

УДК 629.5.01
И 37

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКИ ЛОЦМАНСКОГО КАТЕРА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А. Н. Вашедченко, канд. техн. наук, проф.;
И. Ю. Потай, канд. техн. наук, доц.;
А. Н. Кротов, канд. техн. наук, доц.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Выполнен анализ исследований продольной качки морских судов и предложены пути минимизации инерционных перегрузок крупного катера на начальной стадии проектирования при малом объеме исходных данных.

Ключевые слова: продольная качка, лоцманские катера, амплитуда качки, инерционные перегрузки, гидродинамические составляющие, высота волны, частота колебаний.

Анотація. Виконано аналіз досліджень поздовжньої хитавиці морських суден і запропоновано шляхи мінімізації інерційних перевантажень великого катера в початковій стадії проектування при малому обсязі вихідних даних.

Ключові слова: поздовжня хитавиця, лоцманські катери, амплітуда хитавиці, інерційні перевантаження, гідродинамічні складові, висота хвилі, частота коливань.

Abstract. The research analysis of longitudinal roll of marine vessels is carried out and the ways of minimization for inertial overloads of a large boat at the initial designing stage are offered in terms of the small scope of the initial data.

Keywords: longitudinal roll, pilot boats, roll amplitude, inertial overloads, hydrodynamic components, wave height, vibration frequency.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Условия работы лоцманских катеров в разных акваториях сильно различаются. Объясняется это специфическими условиями волнения вблизи побережья, разной оперативной дальностью обслуживания и различием коэффициентов напряжения рабочих циклов катеров. Указанные особенности отражаются на условиях пребывания и работоспособности команды и лоцманов, находящихся на катере в море. Первостепенный интерес представляют последствия воздействия качки на людей в период рабочей смены. Вопросы стабилизации продольной качки актуальны с точки зрения уменьшения ходового дифферента с целью снижения сопротивления и амплитуд качки при средних и высоких скоростях хода (для удержания инерционных перегрузок в пределах технических норм).

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В публикациях последних лет приведены результаты теоретических исследований продольной качки морских судов [5, 11]. Однако вопросы влияния основных элементов и характеристик лоцманских катеров на параметры продольной качки не нашли

своего отражения в этих исследованиях, поэтому в представленной статье основное внимание уделено практическому решению данной проблемы.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — изучение путей минимизации инерционных перегрузок крупного катера на начальной стадии проектирования при малом объеме исходных данных и разработка рекомендаций для проектирования.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Особенностью колебаний в продольной вертикальной плоскости является совместность килевой качки с вертикальным смещением ЦТ судна ζ_g даже в процессе качки без хода на спокойной воде. Кроме того, из-за сугубой асимметрии корпуса катера относительно миделя абсциссы ЦТ катера и ЦТ площади действующей ватерлинии отличаются на величину l . Благодаря этому уравнения собственной килевой и вертикальной качки образуют *систему*¹ однородных линейных дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами²:

$$D(1 + k_{33})\ddot{\zeta}_g + \rho g S \zeta_g + \rho g S l \psi = 0;$$

$$J_{y_g}(1 + k_{55})\ddot{\psi} + G H_{\text{мтц}} \psi + \rho g S l \zeta_g = 0. \quad (1)$$

¹ Уравнения А. Н. Крылова. При рассмотрении бортовой качки надобность в подобной системе не возникает.

² При этом введено упрощение — считается, что центр дополнительных присоединенных масс погруженной части надводного корпуса совпадает с центром присоединенных масс основного объема.

Анализ и решение этой системы показывают, что колебания любой точки судна представляют собой наложение двух гармонических колебаний; частота одного из них весьма близка к частоте вертикальной качки в «чистом» виде, частота другого — к частоте «чистой» килевой качки на тихой воде [1, 9]. Таким образом, в возникновении резонанса продольных колебаний с частотами внешних воздействий кроме собственных «чистых» частот корабля ω_ζ и ω_ψ может участвовать еще третья частота, величину которой можно приблизительно оценить как $\omega_\Sigma = \sqrt{\omega_\zeta^2 + \omega_\psi^2}$.

Из-за большого сопротивления продольной качке собственные колебания судна быстро затухают. Вынужденные колебания определяются как частное решение дифференциальных уравнений качки с учетом демпфирования (гидродинамического сопротивления и инерционных сил дополнительно присоединенных масс), судно в той или иной мере (в зависимости от соотношения частот) повторяет амплитудную характеристику внешнего воздействия.

При малых числах Фруда ($Fr < 0,255$) продольная качка судна, идущего попутно или вразрез волне, отображается уравнениями килевых и вертикальных колебаний (без учета таких особенностей судна, как развал борта, продольная несимметричность обводов и распределения нагрузки):

$$\begin{aligned} (J_y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + v_{55}\dot{\psi} + Gh\psi &= \\ = -r_b [\omega_k b'_1 \cos \omega_k t + (\gamma b_1 - \omega_k^2 b''_1) \sin \omega_k t]; & \quad (2) \\ \left(\frac{D}{g} + \lambda_{33}\right)\ddot{\zeta}_g + v_{33}\dot{\zeta}_g + \gamma S_{\text{вл}}\zeta_g - v\lambda_{55}\dot{\psi} - v v_{33}\psi &= \\ = r_b [(\gamma a_0 - \omega_k^2 a''_0) \cos \omega_k t - \omega_k a'_0 \sin \omega_k t], & \end{aligned}$$

