УДК 629.5.017
С 60

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЫНУЖДЕННЫХ ПОТЕРЬ СКОРОСТИ СУДНА НА ВСТРЕЧНОМ ВОЛНЕНИИ, СВЯЗАННЫЕ С НОРМИРОВАНИЕМ СЛЕМИНГА И ЗАЛИВАЕМОСТИ

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

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрен расчет вынужденных потерь скорости судна в условиях встречного волнения с учетом возможной нестационарности процесса относительных перемещений от продольной качки, когда частота этих перемещений оказывается функцией времени. Учтена ситуация, когда указанная частота представляет собой случайную величину.

Ключевые слова: вынужденное снижение скорости, слеминг, заливаемость, случайный процесс.

Анотація. Розглянуто розрахунок вимушених втрат швидкості судна в умовах зустрічного хвилювання з урахуванням можливої нестаціонарності процесу відносних переміщень від поздовжньої хитавиці, коли частота цих переміщень є функцією часу. Враховано ситуацію, коли зазначена частота являє собою випадкову величину.

Ключові слова: вимушене зниження швидкості, слемінг, залиття, випадковий процес.

Abstract. Ship forced speed loss on head sea is examined considering probable process non-stationarity due to connected with heave and pitch relative motions, when motions frequency is a time function. The situation is considered when the indicated frequency is a random variable.

Keywords: ship speed loss, slamming, green water spraying, probable process.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

При анализе модели функционирования судна в расчетные зависимости вместо скорости хода на тихой воде v_0 должна подставляться фактическая скорость хода на волнении

$$v = \eta_v(\overline{X}, h_3)v_0,\ \eta_v(\overline{X}, h_3) < 1, \qquad (1)$$

где $\eta_v = \eta_v(\overline{X}, h_3)$ — коэффициент, учитывающий потери скорости в условиях ветра и волнения; $\overline{X}$ — вектор главных элементов проектируемого судна; h_3 — высота волны 3%-й обеспеченности.

В данной работе ограничимся рассмотрением только встречного волнения. В 1986 г. была получена зависимость для коэффициента ηv для встречных курсовых углов судна по отношению к волнению в следующей общей форме [14]:

$$\eta_v = \eta_{v1}\eta_{v2} - \Delta\,\eta_v, \qquad (2)$$

где η_{v1} — коэффициент, учитывающий естественные потери скорости, связанные, в первую очередь, с появлением дополнительного сопротивления в условиях ветра и волнения; η_{v2} — коэффициент, учитывающий вынужденное снижение скорости капитаном судна во избежание чрезмерно интенсивных амплитуд, и (или) скоростей, и (или) ускорений от продольной качки, слеминга и заливаемости; $\Delta\eta_v$ — поправка, учитывающая разгон винта при качке.

Если известны методики расчета сопротивления воды движению судна на тихой воде и дополнительного сопротивления на волнении, то расчет величины η_{v1} не представляет затруднений. Соответствующие зависимости содержатся в работе автора [14], расчет поправки $\Delta\eta_v$ описан в [15].

Осталось найти способ расчетной оценки величины η_{v2}. Эта задача весьма актуальна для случая движения небольшого корабля на интенсивном волнении, когда высота волны 3%-й обеспеченности h_3 заметно превышает величину $[h_3]$, при превышении которой начинается вынужденное снижение скорости.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ И ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ

Перед определением коэффициента η_{v2} необходимо найти нормативы по тем указанным выше характеристикам продольной качки, при превышении которых имеет место вынужденное снижение скорости.

Такие нормативы приведены для транспортных судов в работе [9], для промысловых судов — в [1, 2] и для надводных кораблей — в обзоре [6]. Предложенные различными авторами нормативы по соответствующим амплитудам, скоростям и ускорениям от продольной качки достаточно близки между собой. Что же касается слеминга и заливания, то здесь нормативы разных авторов существенно противоречат друг другу. Поэтому необходимо выяснить причины этого.

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕРЕШЕННЫХ ЧАСТЕЙ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

На современном этапе отсутствуют как общие зависимости для определения поправки η_{v2}, так и необходимые при расчете этой же поправки зависимости для расчета вероятностей отказов по слемингу и заливаемости. В общем случае расчет коэффициентов η_{v1} и $\Delta\eta_v$ связан с формальным применением известных из теории корабля схем и методов, что и было выполнено в 1986–1988 гг. в [14, 15]. Расчет коэффициента η_{v2} связан с действиями капитана судна, и здесь получение аналитических зависимостей оказывается намного более проблематичным.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — определение поправки η_{v2} в формулах (1), (2) при вычислении потери скорости на волнении с учетом тех фактических обстоятельств, при которых производится вынужденное ее снижение.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Будем далее рассматривать различные виды слеминга и заливания. При этом для слеминга $i=1$ отвечает днищевому слемингу при ударе бульбом, $i = 2$ — днищевому слемингу при ударе корпусом, $i = 3$ — бортовому слемингу; $I_С = 3$. Для заливания $i = 1$ отвечает зарыванию, $i = 2$ — забрызгиванию; $I_З = 2$. Под зарыванием понимается обусловленное продольной качкой периодическое заливание судна сплошными неразрушенными потоками воды. Соответственно забрызгивание — это обусловленное продольной качкой периодическое заливание судна разрушившимися (утратившими сплошность) потоками воды (брызговыми струями).

Пусть $\overline{П}$, $\{\overline{П}\}= \pi_i$, $\forall i \in I_{\overline{П}}$ — вектор показателей, связанных с вынужденным снижением скорости на волнении, а $[\overline{\Pi}]$, $\{[\overline{\Pi}]\} = [\pi_i]$, $\forall i \in I_{\overline{\Pi}}$ – вектор эксплуатационных нормативов по этим показателям ($\forall$ есть квантор общности, и запись «$\forall i$» читается «для всех i»). Здесь $I_{\overline{\Pi}} = I_C + I_З + I_К$, где $I_К$ есть количество показателей продольной качки, которые учитываются при вынужденном снижении скорости судна.

Показатели $\overline{\Pi}$ отвечают переменной интенсивности реального нерегулярного волнения и переменной скорости. При осреднении по всему времени действия стационарного волнового режима эти показатели получаются или в виде случайных величин

$$\pi_i = \pi_i(v_1, h_3) = \sqrt{-2\ln[\mathrm{P}_{\pi i}]D_{\pi i}(v_1, h_3)}, \ \forall i \in I_{\overline{\Pi}}$$

или в виде неслучайных величин

$$\pi_i = \pi_i(v_1, h_3) = \lambda_i(v_1, h_3), \ \forall i \in I_С + I_З,$$
$$v_1 = v_1(h_3) = \eta_{v1}(h_3)v_0.$$

Здесь D_{ni} есть неслучайная дисперсия амплитуд, скоростей или ускорений вертикальной или килевой качки, $[P_{ni}]$ — нормативная обеспеченность, а λ_i — неслучайная средняя частота того или иного вида слеминга (заливаемости). Для стационарного процесса величина λ_i найдется по формуле вида

$$\lambda_i(v_1, h_3) = \frac{\mathrm{P}_i(v_1, h_3)}{\tilde{\tau}_\zeta(v_1, h_3)} = \frac{1}{\tilde{\tau}_\zeta(v_1, h_3)}\exp\left[-\frac{\chi_i^2(v_1, h_3)}{2}\right]; \qquad (3)$$

$$\tilde{\tau}_\zeta(v_1, h_3) = 2\pi\sqrt{\frac{D_\zeta(v_1, h_3)}{D_{\dot{\zeta}}(v_1, h_3)}},$$

где χ_i — коэффициент безопасности для соответствующего вида слеминга или заливания; $\mathrm{P}_i = \exp\left(-\frac{\chi_i^2}{2}\right)$ — вероятность слеминга (заливания); $\tilde{\tau}_\zeta$ — средний период относительных перемещений от продольной качки; D_ζ, $D_{\dot{\zeta}}$ — дисперсии относительных перемещений и скоростей относительных перемещений от продольной качки.

