

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТРЕБНЫХ РАЗМЕРОВ ЩИТА- БРЫЗГОТБОЙНИКА НА ПРОЕКТИРУЕМОМ СУДНЕ

О. И. Соломенцев, д-р техн. наук, проф.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрено теоретическое определение потребной ширины щита-брызготбойника из условия снижения в заданной степени частоты забрызгивания или кинетической энергии брызговых струй, а также целесообразность применения этого щита.

Ключевые слова: забрызгивание, щит-брызготбойник, потребная ширина щита, частота забрызгивания.

Анотація. Розглянуто теоретичне визначення потрібної ширини щита-брызговідбійника з умови зниження у заданій мірі частоти забрызкування або кінетичної енергії брызгових струменів, а також доцільність використання цього щита.

Ключові слова: забрызкування, щит-брызговідбійник, потрібна ширина щита, частота забрызкування.

Abstract. Theoretical determination of a necessary breadth of the spray deflector (hull strike) because of reduction of the frequency or kinetic energy of spraying is determined. We shall also consider the practical efficiency of the spray deflector.

Keywords: spraying, spray deflector, necessary breadth of spray deflector, frequency of spraying.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Важным показателем мореходности проектируемого судна на встречном волнении является заливание. Различают два вида заливания: зарывание (green seas), когда верхняя палуба судна оказывается под сплошным (неразрушенным) потоком воды, и забрызгивание (spray), когда на надводную часть судна действуют разрушившиеся несплошные потоки воды (брызги). Сильное забрызгивание резко ухудшает эксплуатационные свойства судна.

Так, известны случаи, когда крупные (водоизмещением 3000 т) эсмин-

цы уже при слабом волнении не могли использовать артиллерию главного калибра из-за сильного забрызгивания (см., например, выступление Д. К. Брауна в прениях по статье [20]). В работе [18] А. Н. Шмырев отмечает, что интенсивное забрызгивание для средних и крупных водоизмещающих кораблей при ходе на встречном волнении обычно начинается при интенсивности волнения 4 балла, а при волнении 6 баллов забрызгивание становится непрерывным. В работе [19] Д. К. Браун называет забрызгиваемость одной из вечных проблем кораблестроения. Этот фактор

существенно ухудшал условия использования морского оружия как в обеих мировых войнах, так и в послевоенный период.

Значительным забрызгиванием характеризуются даже такие крупные корабли, как американские крейсера типа «Ticonderoga». Даже те корабли ВМФ бывшего СССР, мореходность которых в целом оценивалась как хорошая (эсминцы пр. 56) и даже как отличная (сторожевые корабли пр. 42), все же имели проблемы с забрызгиванием на полном ходу.¹

Известны две физические модели забрызгивания для водоизмещающих судов:

забрызгивание возникает, когда полные (суммарные) относительные перемещения корабля, которые включают в себя как статический, так и определенный по известным соотношениям для отдельно взятого колебания динамический подъем воды при качке, превысят высоту надводного борта в расчетном сечении [17];

забрызгивание возникает, когда для анализируемого расчетного сечения фактическое число Фруда по скорости потока Fr_s превысит зависящее только от геометрии расчетного поперечного сечения пороговое число Фруда по скорости потока Fr_s^* [2].

Первая трактовка характеризует забрызгивание как своего рода зарывание малой интенсивности. Получается, что забрызгивание возникает тогда, когда палуба погружается под струйные потоки у борта, но при этом остается выше уровня невозмущенной набегающей волны (ситуация, когда палуба погружается под уровень невозмущенной волны, в рамках данной трактовки представля-

ет собой зарывание). Под струйными потоками здесь понимается динамический подъем, определенный как для отдельно взятого колебания.

В основе первой трактовки лежат модельные эксперименты [21], когда заливание оценивалось по зрительному впечатлению. Качественно были выделены три состояния (Dry Deck — сухая палуба, Wet Conditions — заливание умеренной интенсивности и Very Wet Conditions — интенсивное заливание). Тогда под Wet Conditions в работе [17] понимается забрызгивание, а под Very Wet Conditions — зарывание.

Разумеется, зрительное впечатление всегда субъективно и поэтому может выглядеть недостаточно убедительным. В то же время приходится учитывать, что моделирование забрызгивания затруднительно. При моделировании забрызгивания в качестве критерия гидродинамического подобия используется число Вебера (подобие по силам поверхностного натяжения) [13]. И одновременное соблюдение гидродинамического подобия как по числу Фруда (что необходимо для моделирования продольной качки), так и по числу Вебера не всегда осуществимо (похожая ситуация возникает и при модельных экспериментах для изучения сопротивления воды движению судна, когда одновременное соблюдение гидродинамического подобия по критериям Фруда и Рейнольдса не может быть осуществлено). При этом оказывается, что если в модельном эксперименте разрушение струйных потоков не происходит (и тогда погружение под струйные потоки — но не под уровень невозмущенной волны — может рассматриваться как зарывание малой интенсивности), то в на-

¹Морской сборник. — 1992. — № 11. — С. 53; Судостроение — 1993. — № 7. — С. 59; № 10. — С. 75; 1994. — № 1. — С. 81; № 11/12. — С. 64; Судостроение за рубежом. — 1988. — № 1. — С.35; 1991. — № 2. — С. 12.

турном експерименте таке руйнування може статися. І якщо це так, то для натурального корабля — і тільки для нього, але не для моделі — маємо нове, якісно відмінне від руйнування явище. Це явище і називається забрызгуванням (струйно-брызговим заливанням), його вже не можна інтерпретувати як руйнування малої інтенсивності. Руйновані струйні потоки піднімаються в цьому випадку на велику висоту, вони можуть перешкодити спостереженню і використовувати технічні засоби судна. Тому прийняте в роботі [17] розглядати забрызгування тільки як руйнування малої інтенсивності — незважаючи на спробу обґрунтувати такий підхід модельним експериментом — важко визнати повністю обґрунтованим.