где J_y — момент инерции массы судна относительно поперечной оси, т·м·с²; λ_{55} — присоединенный момент инерции, т·м·с²; v_{55} — коэффициент пропорциональности при моменте сил сопротивления, т·м·с; D — водоизмещение судна, тс; H — продольная метацентрическая высота, м; r_b — амплитуда волны, м; ω_k — кажущаяся частота волн, с⁻¹; v — скорость судна, м·с⁻¹; γ — удельный вес воды, тс·м⁻³; g — ускорение силы тяжести, м·с⁻²; λ_{33} — присоединенная масса воды, т·м⁻¹·с²; v_{33} — коэффициент пропорциональности при силе сопротивления, тс·м⁻¹·с; $S_{\text{вл}}$ — площадь ватерлинии, м²; ψ , $\dot{\psi}$, $\ddot{\psi}$ — угол дифферента и его производные; ζ_g , $\dot{\zeta}_g$, $\ddot{\zeta}_g$ — аппликата перемещения ЦТ судна и ее производные.

На первых этапах проектирования катера нет смысла искать решение этих уравнений. Рассматриваются катера, которые работают в переходном режиме ($0,4 < Fr < 1,0$). Уравнения (2) требуют модификации, которой трудно придать адекватный вид: на начальной стадии еще нет теоретического чертежа, недостаточно информации о параметрах посадки корпуса, чтобы уверенно определить коэффициенты главной части возмущающих сил a_0 , b_0 , a_1 , b_1 , а также коэффициенты дифракционных компонентов возмущающих сил инерционной природы a''_0 , b''_0 , a''_1 , b''_1 .

Для сравнительной оценки уровня инерционных перегрузок у разных вариантов проекта катера желательно создать некий обобщенный вид в части перегрузок в опасной зоне судна, определяемый частотой собственных колебаний. Изъятие из (2) демпфирующих составляющих в некоторой мере компенсирует воздействие возмущающих сил, которые тоже отбросим. Период собственных колебаний доминирует в любых условиях качки, и, если задавать предельный угол килевой качки, можно с помощью эксперимента, при определенных соотношениях Fr и λ/L , найти соответствие по перегрузкам между первым вынужденным размахом на тихой воде и параметрами хода на волнении. Подобный прием применим далее.

Вследствие большого сопротивления амплитуды собственной вертикальной и килевой качки быстро затухают и судно в той или иной мере (в зависимости от соотношения частот) повторяет амплитудную характеристику внешнего воздействия.

При ходе на нерегулярном волнении опасными являются «резонансные»³ амплитуды, которые возникают при сближении собственных периодов судна τ_c с кажущимися периодами волн τ_k . Наибольшие амплитуды качки должны появляться при $\tau_c = \tau_k$ или кратных отношениях $a_1 \tau_c = a_2 \tau_k$, где a_1 и a_2 — целые числа.

Кажущийся период τ_k , средние значения длины λ_{cp} , м, скорость волны v_b , м·с⁻¹, а также скорость судна v_c , м·с⁻¹, и его курсовой угол на волну φ связаны формулой

$$\tau_k = \frac{\lambda_{cp}}{v_b + v_c \cos \varphi}.$$

Переходя к частоте и различая групповую и фазовую скорости волн, имеем

$$\omega_k = 2\pi \frac{m\sqrt{\lambda_{cp}} + v_c \cos \varphi}{\lambda_{cp}},$$

где m — блочная переменная характера движения волн ($m = 1,25$ при фазовой скорости⁴ и $m = 0,625$ при групповой скорости волн в глубокой части моря).

³ Истинный резонанс на нерегулярном волнении не разовьется в силу малого числа периодов собственных продольных колебаний катера, а с другой стороны, в силу нестационарности длины и направления волн.

⁴ Фазовая скорость характерна для прибрежной зоны, когда длина волны более двух глубин бассейна. В открытом море в многомерном спектре волн происходят явления интерференции и биений и групповая средняя скорость волн в 2 раза меньше прибрежных [см. Ч. Дрейк и др. «Океан сам по себе и для нас». — М.: Прогресс, 1982, с.137].

Если упростить описание процесса и не учитывать гидродинамические составляющие качки, то отношение кажущейся частоты волн и собственной килевой частоты судна можно связать⁵ зависимостью:

$$\frac{\omega_{\kappa}}{\omega_{\psi}} = 2,83 \frac{m \sqrt{\frac{\lambda_{\text{cp}}}{L}} + 3,13 \text{Fr} \cos \varphi}{\frac{\lambda_{\text{cp}}}{L} \sqrt{\frac{L\alpha}{T\delta}}} \quad (3)$$

Резонанс первого тона возникает при отношении $\frac{\omega_{\kappa}}{\omega_{\psi}} = 1$. Вследствие непостоянных значений периодов нерегулярных волн практически опасной зоной являются отношения частот $0,75 < \frac{\omega_{\kappa}}{\omega_{\psi}} < 1,35$. Колебания, приближающиеся к первому тону, негативно влияют и на обитаемость в салонах, и на прочность корпуса. Формула (3) показывает, что резонанс может возникать у вариантов проекта при разных значениях λ_{cp}/L в зависимости от относительной скорости хода и формы подводной части судна. Например, при параметрах подводной части $\alpha=0,73$, $\delta=0,5$, $L/T=25$ и относительной скорости $\text{Fr} = 0,40 \dots 1,2$, характерных для современных быстроходных лоцманских катеров, резонанс такой идеализированной встречной килевой качки наступает при следующих сочетаниях Fr и λ_{cp}/L :

Fr	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40
λ_{cp}/L	0,44	0,72	1,09	1,54	2,08	2,69

Учет в уравнении качки гидродинамических составляющих демпфирования и внешних воздействий меняет абсолютные значения λ_{cp}/L , но тенденция его влияния сохраняется — для больших скоростей резонанс первого тона наступает при больших длинах волн. На рис. 1 и 2 показаны реальные графики [3] относительных амплитуд остроклюлого катера БК-1 на регулярном волнении с относительной высотой $h_{3\%}/D^{1/3}=0,22$.