Коэффициенты безопасности для слеминга $\chi_i = \chi_{Ci}$, $\forall i \in I_С$ и для заливания $\chi_І = \chi_{Зi}$, $\forall i \in I_З$ определятся для расчетного поперечного сечения (обычно это первый или второй теоретический шпангоут) в виде

$$\chi_{C1} = \sqrt{\frac{У_{C1}^2}{D_\zeta} + \frac{w_{C1}^2}{D_{\dot{\zeta}}}}; \ \chi_{C2} = \sqrt{\frac{У_{C2}^2}{D_\zeta} + \frac{w_{C2}^2}{D_{\dot{\zeta}}}};$$

$$\chi_{C3} = \frac{У_{C3}}{\sqrt{D_\zeta}}; \ \chi_{З1} = \frac{У_{З1}}{\sqrt{D_\zeta}}; \ \chi_{З2} = \frac{w_{ПЗ}}{\sqrt{D_{\dot{\zeta}}}}.$$

В этой формуле обозначено: $У_{Ci}$, $\forall i \in I_С$ — уровни относительных перемещений, при превышении которых возможен слеминг i-го вида [2, 8, 9, 18]; $У_{З1}$ — уровень относительных перемещений, при превышении которого возможно зарывание [1, 8, 9, 18]); w_{Ci}, $\forall i \in I_С$ — расчетная скорость при слеминге i-го вида [2, 8, 9, 18]; $w_{ПЗ}$ — расчетная скорость, при превышении которой возможно забрызгивание [8, 9, 18].

В первом приближении $У_{C1} \approx У_{C2} = T$, $У_{З1} = H_f - \Delta$, где T — осадка; H_f — высота надводного борта и Δ — статический подъем воды, основную часть которого составляет корабельная волна. Для уровня $У_{C3}$ и скорости $w_{ПЗ}$ имеем более сложные зависимости вида:

$$У_{C3} = \frac{0,75H_f}{\sqrt{1 - \left(\frac{b_{02}}{b_{ВП2}}\right)^2 \frac{b_{05}}{B}}};$$

$$w_{ПЗ} = \frac{\mathrm{Fr}_S^*}{a_З}\sqrt{\frac{g(H_f - \Delta)}{\kappa_В}};$$

$$a_З = \frac{1 + \cos\gamma}{\mathrm{tg}\,\gamma}\kappa_В;$$

$$\kappa_В = 1 + 2(1 - \beta)\left(\frac{\pi}{2} - 1\right)\cos^{\frac{3}{2}}\gamma;$$

$$\mathrm{Fr}_S^*(\beta, \gamma) \approx (2,78\bar{\gamma}^3 - 1,846\bar{\gamma}^2 + 0,602\bar{\gamma} + 0,645) \times (2,68 - 2,39\beta), \ \bar{\gamma} = 0,01\gamma, \ \gamma \text{ — в градусах};$$

где b_{02}, $b_{ВП2}$ — ширина второго теоретического шпангоута по КВЛ и по верхней палубе; b_{05} — ширина пятого теоретического шпангоута по КВЛ; B — ширина судна; a_3 — переходный коэффициент от скорости относительных перемещений к скорости брызгового потока; $\kappa_В$ — коэффициент, характеризующий встречное движение жидкости при погружении в жидкость шпангоутного контура, в предположении, что жидкость является невесомой; β, γ — коэффициент полноты погруженной площади шпангоута и угол килеватости на уровне КВЛ; Fr_S^* — пороговое число Фруда по скорости потока. Величины a_3, $\kappa_В$, β, γ, Fr_S^* — отвечают расчетному сечению.

При определении пороговых скоростей при слеминге w_{Ci} $\forall i = 1, 2$ возможны такие два подхода:

– эти скорости определяются как такие минимальные, при которых вход в воду вышедшей перед этим из воды вследствие продольной качки носовой оконечности судна еще воспринимается как удар, в этом случае указанные скорости имеют смысл пороговых скоростей и $w_{Ci} = w_{\Pi i}$, $i = 1, 2$;

– эти скорости определяются как такие минимальные, при которых ударные давления p становятся равными нормативным ударным давлениям $[p]$, в этом случае указанные скорости имеют смысл опасных скоростей и $w_{Ci} = w_{pi}$, $i = 1, 2$.

При бортовом слеминге $w_{C3} = 0$. При днищевом слеминге имеем

$$w_{\Pi 1} = 0{,}4\sqrt{\frac{gL}{K_{p1}}};\; w_{\Pi 2} = 0{,}4\sqrt{\frac{gL}{K_{p2}}};$$

$$w_{p1} = \sqrt{\frac{2[p]}{\rho K_{p1}}};\; w_{p2} = \sqrt{\frac{2[p]}{\rho K_{p2}}},$$

где K_{p1} — коэффициент ударных давлений при слеминге бульба; K_{p2} — коэффициент ударных давлений при ударе корпусом в условиях днищевого слеминга; ρ, g — плотность воды и ускорение свободного падения.

При нормировании слеминга (заливаемости) может также приниматься $\pi_i = \chi_i$, для слеминга $\chi_i = \chi_{Ci}$, $\forall i \in I_C$, для заливания $\chi_i = \chi_{3i}$, $\forall i \in I_3$ и, соответственно, $[\pi_i] = [\chi_i]$, $\forall i \in I_C + I_3$, а также $\pi_i = \mathrm{P}_i$ и, соответственно, $[\pi_i] = [\mathrm{P}_i]$, $\forall i \in I_C + I_3$. Здесь $[\mathrm{P}_i] = \exp\left(-\frac{[\chi_i]^2}{2}\right)$.

Предположим, что зависимость $\pi_i = \pi_i(v_1, h_3)$ монотонно возрастает по обоим аргументам. Тогда если $\pi_i \le [\pi_i]$, то $\eta_{v2} = 1$ и вынужденного снижения скорости нет. Если же $\pi_i > [\pi_i]$, то такая ситуация недопустима, для ее преодоления скорость вынужденно снижается и $\eta_{v2} < 1$.

