



Изолиния границы зоны навигационной безопасности судна



Максим ГАРАЩЕНКО

Maxim A. GARASHCHENKO

Isoline of the Border of Navigation Safety Zone of a Vessel

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 22)

Профилактика большинства аварийных ситуаций в навигации основана на соблюдении определённой дистанции между судами, которая позволяет своевременно предпринимать предупредительные меры, чтобы избежать контакта. Создаваемое таким образом условное пространство страховочных дистанций формирует зону навигационной безопасности. В статье даны универсальное концептуальное определение такой зоны, обобщённая структурная классификация факторов, влияющих на её размеры и форму, характер изолинейной зональной границы. Вводятся понятия изоасфалии как идеализированной безопасной границы, а также изоасфалической поверхности, формирующей идеализированную безопасную область вокруг судна. На основе теории множеств выводится вариативный закон изменения кусочных функций, описывающих асимметричное относительно диаметральной плоскости судна безопасное пространство. Полученное выражение позволяет идентифицировать границу асимметричной эллиптической зоны навигационной безопасности.

Ключевые слова: морские суда, навигационная безопасность, идеализированная модель, изолинейная граница, изоасфалия, изоасфалическая поверхность, асимметричная эллиптическая зона, теория множеств, вариативный закон.

Гаращенко Максим Анатольевич – аспирант кафедры судовождения Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова, третий помощник капитана, ООО «СКФ Менеджмент Сервисиз», Новороссийск, Россия.

При решении основного комплекса задач, связанных с обеспечением безопасности мореплавания, судно всегда выдерживает требуемую дистанцию между другими подвижными и стационарными объектами. Такая дистанция нужна для сохранения заданного уровня навигационной безопасности, а также получения времени на ответные действия в критический момент. Совокупность точек пространства, соответствующих страховым дистанциям на всех курсовых углах, образует вокруг судна зону определённой формы и размеров, именуемую, согласно работе [3], «зоной навигационной безопасности (ЗНБ)». Отдельными авторами в ходе концептуального развития понятия ЗНБ предлагались различные трактовки термина [1–5, 8–14].

Нашей концепции изолинейности более близок вариант, который описывает границу применительно к любому методу ЗНБ.

Зона навигационной безопасности – это пространство вокруг судна, образованное систематизированным множеством точек дистанций на всех курсовых углах, при этом граница рисков представляет собой кривую равных значений (изолинию) степени безопасности плавания

Факторы влияния на размеры и форму зоны навигационной безопасности

№ п/п	Факторы	Критерии оценки
1	Навигационные	<ul style="list-style-type: none"> • технические средства и методы судовождения; • связь с другой изолинией; • район и режим плавания; • особенности плавания в зонах повышенного риска (High Risk Area); • выполняемые экипажем судна навигационные операции (постановка на якорь, швартовка, операции «судно–судно», операции с вертолётom); • лоцманская проводка; • глубины; • воздушное пространство; • количество и местоположение других объектов.
2	Гидрометеорологические	<ul style="list-style-type: none"> • ветер; • волнение; • течение; • приливоно-отливные явления; • плотность морской среды; • штормовые условия; • ледовая обстановка; • состояние видимости.
3	Нормативно-правовые	<ul style="list-style-type: none"> • МППСС-72; • портовые СУДС; • требования международных конвенций и циркуляров; • руководящие документы государств, касающиеся обеспечения безопасности плавания; • требования системы управления безопасностью (СУБ); • наставления капитана по несению ходовой вахты.
4	Статические	<ul style="list-style-type: none"> • параметры судна и других объектов-целей; • постоянные силы и моменты сил (вес судна, силы поддержания).
5	Кинематические	<ul style="list-style-type: none"> • курс судна; • скорость, ускорение и замедление судна; • относительная скорость сближения.
6	Динамические	<ul style="list-style-type: none"> • манёвренные и инерционные характеристики судна; • движущие, внешние и временные – переменные – силы и моменты сил, действующих на судно в процессе эксплуатации.
7	Психологические	<ul style="list-style-type: none"> • практический опыт судоводителя; • степень обобщённости и объективности оценки существующей навигационной ситуации; • коммуникационная взаимосвязь с другими судами и объектами; • организация работы мостика.

данного судна при контакте с любыми объектами.

Результирующее влияние на размерность и конфигурацию такого пространства оказывает комплекс факторов и критериев, выявленных на основе многолетних исследований [1–5, 8–14], их количественной оценки, которые могут быть дополнены анализом практических навыков, полученных в процессе реальной эксплуатации судов. Их обобщённая структурная классификация представлена в таблице 1.

