

3. Кудряшов В. Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов / В. Е. Кудряшов. // Известия ЛЭТИ. – 1976. – № 206. – С. 15–19.
4. Павлов В. В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления / В. В. Павлов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 272 с.
5. Павлов В. В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов / В. В. Павлов, Н. И. Сеньшин. // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. – № 68. – С. 43–45.
6. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. – № 12. – С. 22–24.
7. Сафин В. И. Использование маневра изменения скорости для предотвращения столкновения судов / В. И. Сафин, Е. Е. Тюпиков // Судовождение. – 2005. – № 10. – С. 143–147.
8. Тюпиков Е. Е. Анализ возможности расхождения судна с целью изменением скорости / Е. Е. Тюпиков // Судовождение. – 2006. – № 12. – С. 122–126.
9. Вагущенко Л. Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути: монография / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Феникс, 2013. – 180 с.
10. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus // J. Navig. – 2008. 61. – № 1. – P. 129–142.
11. Lisowski J. The dynamic game models of safe navigation / J Lisowski // Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2007. – P. 23–30.
12. Цымбал Н. Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

УДК 656.61

С. Н. Некрасов,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова;

К. И. Ефимов,
ассистент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

Д. В. Трененков,
аспирант,
ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

НАВИГАЦИОННЫЕ РИСКИ БУКСИРОВКИ СУДНА В СТЕСНЕННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

NAVIGATION RISKS TOWING IN CRAMPED NAVIGATIONAL CONDITIONS

Рассмотрен вопрос определения навигационных рисков прохода судов подходного фарватера к порту Высоцк при различных гидрометеорологических условиях. Используются методы, известные в теории вероятностей и математической статистике для оценки навигационных рисков. Оценку навигационных рисков буксировки предложено производить стохастическими методами, учитывая смещение центра величины судна и изменчивость маневренной полосы движения. Показано, что по результатам имитационного моделирования движения судна по фарватерам и подходным путям п. Высоцк

эти навигационные параметры подчинены нормальному закону распределения и задача оценки рисков сводится к задаче отыскания вероятности попадания случайной величины в назначенную полосу. Выполнена формальная оценка риска прохода узкости судами, на основании которой можно судить о качестве управления судном и некотором числе навигационных аварий и происшествий в заданном районе плавания.

Considered to the question of determination of navigation risks passage of vessels of the approach fairway to the port of Vysotsk in different hydrometeorological conditions. Used techniques known in probability theory and mathematical statistics to assess navigational hazards. Assessment of navigational risks towing asked to produce stochastic methods, estimating the displacement of the centre of buoyancy of the vessel and the variability of maneuvering lanes. It is shown that the results of simulation of ship motion on fairways and approach paths port of Vysotsk these navigation options are subject to the normal law of distribution. Then the task of risks assessment is reduced to the problem of finding the probability of a random value in the assigned band. Made a formal risk assessment of the passage of outcaste courts, on the basis of which you can judge the quality control of the vessel and a number of navigation accidents and incidents in a given area of navigation

Ключевые слова: навигационный риск, навигационная безопасность, ширина маневренной полосы движения судна.

Key words: navigation risk, navigation safety, width maneuverable lanes of the vessel.

БУКСИРОВКА судна в стесненных условиях отличается особой сложностью и необходимостью обеспечения навигационной безопасности плавания, так как навигационные и гидрометеорологические условия оказывают существенное влияние на управление навигационными рисками [5, с. 12]. Необходимость включения в руководящие документы (обязательные постановления капитана порта) крупнотоннажных судов для возможности движения в / из п. Высоцк обусловлена потребностью снижения расходов на один судозаход и повышением экономических показателей.

Одним из подходов к обоснованию возможности буксировки крупнотоннажных судов в стесненных условиях является *имитационное моделирование*, применяемое для оценки навигационных рисков при проектировании и строительстве сооружений и объектов, а также для оценки рисков при движении судов в стесненных условиях [3, с. 164]. Одним из главных параметров, определяющих область возможного нахождения судна, является ширина маневренной полосы движения судна, которая зависит от размерений судна и углов сноса. Навигационными параметрами, характеризующими положение судна на фарватере с учетом его размерений, являются уклонение центра тяжести (ЦТ) судна от эталонной (заданной) траектории $\Delta x(t)$ и угол дрейфа C . В соответствии с правилами применения критерия согласия Колмогорова – Смирнова [2, с. 343] будем полагать, что процесс $\Delta x(t)$ распределен по нормальному закону и имеет некоторые значения математического ожидания $m_{\Delta x}$ и дисперсии $\sigma_{\Delta x}^2$ [4, с. 34–35]. Помимо процесса $\Delta x(t)$ положение судна на траектории движения будет характеризоваться шириной маневренной полосы движения $B(t)$ при угле дрейфа $C \neq 0$ [3, с. 165].

