с коэффициентом полноты $\delta = 0,70$ и отношением $L/B = 7,0$.

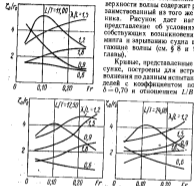


Рис. 47. Зависимость относительной амплитуды C_0/λ от числа Фруда, относительной длины волны и отношения L/λ по Г. Воссеру, В. А. Сваану и Х. Равенку.

§ 8. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ШПАНГОУТОВ

В интервале относительных длин волн, превышающих $\lambda/L = 1,0$, применяя в носовой оконечности судна V-образные шпангоуты, можно значительно снизить амплитуды килевой и вертикальной качки по сравнению с амплитудами качки судов, имеющих U-образные обводы. Снижение амплитуд качки обычно не сопровождается существенным уменьшением сопротивления воды на вхождении в море, а в некоторых случаях (особенно если сопоставляются суда с резко выраженными V-образными и U-образными обводами) сопротивление судна с V-образными шпангоутами возрастает.

При относительных длинах волны $\lambda/L < 1,0$ переход от U-образных к V-образным обводам приводит к существенному увеличению сопротивления при незначительном снижении амплитуд килевой и вертикальной качки.

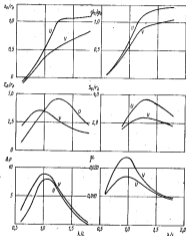


Рис. 48. Показатели сопротивления качки в вращающемся угле модели с V-образными и U-образными обводами в носовой оконечности по В. А. Сваану и Г. Воссеру.

Для транспортных судов затронутой вопрос исследован экспериментально в работе В. А. Сваана и Г. Воссера (W. A. Swan and G. Vossers) [1961]. Основание модели, использованные в этом исследовании, могут быть охарактеризованы следующими показателями: $\delta = 0,70$; $\beta = 0,585$; $\varphi = 0,71$; $L/B = 7,0$, $L/\lambda = 17,5$. Четыре модели отличались формой шпангоутов в носовой оконеч-

ности, что отразилось на коэффициентах полноты конструктивной атерлинки и носовой половины этой атерлинки, которые изменились в пределах $\alpha = 0,787-0,833$ и $\alpha_n = 0,734-0,855$.

На рис. 48 сопоставлены данные испытаний двух моделей с наиболее резко выраженными V-образными и U-образными шпангоутами. Диаграмма воспроизведена в том виде, в каком она дана в книге Г. Воссера (G. Vossers) [1962]. Наряду с коэффициентами динамичности ψ_0/ψ_n , z_0/r_n , z_1/r_n , z_2/r_n на диаграмме приведены значения коэффициента протаривания упора и крутящего момента

$$\Delta p = \frac{\Delta P V}{\rho g^2 D^2}; \quad \mu = \frac{M}{\rho g^2 D^3}.$$

Диаграмма относится к числу Фруда $Fr = 0,20$. При числах Фруда $Fr = 0,15$ и $Fr = 0,25$ кривые имеют тот же характер.

В дополнение к рисунку отметим на основании более подробных данных, приведенных в оригинальной работе, что при переходе от U-образных обводов к V-образным коэффициенты динамичности ψ_0/ψ_n и z_0/r_n уменьшались на всем диапазоне изменения коэффициента α . Кривые же $z_1/r_n = f(\alpha_n)$, построенные для постоянных значений отношения k/L и постоянного числа Фруда, имели максимумы при $\alpha = 0,794$.

В использованной работе приведены также данные, полученные путем испытания двух моделей с U-образными и V-образными обводами и коэффициентом продольной полноты, увеличенным до $\varphi = 0,760$, чему соответствует коэффициент $\beta = 0,522$. Коэффициенты полноты носовой половины конструктивной атерлинки были равны соответственно $\alpha_n = 0,768$ и $\alpha_n = 0,855$. Возрастающие коэффициенты φ , сопровождавшиеся увеличением полноты шпангоутов в оконечностях, оказало благоприятное влияние на показатели качка судов с резко выраженными U-образными обводами. При V-образных шпангоутах уменьшение коэффициента β приводило к противоположным результатам.

На практике для небольших судов (промысловых, каботажных и др.), которые по условиям эксплуатации часто встречают волны с длиной, превышающей длину судна, применяют большей частью резко выраженные V-образные обводы. Носовым шпангоутом крупных транспортных судов в США предкают U-образную, а в европейских странах — V-образную форму.

Дополнительные данные о влиянии формы носовой оконечности на гидродинамические удары, воспринимаемые судном, приведены в § 6 и 8 этой главы.

§ 4. ВЛИЯНИЕ РАЗВАДА ШПАНГОУТОВ В НАДВОДНОЙ ЧАСТИ СУДА

Дополнительно к испытаниям моделей с резко выраженными U-образными обводами, отмеченными в предыдущем параграфе, была испытана модифицированная модель, отличающаяся боль-

шим развалом носовых шпангоутов в надводной части судна. Кривые, характеризующие влияние развала шпангоутов на коэффициенты динамичности и протаривания упора при курсовых углах $\alpha = 10^\circ$ и $\alpha = 50^\circ$, приведены на рис. 49. Они соответствуют числу Фруда $Fr = 0,20$ и отношению $A_0/\lambda = 0,02$.

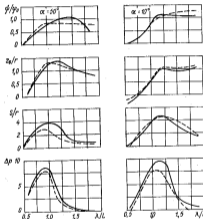


Рис. 49. Показатели продольной качки и протаривания упора моделей с разным развалом (—) и без развала (---) шпангоутов в надводной части судна по П. А. Сивану и Г. Воссеру.

Рисунок показывает, что увеличение развала шпангоутов в надводной части судна привело к значительному снижению коэффициента динамичности при курсовом угле $\alpha = 10^\circ$ и значениях k/L , превышающих 1,0—1,2. С другой стороны, увеличение развала шпангоутов сопровождалось возрастанием упора, необходимого для поддержания постоянной скорости. В работе отмечается также,

что при интенсивной качке большой развал шпангоута неблагоприятно сказывается на ударах корпуса о воду.

Судя по другим данным, при сравнительно высоких скоростях хода чрезмерный развал шпангоута в надводной части судна приводит к сильному образованию брызг. Это также ограничивает возможность применения шпангоута рассматриваемой формы.

§ 7. АМПЛИТУДЫ БОРТОВОЙ, КИЛЕВОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАЧКИ ПРИ КОСЫХ КУРСОВЫХ УГЛАХ

Возмущающие моменты, вызывающие поперечные и вертикальные колебания судна, достигают максимума при курсовом угле $\alpha = 90^\circ$. Максимумам же возмущающего момента килевой качки соответствуют курсовые углы $\alpha = 0$ и $\alpha = 180^\circ$. Обычно встречное волнение приводит к более сильной килевой качке, чем попутное.

Влияние наклона курсового угла на возмущающий момент бортовой качки может быть приближенно учтено путем введения в расчеты условной длины волны

$$\lambda(\alpha) = \lambda_0 \sin \alpha$$

и условного угла волнового склона

$$\varphi(\alpha) = \varphi_0 \sin \alpha.$$

Под φ_0 в настоящем случае понимается максимальный угол волнового склона при $\alpha = 90^\circ$, исправленный с учетом влияния нечетности размеров судна по сравнению с волной.

Аналогичным образом для килевой качки можно написать²

$$\lambda(\alpha) = \frac{\lambda}{\cos \alpha}.$$

При данной длине волны (см. § 3 главы третьей) кажущийся период T_α , а следовательно и частота возмущающей силы $\sigma_\alpha = 2\pi/T_\alpha$, однозначно определяются курсовым углом и скоростью судна. В общем случае резонансные курсовые углы, соответствующие какому-либо виду качки, не совпадают с курсовыми углами, при которых возмущающие моменты, вызывающие бортовую, килевую или вертикальную качку, достигают максимума. Это обстоятельство смягчает неблагоприятное влияние резонанса на качку судна и приводит к смещению максимумов на амплитудных кривых Φ ; φ ; $z = f(\alpha)$. Поэтому в общем случае максимумы этих кривых располагаются между резонансными курсовыми углами и курсовыми углами, соответствующими максимуму возмущающего момента. Чем дальше отстоит резонансный курсовый угол от уг-

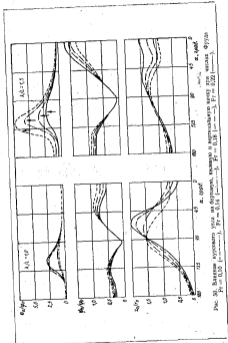


Рис. 50. Влияние курсового угла на бортовую, килевую и вертикальную качку для наклона Φ судна $\varphi = 10^\circ$. Резонансные курсовые углы: $Pr = 0,18$ (—), $Pr = 0,52$ (---), $Pr = 0,05$ (.....).

² Подробнее см. курс качки С. Н. Волгоградского [1964].

лов, соответствующих экстремальным значениям по возмущающему моменту, тем в большей степени сглаживается влияние резонанса. Явление осложняется тем, что скорость хода и связанный с ней входящий период волны влияют на коэффициенты демпферона килей, присоединенную массу воды, гидродинамические компоненты возмущающих сил и угол дрейфа на волнообразном море.

Некоторое представление о том, как складывается совокупное влияние всех этих факторов, можно получить по рис. 50, заимствованному из работы Г. Воссера и В. А. Свааза (G. Vossers and W. A. Swaas) [1960]. На рисунке представлены кривые относительных амплитуд бортовой, килевой и вертикальной качки, построенные в функция курсового угла для четырех чисел Фруда и двух значений M/L . Данные для построения кривых послужили результаты испытания самоходной модели судна «Виктори», имеющие следующие элементы: $L = 133,0$ м; $B = 18,9$ м; $T = 8,69$ м; $V = 15,080$ м²; $\delta = 0,688$; $\beta = 0,988$; $\alpha = 0,740$; $h = 1,13$ м; $\tau = 13,0$ сек. Использование данные относятся к испытаниям при относительной высоте волны $A/L = 0,02$.

Из рисунка следует, что при отношении $M/L = 1,0$ максимумы амплитуд бортовой и вертикальной качки в зависимости от скорости судна приходились соответственно на курсовые углы $\alpha = 105-120^\circ$ и $\alpha = 60-90^\circ$. Амплитуды же килевой качки достигали максимума при курсовых углах $\alpha = 45-50^\circ$ и $\alpha = 135-140^\circ$. Таким образом, расхождения между углами, соответствующими максимумам амплитуды и максимумам возмущающих сил, достигали 30° — при бортовой и вертикальной качке и 50° — при килевой качке.

Качественно такая же картина наблюдалась и при относительной длине волны $\lambda/L \sim 1,5$.

§ 6. ВЛИЯНИЕ БОРТОВОЙ КАЧКИ НА ХОДКОСТЬ СУДА

В предыдущих параграфах при рассмотрении вопроса о поведении судна на волнении приводились данные, характеризующие влияние продольной качки на сопротивление, упр. крутящий момент и буксировочную мощность судна. В этом параграфе затронут вкратце вопрос о зависимости скорости хода и мощности механизмов от характеристик бортовой качки.

В первых исследованиях, посвященных этому вопросу, сопротивление определяли путем испытания моделей, совершавших вынужденные колебания в тихой воде. Подобные опыты были, в частности, проведены в Одесском бассейне над моделью пассажирского судна. По словам Г. А. Павлюка [1933], в тех случаях, когда амплитуда качки достигала приблизительно 30° , сопротивление возрастало на 10% во всем диапазоне скоростей хода до

17 узл. Неясно, в какой мере можно считать этот результат, полученный в искусственных условиях, справедливым в реальных условиях эксплуатации судна на волнении. В работе Т. Ф. Бридга, Б. А. Хилларда и И. И. Мак Маллена (Т. F. Bridgess, B. A. Hilliard, J. J. Mc. Mullen) [1964] приведены данные о влиянии бортовой качки на ходовые качества танкера «Эксо Стайт». Они были получены путем испытания самоходной модели судна на регулируемом волнении. Водорезище рассматриваемого танкера равно 110 800 м² при осадке 14,5 м, а длина и ширина равны соответственно 250 и 38,1 м. Максимальная длительная мощность силовой установки танкера 26 500 л. с. Скорость хода на тихой воде при мощности механизмов, равной 80% от максимальной, составляет 16,7 узла. Метacentрическая высота (без поправки на свободные уровни) и период собственных поперечных колебаний судна равны соответственно 4,57 м и 14,5 сек.

Самоходная модель танкера с установленными и снятыми боковыми килевыми испытывалась при включенных и выключенных цистернах Флэма на курсовых углах во отношении к волнению $\alpha = 50; 90; 130^\circ$. Результаты испытаний были пересчитаны спектральным методом на регулярное волнение исходя из принятых предположений о распределении сил ветра и курсовых углов судна во отношении к волнению в течение названного периода.

Наиболее существенные результаты, полученные в работе, могут быть кратко сформулированы так. Вблизи резонанса после включения цистерн Флэма амплитуды бортовой качки снижались приблизительно на 30 до 5° . Эквивалентно менее эффективными оказались боковые килей, сплавляемые в тех же условиях амплитуды бортовой качки на $20-30\%$.

Бортовая качка судна при соотношениях, близких к резонансным, существенно ухудшила ходовые характеристики судна. Так, например (см. рис. 51), при скорости хода, равной 16 узл., мощность механизмов судна с боковыми килевыми и выключенными цистернами Флэма возрастала вблизи резонанса по сравнению с мощностью на тихой воде приблизительно на 70%. После выключения

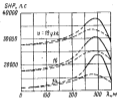


Рис. 51. Зависимость мощности на валу от длины волны для судна с бортовой качкой. Высота волны 2,2 м; курсовой угол $\alpha = 150^\circ$.

— с выключенными килевыми

- - - с установленными килевыми

¹ Строение по рис. 50 отмечено резонансные курсовые углы.

Успокоительных шестерн эта цифра снижалась приблизительно до 40%.

При наличии успокоительных шестерн боковые качи оказались малозначимыми.

Расчеты показали, что на нерегулярном волнении при скорости хода, равной 16,5 узла, установка шестерн Флаома приводит к уменьшению затрачиваемой мощности механизмов танкера, не имеющего боковых килей, в среднем на 8,7%.

Отмеченные выходы весьма полностью относятся к судам с другими элементами, однако рассмотренная работа показывает, что вопрос о наличии бортовой качки на ходкость судна заслуживает большого внимания.

§ 9. СЛЕМНГ

Под слемнгом понимаются гидродинамические удары, которые при известных условиях возникают в носовой оконечности судна, когда оно движется в гребную погоду на встречном волнении. В этом параграфе рассматриваются удары, воспринимаемые днищем судна, которые имеют основное значение. Уместно все же отметить, что при значительном развале шпангоутов удары могут возникать и в надводной части судна. Механизм обоих явлений в основном одинаков.

Рассматривая слемнги исходя из мореходности судна, мы не останавливаемся в дальнейшем на вопросе обеспечения прочности корпуса в условиях слемнга.

Наиболее сильным гидродинамическим ударом подвержено днище на расстоянии от 1/10 до 1/8 длины судна, считая от форштевня. Удары сопровождаются сотрясениями корпуса, переходящими в опрокидывание. Они достигают максимальной интенсивности в моменты, когда обнаженное днище при нисходящем движении носовой оконечности встречает воду.

Гидродинамические удары сканируются особенно сильно на судах, отличающихся малой калеватостью днища, к числу которых принадлежат грузовые суда. Вероятность возникновения слемнга возрастает по мере уменьшения осадки судна носом, вследствие чего наиболее неблагоприятные условия для грузовых судов создаются во время балластных веролодов.¹

Сила ударов возрастает по мере увеличения крутизны волн. Поэтому нерегулярность волнения, при которой судно более или менее периодически встречает видимые волны с относительно большой крутизной, способствует возникновению гидродинамических ударов.

¹ Практически дальною о максимальной допустимой осадке судна носом в балластной пробке правдами в главе четвертой первой части курса проектирования судов (Носад Л. М., 1962).

Гидродинамические удары в слемнгах сосредоточиваются на небольшой площади и отличаются малой продолжительностью. Они они отличаются от общих динамических усилий, вызванных продольной качкой, которые могут достигать большой суммарной величины при незначительном среднем давлении.

Вследствие отмеченных особенностей слемнг не оказывает влияния на качку судна.

Хотя малые слемнги и учитываются при разработке конструкции корпуса, гидродинамические удары нередко вызывают повреждение днища. Поэтому при возникновении сильных ударов судоводители прибегают к уменьшению скорости хода или изменению курса судна. В конечном счете подверженность судна слемнгу сказывается неблагоприятно на его экономических показателях.

Интенсивность гидродинамических ударов в значительной мере определяется линейной скоростью ξ обгоняющей носовой оконечности судна с поверхностью волны. Как это показано в § 7 главы третьей, скорость ξ зависит от амплитуд и фазовых углов калевой и вертикальной качки, которые в своей совокупности при заданном профиле волны определяют амплитуду вертикальных перемещений форштевня относительно поверхности волны и фазовые углы $\delta_{\text{вк}}$ и $\delta_{\text{вп}}$.

Расчет усилий, вызванных гидродинамическими ударами, основывается на теории количества движения. Изменение количества движения в процессе колебания носовой оконечности определяется изменением скорости ξ и присоединенной массы воды m в рассматриваемом поперечном сечении судна. Поэтому импульсная нагрузка, приходящаяся на единицу длины корпуса, выражается равенством

$$p = \frac{d(m\xi)}{dt}$$

Г. С. Чуваковский в исследовании слемнга, результаты которого наложены в работе [1960] и использованы в справочнике [1960], рассчитывал скорость $\xi = f(x, t)$ так, как это указано в § 7 главы третьей. Присоединенная же масса воды определялась обычным способом по формуле

$$m = c\beta^3,$$

где $\beta = f(x, t)$ — ширина рассматриваемого сечения; c — коэффициент, зависящий от формы сечения. Ширина сечений определялась по теоретическому чертежу путем наложения кривых $\xi = -f(x, t)$, а сила p — путем численного дифференцирования произведенная m по времени.

Не останавливаясь на деталях подробных расчетов, рассмотрим некоторые экспериментальные данные.

На рис. 52, заимствованном из книги В. В. Корвин-Круковский (В. W. Korvin-Krotkowsky) (1961), приведены кривые В. Г. Шебехели и С. М. И. Лама, построенные по данным испытаний модели судна «Либерти» на регулярном волнении. Условия испытаний могут быть охарактеризованы следующими параметрами: $\lambda = 1,52$ м; $\lambda/L = 16,7$; $\tau_0 = 0,65$ сек.; $\tau_2 = 0,70$ сек. Судно по рисунку, $\tau_0 = 0,70$ сек.

Кривые, характеризующие суммарные вертикальные перемещения носовой оконечности судна ξ , линейные скорости $\dot{\xi}$ и относительные линейные ускорения $\ddot{\xi}$, даны для третьего теоретического шанпоуга, считая с носа.

Моменты возникновения гидродинамических ударов характеризуются пиками на кривой ускорений $\ddot{\xi} = f(t)$. При тех же абсциссах достигает максимума расстояние между кривой $\dot{\xi} = f(t)$ и кривой $\xi = f(t)$, выражающей вертикальную скорость изменения профиля волны (в данном случае колебания носовой оконечности судна и волны совпадают с фазой, близкой 180°). Максимум же относительной скорости $\dot{\xi} - \dot{f} = f'(t)$ соответствует точки, при которых кривая $\xi = f(t)$ во время нисходящего движения носовой оконечности модели переходила нулевую линию.

Нижняя кривая на рис. 52 характеризует протяженность и расположение обдаваемой зоны дна.

Качественно к таким же результатам привели испытания упрощенной модели судна на регулярном волнении, проведенные Н. Аита и К. Оши (Y. Arita and K. Oshi) (1955). Авторы отмечают, что в пределах исследованных отношений длины волны к длине судна (до $\lambda/L = 1,25$) амплитуды качки при неизменной скорости буксировки возрастали с увеличением этого отношения. Все же ударная нагрузка на днище достигала максимума при относительной длине волны $\lambda/L = 1,0$.

Интенсивность ударов возрастала с увеличением дифферента на корму. Уменьшение же осадки модели, дифференциальной на ровный кил, сопровождалось возрастанием силы ударов лишь до осадки $T_1 = 1/30L$, чему соответствовало отношение $T_1/T = 0,59$. При дальнейшем уменьшении осадки ударная нагрузка снижалась.

Максимум на кривой $p = f(T)$, характеризующей изменение интенсивности ударов, объясняется тем, что для судна, дифференцированного на ровный кил, увеличение осадки сопровождается снижением момента инерции массы судна. Это компенсируется благоприятно на амплитудах качки и создает условия, которые могут постепенно нейтрализовать неблагоприятное влияние уменьшения осадки.

Уместно отметить, что уменьшение осадки модели сопровождается сокращением периодов собственных колебаний. Вследствие этого резонанс наступает при меньшем кажущемся периоде

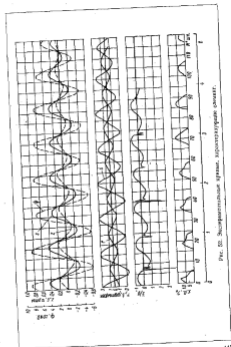


Рис. 52. Эквивалентные кривые, характеризующие удары.

волн, а следовательно при большой скорости буксирных моделей.

К. Оши (K. Oshi) в 1968 г. исследовал явление сдвига на двух моделях с пилочками для грузовых судов U-образными и V-образными обводами. Элементы моделей выражаются следующими цифрами: $L = 6,0$ м; $B = 0,826$ м; $H = 0,53$ м; $T = 0,335$ м; $D = 1,33$ м; $\delta = 0,741$; $\beta = 0,596$. Минимальная осадка модели в балласте была принята равной $0,2$ м.

В качестве характеристик формы обвода наряду с коэффициентом полноты грузовой ватерлинии был принят коэффициент полноты k погруженной площади характерного шпангоута, расположенного на расстоянии $0,1L$ от носового вертикального. Коэффициент k подсчитывался для балластного перехода в предположении, что осадка судна в этом поперечном сечении составляет 50% от средней осадки судна в полном грузу.

Коэффициенты полноты грузовой ватерлинии и характерного шпангоута, наряду с периодами собственных колебаний в полном грузу T_0 и T_1 и балласте $T_0^{(0)}$ и $T_1^{(0)}$ моделей с U-образными и V-образными обводами (модели U и V), выражались следующими цифрами.

	U-образная	V
α	0,629	0,630
k	0,662	0,626
T_0 , сек.	1,46	1,36
$T_1^{(0)}$, сек.	1,30	1,20
$T_0^{(0)}$, сек.	1,50	1,47
$T_1^{(0)}$, сек.	1,37	1,27

При осадках $T > 0,05L$ сдвиг не наблюдался. Гидродинамические удары достигали максимальной интенсивности при наименьшей обследованной осадке $T = 0,035L$. К. Оши предполагает, что при этой осадке есть экстремум.

Наиболее невыгодными соотношениями между длиной волны и длиной судна оказались $\lambda/L = 1,03$ при $Fr = 0,240$ для U-образных обводов и $\lambda/L = 1,10$ при $Fr = 0,345$ для V-образных обводов.

Испытания показали, что при малых осадках, характерных для балластных переходов, утрачивается преимущество V-образных шпангоутов, связанные с более высокими деформируемыми качествами. Независимо от этого при V-образных шпангоутах гидродинамические удары сказывались менее интенсивно, чем при U-образных. Очевидно, это объясняется большей килеватостью шпангоутов V-образной формы, при которой присоединенная масса воды нарастает медленнее и более равномерно.

При осадке, соответствующей балластным переходам, периоды собственных колебаний моделей снижались в среднем на 11% по

сравнению с осадкой в полном грузу. Отношения же соответственных периодов к корню квадратному от осадки носовая приближительно на 17%. Эти цифры, имеющие более или менее общее значение, согласуются с данными, приведенными в § 2 главы третьей.

Дополнительные сведения о сдвиге можно найти в работе К. Оши (K. Oshi) [1964].

§ 18. ЗАЛИВАЕМОСТЬ СУДНА НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Общий способ построения кривых заливаемости по длине судового корпуса рассмотрен в § 7 главы третьей. В этом параграфе приводятся дополнительные данные о заливаемости носовой оконечности судна.

Положение носовой оконечности судна по отношению к поверхности воды в данный момент зависит от особенности колебательного движения судна, формы набегающей волны и ее расположения по отношению к судну. Форма же набегающей волны определяется взаимодействием морской волны, деформированной присутствием корпуса, с носовой системой корабельных волн, возникающей при движении судна на тихой воде, и системой корабельных волн, вызванных качкой судна.

Последние сказываются незначительно. Важнее же носовой системы корабельных волн, возрастающее с увеличением скорости судна, имеет существенное значение для среднескоростных и высокоскоростных судов.

Испытания, проведенные А. Н. Владимировым [1946], показывают, что деформация набегающих волн сказывается сильно лишь при большой полноте носовой оконечности судна. Так, например, при испытании модели с носовым углом заострения ватерлинии, равным 40° , высота деформированной волны превышала высоту недеформированной волны на 60%. При испытании же модели с углом заострения грузовой ватерлинии, равным 20° , встречная волна практически не деформировалась.

В модельном эксперименте волна может подниматься выше палубы, не разрушаясь. В натуре, однако, волна в подобных условиях разрушается под влиянием ветра и вода попадает на открытые палубы и вде брызги, пены или отдельные струи. Такое явление называют брызгообразованием, в отличие от заливания судна, при котором оно зарывается в воду.

В иностранной литературе вместо термина брызгообразование и заливание пользуются терминами заливание и сильное заливание.

Заметим, что заливаемость проявляется особенно сильно при курсовых углах базиса $\alpha = 0$. Наиболее же сильное брызгообразование создается обычно при курсовых углах. Брызги часто достигают высоко расположенных частей судна, особенно если конфигурация надстроек способствует созданию восходящих

воздушных потоков. При низких температурах воздуха это ведет к быстрому обледенению открытых палуб, надстроек, мачт и такелажа.

Вода может попадать на открытые палубы и даже брызг и пеня также в тех случаях, когда морские волны, набегающие с наветренного борта, разбиваются в непосредственной близости к судну. Вопрос о влиянии формы обвода на брызгообразование в подобных условиях мало изучен. Можно отметить лишь высказывания Н. Л. Кента (J. L. Kent), который считает (1949—1960), что на судах со шпильными ватерлиниями вероятность попадания брызг и пены на открытые палубы увеличивается. По его наблюдениям, при подобных обводах расходящиеся корабельные волны распространяются под более острыми углами к диаметральной плоскости, чем на судах с пряжелевными ватерлиниями. Одновременно расходящиеся волны возрастают по высоте из-за поперечных волн и становятся вследствие этого круче. Такие крутые расходящиеся корабельные волны, по словам Кента, легко разбиваются при интерференции с набегающими морскими волнами, если гребни последних располагаются приблизительно параллельно гребням расходящихся волн.

В дальнейшем вопрос, которому посвящен этот параграф, рассматривается под углом зрения заливаемости судна.

Пусть при продольной качке на ветре волнение характерное поперечное сечение корпуса погружается в воду на величину ζ_0 . Судно не будет зарываться в набегающие волны, если в том же поперечном сечении высота надводного борта l_0 будет не меньше амплитуды колебаний ζ_0 . Разность $l_0 - \zeta_0$ выражающее минимальную высоту надводного борта, удовлетворяющую поставленному условию (отсутствию заливаемости), можно представить в виде

$$\frac{l_0}{L} = c_0 \frac{h_0}{\lambda} \frac{1}{F}, \quad (5.02)$$

где $c_0 = \zeta_0/h_0$ — коэффициент динамичности суммарных вертикальных перемещений корпуса по отношению к поверхности волны в рассматриваемом сечении.

Высоту надводного борта l_0 обычно соотношают либо у косоного перпендикуляра либо в сечении, расположенном в хорму от него на 10—15% от длины судна.

Значения коэффициента c_0 изменяются в широких пределах в зависимости от относительной длины волн, элементов судна и относительной скорости хода. Для транспортных судов подходящие значения этого коэффициента можно подобрать по диаграммам, приведенным на рис. 47.

В исследованиях заливаемости в качестве показателя, характеризующего минимальную относительную высоту надводного

борта в носовой оконечности судна, при котором судно еще не заливается, пользуются также соотношением

$$|F| = \frac{h_0}{l_0} \frac{L}{\lambda} = \frac{L}{l_0} \frac{h_0}{\lambda}, \quad (5.03)$$

предложенным Р. Н. Ньютоном (R. N. Newton) [1960]. Под l_0 этот автор понимает приведенную высоту надводного борта, измеренную на четвертой теоретической шпангоуте. При сопоставлении судов, значительно отличающихся формой шпангоутов в надводной части судна, Р. Н. Ньютон, определяя l_0 , вводит поправочный множитель, учитывающий влияние развала шпангоутов на заливаемость судна. В дальнейшем мы будем считать, что в одном и том же поперечном сечении $l_0 = l_0'$. Формулу (5.03) можно представить в виде

$$\frac{l_0}{L} = A \frac{h_0}{\lambda} \frac{1}{|F|}, \quad (5.04)$$

где A — численный коэффициент, который нужно вводить, если надводный борт измеряется не по нормальному перпендикуляру.