Очевидно, что при совокупном учёте всех факторов граница зоны навигационной безопасности будет трансформироваться в чрезвычайно сложную фигуру и, соответственно, сложное математическое описание. Это объясняется следующими основными аспектами:

- навигационные, гидрометеорологические, нормативно-правовые и статические факторы носят причинный характер, являются наблюдаемыми и обуславливают влияние следственных динамических воздействий на судно, а также степень изменения кинематических факторов для поддержания заданного уровня безопасности в зависимости от существующей навигационной ситуации;

- переменные силы и моменты, выступающие критериями оценки динамических внешних воздействий, являются ненаблюдаемыми и могут быть выявлены при исключении из величины результирующего воздействия аналитически сформулированных его известных составляющих;

- причинные гидрометеорологические и, как следствие, динамические воздейст-



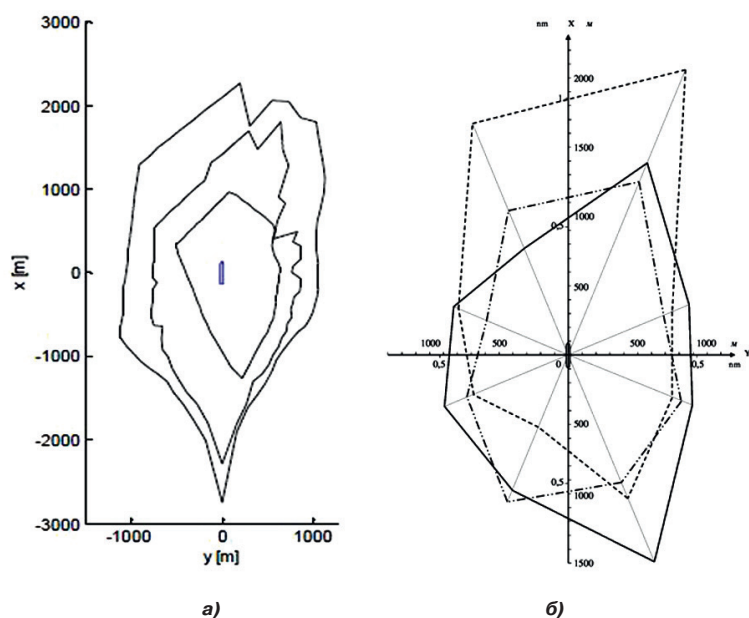


Рис. 1. ЗНБ сложной формы.

вия на судно могут принимать регулярный или нерегулярный характер, проявляя при этом стохастические и скачкообразные свойства;

- значительная часть приведённых факторов является неуправляемой (за исключением курса и скорости судна; к косвенно управляемым можно отнести устойчивость судна на курсе, поворотливость при данных условиях плавания, плотность движения судов при наличии адекватной системы управления (СУДС) [1]);

- психологические факторы являются критериями совокупной оценки причинно-следственных воздействий на судно в процессе его эксплуатации при наличии судоводителя, однако в силу его психофизического и эмоционального состояния не всегда может быть объективно определена степень безопасности судна в преобладающей ситуации;

- критерии оценки психологических и нормативно-правовых факторов не обладают в достаточной мере чёткой и объективной регламентацией, принимая рекомендательный или вариативный характер;

- распределение действующих сил и моментов вдоль длины корпуса судна неравномерно.

Приведённые аспекты использовались при моделировании ЗНБ крупнотоннаж-

ных судов при следовании в ограниченном районе плавания (рис. 1а) [12] и помогли определить вероятностные области, рекомендуемые танкерам в зависимости от преобладающей ситуации (рис. 1б) [13].

Границы предложенных на рис. 1 моделей демонстрируют достаточно трудоёмкие в математическом описании фигуры. Для вероятностных областей существует разнообразие вариаций формализации при регулярно возникающих новых ситуациях, что усложняет оценку обстановки и увеличивает время принятия решения.

Таким образом, фундаментальным условием, соответствием которому позволит наиболее эффективно решать задачи по обеспечению безопасности плавания, является максимальная соотносённость конфигурации ЗНБ с топологическим критерием: простотой математического описания и геометрического представления границы [3].

Отсюда ещё одно основополагающее определение:

Формализованной моделью зоны навигационной безопасности может считаться такая теоретическая модель, форма и параметры которой позволяют одновременно максимально учесть известные факторы влияния, сообразуясь при этом с топологическим критерием.

Наличие на настоящий момент многообразия форм и параметров моделей ЗНБ объясняется особенностями в подходах, методах, степени объективности исследователей при систематизации, оценке и учёте факторов, влияющих на конфигурацию зоны безопасности. Однако все эти подходы обобщаются тенденцией к выявлению и моделированию формализованной границы безопасного пространства вокруг судна.

Формализованной границе ЗНБ предлагается дать обобщённо-абстрактное определение «изоасфалия»:

Изоасфалия (от греч. ισος – равный, $\alpha\sigma\acute{\alpha}\lambda\epsilon\iota\alpha$ – безопасность) – кривая, формирующая границу зоны навигационной безопасности и представляющая собой линию равных значений степени безопасности.

Закономерное производное от этого определения:

Изоасфалическая поверхность – область, лимитированная изоасфалией (рис. 2).

В работе [3] предлагается формирование эллиптической ЗНБ, наилучшим образом обобщающей все другие формы безопасного пространства вокруг судна, с законом смещения центра в зависимости от кинематических характеристик, манёвренных качеств судна, ситуаций и условий плавания с целью формализации её границы (рис. 3). Однако моделирование нецентрированной зоны навигационной безопасности может затруднить оценку ситуации и вызвать дополнительную сложность при идентификации величины смещения судна относительно центра безопасного пространства.

В данном случае для обобщения и универсализации интересующих нас моделей берётся вариант асимметричной центрированной эллиптической ЗНБ. Формализация её модели предполагается путём приближения законов адаптации границы к системе «судно–модель ЗНБ» при нахождении судна в центре изоасфалической поверхности.