Видно, что при $\lambda_{\text{cp}}/L=1$ резонанс килевой качки наступил при $F_d=0,5$ ($\psi/\alpha_m=0,6$), а при $\lambda_{\text{cp}}/L=2$ уже при $F_d=1,0$ ($\psi/\alpha_m=1,05$). Появление максимума амплитуд вертикальных колебаний с ростом длины волны начинает отставать по фазе от скорости: так, если при $\lambda_{\text{cp}}/L=1$ максимум имеет место тоже при $F_d=0,5$, то при $\lambda_{\text{cp}}/L=2$ максимум уже при $F_d=1,48$, а не при $F_d=1$. Графики на рис. 1 и 2 показывают, что значительные всплески амплитуд концентрируются только при одном определенном сочетании значений F_d и λ_{cp}/L . В этот момент $\omega_{\kappa}/\omega_{\psi}$ приближается к 1. Остальные кратные отношения частот уже не вызывают заметного роста амплитуд, что объясняется очень быстрым затуханием собственных колебаний катера.

При $F_d > 2,5$ амплитуды качки стабилизируются около значений, присущих качке катера на том же волнении, но без хода. В этом режиме максимальные амплитуды килевой качки примерно в 1,3 раза меньше амплитуд на волнении и спорадически возникают в интервале относительных длин волн $\lambda_b/L=1,7 \dots 2,1$ (рис. 3).

Предельные параметры килевой качки можно получить, рассматривая дифферентование катера на тихой воде без хода до погружения форштевня на глубину $H_{\text{нб}}$. Высота предельной линии погружения катеров составляет, по статистике, не менее $H_{\text{нб}}=0,5L^{0,5}+0,02L$. Опыты показывают, что раскачиваемый до такого состояния катер имеет динамические параметры, близкие к состоянию при $F_d=1$ на волнении с $h=0,22$ и $\lambda_b/L=2$.

Экспериментально определить эти параметры можно в бассейне на модели, если на тихой воде внешним усилием обеспечить осадку на носовом

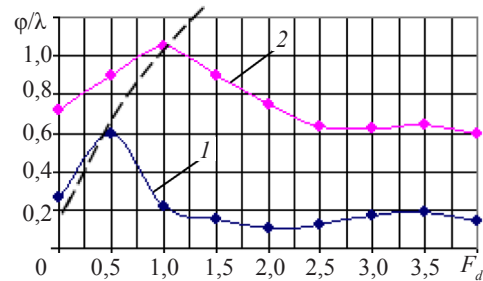


Рис. 1. Характерные кривые амплитуд килевой качки при волнении $h_{3\%}/D^{1/3}=0,22$: 1 — $\lambda_{\text{cp}}/L=1$; 2 — $\lambda_{\text{cp}}/L=2$

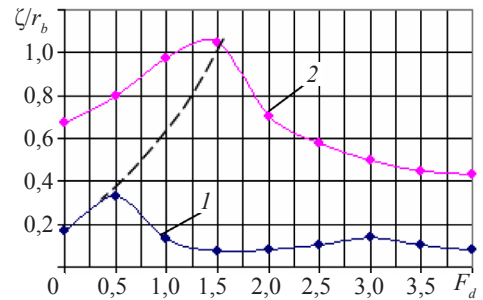


Рис. 2. Характерные кривые амплитуд вертикальной качки при волнении $h_{3\%}/D^{1/3}=0,22$: 1 — $\lambda_{\text{cp}}/L=1$; 2 — $\lambda_{\text{cp}}/L=2,2$

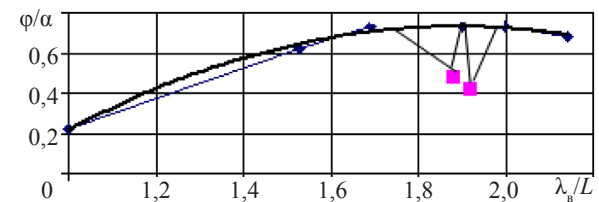


Рис. 3. Амплитуды качки остроклюлого катера ($D=61$ т, $L=25$ м) на стопе при волнении $h_{3\%}/D^{1/3}=0,22$

⁵ Используем указанные выше приближенные выражения метацентрического радиуса $R_{\text{мтц}}$ и момента $J_{\text{ум}}$ инерции масс.

перпендикуляре по предельную линию погружения, а затем мгновенно высвободить модель. Современная аппаратура позволяет регистрировать скорости и ускорения при первом размахе качки. Используя эту запись, получают скорость и ускорение собственных продольных колебаний. Эти значения можно считать предельно допустимыми. Примерно те же результаты получим, закладывая допустимый угол дифферента $[\psi_{\max}] = \arctg(H_{\text{нб}}/L_w)$ и собственный период τ_ψ в формулы угловых скоростей и ускорений, вытекающие из решения уравнений собственных «чистых» (при симметрии корпуса относительно плоскости миделя) продольных колебаний:

– для вертикальной качки

$$D(1+k_{33})\ddot{\zeta}_g + g\rho S\zeta = 0; \quad (4)$$

– для килевой качки

$$J_{my}(1+k_{55})\ddot{\psi} + GH_{\text{мтц}}\psi = 0. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) имеем периоды

$$\tau_\zeta = 2\pi\sqrt{\frac{D(1+k_{33})}{g\rho S}}; \quad \tau_\psi = 2\pi\sqrt{\frac{J_{my}(1+k_{55})}{GH_{\text{мтц}}}},$$