Друга трактування ґрунтується на досвіді виникнення забрызгування (іноді це явище називають струйно-брызговим заливанням) для морських транспортних судів в натурних експериментах. Тут виходимо з того, що якщо при продольній качці виникає струйний потік в формі зустрічного руху води, то цей струйний потік руйнується і сформує брызгові струї, а це призведе до виникнення забрызгування [2]. Зустрічне руху може не виникнути через вплив ваги рідини. Це умову можна сформулювати як $Fr_s > Fr_s^*$.

Через важливість явища забрызгування автором було виконано теоретичний і експериментальний аналіз фізичної картини цього явища для водоісміщувальних кораблів [13, 14]. Цей аналіз дозволив зупинитися на умову виникнення забрызгування із роботи [2] виду $Fr_s > Fr_s^*$.

При глисированні (в відмінні від водоісміщувального режиму) наближаючий до корабля в відносному русі

потік розпадається. Велика його частина проходить під глиссером, а струйка невеликої товщини піднімається вгору, це і призводить до поперечного обтікання шпангоута. Затрати енергії на створення цієї струйки формують брызгову складову опору руху. Таким чином, при глисированні забрызгування обумовлено поступальним рухом корабля, а не продольною качкою. Обтікання шпангоута при цьому приблизно таке ж, як і при продольній качці водоісміщувального судна. Сам же процес глисування можна розглядати як сукупність занурених елементів глисуючого профілю [3]. Дану ситуацію далі розглядати не буде.

Важливо знизити ступінь забрызгуваності проектуваного судна за рахунок відповідного вибору його головних елементів, як правило, це вдається. Тому для зменшення забрызгування в носовій частині на рівні верхньої палуби (палуби полубака, якщо полубак є) часто встановлюються горизонтальні (паралельно площині КВЛ) щити — брызгоотбойники. Так, в 1970 р. в США були початі дослідження в відношенні підвищення мореходності фрегатів типу «Кнох». В 1975 р. були сформульовані рекомендації, які включали в себе застосування фальшборта і бортових щитів-брызгоотбойників (Spray Deflectors, Hull Strikes). В 1979 р. шість кораблів типу «Кнох» в ході планової модернізації отримали щити-брызгоотбойники. Якщо раніше інтенсивне забрызгування вело до корозійних пошкоджень стоящої на баці цих кораблів пускової установки для протилежних ракетоторпед ASROC, то після модернізації ці негативні наслідки вдалося виключити.²

²Судостроєння за кордоном. — 1980. — № 12. — С. 115.

Но известны и случаи, когда установка щитов не улучшала или даже ухудшала забрызгиваемость. Так, в выступлениях Л. Дж. Райделла и Д. К. Брауна в дискуссии по работе [20] содержатся противоположные мнения по поводу практической эффективности щитов-брызгоотбойников.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ И ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ

Выше были приведены некоторые данные описательного характера по теме настоящей работы. По мнению автора, они в достаточной степени обосновывают актуальность предлагаемой статьи. Однако автору не известны какие-либо публикации, посвященные количественному изучению влияния установки щита-брызгоотбойника на степень забрызгиваемости проектируемого судна.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — создание метода аналитического определения потребных размеров щита-брызгоотбойника исходя из условия снижения как частоты брызгообразования, так и массы попадающей на палубу с брызговыми струями воды. Будут также установлены условия, при которых применение брызгоотбойника не целесообразно.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Ограничимся далее случаем, когда шпангоутный контур в месте расположения брызгоотбойника может быть аппроксимирован параболой. Предварительно отметим одно важное обстоятельство.

В дальнейшем изложении, по аналогии с работой [5], будем рассматривать угол наклона касательной к обводу шпангоута на уровне КВЛ к горизонтали (к следу КВЛ) γ и коэффициент полноты погруженной площади шпангоута β (все это в расчетном попереч-

ном сечении, отвечающем середине щита-брызгоотбойника) как формально независимые величины. В то же время тот или иной вариант аналитической (в частном случае — параболической) аппроксимации шпангоутного контура отвечает строго определенной функциональной зависимости $\gamma = \gamma(\beta)$.

Фактически же при заданных ширине по КВЛ в расчетном сечении b_0 и осадке T следует считать, что всякому заданному β отвечает некоторый диапазон γ и величины β и γ на самом деле независимы только тогда, когда величина γ при заданном β берется из указанного диапазона. В противном случае рискуем получить нереальный для судовых обводов шпангоутный контур.

Оценим этот диапазон. Рассмотрим параболическую аппроксимацию шпангоута в расчетном поперечном сечении $y = y(z)$ в следующем обобщенном виде (начало координат — на основной плоскости, положительное направление оси z — вверх):

$$y(z) = C \frac{b_0}{2} \left(\frac{z}{T} \right)^{\frac{1}{\beta}-1} + (1-C) \frac{b_0}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{z}{T} \right)^{\frac{\beta}{1-\beta}} \right], \quad 0 \leq C \leq 1$$

Из этих соотношений следует, что

$$\forall C \in 0,1: \frac{2}{b_0 T} \int_0^T y(z) dz = \beta.$$

Угол килеватости γ определится как $\operatorname{tg} \gamma = \left. \frac{dz(y)}{dy} \right|_{z=T}$. Тогда при $C = 0$ имеем

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{T}{b_0} \cdot \frac{\beta}{1-\beta}, \text{ а при } C = 1 \text{ будет } \operatorname{tg} \gamma \rightarrow +\infty \text{ и } \gamma = \frac{\pi}{2}.$$