Для выявления её границы, базирующейся на систематизации множества элементов, к которым относятся точки безопасных дистанций на всех курсовых углах, целесообразно воспользоваться функцией

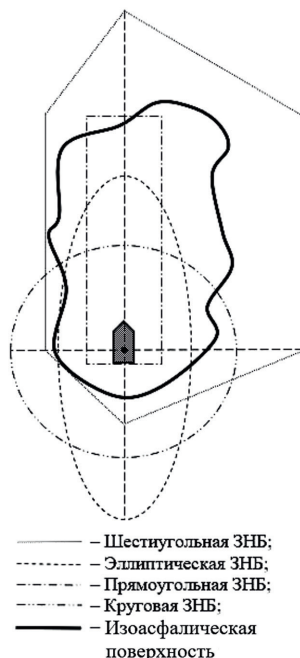


Рис. 2. Концептуальное представление об абстрактной изоасфалической поверхности.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{ЗНБ}} = \{p_0, p_1, \dots, p_n, p_{n+1}, \dots, p_n\}; \quad n \rightarrow \infty; \\ r_i = r(q_i); \quad i \in [0; n], \end{array} \right. \quad (1)$$

где $P_{\text{ЗНБ}}$ – бесконечное ограниченное множество точек безопасных дистанций, образующих границу ЗНБ; r_i – i -я дистанция от центра управления судном до точки, принадлежащей границе ЗНБ, соответствующая i -й дистанции; q_i – курсовой угол i -й дистанции, град; n – число элементов системы ЗНБ.

Очевидно, что в общем виде i -я дистанция эллиптической ЗНБ, симметричной относительно главных осей, является её радиус-вектором, определяемым на соответствующем курсовом угле из выражения [7]:

$$r(q_i) = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 q_i + b^2 \cos^2 q_i}}, \quad (2)$$

где a, b – большая и малая полуоси эллипса ЗНБ, м.

Для идентификации границы асимметричной эллиптической ЗНБ модифицируем функцию (2), оценив границу безопасного пространства вокруг судна с точки зрения теории множеств [6]. На рис. 4 видно, что функция для описания бесконечного ограниченного множества точек



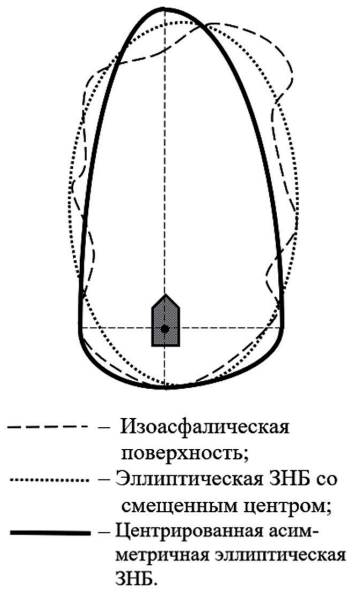


Рис. 3. Вариации идеализированных поверхностей ЗНБ.

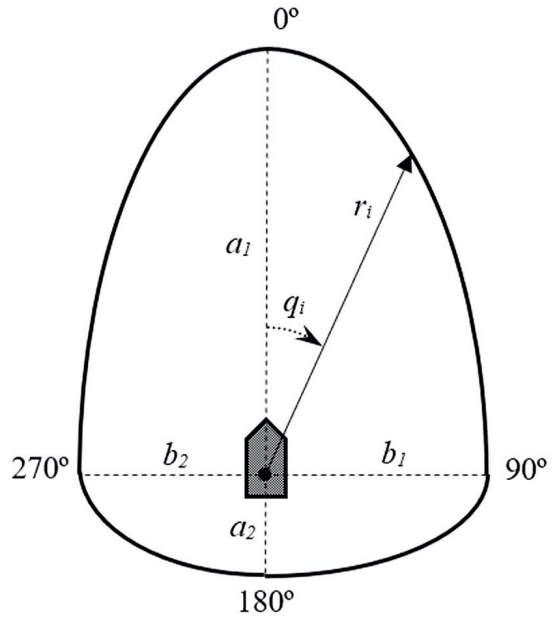


Рис. 4. Модель асимметричной эллиптической ЗНБ.

безопасных дистанций $R_{ЗНБ}$ задаётся кусочно: различными комбинациями функции (2) на определённых секторных интервалах, ограниченных продольными и траверзными полуосями:

$$r(q_i) = \begin{cases} \frac{a_1 b_1}{\sqrt{a_1^2 \sin^2 q_i + b_1^2 \cos^2 q_i}}; & q_i \in [0^\circ; 90^\circ) \\ \frac{a_2 b_1}{\sqrt{a_2^2 \sin^2 q_i + b_1^2 \cos^2 q_i}}; & q_i \in [90^\circ; 180^\circ) \\ \frac{a_2 b_2}{\sqrt{a_2^2 \sin^2 q_i + b_2^2 \cos^2 q_i}}; & q_i \in [180^\circ; 270^\circ) \\ \frac{a_1 b_2}{\sqrt{a_1^2 \sin^2 q_i + b_2^2 \cos^2 q_i}}; & q_i \in [270^\circ; 360^\circ), \end{cases} \quad (3)$$

где $a_{1,2}, b_{1,2}$ – вариации продольных и траверзных полуосей при асимметричности эллипса ЗНБ, м.