Из формул (5.02) и (5.04) следует, что

$$c_0 = A \frac{1}{|F|} \frac{1}{\lambda}. \quad (5.05)$$

В упомянутой работе Р. Н. Ньютона приведены данные, полученные путем испытаний пяти моделей быстрходного судна. Элементы основной модели выражены следующими цифрами: $L = 3,05$ м; $B = 0,323$ м; $H = 0,226$ м; $T = 0,095$ м; $\delta = 0,483$; $\varphi = 0,571$; $\alpha = 0,72$; $R = a = 7,62$ м. Радиус ниртика массы судна и период свободных продольно-угловых колебаний, измеренные в воздухе, были равны $r_g^{(0)} = 0,687$ м и $\tau_g^{(0)} = 0,498$ сек.

Остальные модели отличались от основной высотой и формой надводной части судна.

На рис. 53 приведены кривые $|F| = f(\tau_g^{(0)})$ при числе Фруда в качестве параметра, построенные Р. Н. Ньютоном по данным испытаний пяти моделей Д. А. Мур и Ч. А. Листер в дискуссии по докладу Р. Н. Ньютона привел аналогичную диаграмму, построенную по данным испытаний пяти моделей в резовом с коэффициентами общей полноты $\delta = 0,76-0,82$ при числах Фруда $Fr = 0,14-0,19$. Диаграмма воспроизведена на рис. 54.

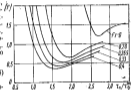


Рис. 53. Кривые $|F| = f(\tau_g^{(0)})$ быстрходных судов по условиям заливаемости.

Области, простирающиеся ниже и выше кривых [F], соответ-
ствуют благоприятным и неблагоприятным условиям плавания
в отношении заливаемости судна.

Подобные диаграммы можно использовать для определения зна-
чительного коэффициента c_0 по формуле (5.6). Предварительно, однако
их нужно перестроить и привести к виду $[F] = f(\lambda/L)$.

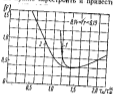


Рис. 54. Кривые $[F] \sim f(\lambda/L)$ по фор-
муле (5.6).
1 — миним. заливаемости; 2 — миним. критиче-
ского значения.

Как отмечалось, для типичных транспортных судов
максимальные значения рассматриваемого коэффициента
достигают величины $c_0 =$
 $\approx 2,4-2,6$. Можно показать,
основываясь на этих данных,
что при неблагоприятных
условиях плавания на регу-
лярном волнении (крутая
волна с длиной близкой дли-
не судна, курсовой угол
 $\alpha \approx 0$) заливание транспор-
тных судов с обычными зна-
чениями отношения λ/L не-
возможно.

В реальных условиях (см.
§ 4 главы третьей) вероятность
резонанса с волнами, представляемыми в частотном спектре волне-
ния, возрастает. Однако в целом условия плавания улучшаются,
в частности уменьшается заливаемость вследствие сглаживания
пиков на амплитудных кривых калевки и вертикальной качки.
Кроме того, при нерегулярном волнении амплитуды качки ста-
новятся величинами переменными. Поэтому, оценивая мореход-
ность судна на нерегулярном волнении, нужно исходить из обеспеченности явления заливаемости. Она выражается отношением
числа колебаний, при которых носовая оконечность судна погру-
жается в воду, к общему числу колебаний.

Под таким углом зрения вопрос о заливаемости судов рас-
смотрен в § 11 этой главы.

НЕРЕГУЛЯРНОЕ ВОЛНЕНИЕ

§ 11. ЗАЛИВАЕМОСТЬ СУДНА НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

В работе О. Краппингера (O. Krappinger) [1964] рассмотрен вопрос
о заливаемости открытых палуб судов различной длины на нерегу-
лярном волнении в предположении, что их надводный борт (миним-
альный) выбран в соответствии с правилами о грузовой марке.
Исследования О. Краппингера основаны на модельных экспериментах
и статистических данных, характеризующих волнение. Оно

охватывает суда, отличающиеся коэффициентом общей полноты,
соотношением главных размеров и формой обводов.

Для каждого варианта судна О. Краппингер определил (рис. 55)
вероятность W данного расстояния от верхней палубы до поверх-
ности волны $x = \zeta - \zeta_0$ у носового передела палубы, вероятность
сохранения сухой палубы W_0 , величину $x_{90\%}$, соответствующую
вероятности незаливания палубы, равной 90%.

Положив же волны по отно-
шению к судну устанавливал-
ось на носовом передела палубы
с учетом седловатости;
предполагалось, что судно
имеет бак.



Рис. 55. Схема к вопросу о залива-
нии судна.

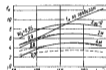
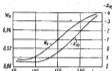


Рис. 56. Вероятность заливаемости нос-
овой оконечности судна в воду.

Для случая, рассмотренного на рис. 55, вероятность незалива-
ния палубы забортной водой равна 42%, а с вероятностью в 90%
можно утверждать, что носовая оконечность судна погружена
в воду не более чем на 2,8 м. Иначе говоря, можно рассчитывать,
что на 100 продольных колебаний этого судна придется 58 колеба-
ний, при которых забортная вода достигнет палубы, и 10 колеба-
ний, при которых она поднимется на 2,8 м выше палубы.

Рис. 56, заимствованный из работы О. Краппингера, относится
к серии судов со следующими показателями: $\delta = 0,7$; $L/B = 7,0$;
 $L/T = 17,5$; $B/T = 2,5$; $Ft = 0,2$. Относительный радиус кривизны
 $r/L = 0,26$. Форма шпангоутов в носовой оконечности U-об-
разная.

На верхней части рисунка приведены кривые W_0 , $x_{90\%} = f(L)$,
соответствующие предписанной высоте надводного борта, а на
нижней части рисунка — кривые $W_0 = f(L)$ при W_0 и x и кривые

параметров. Из рисунка следует, что при длине судна $L = 160$ м частота погружения носовой оконечности судна в воду выражается цифрой $(1 - W_0) = 5\%$. При $L = 260$ м судно не заливаётся, причём $(1 - W_0) = 0$; $X_{00} = -4$ м. Для малых судов длиной $L = 50-100$ м частота погружения носовой оконечности в воду составляет $(1 - W_0) = 10-11\%$.

При постоянной длине судна изменение коэффициента обдувки волноты и соотношений главных размерений влияет как на показатели качки, так и на регламентированную высоту надводного борта. В конечном счёте увеличение коэффициента δ и отношения L/B снижает заливаемость судна. Дополнительные сведения о заливаемости на нерегулярном волнении можно найти в работе К. Оши (K. Oshi) 119641.

§ 12. ВЛИЯНИЕ ОСТОЙЧИВОСТИ НА БОРТОВУЮ КАЧКУ

О влиянии начальной остойчивости и периода собственных поперечных колебаний судна на амплитуды бортовой качки можно получить представление

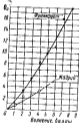


Рис. 57. Амплитуды качки судов «Франкфурт» и «Мадрид».

строены по точкам, соответствующим приблизительно резонансу. Для построения кривых обирались колебания, при которых отношение кажущегося периода волны к периоду собственных колебаний не выходило из пределов

$$\frac{T_0}{T_1} = 0,8 - 1,2.$$

по диаграмме, приведенной в работе В. Мёсла (W. Möslé) 119411. Диаграмма, на которой составлены показатели качки пароходов «Франкфурт» и «Мадрид», воспроизведена на рис. 57. Судя, к которым она относится, можно охарактеризовать следующими показателями.

Показатели судов	«Франкфурт»	«Мадрид»
Длина L , м	133,2	133,5
Ширину, м	17,1	17,4
Высота борта, м	11,2	14,2
Период T_0 , сек.	10,3	19,2

Оба судна мало отличались друг от друга главными размерениями, но период свободных поперечных колебаний парохода «Мадрид» на 86% превосходит период колебаний парохода «Франкфурт».

Кривые, приведенные на рис. 57, выражают зависимость амплитуды качки от силы волнения в баллах. Они построены по точкам, соответствующим приблизительно резонансу. Для построения кривых обирались колебания, при которых отношение кажущегося периода волны к периоду собственных колебаний не выходило из пределов

Из рисунка можно усмотреть, что при одинаковой балльности моря амплитуды качки более остойчивого судна оказались свыше чем в два раза большими, чем амплитуды качки менее остойчивого судна. Тут сказались влияние остойчивости и периода T_0 как на соотношения качки, так и на резонансные соотношения.

Данные о судах «Франкфурт» и «Мадрид» характеризуют поведение обоих судов в условиях резонанса. Некоторое представление о поведении судов в обычных условиях плавания можно получить из данных, приведенных в докладе Л. Вуррилла (L. Wurriell) 119311, которые характеризуют морелодные качества небольших грузовых судов каботажного плавания. Они были собраны в 1928—1929 гг. на семи судах различного типа в течение 26 рейсов (достаточно полные данные есть только о шести судах). Суда были длиной от 70 до 165 м и принадлежали к трехпалубному и квартердечному типам с машинным отделением, расположенным в средней части судна и в корме. Их месящатрическая высота лежала в пределах 0,34—0,82 м при плавании в грузу и в пределах 1,16—1,53 м — в балластном пробеге.

Данные, заимствованные из рассмотренной работы, были использованы автором [1955] для построения диаграммы, характеризующей зависимость амплитуды бортовой качки от периода собственных поперечных колебаний и приведенной на рис. 58. Из рисунка следует, что при увеличении периода T_0 с 6 до 12 сек., т. е. в два раза, амплитуда качки уменьшалась в 6—7 раз.

Также и в данном случае изменение остойчивости и периода сказывалось на амплитуде качки не только непосредственно, но и косвенным образом вследствие изменения резонансных соотношений.

Интересно также отметить, что при одинаковых примерно периодах T_0 , равных 7,6—7,8 сек., точки, относящиеся к балластным пробегам, лежат значительно выше точек, соответствующих грузовым пробегам. Это значит, что после разгрузки судна, когда его центр тяжести перемещался вверх, амплитуда качки возрастала, несмотря на увеличение отношения B/T даже тогда, когда период T_0 оставался неизменным.

Этот результат согласуется с выводами, к которым пришла В. А. Моренвальд [1955] при рассмотрении вопроса о влиянии возмущения центра тяжести судна на бортовую качку.

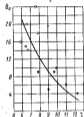


Рис. 58. Амплитуды качки судов каботажного плавания в грузовом (●) и балластном (○) пробеге.

§ 13. АМПЛИТУДНЫЕ ГРАФИКИ

Амплитудными называют графики, выражающие зависимость коэффициента динамичности качки на регулярном волнении от отношения частоты (или кажущейся частоты) волны к собственной частоте судна при коэффициенте сопротивления качке в качестве параметра. Для амплитудных графиков, отображающих регулярное волнение, характерны резко выраженные пики при значении относительной частоты волны, соответствующий резонансу.

Строго говоря, понятие резонанса не применимо к нерегулярному волнению. Все же мы будем условно считать, что нерегулярный пикка совершается в условиях резонанса, если частота собственных колебаний судна равна частоте, соответствующей максимуму частотного спектра волнения.

В качестве примера на рис. 59 приведен амплитудный график учебного судна, замасштабированный из работы Като Х., Мотора С., Ишикава К. (Kato H., Motora S., Ishikawa K.) [1967]. При построении графика были использованы данные испытаний модели судна в открытом водоеме на нерегулярном волнении. Во время испытаний фиксировалась давление истра, колебавшаяся

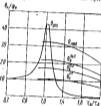


Рис. 59. Коэффициенты динамичности бортовой качки судна на регулярном и нерегулярном волнении.

уровня воды, амплитуды бортовой качки модели. Кроме того, модель была испытана в открытом бассейне на регулярном волнении.

Длина модели 2,0 м, вес 40,2 кг, средняя осадка 10,8 см. Период собственных поперечных колебаний изменялся во время испытаний в пределах 0,95—2,40 сек.

На графике показаны кривые коэффициентов динамичности качки, соответствующие регулярному и нерегулярному волнению. Последние даны для средних амплитуд качки $\theta_0^{(1)}$, значительных амплитуд $\theta_0^{(10)}$, средних из 1/10 максимальных амплитуд $\theta_0^{(10)}$ и максимальных из 1000 амплитуд.

Первые три кривые, наиболее интересные в настоящем случае, рисуются значительно ниже пика амплитудной кривой, соответствующей регулярному волнению. Это показывает, что нерегулярность волнения — фактор, приводящий к снижению амплитуд качки. С другой стороны, на нерегулярном волнении значительно расширяется интервал частот, при которых ощущается

резонанс. Поэтому все пики кривой регулярного волнения нерегулярность колебаний приводит к ужесточению качки.

В заключение отметим, что при построении амплитудного графика можно считать период собственных колебаний судна величиной переменной или постоянной. В первом случае для построения амплитудного графика можно исходить из какого-либо определенного спектра волнения. Во втором случае необходимо рассчитать качку для ряда частотных спектров. Вследствие различной постановки задачи графика не будут идентичными.

§ 14. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУД КАЧКИ

Методика расчета качки при нерегулярном волнении, изложенная в предыдущей главе, основывается на предположении, что амплитуды качки распределяются в соответствии с законом Рэлея. Приемлемость этого допущения подтверждается материалами, опубликованными в ряде работ. В частности об этом свиде-

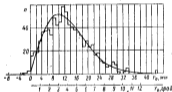


Рис. 60. Распределение амплитуд качки траулера.

тельствует рис. 60, на котором экспериментальная гистограмма распределения амплитуд бортовой качки траулера сопоставлена с теоретической кривой, отображающей закон Рэлея. Рисунок заимствован из работы Н. Б. Севастьянова [1963].

При решении некоторых практических задач возникает вопрос о соотношениях между максимальными θ_m и средними $\theta_0^{(1)}$ амплитудами бортовой качки. Практически величина $\theta_m/\theta_0^{(1)}$ зависит от того, что понимается под максимальными амплитудами. Так, например, если принять в качестве максимальных амплитуды с обеспеченностью в 1,0 или 0,1%, то при распределении Рэлея

$$\frac{\theta_m}{\theta_0^{(1)}} = 2,43; \quad \frac{\theta_{0,1\%}}{\theta_0^{(1)}} = 2,96.$$

В курсе катки А. Н. Крылова [1951] приведены данные, полученные во время испытаний парохода «Метеор», которые были проведены в 1913 г. комиссией под председательством А. Н. Крылова. Эти данные были использованы для некоторых сопоставлений в работе автора [1955], откуда заимствована лодарная диаграмма амплитуд бортовой катки парохода «Метеор», приведенная

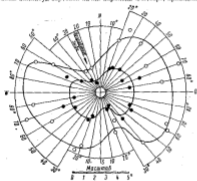


Рис. 61. Полярная диаграмма амплитуд бортовой катки парохода «Метеор».

на рис. 61. Диаграмма построена по данным испытаний, проведенных 22 марта 1913 г. По радиусам-векторам диаграммы, из которых каждый соответствует определенному курсовому углу, отложены максимальные и средние амплитуды катки по отдельным галсам. Для испытаний в целом

$$\frac{\theta_m}{\theta_{\text{ср}}} = 2,2 - 2,4,$$

где θ_m и $\theta_{\text{ср}}$ — максимальные и средние амплитуды катки, полученные усреднением максимальных и средних цифр по отдельным галсам. Для отдельных галсов рассматриваемое соотношение изменится в более широких пределах.

На рис. 62 и 63 приведены эквалентные диаграммы, отображающие катку трех экваторных широтностей. Диаграмма

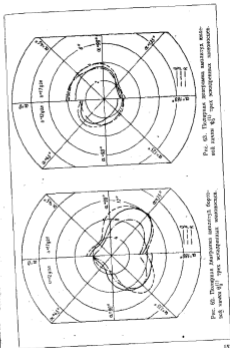


Рис. 63. Эквалентная диаграмма амплитуд катки катки $\theta_{\text{ср}}^{\text{ш}} \theta_{\text{ср}}^{\text{ш}}$ трех экваторных широтностей.

Рис. 62. Эквалентная диаграмма амплитуд бортовой катки $\theta_{\text{ср}}^{\text{ш}} \theta_{\text{ср}}^{\text{ш}}$ трех экваторных широтностей.

заинтересованы работы В. Х. Варвикова и М. Сен-Дени (W. H. Warwick and M. St. Denis) [1957]. Первая из них относится к бортовой, а вторая — к килевой качке. По радиусам полярных диаграмм отложены средние амплитуды качки на $1/10$ максимальных амплитуд при скоростях хода, равных 12 узл. (в левой половине) и 17 узл. (в правой половине диаграмм).

Характерная особенность всех трех приведенных диаграмм заключается в том, что амплитуды качки, достигнув максимума при каком-либо курсовом угле, медленно уменьшаются в направлении относительно больших или меньших курсов. Так, например, для эскадренного миноносца Р, движущегося со скоростью 17 узл. амплитуда бортовой качки, равная $12''$ при курсовом угле $\alpha = 130^\circ$, уменьшается до $8''$ лишь после изменения курса на $\pm 40^\circ$.

Для нерегулярной качки характерно также то, что бортовая качка обычно не затухает при курсовых углах $\alpha = 0$ и $\alpha = 180^\circ$, а килевая — при курсовом угле $\alpha = 90^\circ$.

§ 15. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ КАЧКИ

Натурные испытания судов позволили установить, что средний период бортовой качки на нерегулярном волнении обычно мало отличается от собственного периода поперечных колебаний судна. Для килевой качки эта закономерность сохраняется лишь при сравнительно малых кажущихся периодах τ_c . При больших же значениях τ_c периоды килевой качки сближаются с кажущимся периодом волны.

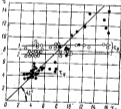


Рис. 64. Периоды τ_c бортовой (○) и килевой (●) качки траулера.
1 — возмущение с периодом τ_c ; 2 — период τ_k качки траулера.

В ряде собственных поперечных колебаний судна при различных нагрузках. Вдоль этих данных группируются точки, характеризующие периоды бортовой качки при этих состояниях нагрузки. Точки, характеризующие периоды килевой качки, ложатся частично вдоль горизонталей, соответствующих

первому собственным колебаниям траулера τ_0 , а частично — вдоль прямой, проведенной под углом в 45° к осям координат.

Н. В. Севастьянов [1953 б], исследовавший вопрос о распределении периодов бортовой качки,² показал, что средняя частота качки тем ближе к собственной, чем меньше демпфирование качки. В пределе при сопротивлении, близком нулю, имеет место строгое равенство частот собственных и вынужденных колебаний. Существенное отличие средней частоты от собственной возможно лишь в тех случаях, когда резонансная для данного судна составляющая волнения обладает малой энергией.

Добавим, что отступления от этой закономерности, наблюдаемые при килевой качке, можно частично объяснить более высокими коэффициентами демпфирования продольной качки. С другой стороны, для килевой качки величина отношения τ_c/τ_0 часто оказывается значительной. Оба эти обстоятельства снижают коэффициент динамичности, что в конечном счете может создать условия, при которых судно в своем колебательном движении следует за волной. Естественно, что в подобных случаях период килевой качки близок к кажущемуся периоду волны.

При других условиях средние периоды килевой и равным образом вертикальной качки также оказываются близкими соответствующим периодам свободных колебаний судна. В качестве примера на рис. 65 приведена диаграмма распределения периодов бортовой, килевой и вертикальной качки парохода «Сан-Франциско». Построенная на основании данных, рассмотренных в работе Т. Хорна (T. Horn) [1936], она была приведена в работе автора [1953].

По оси абсцисс диаграммы отложены периоды качки, а по оси ординат — число колебаний в течение одного часа. Пики кривых соответствуют приблизительно периодам собственных поперечных, продольно-угловых и вертикальных колебаний судна, причем эта закономерность проявляется более точно при бортовой качке.

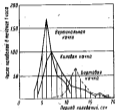


Рис. 65. Распределение периодов бортовой, килевой и вертикальной качки парохода «Сан-Франциско».

² См. также работу А. Н. Тузова [1957].

На рис. 66 приведена гистограмма распределения периодов бортовой качки рыболовного траулера, замаскированная из отчетной работы Н. В. Севастьянова. Рисунок показывает, что наиболее повторяемостью отличаются периоды качки в пределах 7,0—7,5 сек. Эти цифры приблизительно совпадают с периодом собственных колебаний траулера, который назывался во время испытаний в пределах 7,3—8,0 сек.



Рис. 66. Распределение периодов качки траулера.

ными, не выходя из пределов значений собственных периодов T_0 . По отдельным же галсам отклонения периодов качки от средних цифр за испытание достигают $\pm 10\%$.

С увеличением числа наблюдений расхождение между периодом собственными колебаниями и средним периодом вынужденных колебаний судна уменьшается. В качестве примера, иллюстрирующего это положение, иллюстрирующего это положение, в табл. 17 приведены данные о периодах качки парохода «Метор». Эти данные были собраны во время испытаний, уже отмеченных в предыдущем параграфе.

В таблице для трех испытаний указаны периоды бортовой качки судна в среднем по каждому галсу и в среднем за испытание. На каждый галс приходилось 40—50 размахов. Периоды собственных колебаний судна изменялись во время испытаний в пределах $T_0 = 12—13$ сек. Средние периоды качки за испытание, оказавшиеся стабильными, не выходя из пределов значений собственных периодов T_0 .

Таблица 17

Периоды качки парохода «Метор»								
№ галсов	1-е испытание		2-е испытание		3-е испытание		Средние периоды	
	14 (11) размахов	22 (9) размахов	21 (9) размахов	24 (9) размахов	14 (11) размахов	22 (9) размахов		
1	12,6	13,7	11,3	7	12,5	13,5	12,0	
2	12,3	11,8	11,8	8	10,9	12,4	13,2	
3	12,0	11,8	12,0	9	11,8	12,0	—	
4	12,5	11,2	12,7	10	12,0	12,2	—	
5	11,5	13,2	13,0	11	11,5	11,7	—	
6	10,9	12,0	13,5	12	12,5	12,0	—	
					Средние периоды	12,1	12,3	12,3

Отметим также, что значительное рассеивание периодов качки наблюдается лишь при козюбинках, совершающихся с малыми амплитудами. По мере же увеличения амплитуд периоды качки приближаются к среднему периоду.

Детальные расчеты бортовой качки судна на нерегулярном волнении позволяют определить наряду со статистическими амплитудами качки средние периоды качки и средние значения угловых скоростей в ускорении. При качественной же оценке бортовой качки судна на нерегулярном волнении можно исходить из предположения, что характерные периоды бортовой качки равны периоду собственных поперечных колебаний судна.

Пусть $(\theta)_{\text{кр}}$ — характерная амплитуда бортовой качки (например трехпроцентной обеспеченности). Тогда исходя из предположения, что для каждого единичного колебания действительная формула (3.50), можно принять в качестве характерных угловых скоростей и ускорений

$$\begin{aligned} (\dot{\theta})_{\text{кр}} &= \frac{2\pi}{T_0} (\theta)_{\text{кр}}; \\ (\ddot{\theta})_{\text{кр}} &= -\frac{4\pi^2}{T_0^2} (\theta)_{\text{кр}}. \end{aligned} \quad (5.06)$$

Эти формулы аналогичны формулам (3.54), которые в условиях регулярного волнения действительны лишь при резонансе. Поэтому соображения о важности периода собственных поперечных колебаний судна на его морозолость при регулярном волнении, приведенные в главе третьей, справедливы и в случае нерегулярного волнения.

Закономерности, рассмотренные в этом параграфе, имеют и другое важное значение. Не будучи вполне точными, они позволяют с допустимой погрешностью оценить начальную метацентрическую высоту по среднему периоду бортовой качки. Не останавливаясь на этом вопросе, отметим, что он рассматривается в ряде работ, и в частности в работе Н. В. Севастьянова, отмеченной в этом параграфе.

Дополнительные сведения о распределении периодов качки и о взаимосвязи периодов и амплитуд можно найти в работе В. Г. Зиньковского-Горбатенко (1965а).

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ОСТОЙЧИВОСТИ СУДНА

§ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Рассматривая остойчивость судна с практической точки зрения, мы сталкиваемся прежде всего с вопросом о нижнем ее пределе, обусловленном требованиями безопасности плавания. Исходя из этого критерия, остойчивость судна должна признаваться достаточной, если совместно действие возмущающих сил, возникающих на волнении, и других внешних сил, действующих на судно в бурную погоду, не может привести к опрокидыванию судна. Некоторый минимум начальной остойчивости необходим также для предотвращения чрезмерной калекости судна.

Проблема, о которой идет речь, недостаточно еще изучена теоретически и экспериментально. Это относится прежде всего к механизму опрокидывания судна на шквалованном волнении. Недостаточно исследован также вопрос о гидродинамических силах, возникающих во время ветрового дрейфа и изменяющихся в процессе наклона судна. То же самое можно сказать и о ветровом кренящем моменте. Кроме того, говоря о внешних силах, действующих на судно, мы в лучшем случае можем назвать предельные или средние цифры, которыми они выражаются. Между тем, для получения выводов, имеющих практическое значение, следовало бы исходить из вероятных комбинаций внешних сил.

Значительно осложняет рассматриваемую задачу также отсутствие необходимой ясности и в вопросе о степени безопасности, которая может быть реально достигнута на судне данного типа и размеров. В частности, нужно считать с огромной разрушительной силой воды, возникающей при большой силе ветра. Волны, заливающие судно, способны разрушать конструкции, расположенные на палубе, в некоторых случаях, когда суда гибнут во время шторма вследствие попадания воды внутрь корпуса, хотя их остойчивость в неповрежденном состоянии была достаточной. Это значит, что при известных условиях диметрирующее значение может иметь прочность конструкций, а не остойчивость судна.

Вследствие описанных обстоятельств требования, которые предъявляются к остойчивости морских судов, основаны главным образом на статистических исследованиях. Такие исследования

охватывают как суда, признанные достаточно остойчивыми, так и суда малоостойчивые и погибшие от недостатка остойчивости.

Наряду с вопросом о минимальной остойчивости судна возникает вопрос об оптимальной остойчивости, поскольку чрезмерное увеличение начальной метастатической высоты ухудшает мореходность судна. Вторая задача также отличается большой сложностью, однако в некоторых отношениях она проще, чем задача, возникающая перед последователем, работающим в области нормирования остойчивости судов. Действительно, не прибавляясь чрезмерно к спорным предельным цифрам, можно всегда спроектировать судно, остойчивость которого не вызывает сомнения.

§ 2. ОБЗОР ДЕЙСТВУЮЩИХ СИЛ И КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АВАРИЯХ

Ветровая нагрузка — фактор, который в первую очередь оказывается при проверке остойчивости судна. Влияние давления ветра определяется с учетом бортовой калекки, поскольку воздействием обоих факторов проявляется совместно.

На увеличанном море остойчивость судна непрерывно изменяется во времени вследствие изменения уровня воды вдоль корпуса. В частности, на первом гребневом волне остойчивость судна может значительно снизиться, если его длина мало отличается от длины волны. Изменения дифферента и попеременное погружение в воду носовой и кормовой оконечности судна вследствие калекки и вертикальной качки также вызывают колебания остойчивости судна. Некоторые благоприятные влияния на остойчивость более или менее быстродвижных гражданских судов могут оказывать корабельные волны (когда носовая и кормовая волны становятся достаточно большими), однако при очень остром обводке остойчивость судна на ходу может снижаться.¹

Вопрос об инерционных силах, проявляющихся на циркуляции, имеет существенное значение при проектировании сравнительно быстродвижных судов, поскольку в случае неблагоприятного стечения обстоятельств значительный крен, возникающий в этих условиях, может поставить судно в тяжелое положение.

Крен судна может вызываться смещением сыпучих или навалочных грузов, затоплением палубы (если вода не успеет достаточно быстро слиться через штормовые отверстия), неравномерным расходованием топлива и воды и др. Неблагоприятно сказывается на остойчивости судна обледенение палубы и надстроек

¹ По В. В. Образцову [1966] влияние скорости ветра на остойчивость судна является критическим при $U \geq 0,25$, определяется значением α $\alpha = 0,25$ и становится критическим при $U \approx 0,50$. Эти результаты были получены В. В. Образцовым экспериментально. В В. В. Соколов-Три-Шанский [1961] рассмотрен вопрос теоретически, исходя из анализа допустимой об обледенениях дефлекторов на корпус при движении судна.

при плавании в высоких широтах. Свободные урны в отсеках с людьми грузами также снижают остойчивость судна.

Остойчивость пассажирских судов должна дополнительно проверяться в предположении, что пассажиры сложились на одном борту. Этот расчетный случай имеет особенно большое значение при проектировании небольших пассажирских судов местного сообщения, перевозящих значительное число пассажиров. Поскольку наклонные судна на 12° уже вызывает пантику среди пассажиров, предельный угол крена, подчитанный в этих условиях, не должен превышать $8-10^\circ$. Допускаемый угол крена при сложении пассажиров на одном борту должен быть ограничен в еще большей степени, если это необходимо для того, чтобы предотвратить возможность затопления внутренних отсеков судна через нижний ряд открытых иллюминаторов.