Совместный учет статистических характеристик процессов $\Delta x(t)$ и $B(t)$, характеризующих качество управления судном, позволяет оценить изменчивость параметров траектории движения судна, что, в свою очередь, дает возможность оценить навигационные риски прохода узкости. Процессы $\Delta x(t)$ и $B(t)$ статистически независимы, поэтому оценка общего среднего значения изменчивости траектории судна [4, с. 34] составит

$$m_{\Sigma} = m_{\Delta x} + m_B, \quad (1)$$

где $m_{\Delta x}$ – математическое ожидание изменчивости ЦТ судна; m_B – математическое ожидание изменчивости ширины полосы движения судна; m_{Σ} – суммарное математическое ожидание.

Значение дисперсии изменчивости полосы траектории движения судна составит

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{\Delta x}^2 + \sigma_B^2, \quad (2)$$

где $\sigma_{\Delta x}^2$ – дисперсия изменчивости ЦТ судна; σ_B^2 – дисперсия изменчивости ширины полосы движения судна; σ_{Σ}^2 – общая дисперсия изменчивости параметров движения судна [4, с. 35].

Имитационное моделирование движения танкера в сложных гидрометеорологических условиях проводилось на подходном фарватере к п. Высок с помощью навигационного тренажера NTPro 4000 и электронной картографической навигационно-информационной системы (ЭКНИС). Были получены значения уклонения центра тяжести (ЦТ) судна и угол дрейфа при движении судна в грузу и в балласте при различной скорости ветра. Результаты, характеризующие движение судна, были проанализированы классическими методами статистического анализа [1, с. 82], [6, с. 137].

Гистограммы и статистические моменты временных рядов отклонения ЦТ судна $X(nh)$ и угла дрейфа $C(nh)$, где h – шаг квантования, приведены на рис. 1–3 и в табл. 1–3.