Пусть сначала корабль движется на тихой воде со скоростью v_0 (в этом случае имеем $\forall i$: $\pi_i = 0$), а затем на него начинает действовать волнение возрастающей интенсивности. С ростом высоты волны 3%-й обеспеченности h_3 при медленно снижающейся по закону $\eta_{v1}(h_3)v_0$ скорости $v_1(h_3)$ величина $\pi_i = \pi_i[v_1(h_3), h_3]$ также увеличивается и при некоторой интенсивности волнения $h_3 = [h_{3i}]$ достигает нормативной величины $[\pi_i] \in [\overline{\Pi}]$. Тогда при $0 \le h_3 \le [h_{3i}]$ вынужденного снижения скорости нет и в этом диапазоне интенсивностей волнения для i-го показателя, $i \in I_{\overline{\Pi}}$, имеем $\eta_{v2i} = 1$. При $h_3 = h_{30} > [h_{3i}]$ имеем $\pi_i[v_1(h_{30}), h_{30}] > [\pi_i]$. Равенству фактических π_i и нормативных $[\pi_i]$ значений i-го показателя отвечает такая скорость $v_{h0i} = v_{h0i}(h_{30}) < \eta_{v1}(h_{30})v_0$, при которой $\pi_i[\eta_{v1}(h_{30})v_{h0i}, h_{30}] = [\pi_i]$. Но тогда имеет место вынужденное снижение скорости и для i-го показателя $\eta_{v2i}(h_{30}, i) = \frac{v_{h0i}(h_{30})}{v_0} < 1$.

Выполнив ту же операцию для ряда значений $h_3 > [h_3]$, получим искомую зависимость вида $\eta_{v2}(h_3, i)$, которая отвечает i-му показателю. А для определения величины $\eta_{v2}(h_3)$, которая отвечает всем компонентам вектора $\overline{\Pi}$, достаточно взять нижнюю огибающую зависимостей $\eta_{v2i}(h_3, i)$, приняв

$$\eta_{v2}(h_3) = \min_{i \in I_{\Pi}} \eta_{v2i}(h_3, i).$$

Рассмотрим теперь, почему предложения разных авторов в части нормирования тех частот слеминга и заливания, при превышении которых имеет место вынужденное снижение скорости, существенно различаются. Дело здесь, по мнению автора, в том, что основная нормативная характеристика слеминга и заливания — средняя частота λ_i — в существующих нормативах относится к одному удару (заливанию, формула (3)). Но на практике капитан судна отдает приказ о вынужденном снижении скорости в таких случаях:

при слеминге — под впечатлением от нескольких сильных ударов подряд [19];

при зарывании, когда попавшая на палубу вода не успевает слиться за борт до нового зарывания [10];

при забрызгивании — под впечатлением от нескольких подряд мощных фонтанирующих всплесков над верхней палубой (палубой бака) [8].

Данные описания отказов нуждаются в численной конкретизации (что значит «несколько ударов (забрызгиваний) подряд» — два, три удара (забрызгивания) или больше и каким промежутком времени они должны быть отделены друг от друга). Эти вопросы должны стать предметом будущих исследований, а далее будем предполагать, что соответствующие конкретные нормативы известны. Тогда под π_i для всех $i \in I_C + I_3$ следует понимать новые средние частоты $\Lambda_i = \Lambda_i(v_1, h_3)$, определяемые по аналогии с формулой (3) как

$$\Lambda_i(v_1, h_3) = \frac{P_i(v_1, h_3)}{\tilde{\tau}_{\zeta}(v_1, h_3)}, \qquad (4)$$

где $P_i = P_i(v_1, h_3)$ — вероятности сформулированных только что отказов.

Соответствующий норматив $[\pi_i] = [\Lambda_i]$, $\forall i \in I_C + I_3$ в первом приближении можно принять в виде $\forall i \in I_C + I_3 : [\Lambda_i] = \dfrac{1}{T}$, где Т — длительность стационарного волнового режима. Это означает, что вынужденное снижение скорости будет иметь место, если один из сформулированных только что отказов будет иметь место хотя бы один раз в течение времени Т.

Рассмотрим определение вероятностей $P_i = P_i(v_1, h_3)$ при $i \in I_C + I_3$. Это придется выполнить раздельно для слеминга всех видов и забрызгивания, с одной стороны ($P_i = P'_i$, $\forall i \in I_C$, $i = 2 \in I_3$), и для зарывания, когда $P_i = P''_i$, — с другой.

Здесь и далее нижний индекс «*i*», определяющий вид слеминга (заливания), опускается. Однако вводится новый нижний индекс, связанный с исходными допущениями при поиске соответствующей вероятности. Теперь можно отметить, что физическому смыслу сформулированных ранее отказов по слемингу и по забрызгиванию отвечают такие три трактовки вероятности $P'_i = P'$.

1. Вероятность $P' = P'_1$ определяет случайное количество ударов (забрызгиваний) *N* в течение неслучайного времени τ. Здесь *N* есть дискретная величина. В этом случае вероятность снижения скорости $P'_1 = P'_1(N)$ есть вероятность случайного события, заключающегося в том, что за время $\tau = [\tau]$, где $[\tau]$ — нормативное время, будут иметь место в точности $N = [N]$ ударов (забрызгиваний), где $[N]$ — нормативное число ударов (забрызгиваний).

При определенных условиях, которые более подробно рассмотрим ниже, эта вероятность определяется законом Пуассона для стационарного процесса

$$P'_1(N) = \frac{(\lambda\tau)^N}{N!} \exp(-\lambda\tau). \qquad (5)$$

При невыполнении этих условий приходится применять задаваемое приведенным ниже соотношением нормальное распределение для определения указанной вероятности. Стационарность процесса в данном случае означает, что найденная по соотношению (3) для соответствующего вида слеминга или забрызгивания средняя частота λ не зависит от времени.

2. Вероятность $P' = P_2'$ определяет случайное время τ (непрерывная величина), в течение которого будут иметь место N ударов (забрызгиваний). В этом случае величина $P' = P_2'(\tau)$ есть вероятность случайного события, заключающегося в том, что $N = [N]$ ударов (забрызгиваний) будут иметь место за время не больше $\tau = [\tau]$ (или, что то же самое, вероятность события, когда за время $\tau = [\tau]$ будут иметь место не менее $N = [N]$ ударов (забрызгиваний)).

Пусть теперь $f_{\tau N}(\tau)$ есть плотность вероятности интервала времени, в течение которого будут иметь место N ударов (забрызгиваний). Тогда вероятность $P_2'(\tau)$ определится как ордината соответствующего интегрального распределения $F_{\tau N}(\tau)$, $\tau = [\tau]$:

$$P_2'(\tau) = F_{\tau N}(\tau) = \int_0^{\tau} f_{\tau N}(x)dx, \;\; 0 < \tau < +\infty.$$

Если справедлив закон Пуассона, то для плотности вероятности $f_{\tau N}(\tau)$ имеем [11]

$$f_{\tau N}(\tau) = \frac{\lambda^{N+1}\tau^N}{N!}\exp(-\lambda\tau), \tag{6}$$

$$f_{\tau N}(\tau) = 0, \; \tau < 0.$$

Поскольку справедливо интегральное соотношение вида[1]

$$\int_0^{\infty} x^N \exp(-\lambda x)dx = \frac{N!}{\lambda^{N+1}}, \;\; \lambda > 0, \;\; N = 1, 2, 3...,$$

то условие нормирования плотности вероятности непрерывной случайной величины x, когда $0 < x < +\infty$, выполняется (это условие имеет вид $\int_0^{\infty} f_{\tau N}(x)dx = 1$).