Буксирные суда должны быть достаточно остойчивыми для того, чтобы противостоять рычкам буксирного троса, когда он располагается под некоторым углом к диаметральной плоскости. Особые требования, предъявляемые к остойчивости промысловых судов, определяются специфическими условиями промысла.

Если к судну предъявляются требования, связанные с непогодостойкостью, необходимо обеспечить аварийную остойчивость, которая может иметь доминирующее значение и диктовать требования к остойчивости судна в непогрязенном состоянии. Так обстояло дело с судами, отличающимися сравнительно большими значениями отношения B/T (например пассажирские суда). Объясняется это тем, что по мере увеличения отношения B/T остойчивость судна в аварийных условиях снижается более интенсивно. Подробно этот вопрос рассмотрен в курсе автора [1955].

В заключение оставимся выразить за статистических данных о потерях судов. Такие данные, публикуемые периодическими Английским Ллойдом, систематизированы Ч. В. Манлем (C. V. Manley) в ряде работ, и в частности в работе [1965], которая охватывает морские стальные торговые суда с валовой вместимостью более 100 рег. т, кроме специализированных судов (промысловых, буксирных и пр.). Судя из данных на группы в зависимости от причин, вызвавших аварию.

К первым трем группам относятся суда, погибшие от пожаров, столкновений и разрушений при посадке на грунт. Последняя группа охватывает суда, покинутые командой, затопленные и пропавшие без вести. Метод исключения приводит к выводу, что это — суда, потерпевшие аварию вследствие недостатка остойчивости. В некоторых случаях могли сказаться какие-либо сопутствующие обстоятельства, например попадание воды во внутренние отсеки вследствие неисправности трубопроводов.

На протяжении $2\frac{1}{2}$ лет от начала 1961 до середины 1963 г. количество судов, габнующих ежегодно от недостатка остойчивости составляло по Манлею в среднем 0,15% от всего флота.

зарегистрированных судов. Из них 76% приходится на суда длинной менее 61 м [200], несмотря на то, что их число составляло лишь 35% от всех зарегистрированных судов. Подобные суда используются обычно в малом кботаже.

Преимущество судов большого тоннажа можно объяснить тем, что с увеличением размеров судна восстанавливающие моменты возрастают быстрее, чем кренящие. Так, для геометрически подобных судов восстанавливающие моменты являются пропорционально четвертой степени линейных размеров, а кренящие моменты — от давления ветра — пропорционально кубу линейных размеров. Для гражданских судов имеет существенное значение и то обстоятельство, что отношение высоты борта к осадке возрастает с увеличением размеров судна. Необходимо, наконец, отметить, что неблагоприятное влияние попутного волнения сказывается лишь на остойчивости небольших судов.

Как показано в рассматриваемой работе, аварины от недостатка остойчивости подержаны в основном суда с минимальным надводным бортом при длине надстроек, меньше 50% от длины судна. Это большей частью суда, перевозящие навалочные грузы (уголь, кокс, руду, цемент) и сыпучие грузы. Ряд тяжелых аварий явился следствием потери остойчивости при попадании воды внутрь корпуса вследствие плохого состояния люковых брезентов и закрытых вентиляторов, неисправности трубопроводов и пр.

§ 3. ОБРАЗОВАНИЕ КРЕНЯЩЕГО ВЕТРОВОГО МОМЕНТА

Упрощенная схема явления. Вопрос об образовании ветрового кренящего момента на тихой воде рассмотрен в работах К. К. Федоскина — Г. А. Фирсова [1957] и С. Н. Благовещенского [1965а] в предположении, что быстро нарастающее давление ветра в шквале приложено к судну, находящемуся в состоянии равновесия. Ниже этот вопрос изложен в общих чертах для того, чтобы вознест сущность явления. Как и в упомянутых работах, явление качки на образование кренящего момента в действительности не учитывается и, кроме того, предполагается, что судно не имеет хода. Не принимаются во внимание аэродинамические и гидродинамические силы перпендикулярной природой, поскольку, как показано в первой из упомянутых работ, они малы по сравнению с аналогичными силами неперпендикулярной природы.

На рис. 67 приведена схема сил, возникающих при шквале, на которой буквой P обозначена проекция аэродинамической силы неперпендикулярной природой (предполагается, что сила направлена перпендикулярно к диаметральной плоскости судна). Под R' понимается гидродинамическая сила неперпендикулярной природой, зависящая от скорости ветрового дрейфа, формы судна и угла крена. Поскольку в общем случае сила R' направлена наклонно к диаметральной плоскости судна, точка приложения горизонтальной

проекция R гидродинамической силы может быть расположена как в центре тяжести судна, так и ниже или (как показано на схеме) выше центра тяжести.

При продувке моделей кренящий момент Rz_x определяют относительно плоскости грузовой палатки. Для перехода к моменту, отсчитываемому от центра тяжести судна (см. рис. 67), необходимо умалить плечо z_x на величину

$$b = (z_x - T) \cos \theta.$$

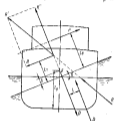


Рис. 67. Сила действующая на при крене.

ного инальде судно получает угловую скорость и вступает во второй период с некоторым углом крена.

Как показывают практические расчеты, первый период не оказывает существенного влияния на конечные результаты, что позволяет исключить его из рассмотрения.

На протяжении второго периода боковой дрейф и вращение судна описываются уравнениями

$$(M + \lambda_y) \frac{dy}{dt} + R - P = 0; \quad (6.01)$$

$$(J_x + \lambda_y) \ddot{\theta} + N\dot{\theta} + Rz_x - P(z_x - b) + Dl(\theta) = 0, \quad (6.02)$$

в которых, наряду с обозначениями, показанными на рис. 67, приняты следующие обозначения:

M — масса судна;

J_x — момент инерции массы судна относительно продольной оси, проходящей через центр тяжести;

y — скорость дрейфа;

N — коэффициент сопротивления вращению судна;

λ_y, λ_m — присоединенная масса и присоединенный момент инерции воды.

Первый член в уравнении (6.01) выражает силу инерции, вычисленную с учетом присоединенной массы воды. В уравнении (6.02) наряду с моментами сил R и P введен момент силы инерции $(J_x + \lambda_y) \ddot{\theta}$, момент сопротивления вращению судна $N\dot{\theta}$ и восстанавливающий момент $Dl(\theta)$.

Сила P зависит от скорости ветра, а сила R — от скорости дрейфа. Кроме того, силы P и R , как равным образом и плечи z_x и b , являются функциями угла крена. От угла наклона зависят также коэффициенты λ_y и λ_m .

В общем случае систему дифференциальных уравнений (6.01) и (6.02) можно решить численным интегрированием.

Пренебрегая влиянием второго периода образования кренящего момента, мы тем самым предполагаем, что на протяжении второго периода сила давления воды возрастает от нуля до ее конечного значения $R = P$, при котором сила инерции обращается к нулю. В дальнейшем судно дрейфует с постоянной скоростью хода. После обращения к нулю первой и второй производной по углу θ дрейф происходит при постоянном угле крена и, как это следует из формулы (6.02), кренящий момент определяется зависимостью

$$Pl_p = Dl(\theta), \quad (6.03)$$

где $l_p = z_x - b = z_x$ — расстояние между линиями, по которым действуют силы P и R . Поэтому угол максимального статического крена $\theta_{ст}$ можно определить, как это обычно и делается, по диаграмме устойчивости.

С. Н. Благосветский [1965] нашел, что крен $\theta_{ст}$ образуется на протяжении промежуточной времени $t \approx 0,6t_p$.

Перейдем к более подробному рассмотрению действующих сил. Кренящие моменты. Аэродинамические силы и моменты выражаются формулами

$$P = \rho S_y - c_p(\theta) \frac{\rho v}{2} S_y v^2; \\ M = Pz_x = c_m(\theta) \frac{\rho v}{2} S_y z_x v^2, \quad (6.04)$$

где $c_p(\theta)$ и $c_m(\theta)$ — безразмерные коэффициенты поперечной силы и момента; S_y — площадь тарусности или, иначе говоря, площадь проекции надводной части судна на диаметрально плоскость; v — скорость воздушного потока; $\rho_a = 0,125 \text{ кг} \cdot \text{сек}^{-3} \cdot \text{м}^{-3}$ — расчетная плотность воздуха при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 15°C .

По данным отечественных и иностранных продувок в породали-мических трубах численные значения коэффициента c_m соответствующие максимальной поперечной силе, для понаклоненного судна не выходят обычно из пределов $c_m = 1,1-1,3$. В отечествен-

ной практике при рассмотрении вопросов устойчивости гражданских судов обычно принимают $c_{\theta} = 1,3$.

Коэффициент момента ненаклоненного судна выражается приблизительно следующими цифрами: $c_{\theta} = 1,2$ — для быстроходных судов; $c_{\theta} = 1,3-1,4$ — для пассажирских и рыболовных судов.

В работе К. К. Федосеева и Г. А. Фирсова [1957] приведены данные о аэродинамических характеристиках быстроходных судов с коэффициентами облей водного $\delta = 0,50-0,65$. Учитывая, что коэффициент аэродинамической силы во время проведения испытаний изменялся при наклонении модели в небольших пределах, авторы работы предлагают рассмотреть его как величину постоянную. Для отношения же $c_{\theta}(\theta)/c_{\theta}$ авторы дают формулу

$$\frac{c_{\theta}(\theta)}{c_{\theta}} = 1 - 0,31(\theta).$$

В последней формуле под θ понимается угол крена под ветер, выраженный в радианах. В другом источнике указано, что эта формула действительна при наклонении судна до 40° .

В работе М. Ямагата (M. Yamagata) [1959] приведены формулы, арддинамические для определения коэффициентов c_{θ} и $c_{\theta}(\theta)$ при наклонении рыболовных и пассажирских судов на ветер и против ветра. Формулы обобщают результаты, полученные при продувке 16 моделей в аэродинамической трубе.

Ниже для различных углов наклоения на ветер и против ветра приведены цифры, вытекающие из формул, приведенных в отнесенной работе.

Отношение $c_{\theta}(\theta)/c_{\theta}$ изменялось при наклонении судна так:

Угол наклоения	Рыболовные суда					
	0	10°	20°	30°	37°	
Крен	под ветер	1,00	0,94	0,87	0,78	0,65
	против ветра	1,00	1,05	0,98	0,89	0,73

Угол наклоения	Пассажирские суда					
	0	10°	20°	30°	37°	
Крен	под ветер	1,00	0,94	0,88	0,75	0,68
	против ветра	1,00	1,06	1,02	0,78	0,48

Отношение $c_{\theta}(\theta)/c_{\theta}$ изменялось в функции угла крена следующим образом:

Угол наклоения	Рыболовные суда					
	0	10°	20°	30°	37°	
Крен	под ветер	1,00	0,98	0,88	0,58	0,41
	против ветра	1,00	0,94	0,80	0,52	0,29

Угол наклоения	Пассажирские суда				
	0	10°	20°	30°	37°
Крен	1,00	0,98	0,81	0,63	0,31

Судя по приведенным цифрам давление воздуха на надводную часть рыболовных и пассажирских судов и момент, соответствующий этому давлению, существенно уменьшаются по мере увеличения угла наклоения под ветер. При наклонении же судна на ветер коэффициент поперечной силы вначале увеличивается, а затем уменьшается, а во время, как коэффициент момента уменьшается также и при наклонении судна на ветер.

По К. Венделю (K. Wendel) [1958], независимо от типа судна, можно определять отношение $c_{\theta}(\theta)/c_{\theta}$ для наклонений под ветер по формуле

$$\frac{c_{\theta}(\theta)}{c_{\theta}} = 0,25 + 0,75 \cos^2 \theta.$$

По нормам же устойчивости Югославии для пассажирских судов

$$\frac{c_{\theta}(\theta)}{c_{\theta}} = \cos \theta + 0,25 \sin \theta.$$

Ранее часто пользовались формулой

$$\frac{c_{\theta}(\theta)}{c_{\theta}} = \cos^2 \theta,$$

основывающейся на некоторых упрощенных допущениях.

В отечественной практике критический момент большей частью рассматривают как величину постоянную, что может быть в известной мере оправдано соображениями, приведенными в конце настоящего параграфа.

Гидродинамическая сила. Выразим горизонтальную составляющую давления воды в дрейфе равенством

$$R = c_{\theta}(\theta) \frac{\rho}{2} S u_{\theta}^2,$$

где $c_{\theta}(\theta)$ — безразмерный коэффициент поперечной гидродинамической силы; S — площадь диаметра; u_{θ} — скорость бокового дрейфа; ρ — плотность морской воды. Для морских судов при $\theta = 0$ коэффициент гидродинамической силы не выходит обычно из пределов $c_{\theta} = 0,85-0,95$. Меньшая цифра относится к буксирам, а большая — к быстроходным судам. В курсе П. А. Лаухтина и Я. И. Войткевича [1953] указывается, что для модели буксира, наклоненной в сторону дрейфа на угол $\theta = -15^{\circ}$ были получены цифры $c_{\theta}(\theta)/c_{\theta} = 0,70-0,77$.

Существенное значение при исследовании устойчивости судна имеет вопрос о точке приложения сопротивляясь дрейфу. Некоторые данные по этому вопросу, полученные путем испытания моделей быстроходных судов, приведены в отнесенной выше работе К. К. Федосеева и Г. А. Фирсова. В дальнейшем изложении используются лишь данные, относящиеся к судам, снабженным скуловыми килем, так как результаты, полученные для судов,

не имеющих боковых килях, ставится авторами работы под сомнение вследствие трудности удовлетворить в эксперименте требования подобия.

Отметим, что для судов с отношением $B/T = 2,2$ в тех случаях, когда модель не имела хода, возмущение z точки приложения силы R (считая по вертикали) изменялось от $z = 1,0T$ при $\theta = 0$ до $z = 1,8T$ при $\theta = 30^\circ$. Увеличение отношения B/T существенного влияния на результаты не оказывало.

При скоростях хода, соответствующих числу Фруда $Fr = 0,6$, возмущение точки приложения силы R замедленно движется от $z = 0,5T$ при $\theta = 0$ до $z = 1,6T$, когда угол крена достигал 45° . При дальнейшем наклонении судна перемещение точки приложения давления воды приостанавливалось, а затем ордината z начинала снижаться.

Авторы отмечают, что при числе Фруда $Fr < 0,3$ центр давления воды лежал приблизительно на половине осадки.

Все эти данные относятся к судам с большими отношениями L/B и малыми коэффициентами обшивки полноты.

Данные, характеризующие влияние некоторых факторов на положение центра давления воды во время дрейфа судна, приведены также в работе А. Н. Шабалова (1934б). Они были получены путем испытания трех серий моделей, не имеющих хода. Первая серия состояла из четырех моделей прямоугольных тоннонов, вторая серия — из трех стематизированных моделей с переменным коэффициентом полноты поперечных сечений, а третья серия — из четырех моделей речных судов. Ниже даны скорости дрейфа $\beta = 0,2$ м/сек приложенные данные, характеризующие влияние изменения отношения B/T и коэффициента β . Цифры, относящиеся к первым двум сериям, сняты с графиков А. Н. Шабалова.

B/T	2,0	2,5	3,0	3,5	3,9	3,0
β	1,0	1,0	1,0	1,0	0,785	0,790
$\alpha T - 1$	+0,3	0	-0,3	-0,6	-0,3	+0,2

Приведенные цифры показывают, что в рассмотренном случае центр давления воды перемещался вниз по мере увеличения отношения B/T и коэффициента β .

О влиянии изменения полноты судна на положение центра давления воды в тех случаях, когда судно не имеет хода) можно судить также по отмеченной выше работе М. Ямагачи. Для судов с боковыми килем и без них этот автор получил следующие значения отношения $\xi_{\text{киль}} = \xi_{\text{киль}} = (z - T)/T$:

δ	0,704	0,670	0,526	0,600
$\xi_{\text{киль}}$	0,20	0,37	0,77	1,06
$\xi_{\text{киль}}$	0	0,38	0,67	1,36

Таким образом, и в этом случае центр давления воды перемещался вверх по мере увеличения полноты судна.

Аналогичные данные, полученные путем испытаний моделей судов различного типа (без хода) приведены в книге С. Тамия и С. Мотора (S. Tamia and S. Matora) (1960). Во всех случаях, рассматриваемых этими авторами, центр давления воды перемещался вверх по мере увеличения скорости дрейфа, притом тем интенсивнее, чем толще была модель.

Коэффициенты присоединенной массы и присоединенного момента вверху воды, как это следует из работы А. Н. Шабалова (1964), также изменяются (но не в большой степени) в зависимости от угла крена.

Общие выводы. Практические данные, приведенные в настоящем параграфе, показывают, что по мере наклона судна в сторону дрейфа кренящий момент от давления ветра уменьшается. При этом, если судно не имеет хода, центр давления воды по мере увеличения крена перемещается вверх. Это приводит к дополнительному снижению кренящего момента, притом в большей степени на судах с малыми отношениями ширины к осадке и малыми коэффициентами обшивки полноты.

Вероятно, когда судно движется собственным ходом, положение центра давления по высоте более стабильно. Однако и в этих условиях кренящий момент в аквале уменьшается по мере увеличения угла крена вследствие снижения коэффициента аэродинамической силы.

В целом следует признать, что вопрос об аэродинамических и гидродинамических характеристиках судна, дрейфующего на тихой воде, недостаточно изучен. Вопрос же о действии на судно аквала в условиях шквального моря с учетом качки, по-видимому, вообще не являлся еще предметом изучения. Все это приводит к необходимости упрощенно трактовать влияние в инженерных приложениях.

К таким упрощениям относится часто применяющееся допущение о том, что кренящий момент, воспринимаемый судном, — величина постоянная. Реже исходят из допущения, что коэффициент кренящего момента изменяется в зависимости от угла наклона судна по одной из известных эмпирических зависимостей, например по формулам (6.04) или (6.05).

Независимо от этих исходных допущений кренящий момент считается приложенным либо статически, либо (как в отечественных нормах остойчивости) динамически, либо частично статически, а частично динамически. Влиянием сопротивления вращательному движению судна обычно пренебрегают.

§ 4. СОВМЕЩЕННОЕ ДЕЙСТВИЕ ВЕТРА И ВОЛН

Предположим (см. рис. 68), что судно, остойчивость которого характеризуется кривой статических восстанавливающих моментов I , подвержено действию ветрового кренящего момента K ,

плавания по кривой 2. Продолжим кривую восстанавливающим моментом в сторону отрицательных углов наклона и отложим на оси абсцисс угол $\theta_{ст}$, равный амплитуде качки. Площадь I выражает работу, затраченную на наклонение судна от состояния равновесия в вертикальном положении до угла $\theta_{ст}$. Площадь же II + III численно равна работе кренящего момента на протяжении вращения судна от предельного угла наклона на ветер до угла статического равновесия $\theta_{ст}$.

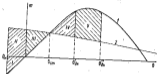


Рис. 68. Определение угла крена, вызванного действием ветра и волнения.

Если явление рассматривается без учета влияния качки и сопротивления воды, то угол динамического крена $\theta_{дк}$ определяется исходя из условия равенства площадей

$$II = IV.$$

Для определения же угла динамического крена $\theta_{дк}$ с учетом влияния качки, но без учета влияния сопротивления воды нужно приравнять площади

$$I + II + III = IV + V.$$

Рисунок показывает, что учет бортовой качки приводит к значительному увеличению расчетного значения угла динамического крена.

Рассмотрим ту же задачу в предположении, что на судно (см. рис. 69) действует постоянный по величине ветровой кренящий момент $m = m_{ст} + m_{дк}$, где $m_{ст}$ и $m_{дк}$ — статическая и внезапно приложенная составляющие момента давления ветра. Пусть прямая $m_{ст}$ пересекает кривую восстанавливающих плеч в точке А и, следовательно, судно имеет постоянный угол крена $\theta = \theta_{ст}$. Перенесем начало координат в точку А и отложим влево от точки $\theta_{ст}$ на оси абсцисс амплитуду качки $\theta_{ка}$. Тогда суммарный угол крена $\theta_{дк}$ с учетом влияния качки найдется исходя из условия равенства заштрихованных площадей

$$I + II = III.$$

Новое построение отличается от предыдущего лишь тем, что угол $\theta_{ст}$ отсчитывается теперь не от положения равновесия судна, а от угла наклона $\theta = \theta_{ст}$. Естественно, что при всех прочих одинаковых условиях такое разделение кренящего момента на статическую и динамическую составляющие приводит к снижению угла динамического крена по сравнению с углом в рассмотренном ранее случае.

Так как углы наклона судна, вызванные совместным действием волн и динамически приложенного давления ветра, возрас-

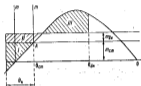


Рис. 69. Определение угла крена при статической и динамической составляющей давления ветра.

тают с увеличением амплитуды качки, суда с кобальтопритной качкой могут оказаться в опасном положении, несмотря на то, что их остойчивость, рассмотренная изолированно, представляется достаточной. С другой стороны, поскольку амплитуда качки возрастает с увеличением остойчивости, нельзя быть заранее уверенным, что увеличение начальной метацентрической высоты при любых условиях повышает безопасность плавания.

§ 5. ДИАГРАММА ОСТОЙЧИВОСТИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ

Форма диаграммы восстанавливающих плеч, и в частности величина и положение максимального восстанавливающего плеча, являются важными показателями остойчивости судна. Рассмотрим кратко вопрос о влиянии этих показателей на безопасность плавания.

На рис. 70 приведены две диаграммы статической остойчивости с одинаковыми значениями максимального восстанавливающего плеча l_{max} и одинаковым углом залога θ_{max} , но отличающиеся положением максимумов кривых. Допустим, что к судам 1 и 2, которым принадлежит приведенные диаграммы, приложен статически кренящий момент с плечом $l_{кр}$. Тогда судно 1 наклонится

на угол θ_1 , а судно 2 — на больший угол θ_2 . Это не может явиться основанием для того, чтобы предпочесть одно судно другому, так как оба они терпят остойчивость при одинаковом статическом восстанавливающем моменте с плечом $l_{ст}$. Если, однако (рис. 71), мы будем считать, что по мере наклона судна кренящее плечо увеличивается, то второе судно представится более остойчивым. Действительно под влиянием статического момента с плечом $l_{ст}$ первое судно опрокинется после наклона на угол θ_1 , а второе останется на ялзу с большим углом крена θ_2 .

Как отмечалось, предположение о стабильности кренящего момента не согласуется с экспериментальными данными. Поэтому следует признать, что в тех случаях, когда кренящий момент при-



Рис. 70. Влияние зависимости максимума диаграммы остойчивости при постоянном кренящем плече.



Рис. 71. Влияние положения максимума диаграммы остойчивости при перекаеме кренящего плеча.

ложен статически, более остойчивы суда, у которых угол $\theta = \theta_{ст}$ соответствующий максимуму кривой восстанавливающих плеч, больше.

Допустим теперь (рис. 70), что момент с плечом $l_{ст}$ приложен к судну не статически, а динамически. Так как он превращает восстанавливающий момент в процессе наклона первого судна вплоть до угла $\theta = \theta_1$, а второго судна — до большего угла $\theta = \theta_2$, кренящий момент совершит более значительную работу при наклоне второго судна. Поэтому обычное построение покажет, что при принятых предположках первое судно остойчивее второго. Вместе с тем, вследствие более резкого нарастания восстанавливающего момента, первое судно будет отличаться более неблагоприятной качкой. Поэтому, если мы учтем влияние качки, как это делалось в предыдущем параграфе, более остойчивым может оказаться второе судно.

Обычно восстанавливающие плечи начинают быстро уменьшаться, после того как палуба судна входит в воду. Поэтому на основании рис. 70 и 71 можно предположить, что первое из сопоставляемых судов, отличающееся, как отмечалось, более неблагоприятной качкой, имеет в то же время меньший надводный борт. Это дополнительно снижает мореходность судна, а при некоторых обстоятельствах (см. § 6) также его остойчивость на попутном волнении.

Таким образом, подход к оценке остойчивости составленных судов с различных точек зрения, мы приходим к противоречивым выводам. Поскольку же внешние условия, с которыми будет сталкиваться судно, заранее неизвестны, вопрос об оптимальном положении максимуму диаграммы остойчивости переходит в область статистики.

Обращаясь к вопросу о протяженности диаграммы остойчивости, отметим, что при известных обстоятельствах суда могут получать значительный статический крен, представляющий угрозу 50°. Поэтому увеличение угла $\theta_{ст}$ улучшает статическую остойчивость судна. С другой стороны, с увеличением протяженности диаграммы остойчивости возрастает величина динамически приложенного опрокидывающего (или же говоря, максимального восстанавливающего) момента. Это также повышает степень безопасности плавания.

Необходимо, однако, отметить, что увеличение протяженности диаграммы остойчивости может оказаться бесполезным, если оно обусловлено понижением носутого участка на последующий ветан кривой восстанавливающих плеч. Такие кривые (см. кривую 2 на рис. 72) характерны для судов с малой высотой надводного борта, если в расчете остойчивости учитывается влияние рубок, не доходящих до бортов.

Существенное значение имеет также форма восходящего участка кривой восстанавливающих плеч. Она может быть регламентирована либо путем непосредственного фиксирования величины восстанавливающего плеча при каком-либо небольшом угле наклона, либо путем фиксирования минимальной допустимой метacentрической высоты.

Вогнутый участок на восходящей части кривой восстанавливающих плеч (см. кривую 2 на рис. 72) оказывает благоприятное влияние на бортовую качку судна. Однако чрезмерная вогнутость кривой, свидетельствующая о малости судна, крайне нежелательна. Это относится к кривой очерка к судам, предназначенным для перевозки сыпучих и навалочных грузов.

Обратимся теперь к практическим цифрам. Первая попытка обеспечить желательную форму диаграммы остойчивости статическим путем была сделана около 80 лет тому назад А. Денин (A. Denby) [1884]. По А. Денин начальная метacentрическая высота в восстанавливающем плече судна при углах наклона, равных 30 и 45°, превосходит 0,24 и (0,8)'. В более поздних своих выступлениях Денин указывал, что в отношении минимального значения метacentрической высоты эти требования могут быть



Рис. 72. Влияние формы восходящего и нисходящего участков диаграммы остойчивости.

смигачи (по-видимому, являясь в виду сравнительно крупные суда).

И. Рахала (I. Rahola) [1939], исследовав ряд судов, погибших от недостатка остойчивости, и ряд судов с критической остойчивостью, также предложил нормированную диаграмму восстанавливающего плеча именно, при наклонении судна на 20° восстанавливающее плечо судна должно быть не менее $0,14 \text{ м}$, а при углах наклонения, равных 30 и 40° , — не менее $0,20 \text{ м}$.

Для диаграммы остойчивости, соответствующих минимальным швартам Денца, характерно следующее соотношение: $I_{\text{ден}} \approx 0,26 \text{ м}$ при $\theta_{\text{д}} \approx 37^\circ$, а для стандартной диаграммы Рахала: $I_{\text{ден}} \approx 0,22 \text{ м}$ при $\theta_{\text{д}} \approx 35^\circ$. Для таких диаграмм вероятные значения угла заката лежат в пределах $\theta_{\text{за}} \approx 65-70^\circ$.

Для судов с диаграммой остойчивости, подобной диаграмме Рахала, вероятные значения метацентрической высоты составляют $\lambda = 0,3-0,4 \text{ м}$.

В ряде стран, не имеющих официальных норм остойчивости, органы, ответственные за безопасность плавания судов, руководствуются в повседневной работе критериями Рахала как неофициальными материалами.

Нормы Регистра СССР, регламентируя форму кривой восстанавливающего плеча, рассматривают ее как дополнительный критерий остойчивости. По этим нормам угол, соответствующий максимальному восстанавливающему плечу должен быть не менее 30° , а максимальное восстанавливающее плечо должно быть не менее $0,25 \text{ м}$ при длине судна меньше 100 м и не менее $0,20 \text{ м}$ — при большей длине судна. Кроме того, согласно нормам Регистра СССР угол заката диаграммы остойчивости должен быть (в общем случае) не менее 60° , а метацентрическая высота, подсчитанная с учетом влияния жидких грузов, должна быть положительной.

Приведенные данные показывают, что требования, предъявляемые на практике к влиянию и положению максимального восстанавливающего плеча, более или менее единообразны. Однако некоторые специалисты считают, что диаграммы остойчивости мелких промышленных судов и портовых буксиров должны удовлетворять более жестким требованиям. В частности, в дискуссии по докладу Х. Е. Егера (H. E. Jaeger) [1954], посвященному вопросу проектирования траулеров с возмещением $1000-1300 \text{ т}$, Д. Манниг рекомендовал принимать для мелких промышленных судов $I_{\text{ден}} \geq 0,3 \text{ м}$ при $\theta \geq 25^\circ$ и $\theta_{\text{ден}} \geq 60^\circ$. Тогда же Г. Азресен предложил в качестве минимальных цифр $I_{\text{ден}} = 0,3 \text{ м}$ при $\theta = 30^\circ$.

В ФРГ для портовых буксиров регламентированы следующие цифры: $I_{\text{ден}} \geq 0,3 \text{ м}$ при $\theta_{\text{д}} \geq 30^\circ$ и $\theta_{\text{ден}} \geq 75^\circ$.