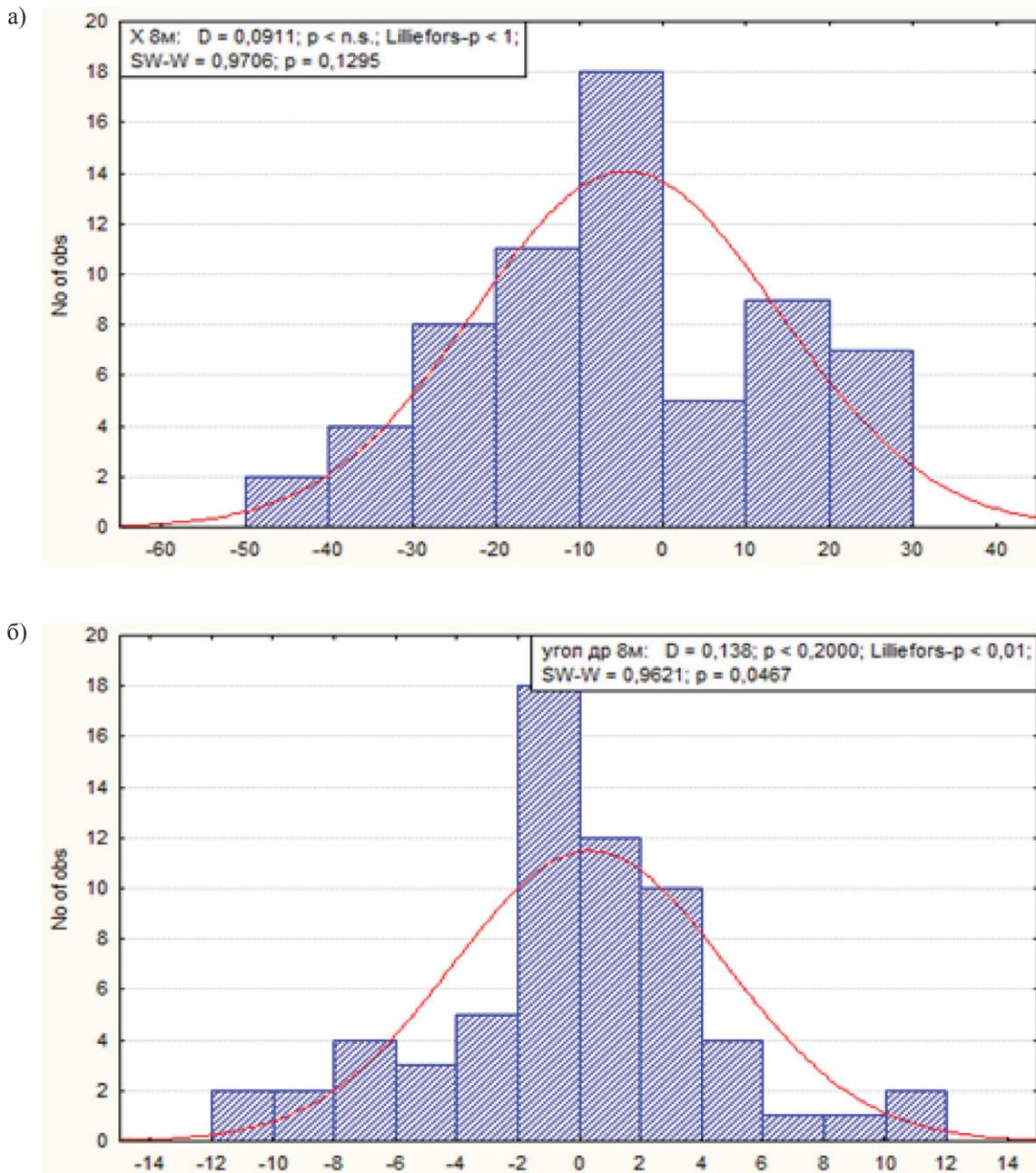
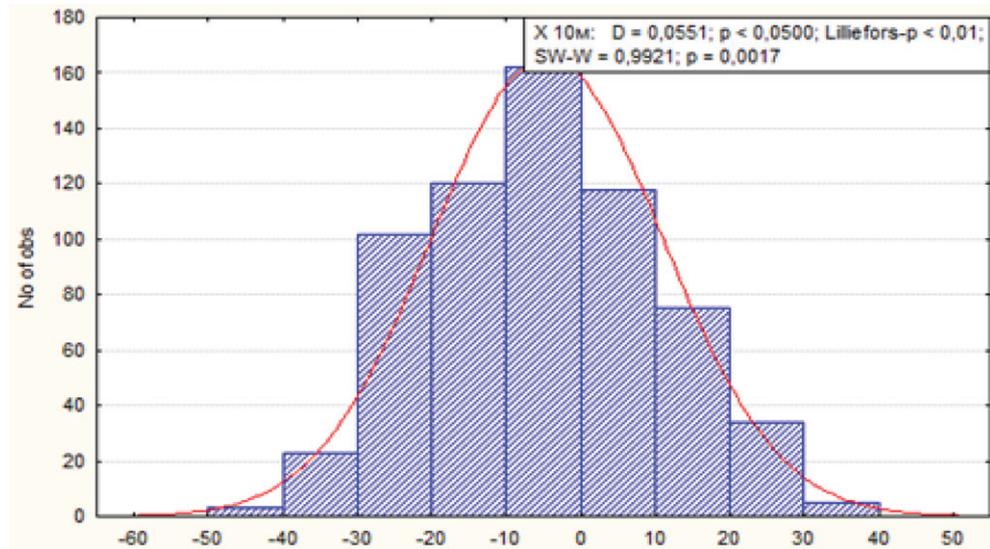


Рис. 1. График распределения уклонения ЦТ судна от оси фарватера (а) и угла дрейфа судна (б) при скорости ветра 8 м/с

а)



б)