Получается, что при заданном коэффициенте полноты погруженной площади шпангоута β имеем искомый диапазон углов килеватости в таком виде:

$$\gamma_{\min}(\beta) \leq \gamma \leq \frac{\pi}{2}; \quad \gamma_{\min}(\beta) = \operatorname{arctg}\left(\frac{T}{b_0} \cdot \frac{\beta}{1-\beta}\right).$$

После аппроксимации промежуточных графических зависимостей из работы [5] критерий интенсивного забрызгивания может быть принят в такой форме:

$$\operatorname{Fr}_S \geq \operatorname{Fr}_S^*; \tag{1}$$

$$\operatorname{Fr}_S = \frac{a_3 \sqrt{\kappa_B \dot{\zeta}_0}}{\sqrt{g(H_f - \kappa_3 \Delta)}}; \tag{2}$$

$$\operatorname{Fr}_S^*(\beta, \gamma) \approx (2,78\bar{\gamma}^3 - 1,846\bar{\gamma}^2 + 0,602\bar{\gamma} + 0,645) \cdot (2,68 - 2,39\beta);$$

$$\kappa_B \approx 1 + 2(1 - \beta) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \cos^{\frac{3}{2}} \gamma; \quad a_3 = \frac{1 + \cos \gamma}{\operatorname{tg} \gamma} \kappa_B;$$

$$\kappa_3 \cong \sqrt[3]{\frac{\alpha_{\text{КВЛ}}}{60}} \leq 1,0; \quad \alpha_{\text{КВЛ}} = 52 - 139\operatorname{Fr} \geq 8^0, \operatorname{Fr} < 0,30; \quad \alpha_{\text{КВЛ}} = 7(l - 7) \geq 8^0, \operatorname{Fr} > 0,30; \quad l = \frac{L}{\sqrt[3]{V}};$$

$$\Delta = \kappa_W \zeta_W(x_B, 0) - \Delta T_X - \Psi_X(x_B - x_g);$$

$$\zeta_W(\bar{x}_B, 0) = \frac{0,23}{\sqrt{\bar{x}_B}} \zeta_W(0,05; 0) \frac{\cos\left(\frac{\bar{x}_B}{\operatorname{Fr}^2} - \frac{\pi}{4}\right)}{\cos\left(\frac{0,05}{\operatorname{Fr}^2} - \frac{\pi}{4}\right)}; \quad \zeta_W(0,05; 0) = \begin{cases} C_c B \operatorname{Fr}^2, & \operatorname{Fr} \leq 0,4; \\ 0,4 C_c B \operatorname{Fr}, & \operatorname{Fr} \geq 0,4; \end{cases}$$

$C_c \approx 1,0$ для U-образных обводов и $C_c \approx 1,2$ для V-образных обводов;

$$\Delta T_X \approx [1 - (1 - K_{\text{РЗГ}})^x] T \approx \chi K_{\text{РЗГ}} T; \quad \Psi_X = 0,13 \left(0,01 + \frac{x_g}{L}\right) + 0,028 \sin(5,2\operatorname{Fr} - 1,9);$$

$$\kappa_W \approx \exp\left(-\frac{4,4\dot{\zeta}_0}{v}\right) [1,0 + 0,00044(80 - \gamma)^2], \quad \gamma - \text{в градусах}; \tag{3}$$

$$\bar{\gamma} = 0,01\gamma, \quad \gamma - \text{в градусах};$$

$$\bar{x}_B = \frac{x_B}{L}; \quad K_{\text{РЗГ}} = \frac{Z_{\Gamma}}{D} \approx 0,00173 \operatorname{Fr}_V^{2,67}; \quad \operatorname{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gL}}; \quad \operatorname{Fr}_V = \frac{v}{\sqrt{g^3 \sqrt{V}}},$$

где x_B — отстояние расчетного сечения, в котором расположена середина щита-брызгоотбойника, от носового перпендикуляра; x_g — абсцисса центра тяжести судна; $\dot{\zeta}_0$ — скорость перемещений судна от продольной качки по отношению к невозмущенной регулярной волне; κ_B — коэффициент, характеризующий встречное движение жидкости при погружении в жидкость в предположении, что жидкость является невесомой [5]; a_3 — переходный коэффициент от скорости относительных перемещений

к скорости брызгового потока [2, 5, 15]; κ_3 — коэффициент, учитывающий различие характера зарывания верхней палубы под возмущенную волну и под струйный поток, принят на базе экспериментального исследования [6]; $\alpha_{\text{КВЛ}}$ — угол заострения КВЛ, принят на основе статистических зависимостей В. А. Семенов-Тянь-Шанской и Г. Е. Павленко; Δ — статический подъем воды при продольной качке; $\zeta_W(\bar{x}_B; 0)$ — ордината поперечной ходовой волны в расчетном сечении [12]; $\zeta_W(0,05; 0)$ —

то же на первом теоретическом шпангоуте [15]; ΔT_x — ходовое изменение осадки; $\Delta \Psi_x$ — угол ходового дифферента [11]; κ_w — коэффициент, учитывающий влияние регулярного волнения на статический подъем [7, 15]; L, B, T — длина, ширина и осадка судна; V — объемное водоизмещение судна; χ — коэффициент вертикальной остроты; v — скорость поступательного движения судна; Z_r — вертикальная гидродинамическая сила, обусловленная ходом судна; $K_{\text{раз}}$ — коэффициент гидродинамической разгрузки, обусловленной ходом судна [9]; H_f — высота надводного борта; g — ускорение свободного падения.