Более подробные сведения об официальных требованиях, которые предъявляются к диаграммам остойчивости в ряде стран, можно найти в статье С. Н. Благовещенского [1965а].

§ 6. ОСТОЙЧИВОСТЬ СУДА НА ВОДУШНОМ И ВСТРЕЧНОМ ВОЛНЕНИИ

Предварительные замечания. Остойчивость судна, движущегося на попутном или встречном волнении, изменится во времени вследствие искривления плоскости грузовой ватерлинии. Если длина попутных волн мало отличается от длины судна, его остойчивость значительно уменьшится при прохождении через вершину волны. Продолжительность пребывания судна в этом состоянии зависит от соотношения между скоростью судна и скоростью волны.

Подробно этот вопрос был впервые исследован К. Венделем (K. Wendel) в работе [1954], посвященной анализу аварии грузового судна «Ирена Ольмадорф», которое погибло на попутном волнении с грузом кокса на палубе. Задача рассматривалась без учета двимки явления. Такой же характер имеет работа К. Венделя [1958] и работа К. Венделя—В. Платцера (K. Wendel und W. Platzhofer) [1958], в которой рассматриваются причины гибели учебного судна «Ламар» при переколе леса. То же относится к работам В. Н. Цибуна [1957], В. Н. Салтовской [1956] и [1959], В. Н. Салтовской—Н. Н. Сюрюнкова [1956], С. Н. Благовещенского [1963], в которых анализируются причины гибели ряда мелких судов.

Вопрос о бортовой качке судна, возникающей на регулярном волнении при курсовых углах $\alpha = 0$ и $\alpha = 180^\circ$, рассмотрен в работе И. Е. Керина (I. E. Kerwin) [1955].

В работе О. Гримм (O. Grimm) [1961] рассмотрен с учетом бортовой качки вопрос о безопасности плавания судна на нерегулярном волнении. Работы И. К. Вороды [1962 и 1965] посвящены аналогичной задаче об остойчивости судна на нерегулярном волнении, рассматриваемой с учетом пропульсивной качки.

Результаты, полученные при помощи модельных исследований в бассейне, приведены в работах Б. Ардта и С. Родена (B. Ardt und S. Roden) [1958], И. Р. Паулини (J. R. Paullini) [1961], И. К. Вороды [1962], Ю. Н. Немцова [1965 а и б] [1965 г]. Результаты испытаний модель судна на стержнях ветровых волнах описаны в работах С. Кастнера (S. Kastner) [1962] и С. Родена (S. Roden) [1962]. В работе Ю. И. Немцова [1965 г] изложен приближенный способ расчета остойчивости судна на попутном волнении, основанный на результатах серийных испытаний моделей.

Для того, чтобы разобраться в сущности явления, рассмотрим в качественном аспекте условия, определяющие остойчивость судна, расположенного статически на вершине попутной волны, перепадающей со скоростью, равной скорости судна. При такой схематизации явления не учитываются влияния килевой, бортовой и вертикальной качки, а также влияние дополнительного искривления водной поверхности, вызванного возникновением корабельных волн, их интерференцией с ветровыми волнами и деформациями.

шей набегавших волн при обтекании корпуса. Не учитываются также адиабатические изменения распределения давления в волне по сравнению с гидростатическим, возникающего статического дифферента и неравномерности волнения.

На продольном волнении так же, как и на поперечном, начальная остойчивость судна определяется равенством

$$\Delta = z + \rho - z_0.$$

На вершине волны аплнката центра тяжести z возрастает. Метacentрический же радиус ρ уменьшается, так как площадь гру-

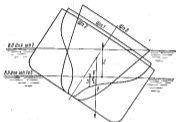


Рис. 73. Гидростатические силы, действующие на судно, расположенное на вершине волны.

зой ватерлинии, потерянная в оконечностях, лишь частично компенсируется ее приращением в средней части судна. В итоге метacentрическая высота может либо возрасти либо уменьшиться. Практически для судна без развала шпангоутов в средней части судна метacentрическая высота несколько уменьшается.

В значительно большей степени снижается остойчивость судна на больших углах крена, что можно посмотреть рис. 73, замкнутым на работу Б. Арцита (1962). На рисунке показаны три теоретических шпангоута и соответствующие им следы ватерлинии. К средней части судна (шпангоут 2) относится верхний, а к оконечностям (шпангоуты 1 и 3) — нижний след ватерлинии.

Плавуность создается в основном средней частью судна, однако соответствующий ей восстанавливающий момент быстро уменьшается уже при малых наклонениях судна вследствие изложения палубы в воду. В оконечностях также создаются небольшие вос-

станавливающие моменты. В настоящем случае они противоположного знака (по сравнению с моментом в средней части судна) и дополнительно снижают общий восстанавливающий момент. В конечном счете диаграмма остойчивости на вершине волны располагается значительно ниже обычной диаграммы, построенной без учета волнения.

Когда судно расположено на подбеге волны, наблюдается обратный картина. Все же для данного угла наклона восстанавливающий момент, усредненный за протяжении одного цикла, обычно меньше восстанавливающего момента на тихой воде. Поэтому усредненная диаграмма остойчивости судна располагается при попутном и встречном волнении ниже диаграммы, построенной для тихой воды.¹

На рис. 74 приведены в качестве примера диаграмма статической остойчивости сейнера С0 на тихой воде, вершине волны и подбеге волнам (кривые Г, В, П), а также усредненная кривая Ср.² Элементы сейнера: $LBH = 25,0 \times 6,2 \times 3,0$; $D = 163$ м; $h = 0,62$ м. Размеры волны $\lambda = L$; $h_w = 2,5$ м.

В рассматриваемом случае остойчивость судна на вершине волны уменьшается чрезвычайно резко. Значительно снизилась также по сравнению с диаграммой за тихой водой усредненная диаграмма остойчивости.

Учит фазовое времяна, продолжительность цикла, в течение которого остойчивость судна изменяется от минимума на вершине волны до максимума на подбеге волны, равна кактусемусу периоду волны

$$T_k = \frac{\lambda}{c - v_s}$$

где v_s — скорость судна, м/сек, которая при встречном волнении берется со знаком плюс, а при попутном волнении — со знаком минус.

¹ Изменяется и знак знака, на протяжении которого восстанавливающий момент уменьшается от минимума до максимума, и диаграмма с ординатами, средними между средними диаграммами на вершине и подбеге волны.

² Диаграммы на рис. 74—76 замкнуты на основании работ В. Н. Салтвской.

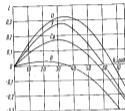


Рис. 74. Диаграмма остойчивости сейнера С0.

Допустим, что в течение некоторого промежутка времени (и будем называть его критическим промежутком и обозначать его волном t_1) кренящий момент, действующий на судно, временно восстанавливающий момент. Тогда, если скорость судна, движущегося на попутном волнении, относительно мало отличается от скорости волны, кажущийся период τ_1 , а с ним и критический период t_1 , могут оказаться достаточно большими для того, чтобы судно опрокинулось. Поэтому при оценке остойчивости судна и

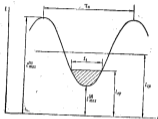


Рис. 75. Связь к вопросу об остойчивости судна на попутном волнении.

попутном волнении существенное значение, наряду с диаграммой остойчивости на вершине волны, имеет продолжительность критического промежутка времени.

При малом кажущемся периоде волны (на встречном волнении и при попутном волнении, если скорость судна значительно отличается от скорости волны) остойчивость судна характеризует средняя диаграмма восстанавливающего плеча.

Сказанное можно пояснить рис. 75, на котором показана гипотетическая кривая, характеризующая закон изменения восстанавливающего плеча данного судна во времени. Пусть $l_{max}^{(0)}$ и $l_{max}^{(1)}$ — максимальные (по углу крена) значения восстанавливающего плеча на подходе и вершине волны, а $l_{cp} = 0,5 [l_{max}^{(0)} + l_{max}^{(1)}]$ — его среднее значение на протяжении цикла. Допустим, кроме того, что кривая $l = f(\beta)$ симметрична относительно плеча l_{cp} и что максимальные возможные (для нормированных) значения кренящего момента и кренящего статического плеча l_{cp} известны.¹

Критический промежуток времени t_1 , в течение которого восстанавливающее плечо l меньше критического, определяется протяженностью заштрихованной части диаграммы. Если $l_{cp} > l_{max}^{(0)}$, остойчивость судна обеспечена, так как критический промежуток времени отсутствует. Судно, безусловно, опрокинется, если $l_{cp} > l_{max}^{(1)}$ и, следовательно, $t_1 > \tau_c$. В промежуточных случаях судно не может опрокинуться, если $t_1 < t_c$, где t_c — продолжительность процесса опрокидывания судна, которую обычно выражают в долях периода свободных поперечных колебаний судна равным

$$t_c = k_1 \tau_c.$$

При данном значении кренящего плеча l_{cp} критический промежуток времени t_1 увеличивается по мере уменьшения остойчивости судна (например вследствие перемещения его центра тяжести вверх), поскольку при такой операции кривая $l = f(\beta)$ располагается ниже. С другой стороны, если $l_{cp} = \text{const}$ и кривая $l = f(\beta)$ остается неизменной, критический промежуток времени увеличивается при возрастании кажущегося периода волны. Поэтому есть основания выражать t_1 зависимостью

$$t_1 = k_2 \tau_c,$$

где k_2 — численный коэффициент.

Поскольку

$$\frac{t_1}{\tau_c} = \frac{k_2 \tau_c}{k_1 \tau_c},$$

отношение τ_c / t_c позволит судить о том, в какой мере для данного судна следует считать с возможным снижением его остойчивости на попутном волнении. Ниже показано, что этот вопрос имеет существенное значение в основном при проектировании небольших быстроходных судов.

Принимая $k_1 \approx 0,25$; $k_2 = 0,5-0,6$, некоторые специалисты пришли к выводу, что судно не может опрокинуться, если

$$\frac{\tau_c}{t_c} < \frac{k_2}{k_1} < (2,0 - 2,4).$$

Поскольку период τ_c увеличивается при уменьшении поперечной метацентрической высоты, из приведенного соотношения следует, что для увеличения остойчивости судна на попутном волнении выгодно уменьшать его начальную остойчивость. Этот вывод ориентирующий конструкторов на проектирование судов с избыточно малой остойчивостью, следует признать ошибочным. Оценка заключается в том, что коэффициент k_2 нельзя считать постоянной величиной. При $\tau_c = \text{const}$ он возрастает по мере уменьшения остойчивости судна, что вытекает из соображений, изложенных при рассмотрении рис. 74. Таким образом, отноше-

¹ Мы ограничимся рассмотрением статической остойчивости судна.

ине τ_0/τ_0 как статистический показатель устойчивости судна на попутном волнении имеет ограниченное значение.

Переходя к конкретным цифрам, разделим числитель и знаменатель равенства $\tau_0 = \lambda/(\epsilon \pm \alpha)$ на $(g\lambda)^{1/2}$ и представим его в виде

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{\lambda}{g}\right)^{1/2}}{\frac{\epsilon}{(g\lambda)^{1/2}} \pm \left(\frac{\lambda}{g}\right)^{1/2} \frac{\alpha}{(g\lambda)^{1/2}}}. \quad (6.05)$$

Поскольку на основании формулы (2.09)

$$\frac{\epsilon}{\sqrt{g\lambda}} = \sqrt{\frac{T}{2\lambda}} = 0.4,$$

равенство (6.05) можно представить в виде

$$\tau_0 = \frac{\left(\frac{\lambda}{g}\right)^{1/2}}{0.4 + Fr \left(\frac{\lambda}{\lambda}\right)^{1/2}}. \quad (6.06)$$

Из формулы (6.06) следует, что кажущийся период τ_0 обращается в бесконечность в тех случаях, когда судно движется на попутном волнении со скоростью, соответствующей числу Фруда

$$Fr = 0.4 \sqrt{\frac{\lambda}{L}}. \quad (6.07)$$

Наибольшее практическое значение имеет интервал значений $\lambda/L = 0.7-1.3$. При изменении отношения λ/L в этих пределах число Фруда, наиболее неблагоприятное для устойчивости судна на попутном регулярном волнении, как показывает формула (6.07), принимает следующие значения:

λ/L	0.7	1.0	1.3
Fr	0.33	0.40	0.46

Устойчивость судна снижается в наибольшей степени при отношениях λ/L , несколько меньших единицы.¹ Поэтому наиболее неблагоприятны числа Фруда, несколько меньшие чем $Fr = 0.4$. По В. В. Семенову-Тянь-Шанскому [1966] они лежат в пределах $Fr = 0.28-0.40$.

Ниже приведены данные о средних значениях числа Фруда и периода τ_0 , характерных для судов различной длины. Они основаны на цифрах, заимствованных из диссертации В. Н. Салтковой и других источников. Наряду с отмеченными данными указаны полученные расчетом значения кажущегося периода волны τ_0

¹ Подробно об этом говорится ниже.

при $\lambda = L$, безразмерного периода $\tau_0^{(L)} = \tau_0 (g/L)^{1/2}$ и отношения τ_0/τ_0 .

L	15	20	25	30	35	40	45
Fr	0.35	0.32	0.30	0.28	0.26	0.25	0.24
τ_0	4.8	4.1	3.2	2.2	1.3	1.0	1.0
$\tau_0^{(L)}$	24.9	20.0	18.9	17.5	17.0	17.2	17.3
$\tau_0/\tau_0^{(L)}$	5.2	3.3	2.6	2.1	1.9	1.7	1.6
$\tau_0^{(L)}$	3.90	3.82	3.80	3.83	3.83	3.89	3.94

Приведенные цифры показывают, что в особенно неблагоприятном положении в отношении устойчивости на попутном волнении оказываются небольшие суда длиной 15-30 м. Скорости их соответствуют числам Фруда 0.31-0.35, а кажущийся период волны превосходит период свободных поперечных колебаний в 3-5 раз. Эти соотношения характерны для мелких промышленных судов: дрифтеров, сейнеров, малых траулеров.

Характерно, что в рассматриваемом интервале длин судов, значения безразмерного периода собственных поперечных колебаний изменяются в узких пределах.

Влияние различных факторов на устойчивость. Восстанавливающее плечо I_0 судна, расположенного на гребне волны, можно рассмотреть как сумму

$$I_0 = I_0(0) - \Delta I_0(\theta) - a \sin \theta,$$

где I_0 — восстанавливающее плечо формы на тихой воде; ΔI_0 — снижение восстанавливающего плеча формы на вершине волны. Влияние возмущения центра тяжести судна, в данном случае, как и при расчете устойчивости судна на тихой воде, учитывается членом $a \sin \theta$, где a — расстояние от центра тяжести до центра волнения.

Как отмечалось, устойчивость судна на вершине волны снижается особенно резко при отношениях λ/L несколько меньших единицы. Для судов, рассмотренных С. Н. Благосещенским [1965б] в предположении, что высота волны остается постоянной, а относительная длина волны принимает значения $\lambda/L = 0.7; 1.0; 1.3$, наиболее неблагоприятные условия создавались при минимальной из перечисленных относительных длин волны. Этот вывод подтверждается результатами экспериментальной работы Ю. И. Нечкина [1965б], который нашел, что максимальное восстанавливающее плечо формы небольших промышленных судов снижается в наибольшей степени при $\lambda/L = 0.8$. Судя по отмеченной выше работе В. В. Семенова-Тянь-Шанского наиболее неблагоприятное отношение λ/L может падать до $\lambda/L = 0.5$.

Попутное волнение оказывает наиболее сильное влияние на устойчивость судна при курсовом угле по отношению к волне, близком $\alpha = 180^\circ$. Незначительное отклонение от этого курсо-

ного угла мало сказывается на величине восстанавливающей плечи, но может способствовать усилению заливчивости. Одновременно, если направление ветра мало отличается от направления распространения волны, возрастает ветровой кренящий момент и усиливается бортовая качка.

При попутном волнении ухудшается управляемость судна. Попутная волна, набегаящая с кормы, может развернуть судно влево к ней. Во время поворота возникают дополнительные кренящие инерционные силы и обычно усиливается ветровая нагрузка, что может поставить судно в тяжелое положение.



Рис. 76. Диаграмма остойчивости сейнера МЧС в зависимости от относительной высоты надводного борта.

При достижении длины волны абсолютное значение приращения $\Delta \zeta$ быстро возрастает при увеличении высоты волны. В основном приращение $\Delta \zeta$ зависит от отношения амплитуды волны к высоте надводного борта $\lambda_0/2l$. Качественно также сказывается уменьшение высоты надводного борта при постоянной высоте волны.

При достижении длины волны абсолютное значение приращения $\Delta \zeta$ быстро возрастает при увеличении высоты волны. В основном приращение $\Delta \zeta$ зависит от отношения амплитуды волны к высоте надводного борта $\lambda_0/2l$. Качественно также сказывается уменьшение высоты надводного борта при постоянной высоте волны.

В качестве примера на рис. 76 приведены для ряда осадок кривые восстанавливающих плеч l^0 сейнера МЧС с главными размерениями $L \times B \times H = 18,0 \times 5,0 \times 2,4$. Нормальная осадка сейнера $T = 2,0$ м. При построении кривых метacentрическая высота принималась к одинаковому значению $h = 0,63$ м путем изменения возмущения центра тяжести судна. Высота волны была принята равной $1,49$ м при длине $\lambda = L$.

Из рисунка следует, что при отклонении высоты надводного борта к высоте борта $h/H = 0,25$ максимальное восстанавливающее плечо сейнера равно $7,5$ см. Его можно увеличить до 10 см без изменения начальной остойчивости, если принять $h/H = 0,30$. Одновременно снижается осадка с $T = 1,80$ м до $T = 1,68$ м, а высота надводного борта увеличивается с $l = 0,60$ м до $l = 0,72$ м. Такое уменьшение осадки сопряжено с существенным снижением грузоподъемности.

Тот же результат в отношении остойчивости можно получить путем снижения центра тяжести судна на 7 см и увеличения начальной метacentрической высоты до $h = 0,7$ м.

В работе И. Р. Паулингга (Paulling J. R) [1961] приведены диаграммы, позволяющие судить о влиянии увеличения высоты борта при постоянной осадке. Качественно оба способа увеличения высоты надводного борта сказываются одинаково.

При постоянных значениях высоты борта и осадки диаграммы остойчивости на вершине волны может быть улучшена путем уменьшения ширины судна, если одновременно снижается его центр тяжести, для сохранения неизменной метacentрической высоты. В качестве примера на рис. 77 приведены диаграммы остойчивости на вершине волны сейнера СО с нормальной шириной, равной $6,2$ м, и шириной, уменьшенной до $5,0$ м в результате афинного преобразования обводов. В обоих случаях метacentрическая высота судна на тихой воде равна $0,8$ м. Рисунок показывает, что таким путем можно существенно улучшить диаграмму остойчивости.

В качестве общего замечания отметим, что законмерности, характеризующие влияние изменения главных размерений судна и коэффициентов теоретического чертежа на диаграмму остойчивости в рассматриваемых условиях, качественно не отличаются от аналогичных законмерностей, относящихся к судну, плавающему на тихой воде. Последние были рассмотрены автором в главе девятой курса [1955] и главе восьмой курса [1964]. Метод афинного преобразования обводов при исследовании остойчивости, использованный в отмеченных работах, можно применять также и при исследовании остойчивости судна, расположенного на вершине волны.

Важнейшей проблемой при продольном волнении, наряду с килевой и вертикальной качкой, обычно возникает также бортовая качка (большая частью всплывательная). Она обуславливается трехмерностью возмущения и нестационарностью восстанавливающего момента. При неблагоприятных соотношениях между периодами собственных поперечных и продольных колебаний судна бортовая качка может возникнуть и вследствие резонанса (см. § 2 главы третьей). Остановимся кратко на вопросе о влиянии нестационарности восстанавливающего момента, который не был рассмотрен в предыдущих главах.

Допустим, что на попутном или встречном волнении восстанавливающее плечо отклоняется от средних значений $l_{cp}(\theta)$ на величину $\Delta l_{cp}(\theta) \sin \sigma t$, где σ — кажущаяся частота волны. Тогда, если к судну приложен значительный кренящий момент M_{cp} (например вызванный ветровой нагрузкой), то уравнение бортовой качки представится в виде

$$\delta \ddot{\theta} + 2N\dot{\theta} + D \left[l_{cp}(\theta) + \Delta l_{cp}(\theta) \sin 2\pi \frac{t}{T_0} \right] = M_{cp} \quad (6.08)$$



Рис. 77. Диаграммы остойчивости осадного и трансформированного варианта сейнера СО.

При линейной постановке задачи уравнение (6.08) можно записать более простым

$$\ddot{\theta} + 2N\dot{\theta} + D\delta_{\theta} \theta - M_{sp} - D\delta_{\theta} \theta \sin 2\pi \frac{t}{T_c}, \quad (6.09)$$

где A_{sp} — осредненная метacentрическая высота, соответствующая осредняемому восстанавливающему плечу. Это уравнение отличается от аналогичного укороченного линейного уравнения бортовой качки прежде всего тем, что произведение $\psi_{sp}\theta$ в правой части последнего заменено произведением $\delta\delta_{\theta}\theta$, а период T_c — периодом T_s . Кроме того, в уравнение (6.09) введен дополнительно кренящий момент M_{sp} , способствующий раскачиванию судна.

Как это следует из теории вопроса и экспериментальных исследований, бортовая качка на продольном волнении возникает даже если $M_{sp} = 0$. Амплитуды качки достигают максимумов при значениях отношения

$$\tau_s T_s = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 \dots$$

но влияние резонанса уменьшается по мере увеличения этого отношения. Поэтому резонанс может вызвать сильную бортовую качку в основном в тех случаях, когда судно движется на встречном волнении. При попутном же волнении, если речь идет о сравнительно быстродвижущихся судах, резонанс сказывается мало. Не следует, однако, упускать из виду, что даже незначительная бортовая качка дополнительно снижает остойчивость судна, расположенного на вершине волны.

Переходя к вопросу о влиянии калевой и вертикальной качки на попутном волнении, отметим, что при больших значениях отношения $\tau_s T_s$ амплитуды ψ_s и γ_s незначительны. Поэтому регулярная качка на попутном волнении не оказывает большого влияния на остойчивость судна. Учет нерегулярности волнения приводит, однако, к новой трактовке каления, так как в этом случае остойчивость судна характеризуется рядом диаграмм восстанавливающих плеч, каждая из которых соответствует определенной обеспеченности процесса.

Методика роста остойчивости судна на нерегулярном волнении изложена в отмеченных работах И. К. Бородин. Для учета влияния нерегулярности волнения О. Грим в упомянутой выше работе вводит в рассмотрение условную синусоидальную волну, эквивалентную по своему влиянию на остойчивость действительному волнению. Высота этой волны, названная эффективной высотой, рассматривается как статистическая характеристика.

Обеспеченные остойчивости судна на попутном волнении. Остойчивость небольших быстродвижущихся судов на попутном волнении можно считать обеспеченной, если они имеют благоприятную диаграмму остойчивости на тихой воде и достаточно высокий надводный борт.

В работе [1962] В. Н. Салтовская изложила требования, которые по ее мнению следует предъявлять к диаграмме остойчивости судна, расположенного на вершине волны. Предложения В. Н. Салтовской основываются на анализе аварий некоторых великих судов, погибших от недостатка остойчивости на попутном волнении. Расчеты, выполненные в предложениях, что длина волны равна длине судна, а высота волны определяется (по Цимерману) зависимостью

$$A_w = 0,17L^{0,5},$$

показали, что в 11 случаях величины максимального восстанавливающего плеча судна на вершине волны лежали в пределах 1—7 см. В двух других случаях максимальные восстанавливающие плечи оказались равными 10 и 11 см. В конечном счете В. Н. Салтовская пришла к выводу, что на вершине волны максимальное восстанавливающее плечо судов длиной $L < 35$ м при скоростях, соответствующих числу Фруда $Fr \geq 0,34$, должно быть не менее 10 см.

Желательными показателями остойчивости она считает $\theta_{max} \geq 12^\circ$ при угле наклонения $\theta \geq 20^\circ$ и угле заката остойчивости $\theta_{zak} \geq 40^\circ$.

Некоторые соображения о критериях остойчивости судна на продольном волнении приведены в работе О. Крайнигера (O. Krainger) [1962], однако конкретных цифр автор же называет.

§ 7. ОСТОЙЧИВОСТЬ СУДНА, ПЕРЕВОЗЯЩЕГО СЫПУЧЕ ГРУЗЫ

Предварительные замечания. Сыпучие грузы отличаются большой подвижностью частей. При неблагоприятных условиях плавания это приводит к смещению (пересыпанию) груза и образованию кренящего момента, снижающего остойчивость судна.

В 60-х годах прошлого столетия вследствие гибели многих судов, груженых зерном, американские страховые общества и портовые власти в Канаде начали применять правила, регламентирующие меры безопасности, которые были установлены для предотвращения опасного смещения зерна. В 1880 г. Британский парламент принял аналогичные правила, действие которых распространялось на все британские суда. Требования, сформулированные в этом документе, вошли в некоторые изменения в правила Международной конвенции по охране человеческой жизни на море, принятой в 1948 г. В ныне действующей Международной конвенции 1960 г. [1963] правила, регламентирующие перевозку зерна, были переработаны и дополнены некоторыми указаниями, связанными с остойчивостью судна.

В Советском Союзе требования к остойчивости судов, груженых сыпучими грузами, и меры безопасности, которые должны

приниматься при подобных перевозках, содержатся в Правилах Регистра СССР [1962].

В теоретическом аспекте вопрос о влиянии смещения сыпучих грузов был впервые затронут в работах Ф. Иггера (F. Eigar) [1887] и Ф. Дженкинса (Ph. Jenkins) [1887]. В первой из них приведены подробные данные о британских судах, погибших на протяжении 1881—1883 гг. Анализируя причины аварий, автор уделяет большое внимание судам, гибель которых была вызвана смещением сыпучих грузов. Влияние подвижности груза он иллюстрирует диаграммой, на которой кривые восстанавливающих моментов судна сопоставлены с кривой кренящего момента, вызванного перемещением зерна. Во второй работе Дженкинса показано, что во время бортовой качки судна груз, вследствие воздействия сил инерции, может перескочить при углах крена, значительно меньших статического угла перескока. Решение задачи, поставленной Дженкинсом, дано в законченном виде А. Скрабанта (A. Skrabant) [1915—1921].

С большой полнотой механизм перемещения груза в статической постановке задан исследован В. Г. Сизовым в работе [1958]. Теоретическое и экспериментальное исследование В. М. Баклова, посвященное вопросу о влиянии качки и вибрации на усадку и смещение сыпучих грузов, опубликовано частично в работах [1960 и 1963] и частично — в докладе советской делегации на Международной конференции [1960].

Самостоятельно вопрос об остойчивости судна, перевозящих зерно, рассматривается в книге Х. Хернера и К. Руша (H. Herzer und K. Rusch) [1952].

При разработке отечественных правил перевозки зерновых грузов была принята в основу упрощенная модель яленина, предложенная в упомянутой работе В. Г. Сизова. Некоторые понятия и требования, которые содержатся в правилах Регистра СССР, можно найти в работе Д. А. Орлова [1965].

Угол естественного откоса. Из сыпучих грузов наибольшей подвижностью отличается зерно (пшеница, рожь, ячмень, кукуруза, рис, а также семена проса, льна, хлопка, конопли и бобовых культур).

Подвижность сыпучих и навалочных грузов характеризуется углом естественного откоса, иначе говоря, максимальным углом, под которым может располагаться свободная поверхность груза.

Угол естественного откоса сыпучих грузов обычно определяют путем измерения образующей конуса, который возникает, когда груз насыпается на горизонтальную плоскость. Очевидно, этот угол совпадает с углом естественного откоса $\beta_{ст}$ груза, движущегося в процессе перемещения при отсутствии сил инерции. До начала же перемещения (например при медленном наклонении судна, на котором в начальный момент поверхность груза располагалась

горизонтально) угол естественного откоса $\beta_{ст}$ (статический) больше угла $\beta_{дв}$.

В дальнейшем для упрощения изложения мы будем оперировать также обобщающим термином «угол покоя», обозначая его символом β_0 и считая, что в зависимости от условий задачи либо $\beta_0 = \beta_{ст}$, либо $\beta_0 = \beta_{дв}$.

При морских перевозках зерна угол естественного откоса снижается вследствие воздействия сил инерции, возникающих во время качки судна и его наклонов под влиянием ветра, а также вследствие вибрации и сотрясений корпуса, вызванных в том числе воздействием вибрации и сотрясений корпуса, вызванных ударами волн. Максимальный угол, при котором начинается сползание зерна в судовых условиях, мы будем условно называть динамическим углом естественного откоса и обозначать его символом $\beta_{дв}$.

Судя по данным, приведенным в ряде работ, углы естественного откоса зерна $\beta_{дв}$ могут изменяться в широких пределах. Отметим следующие цифры, характеризующие подвижность некоторых видов зерна.¹

	$\beta_{дв}$, град
Пшеница	23—28
Рожь	23—28
Овес	25—45
Льняное семя	25—34

В справочнике Иохана—Ферстера (Johann—Foerster) указаны значения угла естественного откоса зерна (град.)