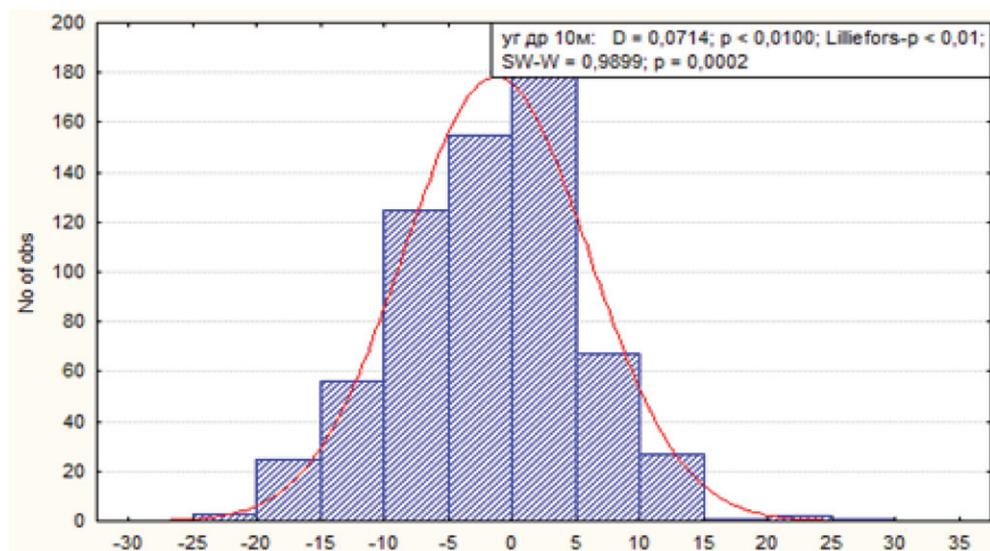
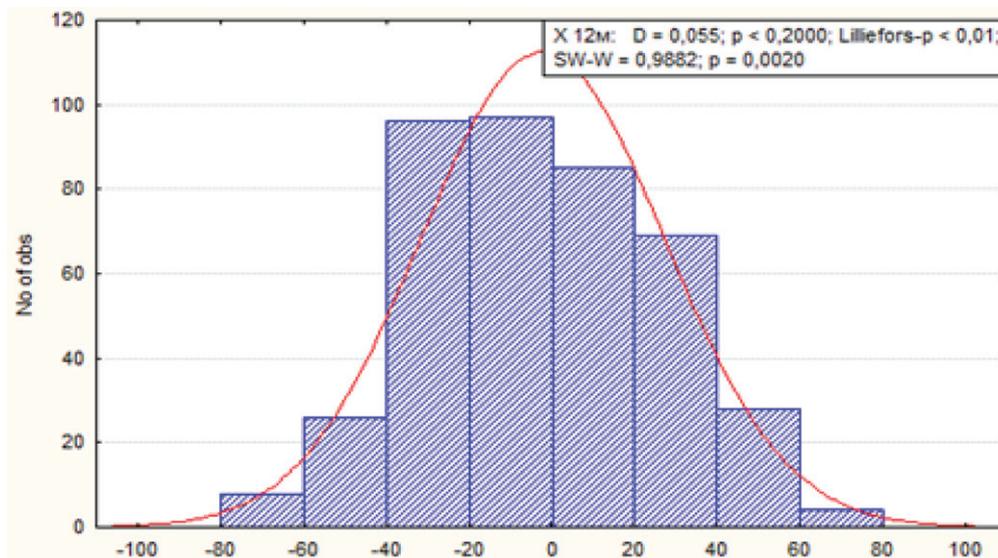


Рис. 2. График распределения уклонения ЦТ судна от оси фарватера (а) и угла дрейфа судна (б) при скорости ветра 10 м/с

а)



б)