Здесь все величины, которые связаны с положением расчетного сечения по длине, отвечают поперечному сечению $x = x_b$, если иное не оговорено. Величина Fr_S связана с относительными перемещениями при продольной качке. Величина Fr_S^* зависит только от геометрических характеристик погруженного контура шпангоута в месте расположения брызгоотбойника. При $Fr_S < Fr_S^*$ встречное движение жидкости при погружении шпангоутного контура в процессе продольной качки отсутствует, а при $Fr_S > Fr_S^*$ это явление имеет место. Предполагается, что встречный поток формирует брызговую струю, а при его отсутствии нет и забрызгивания. И если у нас $Fr_S > Fr_S^*$ и брызгообразование имеет место, то динамический подъем уходит в брызговую струю и не регистрируется в эксперименте [13, 14]. Поэтому при расчете скорости $\dot{\zeta}_0$ не учитываем динамический подъем воды при качке. Иными словами, скорость $\dot{\zeta}_0$ есть скорость перемещений судна относительно невозмущенной волны.

На стационарном нерегулярном волнении амплитуды скорости перемещений относительно невозмущенной волны $\dot{\zeta}_0 = \dot{\zeta}$ распределены по центри-

рованному закону Рэлея с дисперсией $D_{\dot{\zeta}}$, тогда как все прочие входящие в формулу (2) величины неслучайны. В таком случае фактическое число Фруда по скорости потока Fr_S , которое отличается от случайной скорости перемещений относительно невозмущенной волны $\dot{\zeta}$, на неслучайный множитель C , будет также распределено по центрированному закону Рэлея с дисперсией $D_{FS} = C^2 D_{\dot{\zeta}}$.

Тогда среднее в статистическом смысле количество забрызгиваний в час $n_3^{(0)}$ (среднее количество в час событий, состоящих в том, что $Fr_S > Fr_S^*$) на реальном волнении в условиях стационарного волнового режима при отсутствии щита-брызгоотбойника определится в виде

$$n_3^{(0)} = 573 \tilde{\omega}_{\dot{\zeta}} \exp\left(-\frac{u_1^2}{2}\right); \quad (4)$$

$$u_1 = \frac{Fr_S^*}{\sqrt{D_{FS}}}; \quad \tilde{\omega}_{\dot{\zeta}} = \sqrt{\frac{D_{\dot{\zeta}}}{D_{\dot{\zeta}}}}$$

$$D_{FS} = \frac{a_3^2 \kappa_B D_{\dot{\zeta}}}{g(H_f - \kappa_3 \Delta)},$$

где $\tilde{\omega}_{\dot{\zeta}}$ — средняя частота относительных перемещений в расчетном сечении, 1/с; $D_{\dot{\zeta}}$ — дисперсия перемещений относительно невозмущенной волны в расчетном сечении.

Кроме того, на реальном волнении вместо формулы (3) следует применять зависимость вида [7, 15]

$$\kappa_w \approx \exp\left(-\frac{6\sqrt{D_{\dot{\zeta}}}}{v}\right) [1,0 + 0,00044(80 - \gamma)^2],$$

γ — в градусах.

Как следует из формулы (4), для снижения частоты $n_3^{(0)}$ следует так изменить форму корпуса проектируемого судна, чтобы увеличилось пороговое число Фруда Fr_S^* и (или) снизилась дисперсия D_{FS} . Теоретически это можно сделать, уменьшая коэффициент полноты

погруженной площади шпангоута β и увеличивая угол килеватости γ . На практике, однако, существенно увеличить таким способом параметр Fr_S^* не удается. Проблематичным является также и заметное снижение дисперсии D_{FS} . Это связано с необходимостью соблюдения прочих предъявляемых к судну требований. Поэтому и возникает вопрос о применении брызгоотбойника.

Перейдем к рассмотрению функционирования брызгоотбойника. Брызговая струя не обогнет брызгоотбойник, если работа сил сопротивления на нем будет не меньше, чем кинетическая энергия этой струи. В этом случае условием отсутствия брызг выше брызгоотбойника (если только брызгоотбойник не касается воды) будет выполнение для расчетного сечения энергетического соотношения вида

$$A \geq K - K^* \quad (5)$$

$$A = C_A \frac{\rho a_3^2 \zeta^2 b_b^2}{2}; \quad K = C_q \frac{\tilde{\lambda}_z a_3^2 \zeta^2}{2};$$

$$K^* = \frac{C_q}{2\kappa_B} g \tilde{\lambda}_z (Fr_S^*)^2 (H_f - \kappa_3 \Delta);$$

$$\tilde{\lambda}_z = a_z b_z \frac{\rho \pi \cdot b_0^2}{8};$$

$$a_z = 1,0 + (\lambda - \alpha)(\lambda - \alpha + 1);$$

$$b_z = 1 - \frac{0,9}{p} + \frac{0,5}{p^2}; \quad p = \frac{\tilde{\omega}_z^2 b_0}{2g};$$

$$\alpha = 1,5(1 + \lambda) - 0,5 \sqrt{1,0 + 10\lambda + \lambda^2 - \frac{32\beta\lambda}{\pi}};$$

$$\lambda = \frac{2T}{b_0}; \quad C_A = C_A^0 (1 + \kappa_{B1} + \kappa_{B2});$$

$$\kappa_{B1} \approx 0,2 + \frac{b_0}{10T}; \quad \kappa_{B2} \approx -3,0 \sqrt{\frac{b_b}{l_b}}$$

где A — работа сил сопротивления на брызгоотбойнике; K — кинетическая энергия брызговых струй; K^* — пороговая кинетическая энергия брызговых струй (условие (1) может быть переписано в форме $K > K^*$); $C_A, C_A^{(0)}$ — коэффициенты сопротивления брызгоотбойника с учетом и без учета влияния корпуса; b_b — потребная ширина брызгоотбойника в его середине; C_q — коэффициент, учитывающий долю энергии воды, уносимой брызговой струей; $\tilde{\lambda}_z$ — присоединенная масса при вертикальных колебаниях в расчетном сечении; b_0 — ширина по КВЛ в расчетном сечении; a_z — коэффициент присоединенной массы при вертикальных колебаниях шпангоутного контура в безграничной жидкости [8]; b_z — поправка к коэффициенту присоединенной массы на наличие свободной поверхности, [16]; l_b — длина брызгоотбойника; ρ — плотность воды.