Максимальный	30
при состоянии покоя	25
в перемещаемом грузе	20
Минимальный в судовых условиях	

По другим данным в судовых условиях зерно перескакивает уже при наклонении судна на 15°.

Перескакивание груза при статическом рассмотрении задачи. Будем условно считать, что угол наклона судна

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

складывается из трех независимых друг от друга углов наклона, вызванных бортовой качкой, ветровым давлением и перемещением груза. Свободную поверхность груза будем представлять плоской.

¹ В ряде работ термин «угол естественного откоса» и «угол покоя» рассматриваются как синонимы.

² Подробную таблицу данных ряда авторов можно найти в брошюре В. И. Колдобова [1963].

Угол β между этой и горизонтальной плоскостями (см. рис. 76) изменяется в пределах от $\beta = 0$ до $\beta = \beta_0$. Наклонение судна на угол больший чем $\theta = \pm\beta_0$ сопровождается пересыпанием зерна.

Угол между поверхностью груза и плоскостью наклоненной¹ ватерлинии (его называют углом пересыпания) определяют величиной крутящего момента, вызванного смещением груза. До начала пересыпания груза этот угол определяется зависимостью

$$\alpha = \theta - \beta,$$

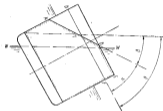


Рис. 78. Схема к вопросу о влиянии первоначальной ситуации груза

а после того как груз начнет пересыпаться, зависимостью

$$\alpha = \theta - \beta_0,$$

Условно считать, что углы β и β_0 положительны, если, как это показано на рис. 78, поверхность груза пересекает расположенную ниже ее горизонтальную плоскость (например плоскость ватерлинии $W'W''$) направо от диаметра. Угол же θ будем считать положительным, если судно наклонено на правый борт. Знак угла α определяется знаками углов θ и β .

Допустим, что после максимального наклонения на правый борт судно начинает вращаться в обратном направлении. В момент, когда $\theta = \theta_{max}$, пересыпание груза прекратится. Такое положение сохраняется до тех пор, пока судно не повернется на угол $\Delta\theta = 2\beta_0$ и свободная поверхность груза, перейдя через горизонтальное положение, не расположится под углом $\beta = -\beta_0$. После

¹ Положение плоскости наклоненной ватерлинии по отношению к судну представляется иллюзорным.

этого начнется обратное пересыпание груза, и в дальнейшем угол пересыпания будет определяться зависимостью

$$\alpha = \theta - (-\beta_0) = \theta + \beta_0.$$

Если предельный угол наклоения судна на правый борт был достаточно велик, то при наклонении судна на левый борт угол пересыпания начинает уменьшаться и, перейдя через нуль (в момент когда $\theta = -\beta_0$), станет отрицательным.

Сказанное можно пояснить рис. 79, на котором рассмотрен процесс пересыпания зерна в предположении, что оно перевозится на прямоместном постоле, не имеющем разделительных переборок. Для каждого угла наклоения θ на рисунке указаны значения углов β и α . Позиции I—IV соответствуют повороту судна от $\theta = 0$ до $\theta = 60^\circ$, а позиции V—VIII — возвращению судна в первоначальное положение и наклонению его на противоположный борт. Предполагается, что угол воюка $\beta_0 = 20^\circ$, причём в начальный момент при $\theta = 0$ поверхность груза горизонтальна.

По отдельным позициям рассматриваемые углы изменятся так:

Позиция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
θ	0	20	40	60	40	20	0	-20
β	0	20	20	20	0	-20	-20	-20
$\alpha = \theta - \beta$	0	0	20	40	40	40	20'	0

На рис. 80 зависимость $\alpha = f(\theta)$ при $\beta_0 = \pm 20^\circ$ представлена графически для случаев, когда $\alpha < \theta$ (судно вращается на правый борт) и когда $\alpha > \theta$ (судно вращается в обратном направлении). Диаграмма состоит из двух параллельных наклонных линий, соответствующих постоянным (положительному и отрицательному) значениям углов поклоя и горизонтальных линий, на протяжении которых вследствие изменения направления вращения судна груз не пересыпается. Положение крайних горизонтальных линий определяется величиной предельных углов наклоения судна (и рассматриваемом случае для верхней и нижней линий $\theta_{max} = \pm 60^\circ$). Средняя горизонтальная линия нанесена в предположении, что в начальный момент времени при $\theta = 0$ поверхность груза горизонтальна ($\beta = 0$) и, следовательно, $\alpha = 0$.

При уменьшении угла поклоя наклонные линии будут сближаться и в пределе при $\beta_0 = 0$, что соответствует жидкому грузу, сольются.

Естественно, что при $\theta = 0$ свободная поверхность груза может располагаться не горизонтально, как это было принято ранее, а наклонно, например под углом $-\beta_0$. В этом случае при наклонении судна на правый борт груз не будет пересыпаться до поворота судна на угол $\Delta\theta = 2\beta_0$, вследствие чего на диаграмме появятся дополнительные горизонтальные линии $\alpha = \beta_0$ — соответствующие углу $\alpha \sim 20^\circ$.

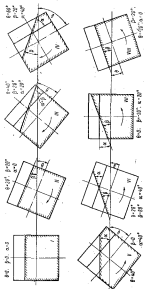


Рис. 79. Сопоставление между углами θ , β , и при перемещении пологого груза.

Если же при $\theta = 0$ груз наклонен на угол $+\beta_0$, то перекашивание начнется сразу же после начала вращения судна. На диаграмме этому моменту соответствует точка с координатами $\theta = 0$, $\alpha = -20^\circ$.

Определение критического момента. Как это показано на рис. 78, наклонение груза на угол α по отношению к наклоненной вертикали равносильно перемещению клиновидного объема ABC в положение $CDEF$. Такое смещение груза приводит к изменению поло-

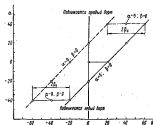


Рис. 80. Сопоставление между углами крена и перекашивания ($P_0 = \pm 20^\circ$).

жения центра тяжести судна, что, как известно, сопровождается изменением instantaneous pitch на величину

$$\Delta l = -\Delta y_z \cos \theta - \Delta z_y \sin \theta, \quad (5.10)$$

где Δy_z и Δz_y — проекции перемещения центра тяжести судна соответственно на ось y и z . Эти проекции связаны с проекциями перемещения центра тяжести груза равенствами

$$\Delta y_z = \frac{P}{D} \Delta y_g = \eta \Delta y_g; \quad (5.11)$$

$$\Delta z_y = \frac{P}{D} \Delta z_g = \eta \Delta z_g,$$

где P — вес перевозимого груза; D — водоизмещение судна; η — коэффициент угла наклона водоизмещения по чистой грузо-

подъемности; Δz_p и Δz_r — проекция перемещения центра тяжести груза. Последнее выражается формулами:

$$\Delta z_p = \frac{1}{V} \int_0^{\alpha} i_a \cos \alpha \, d\alpha,$$

$$\Delta z_r = \frac{1}{V} \int_0^{\alpha} i_a \sin \alpha \, d\alpha, \quad (6.12)$$

где i_a — момент инерции свободной поверхности груза, когда она наклонена на угол α ; V — объемное водозащещение.

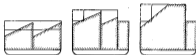


Рис. 81. Разбиение трюма на расчетные отсеки.

В общем случае моменты инерции i_a в формулах (6.12) определяют способом, аналогичным способу, который применяется в расчетах остойчивости судна на больших углах крена. Можно, однако, значительно упростить подобные расчеты, если удастся, не внося чрезмерной погрешности в результаты, заменить отсеки судна равнообъемными, эквивалентными отсеками прямоугольной формы, разбивая их в продольном и поперечном направлениях так, как это показано на рис. 81. В этом случае

$$\Delta z_p = \frac{\sum p_i \Delta z_i}{P}; \quad \Delta z_r = \frac{\sum p_i \Delta z_i}{P},$$

где p_i — вес груза в отдельных эквивалентных отсеках; Δz_i и Δz_r — проекции перемещения центра тяжести груза в этих отсеках, для определения которых можно воспользоваться приведенными ниже равенствами (6.13) и (6.14).

Последние получены путем нескольких преобразований и некоторых упрощений на формул А. П. Фан-дер-Валта [1908], которые были выведены при рассмотрении вопроса об остойчивости прямоугольного понтона на больших углах крена. Формулы даны для двух интервалов изменения углов α в предположении, что высота свободного пространства над грузом (когда $\theta = \beta - \alpha$) меньше половины глубины трюма.¹

Первый интервал соответствует возрастанию углов α до момента сопряжения свободной поверхности груза с палубой, ограничивающей отсек. Второй интервал охватывает более высокие значения углов α вплоть до угла, при котором свободная поверхность груза встретит днище.

Пусть B_1 — ширина отсека; H_1 — высота отсека; κ — усадка груза в долях объема отсека. Начало координат примем в центре тяжести груза, когда его свободная поверхность — горизонтальна. Тогда в первом интервале ($\text{tg } \alpha < 2\kappa \frac{H_1}{B_1}$)

$$\frac{\Delta z_1}{B_1} = \frac{1}{12(1-\kappa)} \frac{H_1}{B_1} \text{tg } \alpha;$$

$$\frac{\Delta z_r}{B_1} = \frac{1}{24(1-\kappa)} \frac{H_1}{B_1} \text{tg}^2 \alpha. \quad (6.13)$$

Во втором интервале ($2\kappa \frac{H_1}{B_1} < \text{tg } \alpha < \frac{1}{2\kappa} \frac{H_1}{B_1}$)

$$\frac{\Delta z_1}{B_1} = \frac{\kappa}{1-\kappa} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \sqrt{2\kappa \frac{H_1}{B_1} \frac{1}{\text{tg } \alpha}} \right);$$

$$\frac{\Delta z_r}{B_1} = \frac{1}{3} \frac{1}{1-\kappa} \sqrt{2\kappa \frac{H_1}{B_1} \text{tg } \alpha}. \quad (6.14)$$

Численный пример. Допустим, что зерно перевозится в прямоугольном понтоне, во внешнем переборке ($B_1 = B$). Примем $\kappa = 0,03$; $\frac{H_1}{B_1} = 2,2$; $\eta = 0,6$; $\beta = 20^\circ$, найдем для второго интервала (первый интервал кончается при угле $\theta = 17,2^\circ$) на основании формул (6.14)

$$100 \frac{\Delta z_p}{B} = 1,55 - \frac{0,17}{\sqrt{\text{tg } \alpha}};$$

$$100 \frac{\Delta z_r}{B} = 0,17 \sqrt{\text{tg } \alpha}. \quad (6.15)$$

Формулы (6.15) приводят к следующим значениям проекций перемещения центра тяжести груза:

α	5	10	20	30	40	50	60	70	80
$100 \frac{\Delta z_p}{B}$	0,90	1,13	1,27	1,33	1,36	1,39	1,43	1,45	1,49
$100 \frac{\Delta z_r}{B}$	0,045	0,072	0,103	0,129	0,155	0,186	0,224	0,262	0,494

Воспользовавшись этими цифрами, нетрудно определить по формулам (6.10) и (6.11), как изменится диаграмма остойчивости вследствие перемещения случайного груза. Некоторые характерные случаи для груза с углом покая $\beta_0 = 20^\circ$ рассмотрены ниже.

¹ Нетрудно получить аналогичные формулы и для других расчетных случаев.

Случай 1. Наклонение судна на правый борт в предположении, что $\beta = 0$ при $\theta = 0$ (свободная поверхность груза горизонтальна в исходном положении).

θ	25	30	40	50	60	70	80
β	25°	25°	20°	20°	20°	20°	20°
$\alpha = \theta - \beta$	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
$100 \frac{\Delta p}{B} = f(\alpha)$	0,905	1,13	1,27	1,33	1,36	1,39	1,41
$100 \frac{\Delta p_0}{B} = f(\alpha)$	0,047	0,072	0,103	0,129	0,155	0,185	0,224
$\cos \theta$	0,906	0,866	0,766	0,643	0,500	0,342	0,174
$\sin \theta$	0,423	0,500	0,643	0,766	0,866	0,940	0,985
$A = 100 \frac{\Delta p}{B} \cos \theta$	0,820	0,978	0,970	0,855	0,680	0,476	0,249
$C = 100 \frac{\Delta p_0}{B} \sin \theta$	0,020	0,036	0,065	0,059	0,133	0,175	0,221
$\Sigma = A + C$	0,840	1,014	1,035	0,984	0,813	0,651	0,470
$100 \frac{\Delta z}{B} = 0,6 \Sigma$	0,50	0,61	0,62	0,57	0,49	0,39	0,28

Для остальных случаев приводим лишь исходные соотношения и конечные результаты.

Случай 2. Вращение судна в обратном направлении, начиная с угла $\theta = 60^\circ$.

θ	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20
β	20	10	0	-10	-20	-20	-20	-20	-20
$\alpha = \theta - \beta$	40	40	40	40	30	20	10	0	0
$100 \frac{\Delta z}{B}$	0,49	0,59	0,63	0,75	0,80	0,79	0,76	—	—

Случай 3. Вращение судна в обратном направлении, начиная с угла $\theta = 80^\circ$.

θ	80	70	60	50	40	30	20	10	0	-10	-20
β	20	10	0	-10	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
$\alpha = \theta - \beta$	60	60	60	60	60	50	40	30	20	10	0
$100 \frac{\Delta z}{B}$	0,28	0,42	0,54	0,65	0,74	0,78	0,80	0,80	0,76	—	—

Случай 4. Наклонение судна на правый борт в предположении, что $\beta = -10^\circ$ при $\theta = 0$.

θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80
β	-10	0	10	20	20	20	20	20	20
$\alpha = \theta - \beta$	10	10	10	10	20	30	40	50	60
$100 \frac{\Delta z}{B}$	0,68	0,68	0,65	0,61	0,62	0,57	0,49	0,39	0,28

Случай 5. Наклонение судна на правый борт в предположении, что $\beta = -20^\circ$ при $\theta = 0$.

θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80
β	-20	-10	0	10	20	20	20	20	20
$\alpha = \theta - \beta$	20	20	20	20	20	30	40	50	60
$100 \frac{\Delta z}{B}$	0,76	0,76	0,73	0,69	0,62	0,57	0,49	0,39	0,28

б. Случай 6. Наклонение судна с жидким грузом ($\beta = \theta_0 = 0$)

θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80
β	0	0	10	20	30	40	50	60	70
$\alpha = \theta - \beta$	0	10	10	10	10	10	10	10	10
$100 \frac{\Delta z}{B}$	0	0,66	0,73	0,72	0,63	0,62	0,54	0,46	0,39

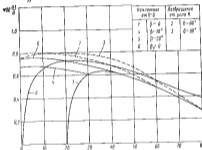


Рис. 82. Относительные кренящие моменты судна с жидким и твердым грузом.

Полученные результаты представим на рис. 82 в виде кривых, выражающих относительные значения кренящего момента, вызванного перемещением груза, в функции угла θ . Сплошными линиями изображены кривые, соответствующие наклонению на правый борт, а пунктирными линиями — соответственно в левое положение.

Из приведенных данных можно усмотреть, что для случая 4, начиная с угла наклона $\theta = 30^\circ$, и для случая 5, начиная с $\theta = 40^\circ$, соотношения между углами α и θ становятся идентичными аналогичным соотношениям для случая 1. Поэтому на рис. 82 кривые 4 и 5 сходятся с кривой 1 соответственно при углах наклона $\theta = 40^\circ$ и $\theta = 30^\circ$.

Пунктирные же кривые отходят от кривой J при углах наклона, с которых начинается вращение судна в обратном направлении.

На рис. 83 для четырех из рассмотренных выше случаев приведены кривые относительных восстанавливающих

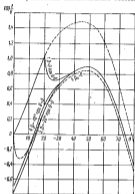


Рис. 83. Относительные восстанавливающие моменты судна с грузом.

плеч $100 \frac{J}{I_0} = \frac{100}{\beta} (I_0 - \Delta I)$. При построении кривых был использован рис. 82 и произвольная исходная кривая восстанавливающих плеч $100 \frac{J_0}{\beta}$, показанная пунктиром.

Исправленные кривые восстанавливающих плеч вновь воспроизведены на рис. 84. На этот раз кривые смещены вдоль оси абсцисс так, что все они пересекают ее в одной точке, соответствующей положению равновесия, при принятых допущениях об углах естественного откоса ($\beta_0 = 0$; 20°) и о первоначальном положении свободной поверхности груза при $\theta = 0$. Поскольку эта точка рассматривается как начало координат, перестроенные кривые

выражают относительные восстанавливающие плечи в функции угла $\theta' = \theta - \theta_0$, где θ_0 — угол крена, определяемый на рис. 83 точками пересечения кривых с осью абсцисс.

Приведенные материалы показывают: наиболее неблагоприятны диаграммы статической остойчивости, построенные в том предположении, что угол косяк груза $\beta_0 = 0$.

Динамические факторы. В судовых условиях частым грузам подвержены действию не только сил веса, но и сил инерции. По-

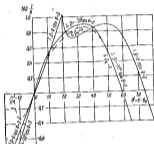


Рис. 84. Относительные восстанавливающие плечи в функции угла $\theta' = \theta - \theta_0$.

следние, как отмечалось, возникают при качке судна, вибрации корпуса, ударах волн. Так же связываются и динамически приложенные кренящие моменты, содействующие или противодействующие перемещению груза. С другой стороны, подвижность груза снижает как инерционные свойства судна, так и его остойчивость. Благоприятное влияние последних обстоятельств на бортовую качку в практических расчетах не учитывают.

Остановимся на вопросе о силах инерции, возникающих при бортовой качке, которые представляют особый интерес. Уравнение вынужденных колебаний судна примем в виде

$$\theta = \theta_0 \sin(\omega t + \delta), \quad (8.16)$$

где θ_0 — амплитуда качки; $\omega = 2\pi/\tau_0$ — частота собственных поперечных колебаний судна; δ — фазовый угол. Строго говоря,

уравнение (6.16) справедливо лишь при рассмотрении регулярной качки в условиях резонанса. Пользуясь им без каких-либо ограничений, мы имеем в виду следующие обстоятельства.

В условиях нерегулярного волнения, как это отмечается в главе четвертой в павой, уравнение (6.16) соответствует характеристикам колебаниям. Такие колебания представляют особый интерес, поскольку они отличаются наибольшей повторяемостью. Кроме того, колебания, имеющие максимальную амплитуду, совпадают с периодами, близкими периоду собственных поперечных колебаний судна.

Допустим, что под действием системы сил, статически приложенных к судну, оно наклонилось на некоторый угол и груз расположился под углом $\beta_{ст}$ к горизонтальной плоскости. Тогда силу веса P , приложенную к какой-либо частице груза, расположенной на его поверхности, можно разложить по составляющей

$$\begin{aligned} P_N &= P \cos \beta_{ст}; \\ P_Z &= P \sin \beta_{ст}, \end{aligned} \quad (6.17)$$

действующие перпендикулярно к поверхности груза и вдоль этой поверхности. Состояние равновесия рассматриваемой частицы определяется равенством

$$P \sin \beta_{ст} = f_0 P \cos \beta_{ст}, \quad (6.18)$$

где f_0 — коэффициент трения покоя. Из формулы (6.18) следует, что $\beta_{ст} = \text{tg} \beta_{ст}$ (для идеальной среды).

Рассмотрим ту же задачу с учетом качки судна. Продифференцируем дважды уравнение (6.16), найдем, что угловые ускорения колебательного движения выразятся равенством

$$\ddot{\theta} = -\omega^2 \sin(\omega t + \delta)$$

и, следовательно,

$$\ddot{\theta} = -\omega^2 \theta, \quad (6.19)$$

изменяясь от $\ddot{\theta} = 0$ в момент прохождения судна через положение равновесия до $\ddot{\theta} = -\omega^2 \theta_{\max}$ при его максимальном наклонении.

Сила инерции Q , действующая на рассматриваемую частицу груза, найдется по формуле

$$Q = -m\ddot{\theta} = m\omega^2 \theta, \quad (6.20)$$

где r — расстояние от центра тяжести судна G_0 до частицы груза. Сила Q направлена перпендикулярно к прямой r , как это показано на рис. 85.

Пусть составляющие сил P и Q , направленные вдоль поверхности груза, будут P_N и Q_N , а направленные перпендикулярно к ней, P_Z и Q_Z (для того, чтобы чертеж был более ясным, силы P и Q разнесены условно вдоль поверхности груза). Составляющие

Q_N и Q_Z считаются положительными, если их направление совпадает с направлением составляющих сил веса. Условие равновесия действующих сил определяется равенством

$$P_N + Q_N = f_0 (P_Z + Q_Z),$$

где, как и прежде, f_0 — коэффициент трения покоя.

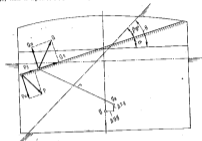


Рис. 85. Силы, действующие на частицу груза при бортовой качке в общем случае.

Представим последнюю формулу в виде

$$\frac{P_N}{P_N} = f_0 + f_0 \frac{Q_N}{P_N} - \frac{Q_Z}{P_N}$$

и будем считать, что отношение

$$f = \frac{P_Z}{P_N}$$

представляет собой динамический (условный) коэффициент трения при наличии сил инерции. Тогда условие равновесия действующих сил переищется так

$$f = f_0 \left(1 + \frac{Q_N}{P_N} \right) - \frac{Q_Z}{P_N}. \quad (6.21)$$

Формула (6.21) становится недействительной, если сила Q_N больше силы P_N и действует в противоположном направлении или же $f < 0$. Как показывает формула (6.20), такие случаи

в принципе возможны при достаточно больших значениях отрезка r и частоты ω . При всех прочих одинаковых условиях отрезок r возрастает по мере увеличения размеров судна, а частота ω — по мере возрастания начальной остойчивости.

В качестве частного случая рассмотрим условие предельного равновесия действующих сил на поверхности груза исходя из предположения, что в начальный момент при $\theta = 0$ свободная

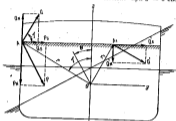


Рис. 86. Силы, действующие на частицу зерна в точках A и A_1 при бортовой качке в условиях предельного равновесия, когда $\alpha = 0$.

поверхность груза была горизонтальна. Принятое допущение позволяет ограничиться рассмотрением действующих сил при $\theta = \beta_{кр}$.

Будем вначале считать, что рассматриваемая частица груза расположена, как это показано на рис. 86, в точке A у поднимающегося борта. Здесь сила Q_N , отжимающая груз, достигает максимума. В диаметральной плоскости она обращается в нуль, а в точках, расположенных в районе опускающегося борта (например в точке A_1), сила $Q_N = Q'_N$, прижимает частицу груза к его свободной поверхности.

Учитывая равенство углов, обозначенных на рис. 86 буквой γ , можно выразить составляющие силы Q формулами

$$\begin{aligned} Q_S &= mg\omega^2 \theta \cos \gamma; \\ Q_N &= -mg\omega^2 \theta \sin \gamma, \end{aligned} \quad (6.22)$$

где в настоящем случае r — расстояние от центра тяжести судна до точки A .

Длина этого отрезка связана с координатами y и z точки A зависимостями

$$\begin{aligned} y &= r \sin \gamma; \\ z &= r \cos \gamma, \end{aligned} \quad (6.23)$$

что позволяет представить формулы (6.22) в виде

$$\begin{aligned} Q_S &= mg\omega^2 \theta; \\ Q_N &= -mg\omega^2 \theta. \end{aligned} \quad (6.24)$$

Кроме того, можно написать

$$\begin{aligned} P_S &= P \sin \theta; \\ P_N &= P \cos \theta. \end{aligned} \quad (6.25)$$

Подставляя значения составляющих сил P и Q по формулам (6.24) и (6.25) в выражение (6.21), найдем

$$f = f_0 - \frac{(y \sin \omega^2 \theta + z \cos \omega^2 \theta)}{P \cos \theta}$$

и, разделив числитель и знаменатель дроби почленно на \cos , получим

$$f = f_0 - \frac{y \sin \omega^2 \theta + z \omega^2 \theta}{g \cos \theta}$$

или в другом виде

$$f = f_0 \left(1 - \frac{y \omega^2 \theta}{g \cos \theta} \right) - \frac{z \omega^2 \theta}{g \cos \theta}. \quad (6.26)$$

Рассмотрим второй вариант решения задачи, зная в формулу (6.26) вместо коэффициентов трения f и f_0 углы естественного откоса $\beta_{кр}$ и $\beta_{кр}'$. Для этого решим уравнение (6.26) относительно угла θ , после чего оно переищется так:

$$\theta = \frac{(\beta_{кр}' - \beta_{кр}) \cos \theta}{(\beta_{кр}' + \beta_{кр}) \frac{\omega^2 \theta}{g}}. \quad (6.27)$$

Формула (6.27) после подстановки

$$\theta = \beta_{кр}' \quad f = \tan \beta_{кр}'; \quad f_0 = \tan \beta_{кр}$$

приводится к виду

$$\beta_{кр}' = \frac{\sin(\beta_{кр}' - \beta_{кр})}{(y \sin \beta_{кр}' + z \cos \beta_{кр}') \frac{\omega^2}{g}}$$

Приняв во внимание, что приблизительно $\sin(\beta_{кр}' - \beta_{кр}) \approx (\beta_{кр}' - \beta_{кр})$, и учтя формулу (6.23), можно написать

$$\beta_{кр}' = \frac{\beta_{кр}}{1 + \frac{\omega^2}{g} \cos(\gamma - \beta_{кр})}. \quad (6.28)$$

В таком виде последняя формула была получена путем несредственных выкладок Скрабинки в упомянутой выше работе.

Несколько иначе подошел к решению рассматриваемой задачи В. М. Быков в работе [1963]. Она же выводит в исходную формулу (6.21) динамического коэффициента трения и определяет значение классического коэффициента трения покоя, необходимое для осуществления условий предельного равновесия, по формуле

$$f_0 = \frac{P_x + Q_x}{P_N + Q_N}. \quad (6.29)$$

После подстановки в выражение (6.29) значений составляющих сил веса и инерции В. М. Быков получил расчетную формулу

$$f_0 = \frac{\sin \theta + \frac{2\omega^2 h}{g}}{\cos \theta - \frac{v^2}{g}}. \quad (6.30)$$

Пусть $y = z = 5$ м; $r = (y^2 + z^2)^{0.5} = 7,07$; $\gamma = 45^\circ$; $\tau_1 = 8$ сек.; $\omega = 2\pi/\tau_1 = 0,785$. Тогда, воспользовавшись формулой (6.28), нетрудно найти следующие соотношения между углами $\beta_{\text{ст}} = \beta_{\text{ст}}'$:

$\beta_{\text{ст}}$	10°	30°	45°
$\frac{\beta_{\text{ст}}}{\beta_{\text{ст}}'}$	0,73	0,71	0,66

При периоде собственных поперечных колебаний, увеличенном до $\tau_1 = 10$ сек., отклонение $\beta_{\text{ст}}/\beta_{\text{ст}}'$ изменилось бы так:

$\beta_{\text{ст}}$	10°	30°	45°
$\frac{\beta_{\text{ст}}}{\beta_{\text{ст}}'}$	0,81	0,80	0,78

Таким образом, при постоянном периоде τ_1 отклонение $\beta_{\text{ст}}/\beta_{\text{ст}}'$ соответствующее началу взрывчатости груза, отличается относительной стабильностью. Объясняется это тем, что при $\beta_{\text{ст}} = \theta$ угловые ускорения, как это следует из формулы (6.19), изменяются пропорционально углу $\beta_{\text{ст}}$. При других предположениях эта закономерность нарушается.

Заметим, что формулы, выражающие условие предельного равновесия в точке, расположенной на опускающемся борте симметрично по отклонению к точке А, отличаются от выведенных формул лишь знаками. В частности в этом случае формула (6.28) переписывается так:

$$\beta_{\text{ст}} = \frac{\beta_{\text{ст}}'}{1 + \frac{2\omega^2}{g} \cos(\gamma + \beta_{\text{ст}})}. \quad (6.31)$$

Для точки же, расположенной в диаметральной плоскости,

$$\beta_{\text{ст}} = \frac{\beta_{\text{ст}}'}{1 + \frac{2\omega^2}{g} \cos \beta_{\text{ст}}}. \quad (6.32)$$

Формулы (6.28), (6.31) и (6.32) позволяют установить, как изменятся значения отношения $\beta_{\text{ст}}/\beta_{\text{ст}}'$ вдоль свободной поверхности груза. Так, например, в случае $\beta_{\text{ст}} = 45^\circ$ можно получить для симметричных точек А; А₁ и точки, расположенной в диаметральной плоскости (ДП), следующие соотношения:

Точка	А	ДП	А ₁
$\beta_{\text{ст}}/\beta_{\text{ст}}'$	0,69	0,76	1,00

При меньшем угле естественного откоса пределы изменения отношения $\beta_{\text{ст}}/\beta_{\text{ст}}'$ сближаются.

Когда судно начнет возвращаться к положению равновесия в сторону убывающих углов θ , сила инерции будет направлена против вращения судна, вследствие чего угол $\beta_{\text{ст}}$ вначале возрастет и будет больше угла $\beta_{\text{ст}}'$. Сравнявшись с последним при прохождении судна через положение равновесия, он вновь будет уменьшаться при вращении судна на противоположный борт.