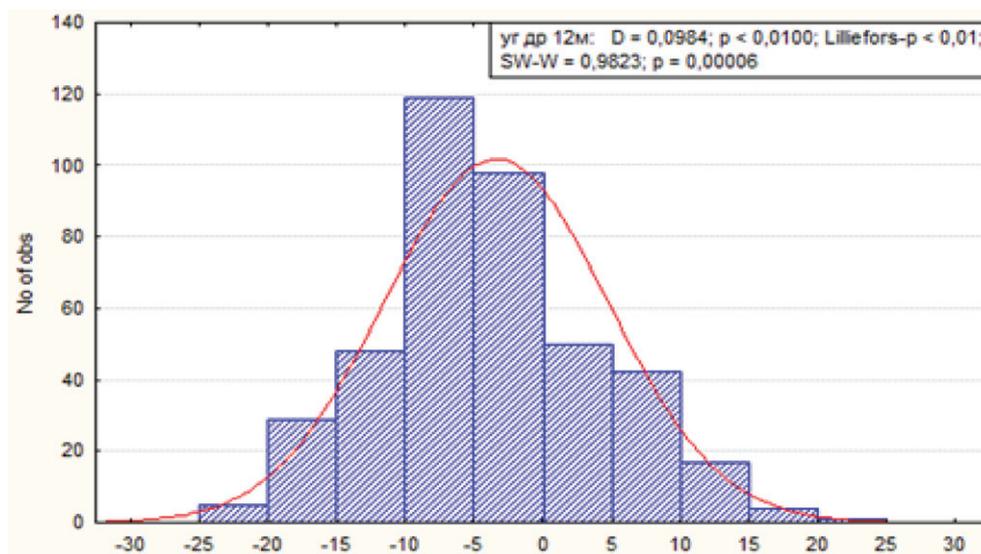


Рис. 3. График распределения отклонения ЦТ судна от оси фарватера (а) и угла дрейфа судна (б) при скорости ветра 12 м/с

Таблица 1

Движение танкера при ветре 8 м/с

Параметры	Количество измерений	Среднее значение	Минимальное значение (ЛБ)	Максимальное значение (ПрБ)	Дисперсия	Стандартное отклонение
Отклонение ЦТ, м	64	-4,64062	-45,0000	27,00000	329,3132	18,14699
Изменение угла дрейфа, град.	64	0,26563	-10,0000	11,00000	19,7855	4,44809

Таблица 2

Движение танкера при ветре 10 м/с

Параметры	Количество измерений	Среднее значение	Минимальное значение (ЛБ)	Максимальное значение (ПрБ)	Дисперсия	Стандартное отклонение
Отклонение ЦТ, м	642	-4,79751	-43,0000	37,00000	239,5596	15,47771
Изменение угла дрейфа, град.	642	-1,40810	-21,0000	28,00000	51,6959	7,18999

Таблица 3

Движение танкера при ветре 12 м/с

Параметры	Количество измерений	Среднее значение	Минимальное значение (ЛБ)	Максимальное значение (ПрБ)	Дисперсия	Стандартное отклонение
Отклонение ЦТ, м	413	-2,69855	-67,0000	70,00000	858,4362	29,29908
Изменение угла дрейфа, град.	413	-3,53511	-24,0000	21,00000	65,5601	8,09692

Математическое ожидание ширины маневренной полосы движения [3, с. 165] можно определить по формуле

$$\frac{m_B}{B_c} = \frac{L_c}{B_c} (\sin m_c + \cos m_c), \quad (3)$$

где m_c – математическое ожидание угла сноса; m_B – математическое ожидание ширины маневренной полосы движения; B_c – ширина судна.

Математическое ожидание (m_B) ширины маневренной полосы движения судна также определяется из табл. 2. При $\frac{L_c}{B_c} = 6$ и $m_c = 0,27$ по табл. 2 [3, с. 165] определим $m_B = 1,07B_c = 1,07 \cdot 48,3 = 51,68$ м.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) изменчивости ширины маневренной полосы движения можно определить по формуле [3, с. 165]:

$$\frac{\sigma_B}{B_c} = \frac{\sigma_c}{57,3^\circ} \left| \frac{L_c}{B_c} \cos C - \sin C \right|, \quad (4)$$

где σ_B – СКО маневренной полосы движения судна; σ_c – СКО суммарного дрейфа судна.

При $\frac{L_c}{B_c} = 6$ и $\sigma_c = 4,45$ по табл. 3 [3, с. 165] определим $\sigma_B = 0,46B_c = 0,46 \cdot 48,3 = 22,22$ м.

Суммарное математическое ожидание изменчивости параметров движения судна составит

$$\frac{m_\Sigma}{B_c} = \frac{L_c}{B_A} \sin m_c + \cos m_c + m_{\Delta x}. \quad (5)$$

На основании формулы (4) дисперсия составит

$$\sigma_B^2 = \left(B_c \cdot \frac{\sigma_c}{57,3^\circ} \left| \frac{L_c}{B_c} \cos C - \sin C \right| \right)^2. \quad (6)$$

Полученные результаты позволяют оценить вероятность свершения событий изменения суммарной маневренной полосы в пределах допустимой ширины судового хода [3, с. 166]:

$$P\{a_1 < x < a_2\} = \Phi\left(\frac{a_2 - \mu_\Sigma}{\sigma_\Sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a_1 - \mu_\Sigma}{\sigma_\Sigma}\right), \quad (7)$$

где a_1, a_2 – границы габаритов судового хода; x – случайная величина ширины маневренной полосы движения судна; Φ – функция Лапласа.