Величины A, K и K^* отнесены к единице длины судна.

Формула для работы сил сопротивления A следует из теории струй Кирхгофа [10]. Для вычисления коэффициентов C_A и $C_A^{(0)}$ применены те же данные справочника [15], что и для определения дополнительного сопротивления при бортовой качке судна из-за наличия скуловых килей. Коэффициент $C_A^{(0)}$ найдется по известному графику хорватского специалиста М. Ридьяновича [15, с. 166, рис. 3.27] в функции коэффици-

ентов $\kappa_l = \frac{l_b}{2b_b}$ и $\kappa_z = \frac{1,59\sqrt{D_\zeta}}{b_b}$. В обобщенных значениях справочника [15] $\kappa_l = \frac{l}{2b}$

$$\text{и } \kappa_z = \frac{r_K \theta}{b}.$$

Чтобы найти коэффициент C_q , рассмотрим обобщенное выражение для погонной ударной нагрузки при днищевом слеминге $\tilde{F}_C(t)$ [1]:

³Оригинальную работу М. Ридьяновича см. Schiffstechnik. — 1962. — Bd. 9. — Н. 45.

$$\begin{aligned} \tilde{F}_C(t) &= -\tilde{\lambda}_{zt}(t)\ddot{\zeta}_t - K_q \dot{\zeta}_t \frac{d\tilde{\lambda}_{zt}(t)}{dt} \approx \\ &\approx -K_q \dot{\zeta}_t \frac{d\tilde{\lambda}_{zt}(t)}{dt}; \lambda_{zt}(t) = a_z b_z \frac{\rho \pi \cdot y^2(t)}{2}, \end{aligned}$$

где t — время; $y(t)$ — переменная ордината ватерлинии шпангоута при входе его в воду, которая соответствует неискаженному из-за входа в воду шпангоута волновому профилю; $\tilde{\lambda}_{zt}$ — переменная присоединенная масса контура шпангоута при входе шпангоута в воду; $\dot{\zeta}_t, \ddot{\zeta}_t$ — вертикальные скорости и ускорения в момент удара.

Пусть встречное движение жидкости отсутствует. Тогда, определяя коэффициент K_q на основании закона сохранения количества движения, имеем $K_q = 1$. Находя тот же коэффициент на основании закона сохранения энергии, получим $K_q = 0,5$. Устранить это несоответствие можно так [1]. Предположим, что имеющееся в действительности встречное движение жидкости приводит, с одной стороны, к снижению общего количества движения жидкости пропорционально коэффициенту $K_q = K_{q1}$, $0,5 \leq K_{q1} \leq 1$ [1, 3, 4]:

для круглоскулых судов;

$$K_{q1} \approx 1 - 0,5 \left(\frac{2\gamma}{\pi} \right)^{3/2};$$

для остроскулых судов

$$K_{q1} = 1 - \frac{1 - \cos \gamma}{2 - \cos \gamma}.$$

С другой стороны, предполагается, что наличие встречного движения увеличивает общую кинетическую энергию этого движения пропорционально коэффициенту K_{q2} , $1 \leq K_{q2} \leq 2$. При этом справедливо простое соотношение вида [1]

$$K_{q2} = 2 K_{q1}.$$

Поскольку забрызгивание связано со встречным движением жидкости, а на встречное движение приходится $K_{q2} - 1 = 2K_{q1} - 1$ от общей кинетической энергии, то находим

$$C_q = K_{q2} - 1 = 2K_{q1} - 1$$

и окончательно имеем:

для круглоскулых судов

$$C_q \approx 1 - \left(\frac{2\gamma}{\pi} \right)^{3/2};$$

для остроскулых судов

$$C_q = 1 - \frac{2(1 - \cos \gamma)}{2 - \cos \gamma}.$$

Видно, что в обоих случаях при увеличении угла килеватости γ от 0 до $\frac{\pi}{2}$ коэффициент C_q снижается от 1 до 0. Дополнительно по расчетным данным [5] имеем $\lim_{\gamma \rightarrow \frac{\pi}{2}} F_{\Sigma}^*(\gamma) = +\infty$, что в соответствии с принятой трактовкой (формула (1)) означает отсутствие забрызгивания.

Теперь уже можно рассмотреть определение фактического количества забрызгиваний судна с брызгоотбойником на стационарном волновом режиме n'_3 , $1/\text{с}$, для случая, когда брызгоотбойник в процессе продольной качки не касается воды. Для этого достаточно выразить пороговое амплитудное значение скорости относительных перемещений в расчетном сечении ζ из уравнения энергетического баланса (5) и подставить его в интегральный закон распределения амплитуд скоростей (закон Рэлея). Тогда

$$n'_3 = n'_3(b_b) = 573 \tilde{\omega}_\zeta \exp \left(- \frac{\bar{K}_3}{2a_3^2 D_\zeta K_E(b_b)} \right) =$$

$$= 573 \tilde{\omega}_\zeta \exp \left[- \frac{u_1^2}{2\kappa_E(b_b)} \right];$$

$$K_E(b_b) = C_q \tilde{\lambda}_z - C_A \rho b_b^2 \geq 0;$$

$$\kappa_E(b_b) = \frac{K_E(b_b)}{C_q \tilde{\lambda}_z} = 1 - \frac{C_A \rho b_b^2}{C_q \tilde{\lambda}_z} \geq 0.$$

Здесь, как и ранее, частота $\tilde{\omega}_\zeta$ измеряется в $1/\text{с}$. При отсутствии брызгоотбойника имеем $b_b = 0$; $\kappa_E = 1$; $n'_3 = n_3^{(0)}$. Случай $\kappa_E = 0$ отвечает полной остановке

брызгоотбойником всех брызг (но при условии, что брызгоотбойник в процессе продольной качки не касается воды). Таким образом, наличие брызгоотбойника при указанном условии как бы изменяет пороговое число Фруда по скорости потока Fr_S^* в $\frac{1}{\sqrt{\kappa_E(b_B)}}$ раз.