Тогда находим[2]:

$$P_2'(\tau) = F_{\tau N}(\tau) = -\frac{\lambda^{N+1}}{N!}\exp(-\lambda x)\left[\frac{x^N}{\lambda} - \sum_{n=1}^{N}(-1)^n \frac{N(N-1)(N-2)...(N-n+1)x^{N-n}}{(-\lambda)^{n+1}}\right]_0^{\tau} =$$

$$= -\frac{\lambda^{N+1}}{N!}\exp(-\lambda x)\left[\frac{x^N}{\lambda} + \sum_{n=1}^{N}\frac{N(N-1)(N-2)...(N-n+1)x^{N-n}}{\lambda^{n+1}}\right]_0^{\tau} =$$

$$= 1 - \frac{1}{N!}\exp(-\lambda\tau)\left[(\lambda\tau)^N + \sum_{n=1}^{N} N(N-1)(N-2)...(N-n+1)(\lambda\tau)^{N-n}\right].$$

Предположим теперь, что необходимо найти плотность вероятности интервала между двумя соседними ударами (забрызгиваниями) $f_T(\tau)$. Для этого достаточно подставить в (6) $N = [N] = 0$; учитывая, что $0! = 1$, приходим к общеизвестному для этого случая показательному распределению

$$f_T(\tau) = \lambda\exp(-\lambda\tau), \; \tau \geq 0; \tag{7}$$

$$f_T(\tau) = 0, \; \tau < 0.$$

Случай $N = 1$, когда

$f_{\tau 1}(\tau) = \lambda(\lambda\tau)\exp(-\lambda\tau), \; \tau \geq 0; f_{\tau 1}(\tau) = 0, \; \tau < 0;$

$$F_{\tau 1}(\tau) = \int_0^{\tau} f_{\tau 1}(x)dx = 1 - \exp(-\lambda\tau)(1 + \lambda\tau),$$

был рассмотрен при анализе заливания

[1]**Двайт, Г. Б.** Таблицы интегралов и другие математические формулы [Текст] : справочник / Г. Б. Двайт. — М. : Наука, 1977. — С. 200 (формула (860.07)).

[2]**Брычков, Ю. А.** Таблицы неопределенных интегралов [Текст] : справочник / Ю. А. Брычков, О. И. Маричев, А. П. Прудников. — М. : Наука, 1986. — С. 68 (формула (3.2.4)).

судов с борта в работе Н. Б. Севастьянова [13]. Рассматриваемая в указанной работе вероятность $P_{\tau 1}$ того, что за время τ будет не более одного удара (забрызгивания), определится как

$$P_{\tau 1} = 1 - F_{\tau 1} = \exp(-\lambda\tau)(1 + \lambda\tau).$$

Точно такое же соотношение содержится и в [13]. При использовании формулы (7) для задач слеминга было отмечено, что фактически здесь не $0 < \tau < +\infty$, а $\tilde{\tau}_\zeta < \tau < +\infty$. Действительно, два и более ударов (забрызгиваний) могут возникнуть только тогда, когда интервал между ними, как минимум, не меньше среднего периода относительных перемещений $\tilde{\tau}_\zeta$ [19]. Иногда в этом случае вместо периода $\tilde{\tau}_\zeta$ используется близкий по величине период собственных килевых колебаний τ_ψ. Тогда приходим к усеченному показательному распределению [4, 19]

$$f_{\mathrm{T}}(\tau) = \lambda \exp[-\lambda(\tau - \tilde{\tau}_\zeta)],\ \tau \ge \tilde{\tau}_\zeta;$$
$$f_{\mathrm{T}}(\tau) = 0,\ \tau < \tilde{\tau}_\zeta.$$

Строго говоря, сказанное относится и к распределению (6). Но там усечение с параметром $\tilde{\tau}_\zeta$ (или с параметром, равным собственному периоду килевой качки судна τ_ψ) менее существенно влияет на результаты расчетов (тем меньше, чем больше N) и в приближенных оценках может не вводиться.

3. Вероятность $P' = P'_3$ определяет случайный временной интервал $\Delta\tau$ (непрерывная величина) между N ударами (забрызгиваниями). В этом случае величина $P'_3 = P'_3(\Delta\tau)$ есть вероятность такого случайного события, когда каждый из интервалов, отделяющих один из N ударов (забрызгиваний) от другого, будет менее нормативного $[\Delta\tau]$. В этом случае для $[\Delta\tau] = \Delta\tau$ будет [19]

$$P'_{v3}(\Delta\tau) = F_{\mathrm{T}}^{N-1}([\Delta\tau]);$$

$$F_{\mathrm{T}}([\Delta\tau]) = \int_0^{[\Delta\tau]} f_{\mathrm{T}}^{(0)}(x)dx = 1 - \exp(-\lambda[\Delta\tau]).$$

Отметим также следующее. При получении расчетных зависимостей для вероятностей P'_1, P'_2 и P'_3 не принималась во внимание групповая структура реального нерегулярного волнения. Если исходить из того, что несколько ударов (забрызгиваний) подряд возникают именно из-за воздействия группы волн, то для указанных вероятностей получатся иные зависимости, которые основаны на статистике групп волн. На основе той же статистики должны корректироваться и исходные данные для расчета относительных перемещений и их скоростей (высоты и периоды нерегулярных волн, если они входят в состав группы волн). Этот вопрос рассмотрим в одной из последующих работ.

Для определения вероятности P'' введем понятие цикла зарывания (это промежуток времени с момента принятия судном воды при зарывании и до полного сливания за борт принятой воды) и примем за основу упрощенное соотношение вида

$$\tau'_{\text{Ц}} = \tau_{\text{П}} + \tau_{\text{С}} \approx C_3 \tau_{\text{П}}, \tag{8}$$

где $\tau'_{\text{Ц}}$ — протяженность одного цикла зарывания; $0 \le \tau'_{\text{Ц}} < +\infty$; $\tau_{\text{П}}$ — промежуток времени в одном цикле зарывания, в течение которого судно принимает воду, $0 \le \tau_{\text{П}} < +\infty$; τ_C — промежуток времени в одном цикле зарывания от момента прекращения принятия воды до полного сливания за борт принятой воды, $0 \le \tau_C < +\infty$; C_3 — коэффициент, связанный с конструктивными особенностями судна (наличие или отсутствие полубака, фальшборта, седловатости; величина погиби бимсов и размеры штормовых портиков) и приближенно принимаемый не зависящим от интенсивности волнения.

Действительно, по физическому смыслу получается, что чем больше интервал $\tau_{\text{П}}$, тем больше принято воды и тем больше потребуется времени на ее слив за борт. Отметим, что аналитическое выражение для коэффициента C_3 при движении проектируемого судна на встречном волнении может быть получено на основе преобразования уравнения непрерывности однонаправленного потока, текущего по подвижному наклонному руслу (уравнения Сен-Венана [17]). Для этого следует дважды (по горизонтальной координате и по времени) проинтегрировать правую и левую части этого уравнения. Затем нужно также дважды применить теорему о среднем значении определенного интеграла. Таким способом можно получить полуэмпирическую зависимость для коэффициента C_3. Эта же задача может быть решена и несколько иным путем, а именно на основе приведенного в справочнике [18] уравнения баланса массы принятой на палубу и слившейся с палубы воды (это уравнение также основано на условии непрерывности потока). В обоих случаях приходится использовать эмпирические материалы из работы [10]. Более подробный анализ соотношения (8) выходит за рамки данной статьи. Эти вопросы будут рассмотрены в одной из последующих работ автора.

Вероятность P'' в соответствии с [10] запишется как

$$\mathrm{P}'' = \text{Вер}\,(\tau'_{\text{Ц}} > \tau''_{\text{Ц}}),$$

где $\tau'_{\text{Ц}} = C_3\tau_{\text{П}}$, а $\tau''_{\text{Ц}}$ есть интервал между двумя соседними зарываниями (скважность), $\tilde{\tau}_\zeta \le \tau''_{\text{Ц}} < +\infty$.