Сообразя элементы полуосей эллиптической ЗНБ, граница которой описана функцией (2), с аналогичными элементами кусочных функций (3), определим секторные интервалы вариативного влияния элементов a_1, a_2, b_1, b_2 на формализацию границы зоны:

$$a = \begin{cases} a_1; & q_i \in [270^\circ; 360^\circ) \cup [0^\circ; 90^\circ) \\ a_2; & q_i \in [90^\circ; 270^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

$$b = \begin{cases} b_1; & q_i \in [0^\circ; 180^\circ) \\ b_2; & q_i \in [180^\circ; 360^\circ). \end{cases}$$

Применение кусочно-постоянной функции позволяет посредством анализа выражений (2)–(4) сформулировать вариативный закон для определения параметров полуосей асимметричной эллиптической ЗНБ:

$$a = \frac{a_1(1 + \Delta a) + a_2(1 - \Delta a)}{2}$$

$$\Delta a = \begin{cases} 1, & q_i \in [270^\circ; 360^\circ) \cup [0^\circ; 90^\circ) \\ -1, & q_i \in [90^\circ; 270^\circ) \end{cases}$$

$$b = \frac{b_1(1 + \Delta b) + b_2(1 - \Delta b)}{2}$$

$$\Delta b = \begin{cases} 1, & q_i \in [0^\circ; 180^\circ) \\ -1, & q_i \in [180^\circ; 360^\circ), \end{cases} \quad (5)$$

где $\Delta a, \Delta b$ – вариативные коэффициенты.

В итоге выводим кусочно-непрерывную функцию, позволяющую описать границу асимметричной эллиптической ЗНБ, частным вариантом которой является функция (2) (см. формулу 6):

$$r(q_i) = \frac{[a_1(1+\Delta a) + a_2(1-\Delta a)] \cdot [b_1(1+\Delta b) + b_2(1-\Delta b)]}{2\sqrt{[a_1(1+\Delta a)\sin q_i + a_2(1-\Delta a)\sin q_i]^2 + [b_1(1+\Delta b)\cos q_i + b_2(1-\Delta b)\cos q_i]^2}}. \quad (6)$$

Полученное аналитическое выражение (6) помогает реализовать метод идентификации границы асимметричной эллиптической ЗНБ посредством использования неэквивалентных друг другу продольных и траверзных полуосей эллипса.

ВЫВОДЫ

Предложенный в статье подход позволяет обобщить способы формализованного представления границы ЗНБ [3], поскольку наряду с рациональным распределением безопасного пространства вокруг судна [1] появляется возможность интерпретировать конфигурации симметричной эллиптической или круговой зоны навигационной безопасности. Несмотря на асимметричные свойства, судно располагается в центре изоасфалической поверхности. Соответственно исключается необходимость учёта его смещения относительно центра ЗНБ, а все нецентрированные или секторные варианты [9, 11] могут быть заданы с использованием выражения (6) «методиками адаптации границы» посредством приращения моделируемых параметров. Для идентификации параметров продольных и траверзных полуосей применительно к крупнотоннажным судам на основе табличных данных о водоизмещении можно применить методику, предложенную в работе [4].

Таким образом, по результатам выполненной работы выделим цели и направления дальнейших исследований:

- формализация факторов влияния на размеры и форму зоны навигационной безопасности (см. таблицу 1) с целью их математической адаптации к системе «судно–ЗНБ»;
- выявление методик идентификации параметров продольных и траверзных полуосей, а также радиусов для отдельных участков асимметричной эллиптической ЗНБ;
- комплексное моделирование асимметричной эллиптической ЗНБ;

- адаптация границы безопасных дистанций к композиционной системе существующей ситуации с учётом влияния предельного количества факторов и критериев их оценки на параметры и конечную конфигурацию ЗНБ, которая будет максимально удовлетворять её определению как изоасфалической поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васьков А. С. Методы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности. – Новороссийск: НГМА, 1997. – 248 с.
2. Васьков В. А., Мироненко А. А. Технологии множественного анализа формирования навигационной обстановки и маршрута судна // Известия вузов. Сев.-Кавказ. регион. Технические науки: Проблемы водного транспорта. – 2008. – Спецвыпуск. – С. 35–38.
3. Гарашенко М. А., Васьков В. А. Способы представления зоны навигационной безопасности судна // Эксплуатация морского транспорта. – 2017. – № 3. – С. 38–44.
4. Гарашенко М. А., Мельник П. В. Методика адаптации параметров зоны навигационной безопасности на основе данных о водоизмещении судна // Транспортное дело России. – 2017. – № 4. – С. 119–125.
5. Лентарев А. А. Развитие концепции зоны навигационной безопасности // Вестник Морского государственного университета. – 2011. – Вып. 50. – С. 75–86.
6. Кытманов А. М., Лейнартас Е. К., Лукин В. Н. и др. Математический анализ: Учеб. пособие. – Красноярск: СФУ, 2011. – 476 с.
7. Мореходные таблицы (МТ-2000). – СПб.: ГУНиО, 2002. – 575 с.
8. Погосов С. Г., Борисов Е. В., Королева В. П. Обеспечение безопасности движения судов в портовых водах // Морской транспорт. Серия «Судовождение и связь» ЦБНТИ ММФ. – 1974. – 42 с.
9. Coldwell T. G. Marine traffic behaviour in restricted waters / Journal of Navigation, 1983, T. 36(3), pp. 430–444.
10. Fujii Y., Seki M., Tanaka K., Yamada K., Watanabe K. Effective areas of ships // Journal of Nautical Society of Japan, 1966, № 35, pp. 71–76.
11. Goodwin E. M. A statistical study of ship domains / Journal of Navigation, 1975, Vol. 28, Iss. 3, 28, pp. 328–344.
12. Gućma L., Marcjan K. Examination of ships passing distances distribution in the coastal waters in order to build a ship probabilistic domain // Maritime University of Szczecin, Scientific Journals, 2012, 32(104), z. 2, pp. 34–40.
13. Pietrzykowski Z., Wielgosz M., Siemianowicz M. Ship domain in the restricted area – simulation research // Maritime University of Szczecin, Scientific Journals, 2012, 32(104) z. 2, pp. 152–156.
14. Szlapczynski R., Szlapczynska J. Review of ship safety domains: Models and applications // Ocean Engineering, 2017, Vol. 145, pp. 277–289. ●