Однако на практике брызгоотбойник при достаточно интенсивной продольной качке может сам касаться воды и продуцировать брызги. При этом приходится считать, что если вход в воду брызгоотбойника имел место, то с единичной вероятностью это приведет к появлению брызговой струи. Эти брызги остановить уже нечем. Условие входа брызгоотбойника в воду есть $\zeta \geq H_f - \kappa_3 \Delta$, где ζ — случайные амплитуды относительных перемещений в расчетном сечении. Поэтому частота забрызгивания, связанного с входом брызгоотбойника в воду, n_3'' определится как

$$n_3'' = 573 \tilde{\omega}_\zeta \exp\left(-\frac{u_2^2}{2}\right), n_3'' \text{ — в } 1/\text{ч};$$

$$\tilde{\omega}_\zeta \text{ — в } 1/\text{с}; u_2 = \frac{H_f - \kappa_3 \Delta}{\sqrt{D_\zeta}}.$$

Тогда при наличии брызгоотбойника фактическое количество забрызгиваний в течение одного часа n_3 с учетом возможных касаний брызгоотбойником воды будет

$$n_3 = n_3' + n_3'' - \Delta n_3 = N_{\text{ц}}(\kappa_{n_1} + \kappa_{n_2} - \kappa_{n_1} \kappa_{n_2}); \quad (6)$$

$$N_{\text{ц}} = \frac{3600}{2\pi} \tilde{\omega}_\zeta \approx 573 \tilde{\omega}_\zeta;$$

$$\kappa_{n_1} = \exp\left[-\frac{u_1^2}{2\kappa_E(b_B)}\right]; \kappa_{n_2} = \exp\left[-\frac{u_2^2}{2}\right].$$

Поясним структуру соотношения (6). В течение одного часа будет иметь место $N_{\text{ц}}$ циклов относительных перемещений. При этом будет $N_{\text{ц}} \exp\left(-\frac{u_1^2}{2}\right) = n_3^{(0)}$

случаев, когда силы тяжести не смогли воспрепятствовать появлению встречного движения жидкости (выполнялось условие $Fr_S > Fr_S^*$) и появится брызговая струя. Для одной части таких ситуаций эта струя разрушится на брызгоотбойнике (это учтено параметром κ_E), а для другой части тех же ситуаций она разрушится выше верхней палубы судна и будет иметь место забрызгивание. Количество таких ситуаций есть $n_3' = \kappa_{n_1} N_{\text{ц}}$.

Кроме того, из-за наличия брызгоотбойника дополнительно будет $n_3'' = \kappa_{n_2} N_{\text{ц}}$ случаев, когда брызговая струя появится из-за входа в воду брызгоотбойника, и в этом случае также будет иметь место забрызгивание. В какой-то части циклов будут иметь место оба явления. Поэтому если определить общее число забрызгиваний как $n_3' + n_3''$, то получится двойной учет ситуации, когда в одном цикле имеют место оба указанных явления. Тогда из суммы $n_3' + n_3''$ следует вычесть количество ситуаций Δn_3 , когда имели место оба явления. Первое явление связано с превышением заданного уровня скоростями относительных перемещений, а второе — с относительными перемещениями. На нерегулярном волнении относительные перемещения и скорости относительных перемещений представляют собой нормальные случайные процессы, причем ординаты одного из процессов определяются путем дифференцирования по времени ординат другого процесса. Поэтому указанные процессы не коррелированы между собой и можно записать, что $\Delta n_3 = \kappa_{n_1} \kappa_{n_2} N_{\text{ц}}$.

При отсутствии брызгоотбойника общее количество забрызгиваний было равно $n_3^{(0)}$. Тогда установка брызгоотбойника приведет к снижению частоты забрызгивания и оказывается в этом плане целесообразной при условии

$$n_3^{(0)} > n_3' + n_3'' - \Delta n_3.$$

Соответственно коэффициент эффективности брызгоотбойника по ча-

стоте $K_{Б1}$, определяемый как отношение частот забрызгивания с брызгоотбойником и без брызгоотбойника, найдется как

$$K_{Б1} = K_{Б1}(b_B) = \frac{n_3}{n_3^{(0)}} = \frac{n_3'(b_B) + n_3'' - \Delta n_3}{n_3^{(0)}}. \quad (7)$$

Потребная ширина щита-брызгоотбойника b_B при заданной максимально допустимой частоте забрызгиваний $[n_3]$ определится как

$$b_B : K_{Б1}(b_B)n_3^{(0)} = [n_3]. \quad (8)$$

Очевидно, что применение брызгоотбойника целесообразно только тогда, когда $K_{Б1} < 1$. А при $n_3^{(0)} < n_3' + n_3'' - \Delta n_3$, когда $K_{Б1} > 1$, применение брызгоотбойника становится нецелесообразным, поскольку он добавляет больше случаев забрызгивания, чем предупреждает. Это и объясняет наличие противоположных мнений в упоминавшейся выше дискуссии по работе [20] в части практической эффективности щитов-брызгоотбойников.