Если уровень груза расположит ниже центра тяжести судна, то сила кинерции, возникающая при бортовой качке, способствует увеличению динамического угла естественного откоса (составляющие Q_x и P_y действуют в противоположных направлениях). Этим можно объяснить леготы, предусмотренные правилами перевозки сыпучих грузов, для случаев, когда трюм заполнен сыпучим грузом не более чем на 35%.

При $\tau_1 = 10$ сек. значение сил кинерции становится более значительным по мере увеличения размеров судна и возрастания координат y и z . Влиянием увеличения координаты z объясняется также большая подвижность зерна, расположенного в тыльниках, по сравнению с зерном, которое перевозится в трюмах.

Динамически подобные судна¹ удовлетворяют критериям подобия: $2/g\tau_1^2 = \text{idem}$; $\rho/g\tau_1^2 = \text{idem}$. Поэтому, если $\beta_{\text{ст}} = \text{idem}$, имеем $\beta_{\text{ст}}' = \text{idem}$ при $\theta = \text{idem}$. Так как относительные периоды свободных поперечных колебаний $\tau_1 \sqrt{g/B}$ и отношения B/H современных сухогрузных судов изменяются в сравнительно узких пределах, то значения угла $\beta_{\text{ст}}'$, подсчитанные для различных зерновозов при одинаковых углах θ , оказываются более или менее стабильными.

Силы инерции, сопутствующие набравшим, не могут, по-видимому, непосредственно оказать существенного влияния на смеще-

¹ Вопросы динамического подобия рассмотрены в учебниках Л. М. Носова. Теория корабля (1956), Судна (1956) и Проектирование судов, ч. 1, глава вторая (1964).

ние сплывших грузов в судовых условиях. Однако вибрация приводит к некоторой усадке груза (на 2—3%) и его уплотнению, что оказывает косвенное (незначительное) влияние на податливость груза.

При проверке остойчивости судна, перевозимых сухих грузов, обычно исходят из предположения, что силы инерции, вызванные шквалом, действуют на протяжении полного размаха во время наклона судна под ветер. Эти силы изменяются во времени по величине и направлению, однако в целом они способствуют увеличению податливости груза.

Влияние вертикальной качки незначительно по сравнению с влиянием бортовой качки. Силы же инерции, вызываемые килевой качкой, могут достигать значительной величины лишь в оконечностях судна, где ширина трюма уменьшается. Кроме того, по мере увеличения бортовой качки амплитуды килевой качки снижаются. Поэтому можно предполагать, что килевая качка не оказывает значительного влияния на смещение сплывших грузов.

Суммарное влияние сил качки различного происхождения может все же существовать превосходить влияние изолированной силы качки, вызванной бортовой качкой.

Примерка остойчивости. Примем вначале для упрощения задачи $\beta_0 = \text{const}$. Тогда при построении диаграммы остойчивости для случая наклона судна на ветер и возращения в исходное положение будем иметь $\alpha - \theta - \beta_0$ и $\alpha - \theta + \beta_0$, где β_0 — абсолютное значение угла поклона.

На рис. 87 две такие кривые A_0A_1 и B_0B_1 показаны сплошными линиями. Из них первая рассчитана в предположении, что в начальный момент, когда $\theta = 0$, судно загружено симметрично. Промежуточная кривая C_0C_1 , показанная на рисунке, построена при $\beta = 0$ и $\alpha = \theta$, что соответствует случаю, когда судно перевозит жидкий груз. Исходная диаграмма остойчивости измерена пунктирной линией.

Допустим, что в момент, которому на рисунке соответствует точка A_1 , судно, наклоненное на правый борт, начало вращаться в обратном направлении. Тогда в интервале углов $\Delta\theta_1 = 2\beta_0$ диаграмма остойчивости изобразится пунктирной линией, а затем, после того как груз начнет пересылаться на другой борт, диаграмма сойдет с нижней сплошной кривой.

В угловой мере точки C_1 и B_1 на промежуточной и нижней кривой сдвигаются по отношению к одинаковым точкам A_1 соответственно на расстояния β_0 и $2\beta_0$. Поэтому после построения кривых A , B и C легко измерять по трем точкам любые переходные кривые.

Если после поворота плыво за угол, соответствующий отрезку A_1B_1 , судно вновь качнется вправо, то, начиная с точки B_1 , диаграмма остойчивости пойдет по пунктирной кривой B_0A_1 , а затем — по верхней основной кривой. Поэтому нижняя основная кривая может рассматриваться как отгибающаяся кривая по отношению

ко всем наиболее неблагоприятным из возможных диаграмм остойчивости судна, касающимся на правый борт.

Для угла поклона, равного β_0 , угол $\theta = (\theta)_{\text{max}}$, отсекаемый на оси абсцисс нижней основной кривой, представляет собой предельный максимальный угол статического равновесия судна. Он может возникнуть в результате воздействия либо нескольких следующих друг за другом шквалов либо одного шквала значительной силы. При бортовой качке отклонение судна от этого по-

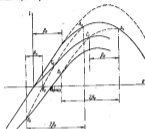


Рис. 87. Основное и переходные кривые остойчивости судна с сплывшим грузом.

ложения на ветер будет сопровождаться пересыпанием груза, что приведет к снижению угла статического равновесия.

Допустим, что бортовая качка совмещается с амплитудой θ_0 . В этом случае груз не будет пересылаться, если в состоянии равновесия судна груз наклонен на угол β_1 , удовлетворяющий равенству

$$\theta_0 < \beta_0 - \beta_1.$$

На рис. 87 амплитуды качки, при которых груз не пересылается, выражаются в угловой мере проекциями на ось абсцисс отрезков θ_0B_1 переходных кривых (на чертеже указан лишь отрезок θ_0B_1).

Поэтому, построив интерполяционный график $\theta_x = f(\theta)$, можно определить угол равновесия $\theta_1 = \theta_0$, при котором груз не пересылается, когда судно совершает поперечные колебания с известной амплитудой θ_0 .

¹ Отрезок переходных кривых θ_0B_1 соответствует наклону судна на ветер (без пересыпания груза), считая от угла статического равновесия.

До сих пор мы принимали $\beta_0 = \text{const}$. В принципе следовало бы, учитывая динамику явления, рассматривать угол поклона как величину переменную, но, поскольку вопрос еще недостаточно изучен, в отчетливой практике обычно исходит из двух значений угла поклона β_{max} и β_{min} . Первым пользуются при построении верхней, а вторым — при построении нижней ветви кривых восстанавливающих плеч. Диаграммы остойчивости, рассчитанные в этом предположении, отличаются тем, что точки C_1 и B_1 переходных кривых располагаются на расстояниях β_{max} и $(\beta_{\text{min}} + \beta_{\text{max}})$ от точки A_0 , считая до горизонтали.

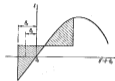


Рис. 88. Схема к проверке остойчивости судна с жидким грузом.

Если остойчивость судна, перевозящего сыпучий груз, провернется с учетом наклона бортовой качки, то, строго говоря, следовало бы выполнять расчет в нескольких вариантах, задаваясь рядом значений угла поклона и амплитуды качки. Однако для сокращения работы представляется возможным исходить из какого-либо среднего значения угла поклона β_0 , считая, что при $\theta = 0$ имеет место равенство $\beta = \beta_0$. Можно было бы фиксировать также расчетную амплитуду качки, считая условно, что при наклоне судна на левый борт груз вообще не пересыпается. Эти допущения позволили бы ограничиться построением одной лишь верхней ветви диаграммы остойчивости.

По Правилам Регистра СССР [1962 а] остойчивость судна проверяется с учетом бортовой качки, амплитуда которой θ_k определяется в соответствии с общими нормами остойчивости. При построении расчетного графика предпологается, что в начальный момент при $\theta = 0$ судно загружено симметрично. Переходная кривая, а с нею и расчетное значение угла статического равновесия подбираются так, чтобы амплитуда качки совпала бы с углом, при котором груз начинает пересыпаться. Углы поклона принимаются равными $\beta_{\text{max}} = 15^\circ$; $\beta_{\text{min}} = 2\beta_{\text{max}} = 30^\circ$.

При определении опрокидывающего момента можно применить общий прием, регламентированный отечественными нормами остойчивости судов (см. главу седьмую), однако в рассматриваемом случае наряду с влиянием ветра и волнения необходимо учесть влияние пересыпания груза. Подобная задача решается при помощи построения, показанного на рис. 88. Оно отличается от аналогичного построения, не учитывающего смещения груза, лишь тем, что начало координат превято не в точке $\theta = 0$, а в точке $\theta' = -\theta - \theta_0 = 0$.

§ 8. ПРИЕМ ВОДЫ НА ОТКРЫТЫЕ ПАЛУБУ

Если волна накрывает верхнюю палубу, вода задерживается на ней в течение некоторого времени, просачивая на нижеромые палубы, которые предусматривают в фальшборте. В тех случаях, когда излишки воды накапливаются на палубу одна за другой, количество воды, влияющей на судно, может быть значительным и влияние ее на остойчивость — существенным. Особенно неблагоприятные условия создаются, если сток воды через отверстия в фальшборте затруднен вследствие обледенения судна или загромождения палубы грузом.

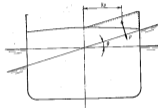


Рис. 89. Схема к расчету остойчивости судна при заливе палубы водой.

Пренебрегая влиянием динамических факторов⁹, можно построить диаграмму остойчивости судна с водой на верхней палубе, используя формулы теории корабля, предназначенные для определения приращений восстанавливающих плеч при приеме на судно малого груза. Однако в этом случае нужно рассматривать не столько прием воды как величину переменную.

Пусть (рис. 89) все воды, задержавшиеся на палубе при наклоне судна на угол θ , будет p , а его координаты β_0 и a_0 . Тогда восстанавливающие плечи формы I_0 изменятся на величину

$$\Delta I_0 = -\frac{p}{D+p} I_0 \quad (6.33)$$

⁹ Судя по работам Н. Н. Раменова [1966], пренебрежение влиянием динамических факторов приводит к значительной ошибке, затрагивающей в основном сторону.

Одновременно восстанавливающие плечи веса изменятся по величине

$$\Delta M_x = \Delta M_x + \Delta M_y,$$

где ΔM_x и ΔM_y — приращения плеч, вызванные перемещением центра тяжести судна в вертикальном и горизонтальном направлениях.

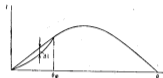


Рис. 90. Диаграмма остойчивости судна с водой на борной палубе.

Они выражаются формулами

$$\Delta M_x = -\frac{P}{D+P} \cos \theta, \quad (6.34)$$

$$\Delta M_y = \Delta a \sin \theta, \quad (6.35)$$

где Δa — приращение возмущения a центра тяжести судна над центром валичности. Если ΔT — приращение осадки, вызванное движением воды, то

$$\Delta M_y = -\frac{P}{D+P} \left(T + \frac{\Delta T}{2} - a - z_g \right) \sin \theta. \quad (6.36)$$

Суммируя формулы (6.33), (6.34) и (6.36), найдем суммарное приращение восстанавливающих плеч

$$\Delta M = \Delta M_x + \Delta M_y + \Delta M_z.$$

Для построения кривой $\Delta M = f(\theta)$ нужно предварительно определить по чертежу значения r ; y_g ; $z_g = f(\theta)$. Исправленная диаграмма остойчивости изображится так, как это показано на рис. 90. Для угла крена, при котором свободная поверхность воды касается верха фальшборта, приращение Δl обращается в нуль. После этого не приходится учитывать влияния алинейной воды, так как она сливается с водой окружающей судно.

§ 6. ПРАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ОБ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ

В этом параграфе приведены практические данные и рекомендуемые показатели остойчивости проектируемого судна. При правильном использовании рекомендуемых цифр они приводят к результатам, не противоречащим правилам Регистра СССР.

В дальнейшем основным показателем, ограничивающим как нижний, так и верхний предел остойчивости (исходя из требований безопасности плавания и поведения судна на волнованном море), считается относительная начальная метацентрическая высота. В некоторых случаях, большей частью для небольших судов, приводятся дополнительные указания об абсолютных значениях метацентрической высоты. Этими показателями можно пользоваться в расчетах, связанных с определением элементов проектируемого судна, поскольку метацентрическая высота, при заданной высоте надводного борта и мере седловатости, в значительной степени предопределяет форму диаграммы остойчивости.

Общие рекомендации. В качестве общей рекомендации для судов любого типа при любых условиях плавания можно предложить ограничивать нижний предел начальной метацентрической высоты проектируемого судна цифрой $h = 0,2$ м. Желательно, однако, чтобы метацентрическая высота проектируемого судна была бы не менее $h = 0,4$ м, а для небольших судов, эксплуатируемых в тяжелых условиях, — не менее 0,6 м.

Пассажирские суда. Максимальное на протяжении рейса значение метацентрической высоты пассажирских судов обычно соответствует моменту выхода в рейс. Для обеспечения хорошего поведения судна на волнованном море желательно, чтобы метацентрическая высота пассажирских судов в этом случае нагрузки лежала в пределах

$$\frac{h}{B} = 0,04 - 0,05. \quad (6.37)$$

Этими цифрами можно пользоваться при ширине судна $B > 15$ м. Верхний предел относительной метацентрической высоты крупных судов целесообразно несколько увеличить.

В условиях нагрузки, при которой проверяется аварийная остойчивость, относительная метацентрическая высота не должна быть меньше чем

$$\left(\frac{h}{B} \right)_1 = 0,030 - 0,035, \quad (6.38)$$

так как, в противном случае, метацентрическая высота судна с затопленными отсеками оказывается обычно отрицательной. Цифры, вытекающие из формулы (6.38), могут оказаться недостаточными, если расчет ведется на несимметричное затопление отсеков.

Если формулы (6.37) и (6.38) приводят к несовместимым результатам, приходится увеличивать начальную метацентрическую высоту судна и в условиях нагрузки при выходе в рейс. И. Ч. Нидермайр (J. C. Niedermaier) [1936] считает, что для обеспечения аварийной остойчивости целесообразно принимать метацентрическую высоту судна при выходе в рейс равной

$$h = 0,06B - \frac{0,020}{\Delta B}, \quad (6.39)$$

что, по его мнению, допустимо по условиям мореходности.

Предложение И. Нидермайра остретало в свое время возражения ряда специалистов, поскольку оно приводит к сравнительно высоким значениям отношения h/B для крупных пассажирских судов. Так, например, если при ширине судна, равной 15 м, отношение h/B по формуле Нидермайра равно 4,8%, то при увеличении ширины судна до 30 м относительная метацентрическая высота возрастает до 5,6%. Все же дальнейшая эволюция пассажирских судов показала, что формула (6.39) приводит к приемлемым цифрам. Отчасти это можно объяснить тем, что, как общее правило, крупные пассажирские суда снабжаются успокоителями качки.

При ширине судна $B < 15$ м метацентрическая высота, подсчитанная по формуле (6.37), может оказаться недостаточной. Для небольших судов рекомендуется в качестве минимальных цифр $h = 0,6$ м при выходе в рейс и $h = 0,45-0,50$ м — в наиболее неблагоприятных условиях нагрузки.

Отметим также, что формулы (6.37) и (6.39) относятся к судам океанского плавания. Для судов, плавающих в бассейнах с незначительным волнением, метацентрическая высота может быть увеличена сверх указанных цифр. На построенных судах с ограниченным районом плавания метацентрическая высота достигает иногда 15—20% от ширины судна.

Проверку аварийной остойчивости целесообразно производить к моменту наращивания запасов топлива и пресной воды на 50%, если в соответствующих инструкциях капитану предусматривается балластировка судна после этого момента. Желательно, чтобы заданная остойчивость судна до наращивания 50% топлива и воды была обеспечена без приема лишнего балласта, так как необходимость этого и в больших количествах балластировать судно в эксплуатационных условиях создает затруднения.

На современных пассажирских судах стремятся сохранить положительную остойчивость при их разгрузке. Желательно, чтобы для судна без груза и топлива метацентрическая высота была не менее 15—20 см.

Кроме того, как это уже отмечалось, нижний предел остойчивости пассажирских судов может быть лимитирован предельно допускаемыми углами крена при выполнении пассажиров на одном

борту. Правила Регистра СССР ограничивают такие предельный угол крена на циркуляции.

Приводим данные об остойчивости следующих пассажирских судов при выходе в рейс: «Ван Франко» (I); «Прект (II); «Бергенс-Фюрд» (III); «Гриндхольм» (IV); «Рейна даль Мар» (V); «Тедор Херил» (VI); «Морнхольм» (VII).

	I	II	III	IV	V	VI	VII
L	125,0	205,0	158,0	187,7	170,7	132,6	161,5
B	23,6	26,4	21,9	24,9	23,7	18,7	23,2
T	8,0	8,8	8,4	8,2	9,1	6,5	8,5
h	750	1100	847	882	706	547	385
h/B	3,18	4,15	3,9	3,5	3,0	2,9	1,7
Δ/B, %	5,0	5,7	4,5	5,6-6,4	5,5-5,9	4,1	4,3-5,2

В перечне элементов рассмотренных судов буквой B обозначена пассажироемкость.

Судоустройство. Для грузовых судов шириной $B \geq 15$ м, как и для пассажирских целесообразно принимать $h/B = 0,04-0,05$ (при нагрузке, соответствующей выходу в рейс). В этом случае после наращивания топлива метацентрическая высота судна с машинными установками, работающими на жидком топливе, падает иногда до $h \approx 0,01 B$, в соответствии с чем может оказаться необходимой балластировка судна.

Метацентрическая высота грузовых судов в состоянии порожня возрастает. Достигая для судов среднего тоннажа 1,5—2 м, а иногда выражается и более высокими цифрами. В балластном пробеге, вследствие большой начальной остойчивости, поведение грузовых судов на волнованном море ухудшается.

При ширине судна $B < 15$ м в качестве подходящих цифр можно рекомендовать $h = 0,7-0,8$ м.

Лю И. В. Вонсебекер² (J. W. Wonsbecker) [1957] метацентрическая высота небольших каботажных шхундарных судов водоизмещением $D = 1050-1450$ м лежит в пределах $h = 0,4-0,9$ м. В качестве наиболее часто повторяющихся цифр он называет $h = 0,6$ м, а затем $h = 0,72-0,82$ м. Для каботажных шхундарных судов водоизмещением $D = 1650-1850$ м И. В. Вонсебекер указывает пределы начальной метацентрической высоты $h = 0,5-1,2$ м при наиболее частой цифре $h = 0,9$ м.

При проектировании десовозов нужно заботиться о том, чтобы обеспечить достаточную их остойчивость в рейсах с палубным грузом, не претерпевая к чрезмерному увеличению остойчивости в условиях перевозки массовых или штучных грузов. Как отмечалось в книге автора [1964], в качестве характерных для оте-

² См. также более ранние данные Л. Буралла, приведенные в § 11 главы второй.

чественной практики проектирования лесовозов шифр можно назвать

$$\frac{h}{B} = 0,015 - 0,030;$$

$$\frac{h}{B} = 0,065 - 0,070$$

при перевозке леса и зерна. Снижение относительной метacentрической высоты лесовоза с палубным грузом до указанного предела возможно, поскольку при наклонных судна груз, укрепленный на палубе, создает дополнительные восстанавливающие моменты.¹

При проектировании судов, предназначенных для перевозки сыпучих грузов, желательно принимать метacentрическую высоту не меньше, чем 0,6 м на протяжении всего рейса. В качестве минимальных шифр представляется возможным назвать $h = 0,4$ м; $I_{\text{мин}} = 0,30$ м при $\theta \geq 30^\circ$ и $\theta_{\text{макс}} = 70^\circ$.

Начальная остойчивость некоторых советских сухогрузных судов при выходе в рейс может быть охарактеризована следующими шифрами.

P	150	1000	3000	5000	13 000
$P_{\text{доп}}$	170	1140	3700	5900	16 000
h	6,5	11,7	14,4	16,8	21,8
θ	0,69	0,83	0,66	0,65	1,00
$h/B, \%$	10,6	7,1	4,6	3,9	4,6

Нефтевозы. Жидкий груз, перевозимый на нефтевозах, оказывает существенное влияние на бортовую качку, уменьшая метacentрическую высоту судна и снижая взрывоопасные свойства судна. Сказывается также колебательное движение груза. Влияние этих факторов было исследовано в ряде работ, и в частности в работе Н. Н. Разманина [1962]. Судя по последней, при общепринятых расстояниях между продольными переборками жидкий груз оказывает благоприятное влияние на поведение нефтевозов.

С другой стороны, вследствие отсутствия двойного дна центр тяжести нефтевозов располагается ниже центра тяжести сухогрузных судов с теми же главными размерениями. Это приводит к увеличению начальной метacentрической высоты нефтевозов. На крупных судах этого типа сравнительно большие значения отношения B/T , которые приходится принимать вследствие эксплуатационных ограничений осадки, тоже приводит к увеличению метacentрической высоты. Так же сказывается и наблюдается в последние годы тенденции сокращать длину крупных нефтевозов для удешевления стоимости постройки.

Необходимо, наконец, отметить, что грузовые люки нефтевозов имеют небольшие размеры и надежно закрываются металличе-

скими водонепроницаемыми крышками. Кроме того, для переходов вдоль судна в соседнюю погоду на нефтевозах предусматривают специальные востры. Вследствие этих особенностей рассматриваемых судов востры, связанные с закрыванием открытых палуб, не имеют для них столь существенного значения, как для сухогрузных судов.

Приводим проекты шифры, характеризующие остойчивость некоторых советских нефтевозов.

P	2100	10 200	13 000	17 900	25 300	44 000
$P_{\text{доп}}$	2300	11 400	13 900	19 900	28 600	49 200
h	12,4	19,2	19,4	23,0	25,8	30,0
θ	1,53	1,83	1,33	1,11	1,07	3,06
$h/B, \%$	12,3	9,3	6,9	4,8	7,6	5,9

Эти значения метacentрической высоты даны с учетом поправки на влияние свободных уровней. Для двух последних нефтевозов несправедливы значения относительной метacentрической высоты равны 9,8 и 12,8% соответственно.

В последние годы среди крупных нефтевозов появились суда с избыточным надводным бортом.

Избыточный надводный борт позволяет снизить начальную метacentрическую высоту надводных судов.

Промысловые суда. Автор настоящей книги рекомендует [1955] для промысловых судов значения метacentрической высоты в пределах $h = 0,7-0,8$ м. В качестве минимальных шифр предлагалось для траулеров водоизмещением $D = 1000$ м $h = 0,4$ м и для мелких судов $h = 0,6$ м.

Эти шифры более или менее согласуются с рекомендациями ряда специалистов. Так, например, В. Мёккел (W. Möckel) [1961] считает, что желательные значения метacentрической высоты больших траулеров лежат в пределах $h = 0,7-0,9$ м. По его мнению, при $h = 0,6$ м суда слишком валяют, а при $h = 1,0$ м отличаются плохой мореходностью. Рекомендации Мёккела основываются на собственных наблюдениях и опросах лиц из плавающего состава. Напомню, что в прежних по докладу Х. Е. Егера (H. E. Jäger) [1954] Д. Манниг назвал в качестве минимальных шифр, рекомендуемых для промысловых судов в наиболее неблагоприятных условиях нагрузки: $h = 0,6$ м, $I_{\text{мин}} = 0,3$ м при $\theta \geq 25^\circ$ и $\theta_{\text{макс}} = 60^\circ$.

Тогда же Г. Аэртсен предложил $I_{\text{мин}} = 0,3$ м при $\theta = 30^\circ$. Ч. Никум (C. Nickum) [1955] предлагает руководствоваться двумя показателями $h \geq 0,6$ м и $h/B \geq 0,1$.

Одновременно специалисты указывают, что высоту надводного борта промысловых судов следует принимать большей, чем это предусмотрено правилами о грузовых марках. По В. Ф. Спеннеру (W. F. Spenner) [1946] надбавка к регламентируемой высоте

¹ Дополнительное сопротивление в балластах по затронутому вопросу можно найти в отечественной работе автора.

надводного борта должна составлять $\Delta f = 0,15-0,30$ м. В упомянутой работе Ч. Никума предлагается формула

$$\frac{L+m}{B} \geq 0,15,$$

где m — мера седловатости, а в уже цитированной работе Х. Егера дается формула $f \geq L/75$ для больших траулеров.

Автор считает, что относительную высоту борта целесообразно принимать не менее $H/T = 1,25$ — для больших траулеров и $H/T = 1,3$ — для мелких промысловых судов. Во многих случаях для обеспечения надлежащей остойчивости судна в интервале больших углов наклона при умеренной начальной остойчивости полезно устанавливать некоторое количество твердого балласта. Кроме того, промысловые суда должны иметь увеличенную седловатость в носовой оконечности, а если они проектируются без бака, это должно быть компенсировано дальнейшим увеличением седловатости. В качестве подходящих шкал, характеризующих минимальную относительную высоту надводного борта в носовой оконечности, можно назвать для мелких промысловых судов $f_{\text{н}}/L = 0,09-0,10$.

Буксирь. Остойчивость буксирных судов должна быть достаточной для того, чтобы они могли противостоять рынку буксирного троса. Наиболее опасен рыбок, возникающий при повороте буксира, если буксируемое судно продолжает двигаться в первоначальном направлении по инерции или под действием собственных движителей. Рыбок может быть вызван также отклонением буксирного судна от курса под влиянием ветра или течения.

Остойчивость буксирных судов обычно проверяют в предположении, что к отклоненному по отношению к диаметральной плоскости буксирному тросу мгновенно приложена некоторая скорость. При этом масса буксирного судна предполагается малой по сравнению с массой буксирного вола, а ударный импульс считается приложенным к буксирному тросу перпендикулярно к диаметральной плоскости.

В нормах Регистра СССР (см. главу седьмую) в качестве нормируемого параметра принята скорость, приложенная к буксирному гаку. Она задается в функции мощности буксира.

Но оставалось в деталях вопроса, отметить, что метацентрическая высота советских буксиров лежит в пределах $\Delta = 0,6-0,9$ м. Как это было указано в § 5, в ФРГ для портовых буксиров считают необходимым иметь: $I_{\text{мет}} = 0,30-0,35$ м при $\delta \geq 30^\circ$ и $\Phi_{\text{дек}} \geq 70^\circ$.

§ 1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Остойчивость морских гражданских судов регламентирована в ряде стран. Нормы остойчивости, действующие в Советском Союзе, а также Польше, Китае и Германской Демократической Республике, охватывают все основные типы морских гражданских судов. В США, Канаде, Италии, Франции, Югославии, Японии и Греции нормы остойчивости распространяются на пассажирские суда, а в некоторых из этих стран — также на суда других типов (в большинстве случаев на буксиры и промысловые суда). В Голландии нормируется остойчивость больших грузовых судов. Другие страны не имеют официальных норм остойчивости.

В Советском Союзе требования, предъявляемые к остойчивости морских гражданских судов, изложены в Нормах Регистра СССР (1963). Остойчивость судов днюлабательного флота регламентирована Нормами Регистра (1964). Кроме того, Регистром опубликовано Правила перевозки зерновых и других сыпучих грузов (1962 а), в которых затронуты вопросы остойчивости.

Требования к аварийной остойчивости морских судов сформулированы в Правилах Регистра СССР (1962 б).

Первый проект отечественных норм остойчивости разработан в Морском Регистре СССР инж. П. Г. Лютиным в толе, предшествующее второй мировой войне. Разразившаяся война помешала довести эту работу до конца, и нормы остойчивости названные Регистром СССР временными, были опубликованы лишь в 1948 г. Они явились первым в мировой практике официальным документом, нормирующим остойчивость морских судов различного назначения и района плавания.

Большой вклад в дело нормирования остойчивости судов внес С. Н. Благоневский, которому принадлежит работа (1932), (1951), (1956). Из аналогичных работ иностранных авторов уместно отметить работу Пиероте (Pierrotet) (1935).

В международном плане аварийная остойчивость морских судов регламентирована принципами Международной конвенции 1960 г. (см. «Международная конвенция», 1963).

Под действие Норм устойчивости Регистра СССР [1963] подпадают морские гражданские суда с валовой вместимостью более 20 рег. т, за исключением глиссирующих судов, судов на подводных крыльях и воздушной подушке, джонботовидных судов, парусных судов в режиме плавания под парусами. К устойчивости судов предъявляются как общие требования, зависящие только от района плавания (он определяет категорию судна), так и дополнительные требования, учитывающие особенности типа судна и специфические условия их эксплуатации.

В качестве основного критерия устойчивости принято отношение опрокидывающего момента, который определяется с учетом качки судна, к критическому моменту от давления ветра. Кроме того, регламентированы минимальные требования, предъявляемые в форме диаграммы устойчивости в начальной поперечной метacentрической высоте. Для судов, плавающих в полных районах, регламентированы также требования, которые предъявляются в форме диаграммы устойчивости, построенной с учетом обледенения судна. Дополнительные требования предъявляются к устойчивости пассажирских судов, бунсирю, судов, перевозящих зерно и лес, промышленных судов.