На основании результатов табл. 1 $m_{\Delta x} = 4,64$ м; $\sigma_{\Delta x} = 18,15$ м; $m_c = 0,27^\circ$, $\sigma_c = 4,45^\circ$.

По формуле (1) определяем $m_\Sigma = m_{\Delta x} + m_B = 4,64 + 51,68 = 56,32$ м.

По формуле (2) находим $\sigma_\Sigma^2 = \sigma_{\Delta x}^2 + \sigma_B^2$ отсюда $\sigma_\Sigma = \sqrt{18,15^2 + 22,22^2} = \sqrt{823,15509} = 28,69$ м.

Тогда значение вероятности безопасного прохода узкости при допустимой ширине составит:
– для первого колена (190 м):

$$2\Phi\left(\frac{a - m_\Sigma}{\sigma_\Sigma}\right) = 2\Phi\left(\frac{190 - 56,32}{28,69}\right) = 2\Phi\left(\frac{133,68}{28,69}\right) = 2\Phi(4,659);$$

– для второго колена (180 м):

$$2\Phi\left(\frac{a - m_\Sigma}{\sigma_\Sigma}\right) = 2\Phi\left(\frac{180 - 56,32}{28,69}\right) = 2\Phi\left(\frac{123,68}{28,69}\right) = 2\Phi(4,311);$$

– для третьего колена (230 м):

$$2\Phi\left(\frac{a - m_\Sigma}{\sigma_\Sigma}\right) = 2\Phi\left(\frac{230 - 56,32}{28,69}\right) = 2\Phi\left(\frac{173,68}{28,69}\right) = 2\Phi(6,054);$$

– для входных ворот (120 м):

$$2\Phi\left(\frac{a-m_{\Sigma}}{\sigma_{\Sigma}}\right) = 2\Phi\left(\frac{120-56,32}{28,69}\right) = 2\Phi\left(\frac{63,68}{28,69}\right) = 2\Phi(2,22).$$

В табл. 3 [2, с. 374] находятся значения функции Лапласа $\Phi(2,22) = 0,4868$, для $2\Phi(2,22) = 0,9736$. Следовательно, значение навигационного риска при проходе входных ворот шириной 120 м танкером с шириной корпуса 48,3 м составит $1 - 0,9736 = 0,0264 = 2,64 \cdot 10^{-2}$. При движении танкера по первому, второму и третьему колену шириной 190, 180 и 230 м соответственно вероятность касания кромки фарватера стремится к нулю.

Выводы

Выбраны основные навигационные параметры, характеризующие положение судна относительно кромок фарватера.

На примере подходного фарватера к п. Высок определены навигационные риски буксировки танкера длиной 248 м и шириной 48,3 м при различных навигационных условиях

Список литературы

1. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: КНОРУС, 2010. – 342 с.
2. *Абезгауз Г. Г.* Справочник по вероятностным расчетам / Г. Г. Абезгауз, А. П. Тронь, Ю. Н. Копенкин, И. А. Коровина. – М.: Воениздат, 1970. – 560 с.
3. *Некрасов С. Н.* Оценка навигационных рисков при проектировании Ново-Адмиралтейского моста / С. Н. Некрасов, Ю. Г. Андреев // Журнал университета водных коммуникаций. – СПб.: СПГУВК. – 2012. – Вып. 2. – С. 163–167.
4. *Некрасов С. Н.* Определение навигационных рисков при имитационном моделировании управления судном при проходе узкости / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – Вып. 1 (23). – С. 34–36.
5. *Катенин В. А.* Навигационно-гидрографическое обеспечение судоходства на внутренних водных путях: произв.-практ. изд. / В. А. Катенин, А. В. Зернов, Г. Г. Фадеев. – М.: Моркнига, 2010. – 344 с.
6. *Груздев Н. М.* Математическая обработка и анализ навигационной информации: учебник / Н. М. Груздев. – М.: Воениздат, 1979. – 222 с.