Координаты автора: **Гарашенко М. А.** – mag1993.08.24@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.01.2018, принята к публикации 27.02.2018.



ISOLINE OF THE BORDER OF NAVIGATION SAFETY ZONE OF A VESSEL

Garashchenko, Maxim A., Admiral Ushakov Maritime State University, LLC SKF Management Services, Novorossiysk, Russia.

ABSTRACT

Prevention of the majority of emergency situations in navigation is based on observing a certain distance between vessels, which allows timely taking precautionary measures in order to avoid contact. The thus created conditional space of safety distances forms a navigation safety zone. The article gives a universal conceptual definition of such a zone, a generalized structural classification of factors affecting its size and shape, the nature of

the isolinear zonal boundary. The concepts of isoasphalia as an idealized safe boundary, as well as an isoasphalic surface forming an idealized safe area around the vessel are introduced. On the basis of set theory, a variational law of variation of piecewise functions describing a safe space asymmetric with respect to the vessel's diametric plane is derived. The resulting expression allows us to identify the boundary of an asymmetric elliptical navigation safety zone.

Keywords: sea vessels, navigation safety, idealized model, isoline boundary, isoasphalia, isoasphalic surface, asymmetric elliptic zone, set theory, variational law.

Background. When solving the main complex of tasks related to ensuring safety of navigation, a vessel always maintains the required distance between other mobile and stationary objects. This distance is necessary for maintaining a given level of navigation safety, as well as obtaining time for response actions at a critical time. The set of points of space corresponding to insurance distances at all course angles forms around the vessel a zone of a certain shape and size, called, according to [3], a «navigation safety zone (NSZ)». Some authors

during the conceptual development of the notion of the NSZ offered various interpretations of the term [1–5, 8–14].

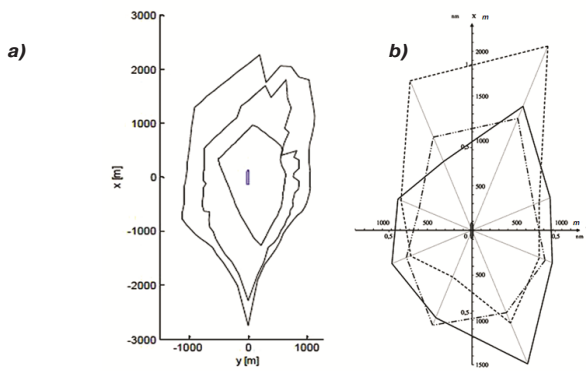
Objective. The objective of the author is to consider issues related to the isoline of the border of navigation safety zone of a vessel.

Methods. The author uses general scientific and engineering methods, set theory, variation law, modeling, comparative analysis, and mathematical apparatus.

Table 1

Factors affecting the size and shape of the navigation safety zone

No.	Factors	Evaluation criteria
1	Navigational	<ul style="list-style-type: none"> • technical means and methods of navigation; • relationship with another isoline; • area and mode of navigation; • features of navigation in high risk areas (High Risk Area); • navigation operations performed by the vessel's crew (anchoring, mooring, ship-to-ship operations, helicopter operations); • pilotage; • depth; • air space; • number and location of other objects.
2	Hydrometeorological	<ul style="list-style-type: none"> • wind; • sea motions, waves; • current; • tidal phenomena; • density of the marine environment; • storm conditions; • ice conditions; • state of visibility.
3	Regulatory	<ul style="list-style-type: none"> • COLREGS-1972 (IRPCS) • port VTS; • requirements of international conventions and circulars; • guidance documents of states concerning the safety of navigation; • requirements of the safety management system (SMS); • the captain's instructions for carrying watch.
4	Static	<ul style="list-style-type: none"> • parameters of the vessel and other targets; • constant forces and moments of force (weight of the vessel, support forces).
5	Kinematic	<ul style="list-style-type: none"> • vessels' heading; • speed, acceleration and deceleration of the vessel; • relative speed of approach.
6	Dynamic	<ul style="list-style-type: none"> • maneuvering and inertial characteristics of the vessel; • driving, external and temporary – variables – forces and moments of forces acting on the vessel during operation.
7	Psychological	<ul style="list-style-type: none"> • boatmaster's practical experience; • degree of generality and objectivity of assessment of the existing navigational situation; • communication relationship with other vessels and facilities; • organization of the work of the bridge.