В настоящей главе изложены с некоторыми сокращениями требования, предъявляемые к устойчивости судов (кроме яхтучих кранов) [1963] и [1962 а].

§ 2. КАТЕГОРИИ СУДОВ

В зависимости от дальности и района плавания суда делятся на три категории.

Категория I охватывает суда неограниченного морского и океанского плавания, имеющие валовую вместимость не менее 80 рег. т.

В категорию II входят суда ограниченного морского и океанского плавания.

Категория III относится к судам прибрежного и рейдового плавания.

Суда второй категории могут плавать без каких-либо ограничений в Белом, Балтийском, Черном, Азовском и Каспийском морях. В любое время года они могут плавать с удалением от порта-убежища на 100 миль в Баренцевом, Беринговом, Охотском морях, в прибрежном районе Тихого океана, а в навигационный период — также в Татарском проливе и Амурском лимане и в Карском, Восточно-Сибирском, Чукотском морях. Суда второй категории могут плавать с удалением от порта-убежища на 150 миль в Баренцевом море — в мае—августе, а с июня по август включительно — в Охотском море.

Районы плавания судов третьей категории в различные время года указаны в табл. 18.

Районы плавания судов третьей категории

Районы плавания	Удаление от порта-убежища, миль	Время года
Белое море		
прибрежный район	20	Навигационный период
Кандалакшский район до линии мыс Земляной — озеро Тарново	50	Июнь—август
Динский залив	50	Навигационный период
Копетловской и Онежской аланки	Неограниченно	
Балтийское море		
прибрежный район	20	Навигационный период
Финский залив до меридиана острова Найссар, Рижский залив, пролив Нуту—Вайи	Неограниченно	Май—сентябрь
линией параллель 66° с. ш.	50	Май—август
Черное море		
прибрежный район	20	Навигационный период
" "	50	Май—сентябрь
Северо-восточное побережье Дунайско-Центральное Гирло—мыс Херсонис	Неограниченно	Май—сентябрь
Азовское море		
прибрежный район, все заливы и лиманы	20	Навигационный период
весь бассейн	Неограниченно	Май—сентябрь
Каспийское море		
прибрежный район	20	Навигационный период

Раионы плавания	Удаление от берега-убежища, миль	Время года
северные концы островов Чечена-мис Тиб-Карагин средняя и южная часть моря	Неограничено 30	Май—сентябрь Июнь—август
Японское море с Татарским проливом	30	Навигационный период
гребневый район	30	Навигационный период
запад Петра Великого Амурский лиман	30 Неограничено	Май—август Навигационный период
Баренцево море	30	Навигационный период
гребневый район	30	Навигационный период
Мушкетское побережье Чешская губа и Петровский залив	30 Неограничено	Июнь—август Навигационный период
Берингово море и Тихоокеанское побережье СССР	30	Навигационный период
гребневый район	30	Навигационный период
Восточное побережье Камчатки от мыса Лопатка до мыса Камчатский и Авдотьиной залив	30	Май—август
Охотское море	30	Навигационный период
гребневый район	30	Навигационный период
Сихотлинский залив	Неограничено	То же
Певекской залив с Певекской губой	30	Июнь—август
Моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское	30	Навигационный период
гребневый район	30	Навигационный период

Суда, плавающие в арктических морях по трассе Северного морского пути, относятся к судам первой категории.

Регистр СССР может разрешить судам второй категории Азовско-Черноморского бассейна выход в Арморское и Эгейское моря, а также в восточную часть Средиземного моря восточнее мыса Матаган. Судам той же категории Балтийского бассейна может быть разрешено плавание в проливах: Ботлт, Зунд и Категат до параллели мыса Скаген, а также через Кильский канал по реке Эльбе до выхода в Северное море.

§ 3. КРЕЯЩИЙ МОМЕНТ

Расчетный кренящий момент от действия ветра подсчитывается по формуле

$$M_{кр} = 0,001 \rho_v S z_0$$

где $M_{кр}$ — кренящий момент, т.м.; ρ_v — условное удельное давление ветра, кг/м³; S — площадь парусности, м²; z_0 — отстояние центра парусности от действующей кватерлинны, м. Под площадью парусности понимается проекция надводной части судна (включая мачты, устройства, судовые механизмы и пр.) на диаметрально плоскость.

Численные значения удельного давления ветра указаны в табл. 19 в зависимости от категории судна и возвышения центра

Таблица 19

Удельное расчетное давление ветра, кг/м³

Категория судна	При возвышении центра парусности над действующей кватерлинной						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
I	—	96	107	117	125	131	136
II	—	54	61	66	71	74	77
III	24	27	30	33	35	37	38
Категория судна	При возвышении центра парусности над действующей кватерлинной						
	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
I	140	144	147	150	153	155	156
II	80	82	84	86	87	88	89
III	38	40	41	42	43	44	44

парусности z_4 при прямом положении судна на тихой воде. Предполагается, что ветер направляет перпендикулярно к диаметральной плоскости судна в его прямом положении. Кренящий момент считается мгновенно приложенным и постоянным на протяжении всего наклона судна.

При подсчете парусности проекция корпуса, надстроек, рубок, мачт, вентиляторов, цистерн, палубных механизмов и пр. засчитываются с коэффициентом обтекания, равным единице. Отдельно стоящие конструкции круглого сечения (трубы, вентиляторы, мачты) засчитываются с коэффициентом 0,6.

Парусность неслоного леерного ограждения, рангоута (кроме мачт), такелажа и пр. учитывается путем увеличения суммарной площади парусности сплошных поверхностей (вычисленной для судна без груза и с запасами, израсходованными на 90%) на 5%, а статического момента этой площади — на 10%. В условиях обледенения эти цифры увеличиваются до 10 и 20% или до 7,5 и 15% в зависимости от заданной нормы обледенения (см. § 6).

Разрешается определять парусность неслопных поверхностей численным подсчетом. В этом случае габаритная площадь парусности умножается на коэффициенты заполнения, которые без обледенения и при обледенении (цифры в скобках) принимаются равными:

- для лееров, затянута сеткой, 0,6 (1,0);
- для лееров, не затянута сеткой, 0,2 (0,4);
- для краев решетчатого талы 0,5 (1,0).

Для рангоута, мачт и вант судов, не имеющих парусного вооружения, значения коэффициента заполнения указаны в табл. 20 в зависимости от отношения z_4/b , где z_4 — возвышение точки крепления вант к мачте над фальшбортом; b — величина разнеса вант у фальшборта.

Таблица 20

Коэффициент заполнения для рангоута, мачт и вант		При отношении z_4/b					
Условия эксплуатации	При отношении z_4/b						
	3	4	5	6	7	8	
Без обледенения При обледенении	0,14	0,18	0,23	0,27	0,31	0,35	
	0,27	0,34	0,44	0,51	0,59	0,66	
Условия эксплуатации	При отношении z_4/b						
	9	10	11	12	13	14	
Без обледенения При обледенении	0,40	0,54	0,48	0,82	0,87	0,61	
	0,75	0,84	0,91	1,00	1,00	1,00	

При детальном подсчете парусности мелких предметов, неслопных поверхностей, рангоута, такелажа, лееров, вант, мачт и пр. коэффициент обтекания принимается равным единице.

Для судов, имеющих вспомогательное парусное вооружение, площадь парусности свернутых парусов учитывается отдельно по чертежу бокового вида как сплошная поверхность.

§ 4. РАСЧЕТНАЯ АМПЛИТУДА КАЧКИ

Условная расчетная амплитуда бортовой качки судна с круглой скулой, не имеющей скуловых килей, подсчитывается по формуле

$$\theta_{1\text{м}} = \chi y, \quad (7.01)$$

где $\theta_{1\text{м}}$ — амплитуда качки, град., χ и y — численные множители. Множитель y определяется по табл. 21 в зависимости от категории судна и отношения $\sqrt{h/B}$, где h — метацентрическая высота.

Таблица 21

Значения коэффициента y в формуле (7.01)

Категория судна	При отношении $\sqrt{h/B}$										
	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13
I	26,0	26,0	26,1	26,9	29,0	34,2	42,3	51,1	51,1	51,1	51,1
II и III	23,8	23,8	23,8	24,7	25,2	27,1	30,0	34,6	40,6	50,2	51,1

Множитель χ вычисляется по формуле

$$\chi = \frac{1}{f_1(\alpha) \sqrt{f_2(\alpha) + \frac{k}{B}}}$$

где $f_1(\alpha)$ и $f_2(\alpha)$ — функции от аргумента

$$\alpha = \alpha \left(1 + \frac{1}{\sigma} \frac{B}{T} \right),$$

зависящего от коэффициента полноты грузовой ватерлинии α и отношения ширины судна к осадке B/T . Функции $f_1(\alpha)$ и $f_2(\alpha)$ принимают следующие значения.

$\frac{\alpha}{f_1(\alpha)}$	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$f_2(\alpha)$	1,66	2,02	2,34	2,68	3,02	3,36
$\frac{\alpha}{f_2(\alpha)}$	0,672	0,540	0,430	0,380	0,298	0,255
$\frac{\alpha}{f_1(\alpha)}$	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	
$\frac{\alpha}{f_2(\alpha)}$	3,74	4,13	4,49	4,91	5,30	
$\frac{\alpha}{f_2(\alpha)}$	0,220	0,190	0,168	0,150	0,133	

Если судно имеет скуловые килы, то расчетная амплитуда качки вычисляется по формуле

$$\theta_{\text{сск}} = k\theta_{\text{ск}}, \quad (7.02)$$

в которой коэффициент k определяется в зависимости от аргумента

$$\theta_1 = \frac{z_2}{T} \frac{z_1}{LB} \left(\frac{d_1}{B} \right)^2 10^3,$$

где z_2 — возвышение центра тяжести судна над основной плоскостью; z_1 — суммарная площадь скуловых килей; d_1 — расстояние, измеряемое по миделевому сечению, от центра тяжести судна до середины высоты скулового кила. Коэффициент k принимает следующие значения.

θ_1	0	1	2	3	4	5	≥ 6
k	1,00	0,93	0,87	0,80	0,74	0,67	0,61

Если судно имеет только брусковый киль, то амплитуда качки определяется так, как и в рассмотренном случае, однако аргумент θ_1 предполагается равным

$$\theta_1 = \frac{z_2}{T} \frac{z_1}{LB} \left(\frac{d_2}{B} \right)^2 10^3,$$

где z_1 — площадь боковой проекции брускового кила; d_2 — расстояние, измеряемое по миделевому сечению, от продольной оси, проходящей через центр тяжести судна, до середины высоты брускового кила. Если на судне установлены как скуловые, так и брусковые килы, расчетная амплитуда качки определяется по той же формуле и таблице, однако аргумент θ_1 принимается в этом случае равным

$$\theta_1 = \theta_1 + \theta_2.$$

Амплитуда качки судна с острой скулой принимается равной 70% от амплитуды, найденной по формуле (7.01).

Если амплитуда качки круглоскулового или остроскулового судна, подсчитанная по формулам (7.01) или (7.02), оказывается большей угла крена $\theta_{\text{к}}$, при котором верхняя непрерывная палуба входит в воду, то следует исходить из редуцированной амплитуды

$$\theta_{\text{ам}} = \frac{1}{\alpha} \theta_{\text{к}}, \quad (7.03)$$

Коэффициент α в зависимости от отношения $\theta_{\text{к}}/\theta_{\text{ам}}$ принимает следующие значения.

$\theta_{\text{к}}/\theta_{\text{ам}}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
α	0,181	0,223	0,450	0,545	0,630	0,716	0,790	0,860	0,930

Метацентрическая высота b вводится в расчетные формулы для определения амплитуды качки без поправок, учитывающих влияние свободного уровня жидкости. При этом, если $b < 0,3$ м, следует условно принимать $b = 0,3$ м.

Если для каких-либо состояний нагрузки формулы (7.01), (7.02) или (7.03) дают $\theta_{\text{ам}} < 10^\circ$, а проверенных расчетах осторожности следует принимать амплитуду качки равной 10° .

В нормах осторожности есть указание о том, что амплитуду бортовой качки можно определять также другими расчетными методами, основанными на результатах модельных или натуральных испытаний. При этом расчеты должны производиться для условий резонанса исходя из следующих дополнительных предположений.

Для судов первой категории с периодом собственных поперечных колебаний $\tau_1 < 8$ сек. амплитуды качки должны определяться в предположении, что судно движется лагом к волне со скоростью, соответствующей числу Фруда $Fr = 0,1$. Если $\tau_1 > 8$ сек., расчеты производятся для случая резонанса при ходе судна косым курсом к волне длиной 100 м.

Для судов второй и третьей категории при $\tau_1 < 6,2$ сек. расчеты должны производиться исходя из тех же предположений. Если же $\tau_1 > 6,2$ сек., длина синхронной волны принимается равной 60 м.

§ 3. ОПРОКИДЫВАЮЩИЙ МОМЕНТ

Опрокидывающий момент, или, иначе говоря, предельный восстанавливающий момент, определяется обычными способами по диаграмме статической или динамической остойчивости с учетом влияния свободной поверхности жидких грузов и бортовой качки судна.

Поправки на влияние жидких грузов вычисляются в предположении, что отсеки заполнены на 50%. При этом по каждому роду жидкого груза (в том числе и балласта) учитываются сочетания цистерн, которые по условиям эксплуатации могут оказаться в реверс частично заполненными. В расчет ялец остойчивости включаются те сочетания цистерн каждого вида груза, которые дают наибольшую поправку к ялцу динамической остойчивости при угле крена в 30° .

Расчетная амплитуда качки определяется в соответствии с указаниями предыдущего параграфа.

При расчете ялец остойчивости засчитываются надстройки с концевыми переборками, снабженными закрытиями I и II класса, если эти отверстия не являются единственным выходом на палубу. Надстройки вводятся полностью в расчет ялец остойчивости также и в том случае, когда последнее требование не выполнено, но комингсы водонепроницаемых дверей погружаются в воду при крене равном или большем 60° . Если комингс погружается в воду

при меньшем крене, расчетная высота надстройки принимается равной половине ее действительной высоты.¹

Рубки, находящиеся на верхней палубе, также могут быть учтены в расчете плеч остойчивости, если их выходные отверстия снабжены закрытками I класса и предусмотрены дополнительные выходы на вышележащую палубу. Рубки, не имеющие подобного выхода, не учитываются в расчетах, но находящиеся под ними отверстия в палубе условно рассматриваются как закрытые. Если выходные отверстия рубки не имеют закрыток I класса, рубка не учитывается в расчете остойчивости, но, при наличииidem конструктивным оформлением слухов и шахт в нижележащие помещения, отверстия, расположенные под рубкой, считаются закрытыми.

Отдельно стоящие сходные тамбуры в расчетах не учитываются, но отверстия под ними считаются закрытыми, если тамбуры имеют закрытия I класса.

Для маломерных судов валовой вместимостью менее 80 рег. т отверстия в рубках, палубах и надстройках считаются закрытыми, если устройства для их закрытия удовлетворяют требованиям § 21—26 Временных правил о надводном борте маломерных судов (1960). Рубки, расположенные на палубах надстроек, в расчетах остойчивости не учитываются, но расположенные под ними отверстия считаются закрытыми.

Если на бортах, открытых палубах или переборках надстроек имеются отверстия, которые считаются открытыми, то до угла крена, соответствующего началу заледнения, диаграммы остойчивости строятся обычным способом. После этого момента остойчивость судна считается полностью утраченной (диаграммы остойчивости обрываются). Если вода, проникшая через отверстия, может попасть внутрь корпуса. Если распространение воды, поступающей в надстройку через отверстия, считающиеся открытыми, ограничивается данной надстройкой или частью ее, то при углах крена, превышающих угол заледнения, такая надстройка рассматривается как несуществующая. В этом случае диаграмма статической остойчивости получает уступ, а диаграмма динамической остойчивости — навал.

§ 6. ОСНОВНОЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ КРИТЕРИИ ОСТОЙЧИВОСТИ. УЧЕТ ОБЛЕДЕНЕНИЯ

Основной критерий остойчивости. При проверке остойчивости кренящий момент от давления ветра сопоставляется с сопротивляющим моментом, найденным с учетом бортовой качки судна.

¹ По правилам Международной конвенции о грузовой марке 1966 г. при определении надводного борта учитываются лишь надстройки, снабженные водонепроницаемыми устройствами для закрытия выходящих отверстий. Кроме того, согласно правилам, должны предусматриваться дополнительные слуховые доступы в надводное отделение при закрытии наружных дверей средней надстройки для вод — в зависимости от расположения выходящего отверстия.

Остойчивость судна считается обеспеченной по основному критерию, если соблюдено условие

$$K = \frac{M_{кр}}{M_{сп}} \geq 1,0,$$

где $M_{кр}$ — кренящий момент; $M_{сп}$ — сопротивляющий момент; K — численный коэффициент.

Учет обледенения. Для судов, плавающих севернее параллели $60^{\circ}30'N$ и южнее параллели $60^{\circ}00'S$, а также в зимнее время в Беринговом море, Охотском море, Татарском проливе и в остальных районах зимней сезонной зоны, предусмотренной траншами о грузовой марке, при определении кренящего и сопротивляющего моментов следует учесть возможность обледенения. В связанный с этим расчетам, которые производятся исходя из наиболее неблагоприятного в отношении остойчивости основного варианта нагрузки, следует принять во внимание изменения водоизмещения, метacentрической высоты и парусности.

При проверке остойчивости судов, плавающих севернее параллели $60^{\circ}30'N$ и южнее $60^{\circ}00'S$, а также плавающих в зимнее время в Беринговом море, Охотском море и Татарском проливе, следует считать, что на 1 м^2 площади открытых палуб приходится 30 кг, а на 1 м^2 площади парусности — 15 кг льда.

Для остальных районов зимней сезонной зоны принимаются в два раза меньшие нормы обледенения.

Вес льда считается идущим в перегрузку.

Диаграмма остойчивости и начальная остойчивость. Начальная метacentрическая высота судна во всех случаях нагрузки (за исключением случая, когда оно стоит вожокном) с учетом свободных поверхностей жидких грузов должна быть положительной.

Максимальное плечо диаграммы статической остойчивости, построенной без учета обледенения, должно быть не менее 0,25 м при длине судна $L < 100 \text{ м}$ и не менее 0,30 м — при большей длине судна. Угол крена, соответствующий максимуму диаграммы остойчивости, должен быть не менее 30° . Заikat диаграммы должен наступать при углах наклона, превышающих 60° . Если диаграмма имеет два максимума, первый из них должен наступать при углах наклона, не меньших 25° .

Заikat диаграммы статической остойчивости, построенной с учетом обледенения, должен наступать при углах наклона, превышающих 55° , а максимальное плечо для судов II и III категории должно быть не менее 0,2 м при угле крена $\geq 25^{\circ}$.

Судам, не удовлетворяющим требованиям к углу заката, установленным в этом параграфе, исследование обрыва диаграммы, обусловленного наличием открытых отверстий, может быть дано разрешающее плечо как судам II или III категории в зависимости от выдерживаемого давления ветра. Для этого, однако, необходимо, чтобы

условный угол кача диаграммы, соответствующий предположению о водонепроницаемом закрытии отсеков, был бы не ниже регламентированного угла кача.

Отступления от требований, регламентирующих диаграмму статической остойчивости, могут быть допущены для судов с ненормальными соотношениями размеров. Так, для $B/H \geq 0,5$, угол кача диаграммы может быть меньше на 10° а угол, соответствующий максимальному плечу, — меньше на 5° по сравнению с регламентированными углами. Однако в подобных случаях запас остойчивости $K = M_{\text{взл}}/M_{\text{кр}}$ по основному критерию должен быть не менее полуторного.

В промежуточных случаях предусматривается интерполяция по формулам, приведенным в регламентирующих правилах.

§ 7. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Пассажирские и товарно-пассажирские суда. При проверке остойчивости пассажирских и товарно-пассажирских судов по основному критерию следует исходить из нормального по условиям эксплуатации судна размещения классовых пассажиров по каютам, а палубных пассажиров — по открытому палубам. Проверка остойчивости с учетом оборудования производится в предположении, что палубные пассажиры покинули открытые палубы.

В дополнение к основному критерию, остойчивость рассматриваемых судов проверяется по углу крена от скопления пассажиров у одного борта, по углу крена на циркуляции и по суммарному углу крена, вызванному обоими этими факторами совместно. В первом случае следует исходить из предположения, что пассажиры разместились возможно ближе к фальшборту на верхней доступной для них палубе. В третьем случае предполагается, что пассажиры скопились у борта на своих прогулочных палубах.

При размещении пассажиров считают, что на 1 м^2 свободной площади палубы (в местах их скопления) приходится 6 пассажиров. Проходы между диванами, а также узкие проходы между рубками и фальшбортом при ширине их, равной $0,7 \text{ м}$, засчитываются с коэффициентом $0,5$. Кроме того, считают, что взрослый пассажир весит 75 кг . Центр тяжести стоящих пассажиров принимается на высоте $1,1 \text{ м}$ от уровня палубы, а сидящих пассажиров — на высоте $0,3 \text{ м}$ от сиденья.

Расчеты крена производятся без учета влияния ветра, качки и обледенения.

Статический угол крена от скопления пассажиров у одного борта не должен превышать 10° . Независимо от этого он должен быть меньше половины угла, при котором: начинает входить в воду отверстка, считающаяся открытой, или палуба надводного борта входит в воду или обнажается скала.

Угол крена на циркуляции не должен превышать 8° , а суммарный угол крена от скопления пассажиров у одного борта и циркуляции — 12° . Во втором случае требуется дополнительно, чтобы угол крена не превышал трех четвертей угла, при котором: ватерлиния касается кромки отсеков, считающихся открытыми, или палуба надводного борта входит в воду или обнажается скала.

Кренящий момент на циркуляции определяется по формуле

$$M_{\text{кр}} = 0,231 \frac{D}{g} \frac{v^2}{L} \left(z_k - \frac{r}{2} \right),$$

где v — скорость на циркуляции, которая принимается равной 80% от скорости полного хода, м/сек.

Суда, перевозящие лес на палубе. Особые требования к остойчивости судов, перевозящих лес, сводятся к следующему.

Плечи остойчивости формы определяются с учетом влияния палубного груза, объем которого условно включается в объем судна. При этом высота укладки леса на палубе принимается равной 75% действительной высоты, но не более высоты первого яруса застроек.

Одновременно при определении кренящего момента учитывается парусность палубного груза. Если расчет производится для условной обшивки, верхняя поверхность леса рассматривается как палуба, а боковые поверхности, возвышающиеся над фальшбортом, — как расчетная часть парусности.

Промысловые суда. При проверке остойчивости промысловых судов надо исходить из следующих положений.

Для судов, промысловых сетей, нужно вводить в нагрузку, соответствующую случаю завершения их с промысла, вес мокрых сетей на палубе. Для судов, выбирающих сети при помощи грузовых стрел, следует учитывать при проверке остойчивости за промысла влияние груза, подвешенного к стреле. Вес этого груза считается равным грузоподъемности стрелы.

Кроме того, исходят из предположения, что амплитуда качки судна на промысле равна 10° . Поскольку промысел производится при открытых грузовых люках, часть диаграммы остойчивости, соответствующая углам, которые превышают угол заливания, отбрасывается. Для судов первой категории расчетное давление ветра в условиях промысла принимается по нормам судов второй категории, а для судов второй категории — по нормам, соответствующим третьей категории. При проверке остойчивости судов третьей категории расчетное давление ветра снижается на 30%. Диаграмма статической остойчивости судна в условиях промысла может не удовлетворять требованиям, изложенным в предыдущем параграфе.

Бушпритные суда. Угол динамического крена от условного рывка бушпритного троса должен быть меньше угла обрывания и

зависания. В соответствии с этим критерий устойчивости дается в виде

$$K = \frac{I_{\text{оп}}^{10}}{I_{\text{кр}}^{10}},$$

где $I_{\text{оп}}^{10}$ — плечо динамической устойчивости, соответствующее указанным условиям; $I_{\text{кр}}^{10}$ — условное критическое плечо, которое подсчитывается по формуле

$$I_{\text{кр}}^{10} = I_0 \left(1 + 2 \frac{T}{B} \right) \frac{\rho^2}{(1 + \rho^2)(1 + \rho^2 + \beta^2)}. \quad (7.04)$$

В последней формуле относительные динамические абсциссы и ординаты c и b точки подвеса буксирного троса выражены зависимостями

$$c = 4,55 \frac{x_0}{L}; \quad b = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{b_0}{B} - a \right),$$

где x_0 — расстояние между галком и центром тяжести судна, измеренное по горизонтали; x_0 — возвышение точки подвеса галка над основной плоскостью.

Величины a и ϵ вычисляются по формулам

$$a = \frac{0,2 + 0,3 \left(2 \frac{T}{B} \right)^2 + \frac{x_0}{B}}{1 + 2 \frac{T}{B}};$$

$$\epsilon = 0,145 + 0,2 \frac{x_0}{B} + 0,06 \frac{B}{T}.$$

где x_0 — возвышение центра тяжести судна над основной плоскостью.

В формуле (7.04) скоростной напор

$$I_0 = \frac{v_0^2}{2g},$$

и заданная скорость рыска v_0 принимает в зависимости от мощности механизмов на валу следующие значения.

$N, \text{ л. с.}$	≤ 200	400	600	800	1000
$v_0, \text{ м/сек}$	1,30	1,38	1,37	1,43	1,55
$I_0, \text{ м}$	0,086	0,090	0,086	0,104	0,122
$N, \text{ л. с.}$	1200	1400	1600	1800	2000
$v_0, \text{ м/сек}$	1,70	1,88	2,08	2,29	2,50
$I_0, \text{ м}$	0,147	0,180	0,220	0,258	0,319

Устойчивость при рысках буксирного троса проверяется без учета обдувания и свободных поверхностей жидких грузов.

В нормах устойчивости указаны дополнительные требования, предъявляемые к буксирным судам с мощностью механизмов, превосходящей 2000 л. с., омушенные в настоящем параграфе.

Суда, перевозящие зерно массой. Правила содержат указания о мерах безопасности, принимаемых при перевозке сыпучих грузов. В основном они сводятся к следующему.

Для того, чтобы зерно могло осесть в трюмы, устраивают палатки, которые выгораживаются в междупалубном пространстве в районе грузовых люков. На однопалубных судах в качестве палаток используются грузовые люки.

На судах, перевозящих сыпучие грузы, в диаметральной плоскости или на небольшом расстоянии от нее (не более 0,05 B) устанавливаются продольные разделительные переборки. В тех случаях, когда устойчивость судна удовлетворяет требованиям, оговоренным в правилах перевозки зерновых грузов, можно при известных условиях не устанавливать арестных продольных переборок в районе грузовых люков. В таких случаях, если на судне установлены постоянные продольные полупереборки вне грузовых люков, то остается позаботиться лишь об устройстве палаток.

На судах, имеющих две или более палуб, во второй палубе сверху предусматривают отверстия для устройства дополнительных палаток.

Требования к устойчивости судна, о которых было сказано выше, сводятся к следующему.

При усадке зерна на 3% и смещении свободной поверхности груза на 20° угол крена судна не должен превосходить 8°.

Угол крена определяется по диаграмме восстанавливающих плеч путем пересечения вверх ось абсцисс на величину Δl , равную критическому плечу. Протяженность условно исправленной диаграммы должна быть не менее 55°, а исправленное максимальное значение восстанавливающего момента $M_{\text{max}}^{\text{исп}} = I_{\text{max}} - \Delta l$ должно быть не менее восстанавливающего плеча, регламентированного общими нормами устойчивости.

Зерно может перевозиться в верхнем танке только в тех случаях, когда метacentрическая высота судна равна или превышает 0,31 м на однопалубных и двухпалубных судах и 0,36 м — при большем числе палуб.

При соблюдении известных условий зерно может перевозиться в частично заполненных трюмах, однако свободная поверхность груза должна быть покрыта зерном в мешках на высоту не менее 1,2 м. Если метacentрическая высота судна менее 0,31 м на однопалубных и двухпалубных судах и менее 0,36 м — на других судах, то не более двух отсеков может быть заполнено зерном частично.

Отступления от перечисленных требований, связанных с устойчивостью судна, могут быть допущены, если целесообразность снизить такие требования будет обоснована теоретическим расчетом устойчивости (см. § 7 главы шестой).

§ 8. РАСЧЕТНЫЕ ВАРИАНТЫ НАГРУЗКИ

В нормах остойчивости указаны варианты загрузки, которые принимаются в основу проверочных расчетов остойчивости судов различного назначения. В некоторых случаях для удовлетворения требованиям остойчивости разрешается балластировка судна.

Для пассажирских и тепло-пассажирских судов предусмотрены следующие варианты загрузки.

1. Судно в полном грузу. По согласованию с Регистром СССР в этом случае нагрузка может быть допущена балластировка судна.

2. Судно с тем же коммерческим грузом и пассажирами с багажом в конце рейса.¹

3. Судно без коммерческого груза, но с полным количеством пассажиров с багажом в начале рейса.

4. Судно без коммерческого груза, но с полным количеством пассажиров с багажом в конце рейса.

5. Судно без коммерческого груза и пассажиров, но с полным запасом топлива, воды и масла.