где D — масса катера, т; S — площадь грузовой ватерлинии, м²; G — вес катера, кН; J_{my} — момент инерции массы катера относительно его центральной поперечной оси, т·м²; $H_{\text{мтц}}$ — продольная метацентрическая высота, м; $(1+k_{33}) \approx 1,15$ и $(1+k_{55}) \approx 2$ — коэффициенты увеличения массы и ее момента инерции за счет присоединенных масс [12]. Из уравнений (4) и (5) в экстремальных точках размаха качки ($t = \tau_\zeta/2$ и $t = \tau_\psi/4$) имеем:

$$\begin{aligned} \psi_{\max} &= \arctg\left(\frac{H_{\text{нб}}}{L}\right); \quad |\dot{\psi}_{\max}| = \psi_{\max} \frac{2\pi}{\tau_\psi}; \\ |\ddot{\psi}_{\max}| &= \psi_{\max} \frac{4\pi^2}{\tau_\psi^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Значения (6) подходят для определения перегрузок при критических амплитудах качки. В расчете заменим метацентрическую высоту радиусом $R_{\text{мтц}} = \frac{\alpha^2 L^2}{148T}$, момент инерции массы катера определим по формуле Ю. А. Шиманского:

$$J_{my} = D\left(\frac{\alpha^2 L^2}{148} + \frac{H_s^2}{12}\right) \quad \text{или} \quad J_{my} = 0,116\alpha DL^2.$$

Тогда, например, для катера с элементами $D=61$ т; $L=25$ м; $B=5,2$ м; $H_{\text{нб}}=3,2$ м; $T=1,05$ м; $\delta=0,44$; $\alpha=0,7$; $l=1,05$ м получим: $J_{my}=3095$ т·м²; $\tau_\psi=2,9$ с; $\tau_\zeta=1,74$ с; $\psi_{\max}=0,23$ рад ($14,4^\circ$)⁶; $\ddot{\psi}=0,27$ рад·с⁻²;

$\ddot{\psi}_{\max}=0,59$ рад·с⁻² и вертикальное ускорение на третьем теоретическом шпангоуте, обусловленное чисто килевой качкой, будет около $7,1$ м·с⁻², или $0,72g$. К этому нужно добавить ускорение от смещения ЦТ.

Вертикальное смещение ЦТ, определяемое из второго уравнения системы (1):

$$\zeta_{g\psi} = \left| \frac{1}{\rho g S l} (J_{my}(1+k_{55})\ddot{\psi} - GR_{\text{мтц}}\psi) \right| = 0,024 \text{ м.}$$

По аналогии с (6) запишем:

$$|\dot{\zeta}_{\max}| = \zeta_{\max} \frac{2\pi}{\tau_\zeta}; \quad |\ddot{\zeta}_{\max}| = \zeta_{\max} \frac{4\pi^2}{\tau_\zeta^2}.$$

Используя значения $\zeta_{g\psi}$ и периода чистых вертикальных колебаний $\tau_\zeta=1,74$ с, получим $\ddot{\zeta}_{\max}=3,01$ м·с⁻². В случае совпадения килевых и вертикальных амплитуд перегрузка на третьем шпангоуте достигает $1,03g$ — это несколько ниже санитарной нормы для рабочих площадок на открытой палубе [2].

При заданной высоте волны величина вертикальных перегрузок быстро возрастает с увеличением относительной скорости хода и заметно уменьшается за счет увеличения внешнего угла килеватости $\beta_{\text{град}}$ днища катера. Для волнения средней интенсивности ($\hat{h}=0,25$) при $1,5 < F_d < 3$ это влияние иллюстрирует рис. 4.

Большинство лоцманских катеров работает в переходном гидродинамическом режиме $0,6 < F_d < 2,4$. В этом диапазоне перегрузки от вертикальных колебаний катера в наибольшей степени зависят от удлинения ГВЛ L/B , относительной скорости хода F_d , полноты поперечного сечения β и отношения длины волны к длине ватерлинии⁷ катера λ_b/L . Как правило, при $F_d > 1$ катерам делают ломаную скулу по типу простых обводов Клемента и Блаунта [4].

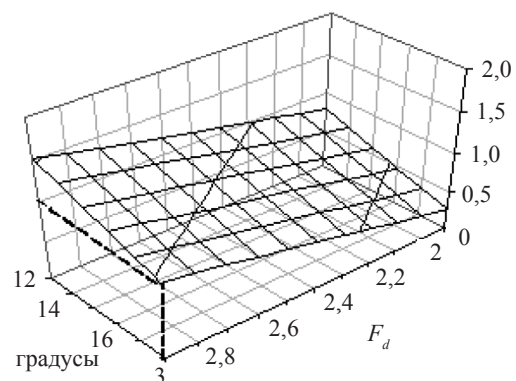


Рис. 4. Влияние угла килеватости днища на величину вертикальных инерционных перегрузок

⁶ На 10% больше максимальной амплитуды при $\lambda_{\text{сп}}/L=2$ на рис. 1.

⁷ Для заданного волнения и конкретного катера шкалу легко пересчитать на шкалу \hat{h} , которая широко используется в справочной литературе по катерам.

Для них характерен постоянный от миделя до транца угол килеватости, равный 15° (рис. 5).

Влияние длины волны на величину инерционных перегрузок в центре тяжести такого катера на волнении с относительной высотой $\hat{h}=0,45$, полученное по материалам [4], показано на рис. 6.