Здесь запись «Вер$(A > B)$» читается: «Вероятность случайного события, состоящего в том, что величина A больше величины B». При этом хотя бы одна из величин (A или B) должна быть случайной.

Тогда, поскольку плотность вероятности интервалов $\tau''_{\text{Ц}}$ есть $f_{\text{Т}}(\tau)$, то

$$\mathrm{P}'' = \int_{\tilde{\tau}_\zeta}^{\infty}\int_{\tau'_{\text{Ц}}}^{\infty} f_{\text{Т}}(x) f_t(y)\,dx\,dy = \int_0^{\infty} P_{\text{Т}}(\tau'_{\text{Ц}}) f_t(\tau'_{\text{Ц}})\,d\tau'_{\text{Ц}},\ \ \tau'_{\text{Ц}} \ge \tilde{\tau}_\zeta;\quad \mathrm{P}'' = 0,\ \ \tau'_{\text{Ц}} < \tilde{\tau}_\zeta;$$

$$\mathrm{P}_{\text{Т}}(\tau'_{\text{Ц}}) = \int_{\tau'_{\text{Ц}}}^{\infty} f_{\text{Т}}(x)\,dx = \exp[-\lambda(\tau'_{\text{Ц}} - \tilde{\tau}_\zeta)],\ \ \tau'_{\text{Ц}} \ge \tilde{\tau}_\zeta;\quad \mathrm{P}_{\text{Т}}(\tau'_{\text{Ц}}) = 0,\ \ \tau'_{\text{Ц}} < \tilde{\tau}_\zeta;$$

$$f_t(t) = \frac{t}{D_t}\exp\left(-\frac{t^2}{2D_t}\right),$$

где $f_t(t)$ — плотность вероятности интервалов, отвечающих одному циклу зарывания (величин $\tau'_{\text{Ц}}$ в соотношении (8)); D_t — дисперсия интервалов, отвечающих одному циклу зарывания [16].

Здесь средняя частота λ отвечает, очевидно, зарыванию, так что будет $\lambda = \lambda_{C1} = \dfrac{1}{\tilde{\tau}_\zeta}\exp\left(-\dfrac{\chi_{31}^2}{2}\right)$, где χ_{31} — коэффициент безопасности по зарыванию. После преобразований находим

$$\mathrm{P}'' = \frac{\exp(\lambda_{C1}\tilde{\tau}_\zeta)}{D_t}\int_{\tilde{\tau}_\zeta}^{\infty}\exp\left\{-\left[\lambda_{C1}x + \frac{x^2}{2D_t}\right]\right\}x\,dx,\ \ x \ge \tilde{\tau}_\zeta;\ \mathrm{P}'' = 0,\ \ x \le \tilde{\tau}_\zeta.$$

Введем промежуточную переменную $\bar{x} = \dfrac{x}{\sqrt{D_t}}$, обозначим $a = \lambda_{C1}\sqrt{D_t}$ и $b = \dfrac{\tau_\zeta}{\sqrt{D_t}}$, тогда

$$\mathrm{P}'' = \exp(\lambda_{C1}\tilde{\tau}_\zeta)\int_b^{\infty}\exp[-(a\bar{x} + \bar{x}^2)]\bar{x}\,d\bar{x},\ \ \bar{x} \ge b;$$

$$\mathrm{P}''_v = 0,\ \ \bar{x} \le b.$$

Интегралы такого типа вычисляются путем дополнения аргумента экспоненты в подынтегральной функции до полного квадрата, когда применяется соотношение

$$\exp[-(a\bar{x}+\bar{x}^2)] = \exp\left[-\left(a\bar{x}+\bar{x}^2+\frac{a^2}{4}-\frac{a^2}{4}\right)\right] = \exp\left(\frac{a^2}{4}\right)\exp\left[-\left(\bar{x}+\frac{a}{2}\right)^2\right].$$

Выполнив интегрирование, находим

$$\mathrm{P}'' = \frac{1}{2}\exp\left(ab+\frac{a^2}{4}\right)\left\{\exp(-b^2) - a\left[1-\frac{\sqrt{\pi}}{2}\overline{\Phi}_1(b)\right]\right\};\ \ \overline{\Phi}_1(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x \exp(-y^2)dy.$$

В качестве распределения $f_t(t)$ принято центрированное распределение Рэлея, отвечающее плотности вероятности длительности выброса случайного процесса (длительности приема воды $\tau_{\text{П}}$ в формуле (8)) с дисперсией, которая для величины $\tau_{\text{П}}$ должна была бы быть $D_t^{(0)} = \dfrac{\tilde{\tau}_\zeta^2}{16\pi^2\chi_{31}^2}$ [16]. Но величины $\tau'_{\text{Ц}}$ и $\tau_{\text{П}}$ различаются неслучайным множителем C_3, поэтому для закона распределения величины $\tau'_{\text{Ц}}$ принято такое же центрированное распределение, но с дисперсией $D_t = C_3^2 D_t^{(0)}$, так что $D_t = \dfrac{C_3^2 D_\zeta \tilde{\tau}_\zeta^2}{16\pi^2 \text{У}_{31}{}^2}$.

Эти соотношения, в принципе, позволяют решить поставленную в статье задачу. Но дело в том, что указанные выше допущения (стационарность процесса, использование закона Пуассона) в силу того, что мы перешли — в отличие от обычной практики — к уменьшенным интервалам реагирования, могут отрицательно сказаться на точности расчетов. Поэтому исследуем возможные подходы к совершенствованию методов определения вынужденных потерь скорости в части отказа от этих допущений.

Сначала рассмотрим учет зависимостей частот слеминга и заливаемости от времени. Практически если интервалы реагирования τ или $N\Delta\tau$ имеют порядок минуты и более, то без больших ошибок можно пренебрегать зависимостями соответствующих средних частот от времени и пользоваться при проектировании приведенными выше соотношениями. При меньших интервалах возможно возникновение погрешностей. А если интервалы реагирования составляют полминуты и менее, то допущение о независимости средней частоты от времени (во всяком случае для задач слеминга) становится вообще неприемлемым [19].

В этом случае для различных видов слеминга и заливания расчетные зависимости для вероятностей $\mathrm{P}'_1(N)$, $\mathrm{P}'_2(\tau)$, $\mathrm{P}'_3(\Delta\tau)$ и P'' принимают такой вид (нижние индексы при частотах опущены):

$$\mathrm{P}'_1(N) = \frac{\left[\int_0^\tau \lambda(x)dx\right]^N}{N!}\exp\left[-\int_0^\tau \lambda(x)dx\right];$$

$$\mathrm{P}'_2(\tau) = 1-\frac{1}{N!}\exp\left[-\int_0^\tau\lambda(x)dx\right]\left\{\left[\int_0^\tau\lambda(x)dx\right]^N - \sum_{n=1}^N N(N-1)(N-2)...(N-n+1)\left[\int_0^\tau\lambda(x)\,dx\right]^{N-n}\right\};$$

$$\mathrm{P}'_3(\Delta\tau) = \left\{1-\exp\left[-\int_0^{\Delta\tau}\lambda(x)dx\right]\right\}^{N-1};$$

$$\mathrm{P}'' = \frac{1}{D_t}\int_0^\infty \exp\left\{-\left[\int_0^y \lambda(x)dx + \frac{y^2}{2D_t}\right]\right\}ydy \quad \text{или} \quad \mathrm{P}'' = \int_0^\infty \exp\left\{-\left[\sqrt{D_t}\int_0^{\bar{y}}\lambda(\bar{x})d\bar{x}) + \bar{y}^2\right]\right\}\bar{y}d\bar{y};$$

$$\bar{x} = \frac{x}{\sqrt{D_t}}; \;\; \bar{y} = \frac{y}{\sqrt{D_t}}.$$

Для практической реализации этих соотношений необходимо найти зависящие от времени частоты $\lambda(t) = \lambda_{Cit}(t)$ и $\lambda(t) = \lambda_{3it}(t)$ (индексы восстановлены). Предварительно обозначим

$$v_1 = \zeta(0); \;\; v_2 = \zeta(t); \;\; v_3 = \dot{\zeta}(0); \;\; v_4 = \dot{\zeta}(t)$$