6. Судно без коммерческого груза и пассажиров в конце рейса.

7. Судно с полным коммерческим грузом и пассажирами с багажом при запасах топлива, воды и масла, израсходованных на 50%.

Для проверки остойчивости судов общего назначения предусмотрены следующие случаи загрузки.

1. Судно в полном грузу. Предполагается, что однородный груз равномерно заполняет грузовые трюмы, танки и люки.

2. Судно с тем же коммерческим грузом в конце рейса. Допускается балластировка судна.

3. Судно в полном грузу. Предполагается, если это предусмотрено заданием, что более легкий однородный груз не только заполняет трюмы, танки и люки, но частично размещается и на верхней непрерывной палубе. В нормах не указывается, как определять количество палубного груза.

4. Судно с тем же грузом в конце рейса.

5. Судно без груза, но с полным запасом топлива, воды и масла.

6. Судно без груза в конце рейса.

7. Судно в полном грузу с заполненными трюмами и танками и тяжеловесами, размещенными на палубах.

8. Судно с тем же грузом, но в конце рейса.

Седьмой и восьмой варианты загрузки считаются дополнительными и принимаются во внимание лишь при проверке остойчивости судов, перевозящих в нормальных условиях эксплуатации

тяжеловесные грузы на палубах. Если грузовые трюмы используются для дополнительного приема жидкого балласта, такой вариант загрузки должен быть учтен при проверке остойчивости судна без коммерческого груза в начале и конце рейса.

Остойчивость судов, предназначенных для перевозки леса, проверяется дополнительно в предположении, что они приняты лесной груз, обладающий наибольшим, предусмотренным заданием, погрузочным объемом. При отсутствии подобных указаний удельная погрузочная кубатура груза принимается равной 2,32 м³/т. Предполагается, что судно загружено лесом по грузовую марку или (если это не соответствует условиям эксплуатации) имеет меньшую осадку, соответствующую обычным условиям плавания.

Для нефтяных судов предусмотрены варианты загрузки в полном грузу и без груза — в обоих случаях по состоянию загрузки в начале и конце рейса. Остойчивость нефтетанков-раздатчиков должна проверяться дополнительно в предположении, что они загружены нефтепродуктами на 75% и запасами топлива, масла и воды на 50%. Балласт в этом случае не вводится в нагрузку.

При проверке остойчивости промысловых судов должны быть рассмотрены следующие случаи:

1) выход на промысел;

2) возвращение с промысла с полным уловом при израсходованных на 90% запасах топлива, масла и воды;

3) возвращение с промысла с 20% улова при израсходованных на 30% запасах льда и соли и на 90% — запасах топлива, масла и воды;

4) судно на промысле с открытыми люками, пустыми трюмами и уловом на палубе. При этом предполагается, что судно сохранило полностью запасы льда и соли и израсходовало на 75% запасы топлива, масла и воды.

Во втором и третьем варианте загрузки следует считать, что часть улова находится на палубе, если такая возможность предусмотрена проектом.

Остойчивость бумажных судов по основному критерию проверяется при состоянии загрузки в начале и конце рейса.

Остойчивость судов других типов проверяется для судна в полном грузу и без коммерческого груза по состоянию загрузки в начале и конце рейса.

¹ Здесь и в дальнейшем указывается предполагается, что в конце рейса запасы топлива, воды и масла израсходованы на 50%.

ЛИТЕРАТУРА

- Аксютин Л. Р. Опыт асимметричной съемки ветрового поля судна. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости морских судов». Регистр СССР, 1963 г.
- Аксютин Л. Р. Опыт определения спиральной плотности ветрового потока. Информационный сборник ЦНИИМФ, вып. 102, 1963 г.
- Аксютин Л. Р. Исследования некоторых вопросов безопасности движения морских судов в штормовых условиях. Диссертация. Одесский ин-т мор. науки, 1964.
- Авдольская Л. Е. Режимы скоростей ветра на территории СССР. Гидро, Л., 1961.
- Андреев Н. Д. Переходность ветра внутри часового интервала. Сб. «Вопросы авиационной метеорологии». АН СССР, 1969.
- Анушкин П. А. и Войткевичский Я. И. Сферичность воды движущего судна. Судпромгиз, 1963.
- Благовожденский С. Н. О методе нормирования устойчивости. ОНТИ, Труды ИМСС, вып. 12, 1932.
- Благовожденский С. Н. Справочник по теории корабля. Судпромгиз, 1950.
- Благовожденский С. Н. О нормировании устойчивости морских судов. Труды ЦНИИМФ, вып. 2, 1961.
- Благовожденский С. Н. Качка корабля. Судпромгиз, 1964.
- Благовожденский С. Н. О новых методах устойчивости для гражданских морских судов. Труды ЦНИИМФ, вып. 7, 1959.
- Благовожденский С. Н. О действиях на судно ветровой нагрузки. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости». Регистр СССР, 1965.
- Благовожденский С. Н. О действиях на судно ветровой нагрузки. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости». Регистр СССР, 1965 г.
- Благовожденский С. Н. Устойчивость судна на трюбе волны. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости». Регистр СССР, 1965 г.
- Благовожденский С. Н. Нормирование требований к устойчивости движущихся судов. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости». Регистр СССР, 1965 г.
- Бородай Н. К. Проверка устойчивости судна при движении на волнении. Труды ЦНИИМФ им. акад. А. Н. Крылова, 1962.
- Бородай Н. К. Проверь расчетного определения статистических характеристик поперечной устойчивости судна при движении на попутном волнении. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости». Регистр СССР, 1965.
- Бронштейн Н., Об устойчивости судов, перевозящих зерно. «Морской флот», № 2, 1961.
- Ванков В. М. Развитие и плавное гашение груза при регулярной качке судна. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости морских судов». Регистр СССР, 1963.
- Ванков В. М. О перекачке груза при качке. «Морской флот», № 4, 1960.
- Валевский Я. Г. и Глуховский В. Х. Экспериментальные исследования процесса мерного волнения. Труды ГОИИ, вып. 36, 1957.
- Владимиров А. Н. Золотенность кораблей при качке на волнении. Прикладная метеорология и метеология, т. X, АН СССР, 1946.
- Вознесенский А. И. и Фирсов Г. А. Методика расчета качки на нерегулярном волнении. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1959.
- Вознесенский А. И. и Фирсов Г. А. Методика оценки величин волнения скорости корабля на морском волнении. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1959.
- Вознесенский А. И. и Фирсов Г. А. О квантовых процессах, связанных с перекачкой морских грузов качкой корабля. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1957.
- Вонсовский А. И., Приложение статистической теории колебаний к исследованию абстрактных случаев качки корабля на нерегулярном волнении. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1958.
- Вознесенский А. И. и Невзетов Ю. А. Нормированный моретемпальный спектр мерного волнения. Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 1963.
- Войткевичский Я. И., Першин Р. Я., Титов Н. А. Справочник по теории корабля. Судпромгиз, 1960.
- Воробей А. П. Некоторые аспекты безвальной качки корабля методами теории вероятностей, изд. ЛГУ, 1963.
- Гончаров Н. П. Некоторые результаты градиентных исследований в районе нефтяных камер. Труды ГОИИ, вып. 30, 1957.
- Звяковский-Горбатенко В. Г. Некоторые исследования бортовой качки СРТ в море. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости промысловых и транспортных судов». Регистр СССР, 1965 г.
- Звяковский-Горбатенко В. Г. Некоторые результаты натурных исследований ветра и их использования при оценке устойчивости. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости промысловых и транспортных судов». Регистр СССР, 1965 г.
- Колобов Н. В., Грылы и шваллы, 1951.
- Коробков В. И. Переходы моря морем. М., 1963.
- Крылов А. Н. Качка корабля. Сб. труды, т. 11, АН СССР, 1951.
- Крутков Ю. А., Замечания о фазовой качке корабля на волнении. ДАН, № 2, 1946.
- Лугоский В. В. и Фаддеев Ю. И., Расчет бортовой качки с использованием метода М. С. Суворовича. «Судостроение», № 6, 1963.
- Лугоский В. В. Новые методики практической оценки бортовой качки промысловых и буксирных судов на волнении. ИТО СЛ, Сб. «Морские качества судов», Л., 1964.
- Лугоский В. В. Новая методика определения реальной расчетной амплитуды качки транспортных судов при нормировании устойчивости. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости судов». Регистр СССР, 1963.
- Мазур В., К расчету угла крена при дрейфе. «Морской и речной флот», № 11, 1964.
- Мореншпильд В. А. Исследования влияния положения центра тяжести и особенностей формы корабля на бортовую качку. Тезисы информации, ЦНИИ МСЛ, 1955.
- Нечаев Ю. И., К вопросу об устойчивости судна на попутном волнении. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости промысловых и транспортных судов». Регистр СССР, 1965 г.
- Нечаев Ю. И., Приближенный способ расчета устойчивости судна при движении на верном попутном волнении. Сб. «Теоретические и практические вопросы устойчивости и непотопляемости», Регистр СССР, 1965 г.

Ногин Л. М., О качке судов на волноломном море, Труды ВНИТОСС т. VI, вып. 1, 1953.

Ногин Л. М., О резонансе при бортовой и килевой качке, Труды ЛКИ, выд. XIII, 1954.

Ногин Л. М., Теория проектирования судов, Судостроит., 1954.

Ногин Л. М., О свойствах, качествах и поопытных судах, Труды ЛКИ, выд. XV, 1955.

Ногин Л. М., Проектирование форм судов и построение теоретического корпуса, Судостроит., 1952.

Ногин Л. М., Проектирование морских судов, т. I, 1954.

Образцов В. В., Экспериментальное исследование влияния скорости хода судна на его поперечную остойчивость, Труды ЛКИ, выпуск LI, 1956.

Орлов Д. А., Некоторые особенности и рекомендации к построению расчетов по составлению плана загрузки судов сыпучими грузами, Сб. «Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости», Регистр СССР, 1958.

Павловский Г. Е., Качка судов, ОГНЗ, 1925.

Павловский Г. Е., Теория качки судов на волноломном море, Известия АН СССР, 1931.

Павловский Г. Е., Сопоставление воды движению судов, 1953.

Перельмутер А. С., Экспериментальное исследование влияния демпфирования на характеристики килевой качки, ПММ, т. X, 1946.

Персон Б. Д., Ветровые волны, Сб. «Ветровые волны», ИЛ, 1952.

Ракманов Н. Н., Эмпирический спектр морского волнения, Труды ЦИНИ им. акад. А. Н. Крылова, 1955.

Ракманов Н. Н., Спектральные свойства морского волнения и моральные качества корабля, Труды Осенней конференции комиссии АН СССР, «Ветровые волны», т. IX, 1950.

Ракманов Н. Н., Бортовая качка судов, отклоняющегося частично зюльцевым движением, Труды ЦИНИ им. акад. А. Н. Крылова, 1952.

Ракманов Н. Н., О динамической остойчивости судов с водой на палубе, НТО СП, Доклады к XVI научно-технической конференции по теории корабля, вып. 73, Л., 1955.

Розенфельд А. М., Об упрощенной методике расчета выдерживаемой кораблем скорости ветра, Судостроение, № 2, 1958.

Савицкий В. Н. и Скворцов Н. Н., Почему ветер опасен для корабля, «Морской флот», № 6, 1956.

Савицкая В. Н., Влияние волн на остойчивость судов, «Морской флот», № 3, 1954.

Савицкая В. Н., Обеспечение остойчивости малых судов, «Морской флот», № 2, 1953.

Савицкая В. Н., Некоторые особенности проектирования малых судов, «Морской флот» № 5, 1952.

Свордур Г. и Мунд В., Ветер, волнение и качка, Сб. «Основные предельные ветровые волны, зыба и качка», ИЛ, 1951.

Севастьянов Н. В., Оценка амплитуды качки малых судов на нерегулярном морском волнении, Доклад на конференции НТО СП, 1953 г.

Севастьянов Н. В., О возможности контроля за остойчивостью судов на море по уровню бортовой качки, Сб. «Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости морских судов», Регистр СССР, 1953 г.

Севастьянов Н. В., Основные вопросы поддержания остойчивости промысловых судов, Сб. «Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости», Регистр СССР, 1955.

Семенов-Тянь-Шанский В. В., Основные скорости и характерные углы для движущихся судов на попутном волнении, Доклады к XVI научно-технической конференции по теории корабля, НТО СП, вып. 73, 1955.

Семенов-Тянь-Шанский В. В., Качка судов на остойчивости судов на ходу, Сб. «Теория качки и экспериментальная гидродинамика судов», НТО СП, № 39, 1951.

Сидорова Л. Г. и Красножог Г. Ф., Расчеты параметров ветровых волн при определенных условиях на гидротехническом сооружении, Труды Осенней конференции комиссии АН СССР, «Ветровые волны», т. IX, 1950.

Сизов В. Г., Об остойчивости судов, перекачивающих сыпучие грузы, «Судостроение», 1958, № 4.

Сизов В. Г. и Вольщиков В. С., О динамике действия шквала на судно, Сб. «Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости морских судов», Регистр СССР, 1955.

Соболев Г. В., Демпфирование бортовой качки судна на ходу, Труды ЛКИ, вып. XXII, 1958.

Титов Л. Ф., Ветровые волны на озерах и морях, Гидротехстройиздат, 1955.

Титов Л. Ф., Основные проблемы и вопросы ветровых волн и пути их решения, Труды Осенней конференции комиссии АН СССР, т. IX, 1950.

Тяпкин В. Я. и Шапов В. С., Об оценке моральных качеств морских транспортных судов на встречном волнении, Труды ЦИНИ им. акад. А. Н. Крылова, 1950.

Тяпкин А. Н., Приложение теории случайных процессов к исследованию качки корабля на нерегулярном волнении, Труды НТО СП, т. IV, вып. II, 1957.

Фан-дер-Флант А. П., Остойчивость арктического ледохода при качании от 0 до 90°, Известия СФБ Вильнюсского института, т. X, 1938.

Федоскин К. К. и Володаровский С. М., Ветровые нагрузки, действующие на сооружения в зимних, Промышленная метеорология, Сб. № 5, ЦАГИ, 1954.

Федоскин К. К. и Фирсов Г. А., Крен судов под действием ветра, Судостроение, 1957, № 12.

Фирсов Г. А., Решение кнб А. Н. Крылова в области теории и расчета качки корабля на волнении, Труды НТО СП, т. VII, вып. II, 1957.

Хаволин Н. Г., Качка корабля, 1947.

Цыбин В. П., Остойчивость судов на попутной волне, Труды Мурманского высшего морского училища, вып. 1, 1957.

Чувпковский Г. С., Исследование влияния волнения на действие ветра на корпус судна и установившийся угол к остроугольному волну, Труды НТО СП, вып. 35, Судостроение, 1958.

Шабалов А. Н., К вопросу об определении коэффициентов присоединенных масс, Труды ЛКИ, вып. XII, 1954 г.

Шабалов А. Н., Установившееся движение ледов под действием горизонтальной силы, Труды ЛКИ, вып. XIII, 1954 г.

Шмырев А. Н., Морские и ледовые волны, Нильева С. Г., Установившееся качка судов, Судостроение, 1951.

Шудейкин В. В., Применение упрощенной поля ветровых волн для определения качки, Труды Осенней конференции комиссии АН СССР, т. IX, 1950.

Шумейко Г. К., Плавание в зоне тропических ураганов, «Морской транспорт», М., 1952.

Безопасность движения морских судов при перевозке сыпучих грузов. Доклад делегата Союза Советских Социалистических Республик на Международной конференции по охране человеческой жизни на море, май, 1950.

Временные правила надзора борта владельцев судов, Регистр Союза ССР, 1950.

Ветровые волны, Труды Осенней конференции комиссии АН СССР, т. IX, 1950.

Ветровые волны, ИЛ, 1953.

Нормы остойчивости морских судов, Регистр Союза ССР, 1953.

Нормы остойчивости морских судов, Суднолазубительного флота, Регистр Союза ССР, 1954.

Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1960 года, «Морской транспорт», Л., 1963.

Правила перевозки зерновки и других сыпучих грузов на морских судах, Речной Свод ССР, Л., 1962 а.

Правила обеспечения безопасности морских судов, Речной Свод ССР, 1962 б.

Справочник по строительной механике корабля, т. III, Судостроение, 1960.

Справочное пособие по расчету ветров и волнения на море, океанографический отдел ЦОСР, Речной Свод ССР, «Морской транспорт», 1962.

Справочное пособие по расчету ветров и волнения на море, океанографический отдел ЦОСР, Речной Свод ССР, «Морской транспорт», 1962.

Arntsen G., Seakeeping-Performance and Seakeeping Trials of m. v. Lakgard, TINA, 1962.

Azuma Y. and Ochi K., Model Experiment on the Strength of Ships Moving in Waves, SNAME, 1962.

Arndt B. and Roder S., Stabilität bei vor- und achterlichen Seezug, Schiffstechnik, H. 25, B. 5, 1958.

Arndt B., Einige Bemerkungen der Seegringschifferei, Schiffstechnik, N 18, 1962.

Bonebakker J. W., Initial Metacentric Height of Small Seagoing Ships and the Inaccuracy and Unreliability of Calculated Curves of Righting Levers, International Shipbuilding Progress, Dec., 1957, N 40.

Briggs J. F., Hilliard B. A., Mc. Mullean J. J., The Influence of Slight Kicks and Rolling in Waves on Sea Speed Horsepower, SNAME, 1964.

Burrill L. S., Seaworthiness of Collier Types, TINA, 1931.

Denny A., On the Practical Application of Stability Calculations, TINA, 1884.

Edgar Fr., Notes upon Losses of Sea, TINA, 1887.

Gerritsma R. J., van den Bosch L. and Boukelman W., Progress in Regular and Irregular Waves, International Shipbuilding Progress, June, 1961.

Orin O., Beitrag zu dem Problem der Stabilität des Schiffes im Seezug, Schiff und Hafen, H. 6, 1961.

Herzer H. und Raach K., Die Theorie des Schiffes, Leipzig, 1952.

Horn T., Hochseemalerei, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1958.

Jaeger H. E., A Note on Large Trawlers, TINA, 1964.

Jinagata M., Standard of Stability Adopted in Japan, TINA, 1959.

Jenkins Ph., On the Shilling of Catguts, TINA, 1887.

Jaeger H. H. and Brooks R. L., Statistical Presentation of the Motion, Hull Bending Moments and Slaving Moments for Ships of the AVP Type, Journal of the American Society of Naval Engineers, May, 1959.

Kaaber S., Kosterseesucht mit einem Modell in natürlichen Seezug, Schiffstechnik, N 48, 1962.

Kato H., Motora S., Ishikawa K., On the Rolling of a Ship in Irregular Wind and Wave, Proceeding, Symposium on the Behavior of Ships in a Seaway, Wageningen, 1957.

Kent J. L., The Design of Seakindly Ship, North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, Transactions, 1949-50.

Kerwin J. E., Notes on Rolling in Longitudinal Waves, Internat. Shipbuilding Progress, 1958.

Korvin-Kroukowsky B. W., Theory of Seakeeping, New York, 1961.

Krappinger O., Ober Kestelkriterien, Schiffstechnik, N 48, Sept., 1962.

Krappinger O., Freibord und Freibordverschleiß, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 1964.

Lewis E. V., Ship Speeds in Irregular Seas, SNAME, 1955.

Longuet-Higgins M. S., On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves, Journal of Marine Research, vol. XI, N 3, 1952.

Mantley C. V., Merchant Ship Losses, TINA, 1965.

Möckel W., Behaviour of Trawlers at Sea—II, d'fishing Boats of the World: 2a, Edited by J. O. Trueng, London, 1960.

Möckel W., Zur statistischen Beurteilung der Schiffschwingungen, Werft, Rederei, Hafen, 1941.

Möckel W., Behaviour of Trawlers at Sea—II, d'fishing Boats of the World: 2b, London, 1960.

Newton R. N., Wetness Related to Freibord and Floe, TINA, 1960.

Nickum C., Proposed Stability Criteria, Fishing Boats of the World, Edited by J. O. Trueng, London, 1955.

Niedermeier J. C., Further Developments in the Stability and Rolling of Ships, SNAME, 1956.

Ochi M., Model Experiments on Ship Strength and Slaving in Regular Waves, SNAME, 1958.

Ochi M., Extrem Behaviour of a Ship in Rough Seas, SNAME, 1964.

Parulling J. R., The Transverse Stability of a Ship in a Longitudinal Seaway, Journal of Ship Research, N 4, 1961, vol. 2.

Pierrotti A., A Standard of Stability for Ships, TINA, 1935.

Rahola J., The Judging of the Stability of Ships and Determination of Minimum Amount of Stability, Helsinki, 1939.

Roden S., Welche Ergebnisse liefern Kosterversuche mit Modellen?, Schiffstechnik, N 48, 1962.

Rock, The Behaviour of the 30 000-ton Cruisers in a Seaway, Navy Department, Bureau of Construction and Repair, Bulletin N 4, Washington, 1932.

Rolli H. U., Height, Length and Steepness of Waves in the North Atlantic and Dimensions of Seaways as Functions of Wind Force, SNAME, N. Y., 1958.

Schweders H. E., Hydrodynamics in Ship Design, v. 2, SNAME, 1957.

Schiffbau A., Lezioni di architettura navale date nella Regia scuola Superiore in Genova, 1915-21.

Spanner W. F., The Seaworthiness and Stability of Trawlers and Drifters, Shipbuilding and Shipping Record, 26 Sept., 1946.

St. Denis M. and Pierson W. J., On the Motion of Ships in Correlated Seas, SNAME, 61, 1953.

Swaan W. A., The Influence of Principal Dimensions on Ship Behaviour in Irregular Waves, International Shipbuilding Progress, June, 1961, p. 245.

Swaan W. A. and Vossers G., The Effect of Poobody Section Shape on Ship Behaviour in Waves, International Shipbuilding Progress, July, 1961.

Tanijie S. and Motora S., Advances in Research on Stability and Rolling of Ships, The Society of Naval Architects of Japan, Tokyo, 1960.

Vossers G. and Swaan W. A., Some Seakeeping Tests with a Victory Model, International Shipbuilding Progress, May, 1960.

Vossers G., Swaan W. A. and Rijcken H., Experiments with Series 60 Models in Waves, International Shipbuilding Progress, May, 1960, p. 301.

Vossers G., Behaviour of Ships in Waves, Harlem, 1962.

Woznesensky A. I. and Firsolf G. A., Statistical Analysis of Data Concerning Rolling of Ships, Proceedings, Symposium on the Behavior of Ships in a Seaway, Wageningen, 1957.

Wernsiner W. H. and St. Denis M., Destroyer Seakeeping Trials, Proceedings, Symposium on the Behavior of Ships in Seaway, Wageningen, 1957.

Wendel K., Sicherheit gegen Kentern, VDI, N 32, 11 November, 1958.

Wendel K. and Platzeeder W., Der Unlegung des Segelschiffes «Perira», Hansa, 1958, S. 367-374.

Wendel K., Stabilitätsverluste in Seezug und durch Kollisionslast, Hansa, N 48/48, 1964.

С О С Р А Щ Е Н И Е

TINA — Transactions of the Royal Institution of Naval Architects.
 SNAME — Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора	3
Обозначения	5
Глава первая. Краткие сведения из теории вероятностей	9
1. Случайные события и признаки	—
2. Плотность вероятности и функция распределения случайной величины	11
3. Моменты и другие числовые характеристики случайной величины	13
4. Нормальное и нормально-логарифмическое распределение	13
5. Распределение Релея	15
6. Случайные функции	18
Глава вторая. Ветер и волны	24
1. Предварительные замечания	—
2. Скорости ветра и их распределение	25
3. Структура ветра	28
4. Примеры сильных штормов и ураганов	34
5. Соотношения элементов волны	35
6. Зарождение и развитие ветровых волн	38
7. Классификация волнения и практические данные о том	43
8. Математическое изображение ветрового волнения	46
9. Частотные спектры волнения	59
10. Самостоятельные безразмерные спектры волнения с практическими данными	65
11. Учет широты спектра	67
Глава третья. Общие сведения о качке судна	71
1. Предварительные замечания	—
2. Периоды собственных поперечных и продольных колебаний судна	72
3. Реальные курсовые углы	80
4. Резонанс при нерегулярном волнении	82
5. Сопроствление бортовой качки	93
6. Бортовая качка на регулярном волнении	94
7. Предельная качка на регулярном волнении	102
8. Физическое действие качки	106
Глава четвертая. Качка судна на нерегулярном волнении	109
1. Историческая справка	—
2. Расчеты бортовой, килевой и вертикальной качки	110
3. Численный пример	115
4. Некоторые приложения статистической теории качки	117
5. Долговременное распределение покателей качки	119

Регулярное волнение

1. Предварительные замечания	—
2. Влияние резонанса, относительной длины волны и относительной скорости хода на продольную качку	124
3. Влияние продольного распределения ветровых пучков	130
4. Влияние коэффициента обшивки полноты и соответствующим размеров	131
5. Влияние формы циллиндричности	134
6. Влияние развития циллиндричности в надводной части судна	135
7. Амплитуда бортовой, килевой и вертикальной качки при разных курсовых углах	138
8. Влияние бортовой качки на водность судна	142
*9. Справка	142
10. Зависимость судна на регулярном волнении	147

Нерегулярное волнение

11. Зависимость судна на нерегулярном волнении	150
12. Влияние остойчивости на бортовую качку	153
13. Амплитудные графики	164
14. Распределение амплитуд качки	175
15. Распределение периодов качки	186

Глава пятая. Общие требования, предъявляемые к остойчивости судна

1. Системные погрешки	—
2. Обзор действующей сил в краткие сведения об авариях	163
3. Образование прерванного ветрового момента	165
4. Совместное действие ветра и волны	171
5. Диаграмма остойчивости как показатель безопасности плаванья	173
6. Остойчивость судна на попутном и встречном волнении	177
7. Остойчивость судна, перевозящего сыпучие грузы	187
8. Прием воды на открытые палубы	200
9. Практические данные об остойчивости судна	211

Глава шестая. Нормы остойчивости морских судов

1. Общие указания	—
2. Категории судов	218
3. Кренный момент	221
4. Расчетная амплитуда качки	223
5. Определительный момент	225
6. Основной и дополнительные критерии остойчивости, Учет обшивки	225
7. Дополнительные требования к остойчивости судов различного назначения	228
8. Расчетные параметры нагрузки	232

Литература 234

Новые учебники для студентов вузов

Выйдут в 1968 году

Александров М. Н. Судовые устройства. 25 л., ц. 1 р. 14 к.

Книга состоит из двух частей. Первая — посвящена общим теоретическим основам судовых устройств, вторая — конструктивным элементам и проектированию. В книге помещены примеры расчетов судовых устройств, даны классификация и общие характеристики судовых устройств. Рассмотрены механика выбихов мотей, подробно описаны конструкции ажурного, швартового, буксирного, румбного, грузового и спасательного устройств, а также рангоута и такелажа.

Учебник предназначен для студентов кораблестроительных вузов и факультетов.

Алешин В. С., Кузнецов Н. М., Саркисов А. А. Судовые ядерные реакторы. 30 л., ц. 1 р. 30 к.

В книге кратко приведены основные положения ядерной физики, позволяющие уяснить физические процессы, происходящие в ядерных реакторах. Рассмотрены классификация, основы физической теории, теплообмен, управление, материалы, конструкции и проектирование судовых ядерных реакторов. Изложены основы теории и описаны конструкции биологической защиты, а также тепловые схемы судовых ядерных энергетических установок.

ЛОГИК ЛЕВ ЖАРКОВУ

Остойчивость судна в его движении на плавающем море
(Проектирование морских судов, часть II)

Редактура: Одесский ин-т инженерной Морского флота, докт. техн. наук
А. М. Шапиро

Научный редактор Г. Н. Палав Редактор В. М. Шапиро
Технический редактор Ю. Н. Короненко
Корректоры С. X. Кравченко, С. Г. Ожолонжид
Оформление верстки художника К. А. Карповича

Сдано в набор 4/VI 1967 г. М-0618. Подписано к печати 1/XI 1967 г.
Формат издания 64x90^{1/2}, Шп. л. 29,20. Уч.-изд. л. 18,4. Изд. № 1992—68.
Тираж 500 экз. Цена 80 коп. Бумага типографская № 2. Заказ № 1400
Издательство «Строительство», Ленинград, Д-62, ул. Гатчина, 3

Ленинградская типография № 8 Государственного
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Ленинград, ул. Мухоморова, 10

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
5	4-я строка	мощности	момента
5	11-я строка	$\rho^{1/2}$	$\rho^{3/2}$
6	27-я строка	S_2	S_0
7	26-я строка	$\frac{1}{\xi}$	ξ_0
7	23-я строка	$\theta; \theta_0$ — углы и амплитуды	θ — углы
7	15-я строка	θ_0	$\theta_0; \theta_2$
8	6-я строка	x_0	$x_0; x^{(1)}$
130	Формула	r_0^2	r_0^3
157	Подпись к рис. 62	$\rho_0^{(1)}$	$\rho_0^{(2,1)}$
157	Подпись к рис. 63	$\rho_0^{(1)}$	$\rho_0^{(2,1)}$