Изучение статистических и экспериментальных данных [4, 6] позволяет получить общую формулу для оценки перегрузок в ЦТ катера ($1 < F_d < 3$):

$$n_g = 0,224 \frac{F_d^{0,5} \exp(0,386 F_d) \hat{h}^{0,484 \exp(0,335 F_d)}}{\exp(-0,07 \beta_{\otimes})(0,92 + 0,245 L/B - 0,045 (L/B)^2)}, \quad (7)$$

где $\hat{h} = h_{3\%}/D^{1/3}$ — относительная высота волны для данного судна; β_{\otimes} — угол внешней килеватости на миделе, $4 < L/B < 7$.

Современные мореходные катера имеют более острые носовые шпангоуты и увеличенный до 22° угол средней килеватости. Такая модификация наряду с увеличением удлинения ГВЛ позволяет существенно снизить инерционные перегрузки от продольной качки на волнении. Значения перегрузок в ЦТ монокорпусов типа deer-V, определенные зависимостью (7), представлены на рис. 7, из которого видно, что только за счет модификации формы корпуса существенно уменьшить перегрузки не удастся.

Полезное с точки зрения снижения перегрузок увеличение удлинения корпуса приводит к его избыточной массе, а также к снижению поворотливости. С другой стороны, значения ширины лоцманских катеров ограничиваются снизу требованиями общего расположения и находятся в пределах 3,2...4,2 м (2,5 м ширина рубки + 2·0,4 м на проходы по бортам). Как следствие, для улучшения мореходности требуется увеличивать водоизмещение лоцманского катера, повышая его строительную стоимость, что во многих случаях неприемлемо. Обеспеченность водоизмещения 53 т для лоцманских катеров равна 8%, причем катера от 9 до 20 т составляют 32% и 31...42 т — 23%. Не менее 80% от общего числа лоцманских катеров имеют удлинение $L/B < 4,2$. Поэтому перегрузки в их ЦТ превышают указанные на рис. 7 более чем в 1,2...1,5 раза.

С повышенными перегрузками можно мириться при малом оперативном радиусе обслуживания судов в силу кратковременности переходов. При дальних проводках (20...40 миль) вопросы мореходности и экономичности катера выходят на первый план, и для их обеспечения нужны новые конструктивные подходы.

На малых катерах при высокой скорости хода ($F_d > 3$) удастся уменьшить перегрузки на 70% путем установки глиссирующих лыж на корпусе [4, с. 246].

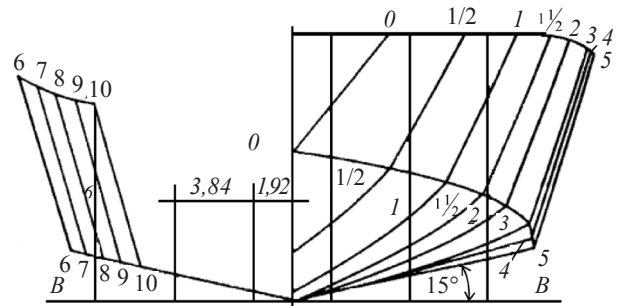


Рис. 5. Типичный корпус катера Клемента и Блаунта

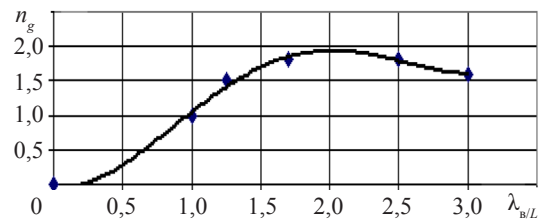


Рис. 6. Изменение величины перегрузки с ростом длины волны ($n_g = 0,2129x^4 + 1,4518x^3 + 2,7808x^2 - 0,4904x - 0,0016$; $x = \lambda_w/L$; $F_d = 2$; $L/B = 7$; $R^2 = 0,9949$)

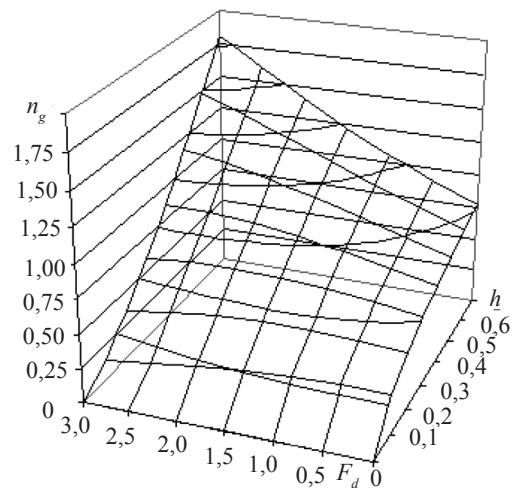


Рис. 7. Перегрузки в ЦТ лоцманских катеров в зависимости от относительной высоты волн и относительной скорости хода (deer-V, $\beta_{mid} = 22^\circ$, $5 < L/B < 7$)

На переходных режимах аналогичного результата можно добиться, применяя катамаран с тонкими корпусами. Идеальным решением в этом плане явился бы катер типа СМПВ⁸. Однако значительная осадка осложняет базирование такого катера у слабо оборудованного берега. Это снижает его оперативные возможности.

Приемлемым типом мореходного мелкосидящего катера является катамаран с тонкими корпусами типа Z-bow. Обладая большим удлинением боковых корпу-

⁸ Судно с малой площадью ватерлинии – катамаран с глубокопогруженными сигарообразными корпусами.