Наряду с частотной трактовкой здесь возможна и энергетическая трактовка. Добавление брызгоотбойника, с одной стороны, позволит снизить кинетическую энергию брызговых струй на величину средней в статистическом смысле работы струй на брызгоотбойнике \bar{A} , здесь $\bar{A} = \kappa_{n1} C_A \rho a_3^2 b_B^2 D_\xi$. С другой стороны, добавляющиеся из-за возможных контактов брызгоотбойника с водой брызговые струи характеризуются средней кинетической энергией \bar{K} и с учетом данных [3] здесь будет

$$\Delta \bar{K} = \kappa_{n2} \pi r \cdot a_3^2 b_B^2 D_\xi.$$

Тогда установка брызгоотбойника позволит снизить кинетическую энергию брызговых струй, воздействию которых подвергается судно, при условии

$$C_A \kappa_{n1} > \pi \kappa_{n2}. \quad (9)$$

Среднее в статистическом смысле снижение кинетической энергии брызговых струй, которого можно добиться благодаря установке брызгоотбойника, — величина $\delta \bar{K}$ определится для стационарного волнового режима как

$$\delta \bar{K} = (C_A \kappa_{n1} - \pi \kappa_{n2}) \rho a_3^2 b_B^2 D_\xi$$

Ситуация, когда $\delta \bar{K} < 0$, означает, что с точки зрения снижения средней кинетической энергии брызговых струй установка брызгоотбойника не целесообразна. А коэффициент эффективности брызгоотбойника по средней кинетической энергии $K'_{Б2}$ определится для стационарного волнового режима как

$$K'_{Б2} = K'_{Б2}(b_B) = \frac{\delta \bar{K}}{\bar{K} - K^*} = (C_A \kappa_{n1} - \pi \kappa_{n2}) \frac{\rho b_B^2}{C_q \tilde{\lambda}_z} \times \frac{1}{1 - \frac{g(H_f - \kappa_3 \Delta)}{D_\xi} \cdot \frac{(Fr_S^*)^2}{2\kappa_B a_3^2}}; \quad (10)$$

$$\bar{K} = C_q \tilde{\lambda}_z a_3^2 D_\xi.$$

Аналогичный коэффициент по кинетической энергии с обеспеченностью P — величина $K''_{Б2}$ для стационарного волнового режима будет

$$K''_{Б2}(b_B, P) = 1 - \frac{k_p(P) \delta \bar{K}}{k_p(P) \bar{K} - K^*} = k_p(P) (C_A \kappa_{n1} - \pi \kappa_{n2}) \frac{\rho b_B^2}{C_q \tilde{\lambda}_z} \times \frac{1}{k_p(P) - \frac{g(H_f - \kappa_3 \Delta)}{D_\xi} \cdot \frac{(Fr_S^*)^2}{2\kappa_B a_3^2}}; \quad (11)$$

$$k_p(P) : \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_{k_p^*(P)}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx = 1 - 2\bar{\Phi}[k_p^*(P)] = P;$$

$$\bar{\Phi}(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

Здесь учтено, что кинетическая энергия жидкости, пропорциональная квадрату нормально распределенных ординат скоростей относительных перемещений, распределена по закону Пирсона с одной степенью свободы. А условие $k_p : f(k_p) = P$ читается: «коэффициент k_p определяется из условия, что функция $f(k_p)$ становится равной P ».

Ясно, что в энергетическом плане применение брызгоотбойника целесообразно при $K'_{б2} > 0$ (или) при $K''_{б2} > 0$ и, соответственно, не целесообразно при $K'_{б2} < 0$ (или) при $K''_{б2} < 0$.

Тогда, если выполнено соотношение (9) и у нас $\delta\bar{K} > 0$, а также известны нормативные значения энергетических коэффициентов эффективности брызгоотбойника $[K'_б]$ и $[K''_б(P)]$, то из соотношений (10), (11) нетрудно выразить потребную ширину щита-брызгоотбойника $b_б$.

Как показывают выполненные расчеты, проверка целесообразности установки брызгоотбойника по критериям $K_{б1}$, $K'_{б2}$ и $K''_{б2}$, равно как и определение его потребной ширины по тем же критериям, может приводить к различным результатам. Поэтому для принятия обоснованного решения об установке брызгоотбойника либо об отказе от его установки необходимо определиться с критерием снижения забрызгивания (по частотам, по средним кинетическим энергиям брызговых струй, по кинетическим энергиям брызговых струй заданной обеспеченности).

Кроме того, по данным выполненных расчетов, наибольшее влияние на потребные размеры щита-брызгоотбойника оказывает угол килеватости шпангоута в характерном сечении на уровне КВЛ γ , несколько меньшее влияние — коэффициент полноты площади характерного шпангоута β . Как отмечалось выше, обе эти величины определяют пороговое число Фруда по скорости потока Fr_5^* .

Влияние интенсивности волнения, характеризуемое высотой волны 3%-й обеспеченности h_3 , оказывается наиболее существенным при значениях параметра $10h_3/L$, где L — длина судна, в диапазоне $0,5 \dots 1,0$. При $10h_3/L > 1$ влияние интенсивности волнения на потребные размеры щита-брызгоотбойника становится малосущественным.

ВЫВОДЫ

1. В результате выполненного исследования разработан метод аналитического определения потребных размеров щита-брызгоотбойника из условия снижения как частоты брызгообразования, так и массы попадающей на палубу с брызговыми струями воды. Кроме того, сформулированы условия, при которых применение брызгоотбойника не является целесообразным.

2. Теоретической основой выполненного исследования послужили методы динамики жидкости со свободными границами. Наряду с этим использовались методы теории качки судна на нерегулярном волнении, а также выполнялось обобщение имеющегося эмпирического материала.