Pic. 1. NSZ of a complex shape.

Results. Our concept of isolinearity is closer to the variant that describes the boundary as applied to any method of NSZ.

The navigation safety zone is the space around the vessel formed by a systematized set of distance points at all course angles, with the risk boundary representing the curve of equal values (isoline) of the safety level of the vessel's navigation when it comes into contact with any objects.

The resultant influence on dimension and configuration of such space is provided by a set of factors and criteria, identified on the basis of many years of research [1–5, 8–14], their quantification, which can be supplemented by an analysis of practical skills obtained in the process of real operation of vessels. Their generalized structural classification is presented in Table 1.

Obviously, with the combined consideration of all factors, the boundary of the navigation safety zone will be transformed into an extremely complex figure, and, accordingly, a complex mathematical description. This is due to the following main aspects:

- navigational, hydrometeorological, regulatory and static factors are causal, are observable and cause the impact of the causal dynamic impacts on the vessel, as well as the degree to which the kinematic factors change to maintain a given level of safety, depending on the existing navigational situation;
- variable forces and moments that are the criteria for estimating dynamic external influences are unobservable and can be detected by excluding from the magnitude of the resulting effect of analytically formulated known components;
- causal hydrometeorological and, as a consequence, dynamic effects on the vessel can take a regular or irregular character, while exhibiting stochastic and intermittent properties;
- a significant part of the factors quoted is unmanageable (with the exception of the course and speed of the vessel, while the steadiness of the vessel on the course, the turning ability under the given conditions of navigation, the traffic density of ships with an adequate control system (VTS) [1] can be implicitly controlled);
- psychological factors are the criteria for cumulative assessment of the cause and effect impacts on the vessel during its operation in the presence of the boatmaster, however, due to his psychophysical and emotional state, the degree of vessel safety in the prevailing situation cannot always be objectively determined;
- criteria for assessing psychological and regulatory factors do not have sufficient clear and objective regulation, taking a recommendatory or variable character;

- distribution of the acting forces and moments along the length of the hull is uneven.

The above aspects were used in the simulation of NSZ of large-tonnage vessels following a limited navigation area (Pic. 1a) [12] and probabilistic areas recommended to tankers depending on the prevailing situation (Pic. 1b) [13].

The boundaries of models proposed in Pic. 1 demonstrate figures, which are quite laborious in the mathematical description. For probabilistic domains, there is a variety of formalization variations with regularly occurring new situations, complicating assessment of the situation, and increasing decision-making time.

Thus, the maximal correlation of the configuration of NSZ with the topological criterion which is the simplicity of the mathematical description and the geometrical representation of the boundary, is the fundamental condition, the compliance with which will allow most effectively to solve the problems of securing navigation [3].

Hence one more fundamental definition:

A formalized model of the navigation safety zone can be such a theoretical model, the form and parameters of which allow one to take into account as much as possible the known influencing factors, being consistent with the topological criterion.

Presently, the variety of forms and parameters of NSZ models is explained by the peculiarities in the approaches, methods, the degree of objectivity of researchers in systematizing, evaluating and recording factors that affect the configuration of the safety zone. However, all these approaches are generalized by the tendency to identify and model the formalized boundary of the safe space around the vessel.

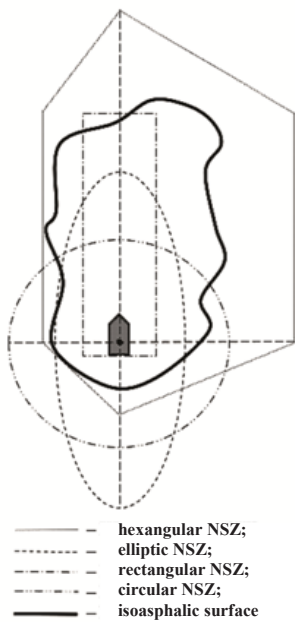
It is offered to give to the formalized boundary of NSZ a generalized abstract definition of «isoasphalia»: Isoasphalia (from Greek ἴσος – equal, ασφάλεια – safety) – a curve that forms the boundary of the navigation safety zone and represents a line of equal values of the degree of safety.

The natural derivative of this definition:

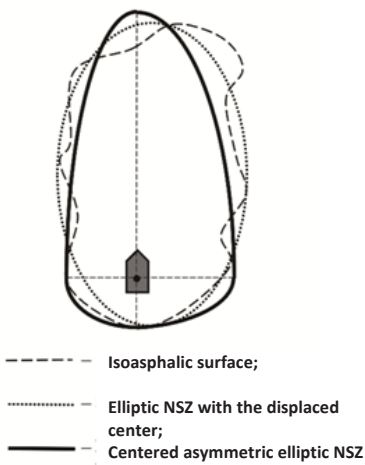
Isoasphalic surface – region limited by isoasphalia (Pic. 2).