сов с ножеобразными бульбами и тонкими (рис. 8, 9) или сильно килеватыми шпангоутами носовой части, такой катер спокойно работает на волне 3%-й обеспеченности высотой до 1,2 своего вертикального клиренса. При этом применение стабилизирующих устройств в виде управляемых подводных крыльев позволяет ликвидировать килевую и минимизировать вертикальные составляющие продольной качки катера.

Площадь стабилизирующего крыла выбирается для эффективной работы при эксплуатационной скорости хода катера с таким расчетом, чтобы его подъемная сила составляла 6...10% веса катера. Для расчета подъемной силы необходимо определить коэффициент C_y , который зависит от геометрических параметров крыла, его заглубления и текущего угла атаки. На первых стадиях расчетов динамической посадки катера можно воспользоваться аппроксимацией Чан Ван Миня [8]: C_y крыла зависит от относительного размаха $\lambda_{кр}$, относительной толщины профиля $S_{отн}$ (% от хорды $t_{кр}$), относительного (в долях хорды) заглубления крыла $h_{погр}/t_{кр}$, от угла атаки крыла к вектору скорости $(\alpha + \alpha_{уст})$. Полученная аппроксимация позволяет учесть перечисленные условия:

$$C_y = 1,106 \exp(-0,0087C_{отн}) \left[1 - 0,5 \exp\left(-2,5 \frac{h_{погр}}{t_{кр}}\right) \right] \times \left[\frac{1,7\pi(\alpha + \alpha_0) + \sin^2(\alpha + \alpha_0) \cos(\alpha + \alpha_0)}{1 + \frac{2}{\lambda_{кр}}} \right]. \quad (8)$$

Здесь α_0 — угол установки крыла к ОП при изготовлении паромы; α — управляемый угол атаки; $\lambda_{кр}$ — относительный размах крыла, установленного между корпусами катамарана.

Выражение во вторых квадратных скобках в (8)

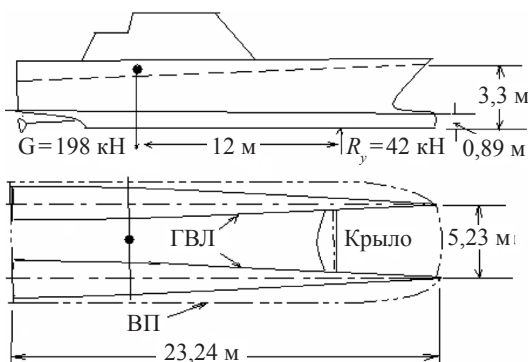


Рис. 8. Схема катамарана со стабилизирующим крылом ($D=20$ т; $V_s=28$ уз; $S_{кр}/S_{ГВЛ}=0,08$)

представляет собой известную формулу К.К. Федяевского для коэффициента подъемной силы крыла малого размаха. Подъемная сила крыла вычисляется как

$$R_y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S_{кр}.$$

Изменение угла атаки α в пределах $\pm 3^\circ$ позволяет на 90% погасить чисто килевую качку и примерно на 50% уменьшить амплитуды вертикальных перемещений ЦТ катера⁹. Расчет характеристик средств управления подъемной силой крыла приведен в [3, 8]. Следует заметить, что применение системы автоматического управления ходовым дифферентом катера (RCS) повышает его стоимость примерно на 20%.

Другой способ умерения вертикальной качки — использование разгрузочного подводного крыла, расположенного непосредственно под центром тяжести судна (так называемое центрированное крыло с $K_{разгрузки}=0,6G$) и поддержание положительного ходового дифферента кормовыми горизонтальными рулями. Подобная схема (со стационарными горизонтальными рулями) предложена профессором К.Г. Норре (южноафриканский университет «Стеленбош») и внедрена на полицейских и боевых катерах ЮАР. Обеспечивается безударный ход высокоскоростного ($F_d > 3$) катера при относительной высоте волны до $\hat{h}_{3\%}=0,89$. Ее применение дает возможность повысить скорость хода на 30% по сравнению с бескрылым равновеликим катером. Однако катер имеет значительный ходовой дифферент (до 10°) на корму, что в определенных условиях может представлять эксплуатационные неудобства.

Применение стабилизирующего крыла (типа рис. 8) позволяет сдвинуть максимальные значения перегрузок к малым значениям относительных частот ($\omega_k/\omega_c=0,25$), при этом абсолютные значения перегрузок не превышают $0,5g$. В области резонанса частот

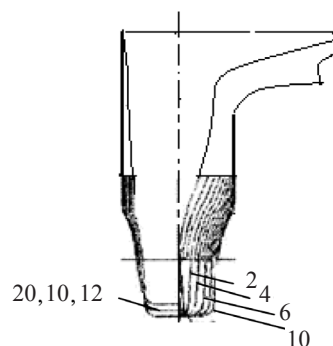


Рис. 9. Форма шпангоутов тонкого корпуса катера-катамарана (2, 4, 6, 10, 12, 20 — номера шпангоутов)

⁹ Эти примерные цифры основаны на сообщениях фирмы «Condor», эксплуатирующей пассажирские катамараны со стабилизирующим крылом (Right Control Sistem) в проливе Ламанш.

первого тона ($\omega_k/\omega_c \approx 1$) перегрузки сводятся к нулю (рис. 10) [9]. Рассмотренные выше соотношения относятся к безударному ходу катера.