и рассмотрим определение совместного закона распределения $\varphi_v(\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4)$ четырех нормально распределенных случайных величин ν_1, ν_2, ν_3, ν_4. Это может быть выполнено на основе либо ненормированной корреляционной матрицы $\overline{\overline{C}}$ [11, 12, 19], либо нормированной корреляционной матрицы $\overline{\overline{c}}$ [16].

В первом случае имеем [11, 12]

$$\varphi_v(v_1, v_2, v_3, v_4) = \frac{1}{4\pi^2\sqrt{\det\overline{\overline{C}}}}\exp\left[-\frac{1}{2\det\overline{\overline{C}}}\sum_{m,n=1}^{4} A_{mn}(\nu_m - \Delta_m)(\nu_n - \Delta_n)\right];$$

$$\{\overline{\overline{C}}\} = \begin{Vmatrix} R_\zeta(0) & R_\zeta(t) & 0 & \dot{R}_\zeta(t) \\ R_\zeta(t) & R_\zeta(0) & -\dot{R}_\zeta(t) & 0 \\ 0 & -\dot{R}_\zeta(t) & -\ddot{R}_\zeta(0) & -\ddot{R}_\zeta(t) \\ \dot{R}_\zeta(t) & 0 & -\ddot{R}_\zeta(t) & -\ddot{R}_\zeta(0) \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} D_\zeta & R_\zeta(t) & 0 & \dot{R}_\zeta(t) \\ R_\zeta(t) & D_\zeta & -\dot{R}_\zeta(t) & 0 \\ 0 & -\dot{R}_\zeta(t) & D_{\dot{\zeta}} & -\ddot{R}_\zeta(t) \\ \dot{R}_\zeta(t) & 0 & -\ddot{R}_\zeta(t) & D_{\dot{\zeta}} \end{Vmatrix}.$$

Аналогичное соотношение в несколько иной форме приведено и в работе Х. Псаратиса [19].

Во втором случае будет [16]

$$\varphi_v(v_1, v_2, v_3, v_4) = \frac{1}{4\pi^2\sqrt{D_\zeta D_{\dot{\zeta}}\det\overline{\overline{c}}}}\exp\left[-\frac{1}{2\det\overline{\overline{c}}}\sum_{m,n=1}^{4} a_{mn}\frac{(\nu_m - \Delta_m)(\nu_n - \Delta_n)}{\sqrt{D_\zeta D_{\dot{\zeta}}}}\right];$$

$$\{\overline{\overline{c}}\} = \begin{Vmatrix} 1 & r_\zeta(t) & 0 & \dot{r}_\zeta(t) \\ r_\zeta(t) & 1 & -\dot{r}_\zeta(t) & 0 \\ 0 & -\dot{r}_\zeta(t) & 1 & \ddot{r}_\zeta(t) \\ \dot{r}_\zeta(t) & 0 & \ddot{r}_\zeta(t) & 1 \end{Vmatrix}; \tag{9}$$

$$r_\zeta(t) = \frac{R_\zeta(t)}{D_\zeta}; \;\; \dot{r}_\zeta(t) = \frac{\dot{R}_\zeta(t)}{\sqrt{D_\zeta D_{\dot{\zeta}}}}; \;\; \ddot{r}_\zeta(t) = \frac{\ddot{R}_\zeta(t)}{D_{\dot{\zeta}}}, \tag{10}$$

где $R_\zeta(t)$, $\dot{R}_\zeta(t)$, $\ddot{R}_\zeta(t)$ — корреляционная функция относительных перемещений от продольной качки и ее первая и вторая производные по времени, при этом $R_\zeta(0) = D_\zeta$ и $-\ddot{R}_\zeta(t) = D_{\dot{\zeta}}$ [4]; $\det\overline{\overline{C}}$, $\det\overline{\overline{c}}$ — определители ненормированной и нормированной корреляционных матриц $\overline{\overline{C}}$ и $\overline{\overline{c}}$ соответственно; A_{mn}, a_{mn} — алгебраические дополнения для соответствующего элемента (на пересечении m-й строки и n-го столбца) применительно к корреляционным матрицам $\overline{\overline{C}}$ и $\overline{\overline{c}}$ соответственно.

Величины Δ_{mn} всегда равны 0 при m, n = 3, 4, т. е. скорости соударения всегда представляют собой центрированные нормальные случайные величины. При $m, n = 1, 2$ величины Δ_{mn} также равны 0, если выполняются расчеты слеминга, и относительные перемещения в этом случае также будут центрированными нормальными случайными величинами. При расчетах заливания величины $\Delta_{mn} \neq 0$ представляют собой упоминавшийся выше статический подъем воды при качке. Относительные перемещения в этом случае будут нецентрированными нормальными случайными величинами. Некоторые данные для расчета статического подъема Δ_{mn} в этом случае содержатся в справочнике [19].

Тогда для частот $\lambda(t) = \lambda_{Cit}(t)$ и $\lambda(t) = \lambda_{3it}(t)$ с учетом [19] находим:

$$\lambda_{Cit}(t) = \frac{J_{Ci}(t)}{\lambda_{Ci}}, \ \forall i \in I_C;$$

$$\lambda_{31t}(t) = \frac{J_{31}(t)}{\lambda_{31}}; \ \lambda_{32t}(t) = \frac{J_{32}(t)}{\lambda_{32}};$$

$$J_{C\cdot i}(t) = \int\limits_{w_{Ci}}^{\infty}\int\limits_{w_{Ci}}^{\infty} \varphi_v(У_{Ci}, У_{Ci}, v_3, v_4) v_3 v_4 dv_3 dv_4;$$

$$i = 1, 2, 3;$$

$$J_{31}(t) = \int\limits_0^{\infty}\int\limits_0^{\infty} \varphi_v(У_{31}, У_{31}, v_3, v_4) v_3 v_4 dv_3 dv_4;$$

$$J_{32}(t) = \int\limits_{w_{П3}}^{\infty}\int\limits_{w_{П3}}^{\infty} \varphi_v(0, 0, v_3, v_4) v_3 v_4 dv_3 dv_4.$$