3. В качестве условия интенсивного брызгообразования может быть использовано соотношение (1) в вероятностной трактовке.

4. В основе описания процесса функционирования щита-брызгоотбойника может быть энергетическое соотношение. При определении составляющих этого соотношения можно исходить из струйной теории Кирхгофа, а также из условия равенства результатов расчетов на основе применения закона количества движения и закона сохранения энергии.

5. В некоторых случаях применение брызгоотбойника оказывается нецелесообразным, так как при контакте с водой он может сам продуцировать

брызги. Критерий целесообразности применения брызгоотбойника может быть либо частотным, или энергетическим. Потребные размеры щита-брызгоотбойника из условия снижения частоты забрызгивания могут быть найдены по соотношению (8), а из энерге-

тических соображений — на основе соотношений (10), (11).

6. Потребные размеры щита-брызгоотбойника определяются в основном пороговым числом Фруда по скорости потока Fr_{ζ}^* . Влияние интенсивности волнения оказывается менее существенным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бойцов, Г. В.** Прочность и конструкция корпуса судов новых типов [Текст] / Г. В. Бойцов, О. М. Палий. — Л. : Судостроение, 1979. — 360 с.
- [2] **Липис, В. Б.** Безопасные режимы штормового плавания судов [Текст] / В. Б. Липис, Ю. В. Ремез. — М. : Транспорт, 1982. — 120 с.
- [3] **Логвинович, Г. В.** Гидродинамика течений со свободными границами [Текст] / Г. В. Логвинович. — К. : Наукова думка, 1969. — 210 с.
- [4] **Осипов, О. А.** Влияние формы поперечных сечений судна на динамические нагрузки, вызывающие вибрацию корпуса [Текст] / О. А. Осипов // Труды ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1971. — Вып. 134. — С. 32–44.
- [5] **Осипов, О. А.** Приближенное решение задачи о погружении контура в весомую жидкость [Текст] / О. А. Осипов // Труды ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1972. — Вып. 140. — С. 57–72.
- [6] **Платонов, В. Г.** Экспериментальное исследование некоторых вопросов заливаемости судов на встречном волнении [Текст] / В. Г. Платонов, Ю. М. Фишкис // Сб. НТО им. акад. А. Н. Крылова. — Л. : Судостроение, 1973. — Вып. 200. — С. 118–137.
- [7] **Платонов, В. Г.** Сравнительная оценка слеминга и заливания судов на встречном волнении [Текст] / В. Г. Платонов // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. — Л. : ЦНИИ «Румб», 1989. — Вып. 13. — С. 55–63.
- [8] **Постнов, В. А.** Вибрация корабля [Текст] / В. А. Постнов, В. С. Калинин, Д. М. Ростовцев. — Л. : Судостроение, 1983. — 248 с.
- [9] **Сахновский, Э. Б.** Проектная оценка эффективности оборудования скоростного катамарана элементами гидродинамической разгрузки корпуса [Текст] / Э. Б. Сахновский // Морской вестник. 2003. — № 4 (8). — С. 52–58.
- [10] **Седов, Л. И.** Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики [Текст] / Л. И. Седов. — М. ; Л. : Гостехтеориздат, 1950. — 444 с.
- [11] **Соболев, Г. В.** Управляемость корабля и автоматизация судовождения [Текст] / Г. В. Соболев. — Л. : Судостроение, 1976. — 480 с.
- [12] **Соломенцев, О. И.** Определение эффективного вертикального клиренса для катамарана [Текст] / О. И. Соломенцев // Автоматизированное проектирование и конструкции судов : сб. науч. трудов НКИ. — Николаев : НКИ, 1986. — С. 37–48.
- [13] **Соломенцев, О. И.** Экспериментальная проверка условий брызгообразования при продольной качке катамарана [Текст] / О. И. Соломенцев // Гидродинамика корабля : сб. науч. трудов НКИ. — Николаев : НКИ, 1992. — С. 97–103.

- [14] **Соломенцев, О. И.** Расчет динамического подъема воды при продольной качке одно- и двухкорпусных судов [Текст] / О. И. Соломенцев // 36. наук. праць УДМТУ. — Миколаїв : УДМТУ, 1998. — № 12 (360). — С. 17–28.
- [15] **Холодили́н, А. Н.** Мореходность и стабилизация судов на волнении [Текст] / А. Н. Холодили́н, А. Н. Шмырев. — Л. : Судостроение, 1976. — 328 с.
- [16] **Чечик, Н. М.** Определение резонансных изгибающих моментов [Текст] / Н. М. Чечик // Труды ЦНИИ морского флота. — Л. : Транспорт, 1976. — Вып. 210. — С. 51–61.
- [17] **Шмидт, М. В.** О сопоставительной оценке интенсивности забрызгивания среднетоннажных промысловых судов на встречном волнении [Текст] / М. В. Шмидт // Вопросы судостроения. Сер. Технология судостроения. — Л. : ЦНИИ «Румб», 1975. — № 6. — С. 58–70.
- [18] **Шмырев, А. Н.** Способы и критерии приближенной оценки мореходности кораблей [Текст] / А. Н. Шмырев // Морской сборник. — 1966. — № 4. — С. 67–72.
- [19] **Brown, D. K.** History as a Design Tool [Text] / D. K. Brown // Naval Architect. — 1993. — № 5. — P. 41–60.
- [20] **Lloyd, A. R. J. M.** The Effect of Bow Shape on Deck Wetness [Text] / A. R. J. M. Lloyd, J. O. Salsich, J. J. Zselesky // Naval Architect. — 1986. — № 1. — P. 9–25.
- [21] **Newton, R.** Wetness, Related to Freeboard and Flare [Text] / R. Newton // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. — 1960. — Vol. 102, nr 1. — P. 51–64.