Рассмотрим удар о волну корпуса типа катера Клемента Блаунта (см. рис. 5). Согласно методике проф. И. Т. Егорова [4], основанной на экспериментальных данных ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, можно вывести необходимые частные зависимости. Например, при ударе остроскулого корпуса с отношением $L/B=6$ носовой частью о встречную волну высотой $h_{3\%}$ в его центре тяжести возникают вертикальные перегрузки $\zeta/g = 0,66h_{3\%}^{0,46} F_{dk}^{0,72}$, где $F_{dk} \approx 0,164v_{s1} \cdot 0,5144/D^{1/6} = 0,0884v_{s1}/D^{1/6}$, v_{s1} — суммарная скорость катера и скорости волны ($v_c + v_b$) $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$. Учитывая статистическую связь периода волн с высотой волны 3%-й обеспеченности $\tau_b = 3,36h_{3\%}^{0,5}$, а также средней длины волн с периодом $\bar{\lambda} = 1,56\tau^2$, нетрудно преобразовать указанную зависимость к виду

$$a_g = 0,43 F_d^{0,72} \hat{h}^{0,46} + 1,346 \hat{h}^{1,344}, \quad (9)$$

где \hat{h} — относительная высота действующего волнения.

Формула (9) дает значения на 12% выше формулы (7). Решая (9) относительно \hat{h} при заданном значении перегрузки a_g , можно установить предельно допустимое водоизмещение при известной скорости катера. Например, получить зависимость, показанную на рис. 11. Кривые 3 и 4 свидетельствуют о том, что монокорпуса существенно уступают по мореходности катамаранам со стабилизирующим крылом [10].

Выполненный анализ свидетельствует о целесообразности при проектировании лоцманского катера дифференцированного подхода к обеспечению его мореходности. Поскольку выносливость экипажа при перегрузках зависит от продолжительности их воздействия, то при длительности ходов в море более 0,5 ч [2] необходимы дорогие мореходные корпуса. Под термином «дорогие» подразумеваются монокатера увеличенного водоизмещения либо катамараны со стабилизирующим крылом. Действительно, если монокатер водоизмещением 44 т на волне $h_{3\%} = 2$ м при скорости 13,3 уз получает перегрузки 1,2g, то при скорости 26,6 уз для сохранения такого же уровня перегрузок при том же волнении необходимо, как это следует из уравнения (7), иметь водоизмещение 97,8 т. Катамаран водоизмещением 44 т со стабилизирующим крылом получит перегрузку всего лишь 0,45g (рис. 11, $F_d = 2,07$). Если же допускать перегрузки, подобные таковым на монокатере, то при 13 уз катамарану с СК достаточно 19,7 т водоизмещения, а при 26 уз — 40 т [8]¹⁰.

Для ориентации при составлении задания на мореходные качества катера на рис. 12 приведена

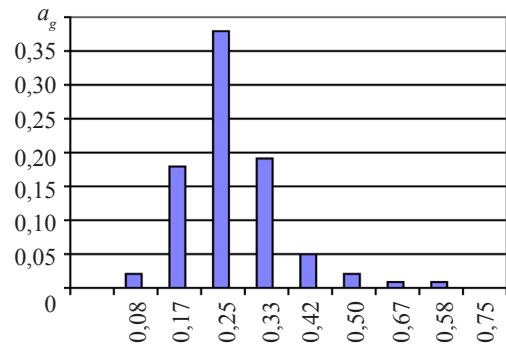


Рис. 10. Распределение перегрузок по отношению кажущейся и собственной частот (ω_k/ω_c)

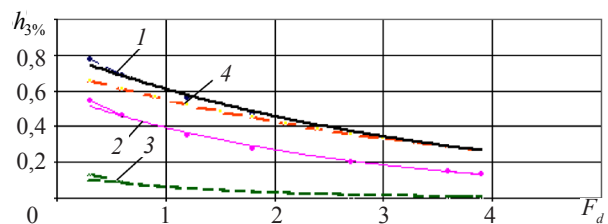


Рис. 11. Допустимая по a_g высота волн при заданной относительной скорости: 1 — $a_g=1,2$; 2 — $a_g=0,8$; 3 — $a_g=0,2$; 4 — $a_g=0,2$ (катамаран)

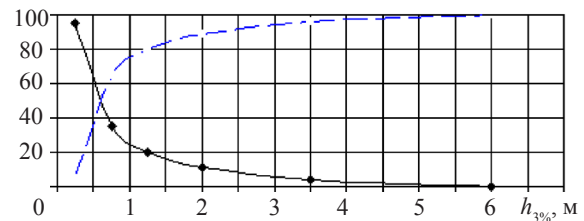


Рис. 12. Характеристики среднегодового распределения волнения у побережья Черного моря: — — среднегодовая обеспеченность; - - - - среднегодовая кумулята

среднегодовая обеспеченность волновых режимов в прибрежных районах Черного моря.

Среднее число штормовых дней у Черноморского побережья за 20 лет наблюдений приведено в [7, с. 48]. Повторяемость длин и периодов волн, %, в районе некоторых портопунктов Южного Берега Крыма показана в [7, с. 181]. Интересно отметить, что в районе Алушты и Ялты 85% всех волн принадлежат зыби. В этих прибрежных районах с относительно большой глубиной волны зыби имеют длину 40...50 м при высоте всего 0,6...0,8 м. Все это свидетельствует о том, что для окончательного суждения о характере волнения в районах предполагаемой эксплуатации лоцманских катеров перед проектированием

¹⁰ При относительной высоте волны $\hat{h}_{3\%} = 0,125 \cdot D^{0,3} + 0,34 \cdot F_d^{-0,7}$ катамаран с СК получает $a_g \approx 1$.

требуются дополнительные исследования в виде систематических записей процесса волнения и их статистической обработки.

Примечательно, что запас мощности катера позволяет преодолевать волнение при минимальных углах дифферента за счет разрушения набегающей волны (рис. 13).