Рассмотрим далее предельный переход, отвечающий $t \to \infty$. В этом случае

$$\lim_{t\to\infty} R_\zeta(t) = 0, \ \lim_{t\to\infty} \dot{R}_\zeta(t) = 0,$$

$$\lim_{t\to\infty} \ddot{R}_\zeta(t) = 0.$$

Тогда в корреляционной матрице $\overline{\overline{C}}$, $\{\overline{\overline{C}}\} = C_{mn}$ отличны от 0 только элементы

$$C_{11} = C_{22} = D_\zeta; \ C_{33} = C_{44} = D_{\dot{\zeta}}.$$

После громоздких, но несложных, в принципе, вычислений можно показать, что

$$\lim_{t\to\infty} J_{Ci}(t) = \lambda^2_{Ci}, \forall i \in I_C; \ \lim_{t\to\infty} J_{31}(t) = \lambda^2_{31};$$

$$\lim_{t\to\infty} J_{32}(t) = \lambda^2_{32}.$$

Находим

$$\lim_{t\to\infty} \lambda_{Cit}(t) = \lambda_{Ci}, \ \forall i \in I_C;$$

$$\lim_{t\to\infty} \lambda_{3it}(t) = \lambda_{3i}, \ \forall i \in I_3.$$

При $t \to \infty$ корреляционная матрица $\overline{\overline{C}}$ становится сингулярной и соответствующий предельный переход для частот $\lambda_{Cit}(t)$ и $\lambda_{3it}(t)$ затруднительно выполнить аналитически.

Задаваемый соотношением (5) закон Пуассона для данного класса задач имеет ограниченную область применения. Этот закон применим тогда, когда вероятности $\mathrm{P}_i = \exp\left(-\frac{\chi_i^2}{2}\right) \ \forall i \in I_\mathrm{C} + I_3$ близки или к 0, или к 1 и существенно отличаются при этом от 0,5. В этой ситуации при некоторых дополнительных условиях (эти условия сформулированы в работе [3] и в данной задаче обычно выполняются) применим закон Пуассона. Тогда, в соответствии с известным свойством этого закона, два первых статистических момента количества отказов — математическое ожидание $\overline{M}_N$ и дисперсия D_N — равны между собой (индексы при статистических моментах опущены) [3, 16].

Второй подход отвечает ситуации, когда указанные вероятности близки к 0,5 и достаточно удалены как от единицы, так и от 0. В этом случае закон Пуассона не может быть использован. А на основании локальной и интегральной теорем Муавра–Лапласа для вычисления вероятности $\mathrm{P}'(N)$ при определенных, сформулированных в работе [7] условиях может быть применено вместо отвечающего закону Пуассона соотношения (5) нормальное распределение с математическим ожиданием $\overline{M}_N$ и с дисперсией $D_N = \overline{M}_N - \overline{M}_N^2 + \widetilde{D}_N$ (индексы опущены) [16].

На практике использование закона Пуассона возможно, когда рассматриваемый случайный процесс характеризуется пересечениями высокого уровня. Это означает, что численные значения всех безразмерных уровней (или, что то же самое, коэффициентов безопасности) должны быть не менее 2 [16]. В этом случае в формуле для второго статистического момента имеем $\overline{M}_N^2 \approx \widetilde{D}_N$ и $\overline{M}_N \approx D_N$, как и должно быть при применении распределения Пуассона.

В литературе имеются практические данные по величинам нормативных коэффициентов безопасности $[\chi_{C2}]$,

$[\chi_{31}]$ и $[\chi_{32}]$. Так, по данным [8, 18], при нормировании днищевого слеминга по опасной скорости, когда под опасным ударным давлением понимается несущая способность пластин днища, имеем $[\chi_{C2}] \approx 1{,}8\ldots2{,}0$ при длине судна $L \leq 100$ м. При росте длины со 100 до 200 м этот коэффициент увеличивается с 2,0 до 3,5. Если же нормирование выполняется не по опасной, а по пороговой скорости, то коэффициенты безопасности будут на 30…50% ниже. Эти данные относятся к морским транспортным судам.

Небольшими (1 и менее) получаются коэффициенты безопасности $[\chi_{C2}]$ и для быстроходных судов переходного режима движения. По зарыванию как для промысловых [1], так и для морских транспортных судов [18] имеем $[\chi_{31}] \approx 2{,}5\ldots2{,}7$. По забрызгиванию также получается, что $[\chi_{32}] \approx 2{,}5$ [8].

В соответствии с этими данными по нормативным коэффициентам безопасности $\chi = [\chi]$ по обоим видам заливания всегда будет пересечение высокого уровня. По слемингу так получается не всегда.

Рассмотрим пересечение низкого уровня ($\chi_{Ci} < 2$) при слеминге. В этом случае дискретная случайная величина оказывается распределенной по характерному для непрерывных случайных величин нормальному закону. Тогда, предполагая, что процесс относительных перемещений является стационарным, и используя представление величины $\widetilde{D}_{NC}$ в соответствии с работой [5], приходим вместо распределения Пуассона (5) к формуле для определения вероятности $P_1'(N)$ применительно к слемингу небольших судов (индексы при коэффициентах безопасности χ_{Ci} опущены) следующего вида:

$$P_1'(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_N(\tau)}} \int_{-\infty}^{N} \exp\left\{-\frac{[N - \overline{M}_N(\tau)]^2}{2D_N(\tau)}\right\} dN; \tag{11}$$

$$\overline{M}_N(\tau) = \lambda\tau;\ D_N(\tau) = \overline{M}_N(\tau) - \overline{M}_N^2(\tau) + \widetilde{D}_N(\tau);\ \widetilde{D}_N(\tau) = 2\int_0^{\tau} (\tau - t) S(\chi, t)\, dt;$$

$$S(\chi, t) = A\sqrt{2\pi} \exp\left\{-\frac{p^2[1 - r_\zeta^2]}{2a_{33}}\right\} \times$$

$$\times \left\{\sigma \frac{\sqrt{\det \overline{\overline{c}} \cdot a_{33}}}{1 - r_\zeta^2} \overline{\Phi}(-s) - \frac{\det \overline{\overline{c}}}{a_{33}(1 - r_\zeta^2)} \left[a_{34} + \frac{\det \overline{\overline{c}} \cdot (1 - r_\zeta^2)}{a_{33}}\right] \frac{p a_{34}}{\sqrt{\det \overline{\overline{c}} \cdot a_{33}}} \overline{\Phi}_2(s) + q\right\} -$$

$$- AB\left[p^2 + \frac{a_{34}}{1 - r_\zeta^2}\right] J(a, \sigma) - \overline{\Phi}_2(-a);$$

$$J(u, w) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 - r_\zeta^2}} \int_0^{\infty}\int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{x^2 + 2uxy + y^2}{2(1 - w^2)}\right] dxdy;$$

$$A = \frac{\widetilde{\omega}_\zeta^2}{2\pi\sqrt{\det \overline{\overline{c}}}} \exp\left[\frac{\chi^2}{\det \overline{\overline{c}}}\left(\frac{a_{22}^2}{a_{33} - a_{34}} - a_{11}\right)\right];\ a = p\sqrt{\frac{1 - r_\zeta^2}{a_{33}}};\ \sigma = \frac{a_{34}}{a_{33}};$$

$$B = 2\pi\sqrt{\frac{\det \overline{\overline{c}}}{1 - r_\zeta^2}};\ p = \frac{a_{22}\chi}{a_{33} - a_{34}};\ q = \frac{\det \overline{\overline{c}}}{1 - r_\zeta^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{s}{2}\right);\ s = -\frac{a_{22}\chi}{\sqrt{\det \overline{\overline{c}} \cdot a_{33}}};$$

$$a_{11} = a_{22} = 1 - \dot{r}_\zeta^2 - \ddot{r}_\zeta^2;\ a_{33} = 1 - r_\zeta^2 - r_\zeta^2;\ a_{34} = r_\zeta \dot{r}_\zeta^2 - \ddot{r}_\zeta(1 - r_\zeta^2);\ \det \overline{\overline{c}} = \frac{a_{33}^2 - a_{34}^2}{1 - r_\zeta^2};$$

$$\overline{\Phi}_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy,$$

где, как и ранее, $\det \bar{\bar{c}}$, a_{mn} — определитель и алгебраические дополнения для задаваемой соотношением (9) нормированной корреляционной матрицы $\bar{\bar{c}}$ [5, 16], а величины $r_\zeta = r_\zeta(t)$, $\dot{r}_\zeta = \dot{r}_\zeta(t)$ и $\ddot{r}_\zeta = \ddot{r}_\zeta(t)$ определятся по формулам (10).