The paper [3] proposes the formation of an elliptic NSZ, which best generalizes all other forms of safe space around the vessel, with the law of center displacement depending on the kinematic characteristics, maneuverability of the vessel, situations and conditions of navigation with the aim of formalizing its boundary (Pic. 3). However, modeling a non-centered navigation safety zone can make it difficult to assess the situation and cause additional complexity in identifying the

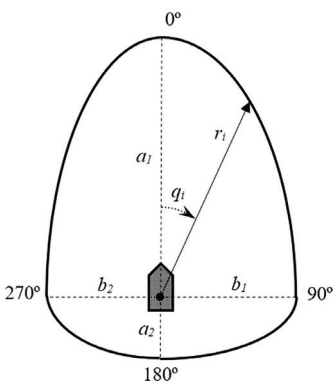




Pic. 2. Conceptual imaging of an abstract isoasphalic surface.



Pic. 3. Variations of idealized NSZ surfaces.



Pic. 4. Model of asymmetric elliptic NSZ.

vessel's displacement relative to the center of the safe space.

In this case, a variant of the asymmetric centered elliptic NSZ is used to generalize and universalize the models of interest to us. The formalization of its model is assumed by approximating the laws of adaptation of the border to the «vessel-model of NSZ» system when the vessel is in the center of the isoasphalic surface.

To identify its boundary, based on systematization of the set of elements, which include points of safe distances at all course angles, it is advisable to use the function

$$\begin{cases} P_{NSZ} = \{p_0, p_1, \dots, p_i, p_{i+1}, \dots, p_n\}; & n \rightarrow \infty; \\ r_i = r(q_i); & i \in [0; n], \end{cases} \quad (1)$$

where P_{NSZ} is an infinite limited set of points of safe distances forming the boundary of NSZ; r_i – i -th distance from the control center of the vessel to the point belonging to NSZ boundary, corresponding to the i -th distance; q_i – heading angle of the i -th distance, degrees; n – number of elements of NSZ system.

Obviously, in general, the i -th distance of an elliptic NSZ, symmetric with respect to the principal axes, is its radius vector, determined from the expression [7] on the corresponding heading angle:

$$r(q_i) = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 q_i + b^2 \cos^2 q_i}}, \quad (2)$$

where a, b are large and small semi-axes of the ellipse of NSZ, m .

To identify the boundary of an asymmetric elliptic NSZ, we modify function (2) by estimating the boundary of the safe space around the vessel from the point of view of set theory [6]. Pic. 4 shows that the function for describing an infinite bounded set of points of safe distances P_{NSZ} is given piecewise: by various combinations of the function (2) on certain sector intervals bounded by longitudinal and traverse semi-axes:

$$r(q_i) = \begin{cases} \frac{a_1 b_1}{\sqrt{a_1^2 \sin^2 q_i + b_1^2 \cos^2 q_i}}; & q_i \in [0^\circ; 90^\circ) \\ \frac{a_2 b_1}{\sqrt{a_2^2 \sin^2 q_i + b_1^2 \cos^2 q_i}}; & q_i \in [90^\circ; 180^\circ) \\ \frac{a_2 b_2}{\sqrt{a_2^2 \sin^2 q_i + b_2^2 \cos^2 q_i}}; & q_i \in [180^\circ; 270^\circ) \\ \frac{a_1 b_2}{\sqrt{a_1^2 \sin^2 q_i + b_2^2 \cos^2 q_i}}; & q_i \in [270^\circ; 360^\circ), \end{cases} \quad (3)$$

where $a_{1,2}, b_{1,2}$ are variations of longitudinal and traverse semi-axes with the asymmetry of NSZ ellipse, m .

Correlating the elements of the semi-axes of the elliptic NSZ, the boundary of which is described by the function (2), with the analogous elements of the piecewise functions (3), we determine the sectoral intervals of the variational influence of the elements a_1, a_2, b_1, b_2 on the formalization of the zone boundary:

$$\begin{cases} a = \begin{cases} a_1; & q_i \in [270^\circ; 360^\circ) \cup [0^\circ; 90^\circ) \\ a_2; & q_i \in [90^\circ; 270^\circ) \end{cases} \\ b = \begin{cases} b_1; & q_i \in [0^\circ; 180^\circ) \\ b_2; & q_i \in [180^\circ; 360^\circ). \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

The use of a piecewise constant function allows us, through the analysis of expressions (2)–(4), to

$$r(q_i) = \frac{[a_1(1+\Delta a) + a_2(1-\Delta a)] \cdot [b_1(1+\Delta b) + b_2(1-\Delta b)]}{2\sqrt{[a_1(1+\Delta a)\sin q_i + a_2(1-\Delta a)\sin q_i]^2 + [b_1(1+\Delta b)\cos q_i + b_2(1-\Delta b)\cos q_i]^2}} \quad (6)$$

formulate a variational law for determining the parameters of the semi-axes of an asymmetric elliptic NSZ:

$$\begin{aligned} a &= \frac{a_1(1+\Delta a) + a_2(1-\Delta a)}{2} \\ \Delta a &= \begin{cases} 1, & q_i \in [270^\circ; 360^\circ) \cup [0^\circ; 90^\circ) \\ -1, & q_i \in [90^\circ; 270^\circ) \end{cases} \\ b &= \frac{b_1(1+\Delta b) + b_2(1-\Delta b)}{2} \\ \Delta b &= \begin{cases} 1, & q_i \in [0^\circ; 180^\circ) \\ -1, & q_i \in [180^\circ; 360^\circ) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

where Δa , Δb are variational coefficients.

As a result, we derive a piecewise-continuous function that allows us to describe the boundary of an asymmetric elliptic NSZ, a particular variant of which is the function (2) (6).