На графике рис. 14 приведены показатели катеров с $D=21\dots 23$ т, обслуживающих дистанцию 30 миль, без запаса мощности (вариант 60/400 мощностью 328 кВт) и с запасом мощности (вариант 1/400 мощностью 630 кВт, вариант 440/400 мощностью 440 кВт); P_t — суточные текущие затраты, дол./сут; цена катера — млн дол.

Видно, что катер даже с очень большим запасом мощности (со скоростью 26 уз на дистанции 30 миль) немного теряет в расходах. Зато существенно возрастают возможности увеличения оперативной напряженности рабочей смены и соответственно повышения полезного эффекта от эксплуатации катера.

Решающее влияние на развитие инерционных перегрузок имеет *относительная высота* действующего волнения $\hat{h} = h_{3\%} / D^{1/3}$.

По опытным и статистическим данным [6] величину перегрузок полностью глиссирующего катера можно определить по формуле

$$\frac{\ddot{z}}{g} = 8,96 \hat{h}_{3\%}^2 - 0,26 \hat{h} + 0,114.$$

Предыдущий анализ свидетельствует о том, что существенно уменьшить вертикальные перегрузки на однокорпусном катере за счет модификации обводов практически не удастся. По-видимому, целесообразно перейти к конструктивному типу, минимизирующему волновое сопротивление.

ВЫВОДЫ

1. Выполненный анализ свидетельствует о целесообразности при проектировании лоцманского катера дифференцированного подхода к обеспечению мореходности для повышения оперативной напряженности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Благовещенский, С. Н. Качка корабля [Текст] / С. Н. Благовещенский. — Л. : Судпромгиз, 1954. — 520 с.
- [2] Вашедченко, А. Н. Успокоение бортовой качки крупных катеров [Текст] / А. Н. Вашедченко, Я. А. Клева // 3б. наук. праць НУК. — 2010. — № 3 (432). — С. 3–10.
- [3] Войткунский, Я. И. Справочник по теории корабля [Текст] / под общ. ред. Я. И. Войткунского. — Л. : Судостроение, 1985. — Т. 3. — 540 с.
- [4] Егоров, И. Т. Ходкость и мореходность глиссирующих судов [Текст] / И. Т. Егоров, М. М. Буньков, Ю. М. Садовников. — Л. : Судостроение, 1978. — 335 с.
- [5] Исторический очерк «Морские катера» [Текст] // Судостроение. — 2005. — № 5.
- [6] Кользаев, Б. А. Удар корпуса о волну [Текст] : справочник по проектированию судов с динамическим принципами поддержания / Б. А. Кользаев. — Л. : Судостроение, 1980.
- [7] Леви, Б. З. Пассажирские суда прибрежного плавания [Текст] / Б. З. Леви. — Л. : Судостроение, 1975. — 320 с.



Рис. 13. Катер с большим запасом мощности легко преодолевает крупное волнение

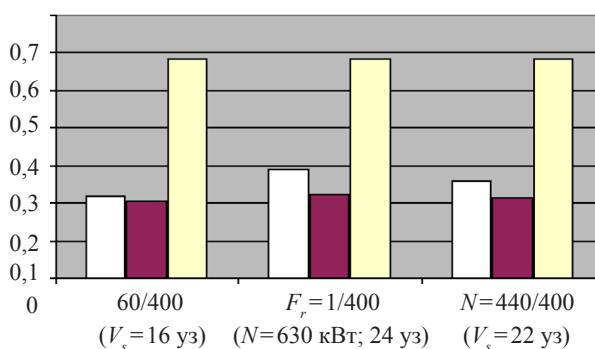


Рис. 14. Технико-экономические показатели катеров при радиусе действия 30 миль ($F_r = 1/400$ — катер с форсирующей скоростью $F_r = 1$, $N = 440/400$ — катер с установленной мощностью 440 кВт): □ — P_t ; ■ — дол./сут/1000; ■ — млн дол./катер

2. Выносливость экипажа при перегрузках зависит от продолжительности их воздействия. При длительности хода в море более 0,5 ч необходимы катера увеличенного водоизмещения либо катамараны со стабилизирующим крылом.

3. Для достоверной характеристики волнения в районах предполагаемой эксплуатации лоцманских катеров перед проектированием требуются систематические записи процесса волнения и их статистическая обработка.

- [8] **Минь, Ч. В.** Математическая модель и алгоритм оптимизации главных элементов пассажирского парома [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ч. В. Минь. — Николаев : НУК, 2009. — 23 с.
- [9] **Ремез, Ю. В.** Качка корабля [Текст] / Ю. В. Ремез. — Л. : Судостроение, 1963. — 327 с.
- [10] **Фан, Т. Ч.** Прогнозирование морской болезни на высокоскоростном катамаране [Электронный ресурс] / Т. Ч. Фан, Ж. С. И. Чанг, М. Е. Чен. — Национальный университет океана, Тайвань, 2005. — 69 с. — Режим доступа: www.ntou.edu.tw/science.
- [11] **Чижиумов, С. Д.** Основы динамик судов на волне [Текст] / С. Д. Чижиумов. — ГОУВПО «Кн.АГТУ», 2012. — 110 с.
- [12] **Холодилин, А. Н.** Гидродинамические задачи мореходности и стабилизации на волнении [Текст] / А. Н. Холодилин, В. К. Трунин. — СПб. : Судостроение, 1993. — 218 с.

© А. М. Вashedченко, І. Ю. Потай, А. І. Кротов

Надійшла до редколегії 16.08.12

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
канд. техн. наук, проф. *А. Ф. Галь*

Статтю розміщено у Віснику НУК №4, 2012