Несобственный двойной интеграл $J(a, \sigma)$ — сходящийся, и для его вычисления могут быть использованы специальные таблицы [16].

Данная работа является первой, где излагается концепция расчета вынужденных потерь скорости судна на волнении исходя из реальных условий, при которых происходит снижение скорости капитаном судна. Предварительные расчеты показали хорошее согласование с данными ряда натурных экспериментов, однако работа по расчетной проверке изложенной концепции должна быть продолжена.

ВЫВОДЫ

1. Для поиска коэффициента вынужденных потерь скорости η_{v2} в формуле (1) необходимы адекватные нормативы характеристик продольной качки (амплитуд, ускорений), а также слеминга и заливаемости. Знание коэффициента весьма существенно для случая движения небольшого судна на интенсивном волнении.

2. К настоящему времени известны достаточно адекватные (в плане определения указанного коэффициента) нормативы для характеристик продольной качки. Однако такая общеупотребительная характеристика слеминга и заливаемости, как средняя частота, не является адекватным нормативом для данной ситуации. Причина этого в том, что данный показатель характеризует единичные удары (заливания), тогда как на практике возможность вынужденного снижения скорости связана с воздействием нескольких ударов (заливаний) подряд. Неадекватность этого норматива косвенно подтверждается противоречивостью рекомендаций разных авторов по данному вопросу.

3. Учет указанного обстоятельства в первом приближении возможен на основе формулы (4). Входящие в это соотношение вероятности P_i найдутся по приводимым далее соотношениям.

4. Уточнение полученных решений возможно за счет учета зависимости частоты слеминга (заливания) от времени, когда процесс относительных перемещений от продольной качки принимается нестационарным, и за счет рассмотрения частоты слеминга (заливания) как случайной величины, которая характеризуется не менее чем двумя статистическими моментами.

5. В задачах заливания (как зарывания, так и забрызгивания) в качестве закона распределения частот выбросов (заливаний, забрызгиваний) может быть принят закон Пуассона (5).

6. Описание в задачах днищевого слеминга для относительно небольших (длиной 80…100 м и менее) судов случайного количества выбросов нормальным законом (11) ведет к заметному усложнению расчетов. Однако, начиная с длины 100…150 м, закон Пуассона оказывается применимым для описания случайного количества выбросов и в этом случае.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Батуев, А.Д.** Расчет защищенного надводного борта судов ФРП [Текст] / А.Д. Батуев // Труды КТИРПиХ. — Калининград : КТИРПиХ, 1982. — Вып. 99. – С. 23–30.

[2] **Батуев, А.Д.** Методика экспертизы проекта судна на слеминг [Текст] / А.Д. Батуев // Мореходные качества и проектирование судов : сб. науч. трудов КТИРПиХ. — Калининград : КТИРПиХ. — 1989. — С. 18–24.

[3] **Беляев, Ю.К.** Предельная теорема для числа пересечений высокого уровня стационарным гауссовским процессом [Текст] / Ю.К. Беляев // Доклады Академии наук СССР. — М. : Наука, 1967. — Т. 173, № 4. — С. 739–741.

[4] **Бородай, И.К.** Качка судов на морском волнении [Текст] / И.К. Бородай, Ю.А. Нецветаев. — Л. : Судостроение, 1969. — 432 с.

[5] **Геранин, В.А.** Дисперсия числа выбросов отрезка стационарного гауссова шума [Текст] / В.А. Геранин // Радиотехника и электроника. — 1967. — № 5. — С. 788–791.

[6] **Дубровский, В.А.** Повышение мореходности водоизмещающих кораблей и методы ее нормирования [Текст] / В.А. Дубровский // Судостроение за рубежом. — 1988. — № 10. — С. 5–12.

[7] **Ершов, М.П.** Предельная теорема для числа пересечений уровня стационарным гауссовским процессом [Текст] / М.П. Ершов // Доклады Академии наук СССР. — М. : Наука, 1967. — Т. 177, № 6. — С. 1259–1262.

[8] **Липис, В.Б.** Гидродинамика гребного винта при качке судна [Текст] / В.Б. Липис. — Л. : Судостроение, 1975. — 264 с.

[9] **Липис, В.Б.** Безопасные режимы штормового плавания судов [Текст] / В.Б. Липис, Ю.В. Ремез. — М. : Транспорт, 1982. — 120 с.

[10] **Платонов, В.Г.** Экспериментальное исследование характеристик потока воды на палубе при заливании модели судна на встречном волнении [Текст] / В.Г. Платонов // Гидродинамика судов и средств океанотехники на волнении : материалы советско-болгарского семинара. — Л. : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1984. — С. 25–37.

[11] Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций [Текст] / Под ред. А.А. Свешникова. — М. : Наука, 1970. — 656 с.

[12] **Свешников, А.А.** Прикладные методы теории случайных функций [Текст] / А.А. Свешников. — М. : Наука, 1968. — 404 с.

[13] **Севастьянов, Н.Б.** О критерии защищенности палубы от заливания на волнении [Текст] / Н.Б. Севастьянов // Труды КТИРПиХ. — Калининград : КТИРПиХ, 1972. — Вып. 54. — С. 3–9.

[14] **Соломенцев, О.И.** Общие принципы расчета потери скорости катамаранов на волнении [Текст] / О.И. Соломенцев // Судостроение. — 1986. — № 10. — С. 10–13.

[15] **Соломенцев, О.И.** О взаимосвязи норматива по разгону винта и потери скорости катамарана на волнении [Текст] / О.И. Соломенцев // Проектирование морских судов : сб. науч. трудов ЛКИ. — Л. : ЛКИ, 1988. — С. 84–87.

[16] **Тихонов, В. И.** Выбросы случайных процессов [Текст] / В. И. Тихонов. — М. : Наука, 1970. — 392 с.

[17] **Фишкис, Ю. М.** К оценке интенсивности заливания гладкопалубного судна на встречном волнении [Текст] / Ю. М. Фишкис // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. — Л. : ЦНИИ «Румб», 1976. — Вып. 10. — С. 115–26.

[18] **Холодилин, А. Н.** Мореходность и стабилизация судов на волнении [Текст] / А. Н. Холодилин, А. Н. Шмырев. — Л. : Судостроение, 1976. — 328 с.

[19] **Psaratis, H. N.** Some New Aspects of Slamming Probability Theory [Text] / H. N. Psaratis // Journal of Ship Research. — 1978. — Vol. 22, nr 3. — P. 186–192.