The obtained analytical expression (6) helps to realize the method of identifying the boundary of an asymmetric elliptic NSZ by using longitudinal and traverse semi-axes of an ellipse that are not equivalent to one another.

Conclusions. The approach proposed in the article allows us to generalize the methods of formalized representation of NSZ boundary [3]. Since along with the rational distribution of safe space around the vessel [1], it becomes possible to interpret the configurations of a symmetric elliptic or circular navigation safety zone. Despite the asymmetric properties, the vessel is located in the center of the isoasphalic surface. Accordingly, it is not necessary to take into account its displacement relative to the center of NSZ, and all non-centered or sector variants [9, 11] can be specified using the expression (6) «border adaptation techniques» by incrementing the model parameters. To identify the parameters of longitudinal and traverse semi-axes in relation to large-capacity vessels, based on tabulated data on displacement, the technique proposed in [4] can be applied.

Thus, based on the results of the work done, we will outline the goals and directions for further research:

- formalization of the factors influencing the size and shape of the navigation safety zone (see Table 1) with a view to mathematically adapting them to the «vessel-NSZ» system;
- identification of methods for identifying longitudinal and traverse semi-axes parameters, as well as radii for individual sections of an asymmetric elliptic NSZ;
- complex modeling of asymmetric elliptic NSZ;
- adaptation of the boundary of safe distances to the composite system of the existing situation, taking into account the influence of the limiting number of factors and the criteria for their evaluation on the parameters and final configuration of NSZ, which will

satisfy its definition as an isoasphalic surface as much as possible.

REFERENCES

1. Vaskov, A. S. Methods of controlling vessel movement and configuration of the navigation safety zone [Metody upravleniya dvizheniem sudna i konfiguracii zony navigacionnoj bezopasnosti]. Novorossiysk, NGMA publ., 1997, 248 p.
2. Vaskov, V. A., Mironenko, A. A. Technologies for multiple analysis of formation of the navigational situation and the vessel's route [Tehnologii mnozhestvennogo analiza formirovaniya navigacionnoj obstanovki i marshruta sudna]. Izv. vuzov. Sev.-Kavkaz. region. Tehnicheskie nauki: Problemy vodnogo transporta, 2008, Special issue, pp. 35–38.
3. Garashchenko, M. A., Vaskov, V. A. Methods of representing the navigation safety zone of the vessel [Sposoby predstavleniya zony navigacionnoj bezopasnosti sudna]. Ekspluatatsiya morskogo transporta, 2017, Iss. 3, pp. 38–44.
4. Garashchenko, M. A., Melnik, P. V. Methodology of adaptation of parameters of the navigation safety zone on the basis of data on vessel displacement [Metodika adaptacii parametrov zony navigacionnoj bezopasnosti na osnove dannyh o vodoizmeshhenii sudna]. Transportnoe delo Rossii, 2017, Iss. 4, pp. 119–125.
5. Lentarev, A. A. Development of the concept of the navigation safety zone [Razvitiye koncepcii zony navigacionnoj bezopasnosti]. Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta, 2011, Iss. 50, pp. 75–86.
6. Kytmanov, A. M., Leinartas, E. K., Lukin, V. N. [et al]. Mathematical analysis: Study guide [Matematicheskij analiz: Ucheb. posobie]. Krasnoyarsk, SFU publ., 2011, 476 p.
7. Nautical tables (MT-2000) [Morehodnye tablicy (MT-2000)]. St. Petersburg, GUNiO publ., 2002, 575 p.
8. Pogosov, S. G., Borisov, E. V., Koroleva, V. P. Providing safety of vessel traffic in port waters [Obespechenie bezopasnosti dvizheniya sudov v portovykh vodakh]. Morskoy transport. Seriya: Sudovozhdenie i svyaz' CBNTI MMF, 1974, 42 p.
9. Coldwell, T. G. Marine traffic behaviour in restricted waters. Journal of Navigation, 1983, Vol. 36(3), pp. 430–444.
10. Fujii, Y., Seki, M., Tanaka, K., Yamada, K., Watanabe, K. Effective areas of ships. Journal of Nautical Society of Japan, 1966, Iss. 35, pp. 71–76.
11. Goodwin, E. M. A statistical study of ship domains. Journal of Navigation, 1975, Vol. 28, Iss. 3, pp. 328–344.
12. Gucma, L., Marcan, K. Examination of ships passing distances distribution in the coastal waters in order to build a ship probabilistic domain. Maritime University of Szczecin, Scientific Journals, 2012, 32(104) z. 2, pp. 34–40.
13. Pietrzykowski, Z., Wielgosz, M., Siemianowicz, M. Ship domain in the restricted area – simulation research. Maritime University of Szczecin, Scientific Journals, 2012, 32(104), z. 2, pp. 152–156.
14. Szlupczynski, R., Szlupczynska, J. Review of ship safety domains: Models and applications. Ocean Engineering, 2017, Vol. 145, pp. 277–289. ●

Information about the author:

Garashchenko, Maxim A. – Ph.D. student at the department of Navigation of Admiral Ushakov Maritime State University, third mate of LLC SKF Management Services, Novorossiysk, Russia, mag1993.08.24@mail.ru.

Article received 21.01.2018, accepted 27.02.2018.

