



# 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.*

**П**ри 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"> <li>• технические средства и методы судовождения;</li> <li>• связь с другой изолинией;</li> <li>• район и режим плавания;</li> <li>• особенности плавания в зонах повышенного риска (High Risk Area);</li> <li>• выполняемые экипажем судна навигационные операции (постановка на якорь, швартовка, операции «судно–судно», операции с вертолётom);</li> <li>• лоцманская проводка;</li> <li>• глубины;</li> <li>• воздушное пространство;</li> <li>• количество и местоположение других объектов.</li> </ul>
2	Гидрометеорологические	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ветер;</li> <li>• волнение;</li> <li>• течение;</li> <li>• приливоно-отливные явления;</li> <li>• плотность морской среды;</li> <li>• штормовые условия;</li> <li>• ледовая обстановка;</li> <li>• состояние видимости.</li> </ul>
3	Нормативно-правовые	<ul style="list-style-type: none"> <li>• МППСС-72;</li> <li>• портовые СУДС;</li> <li>• требования международных конвенций и циркуляров;</li> <li>• руководящие документы государств, касающиеся обеспечения безопасности плавания;</li> <li>• требования системы управления безопасностью (СУБ);</li> <li>• наставления капитана по несению ходовой вахты.</li> </ul>
4	Статические	<ul style="list-style-type: none"> <li>• параметры судна и других объектов-целей;</li> <li>• постоянные силы и моменты сил (вес судна, силы поддержания).</li> </ul>
5	Кинематические	<ul style="list-style-type: none"> <li>• курс судна;</li> <li>• скорость, ускорение и замедление судна;</li> <li>• относительная скорость сближения.</li> </ul>
6	Динамические	<ul style="list-style-type: none"> <li>• манёвренные и инерционные характеристики судна;</li> <li>• движущие, внешние и временные – переменные – силы и моменты сил, действующих на судно в процессе эксплуатации.</li> </ul>
7	Психологические	<ul style="list-style-type: none"> <li>• практический опыт судоводителя;</li> <li>• степень обобщённости и объективности оценки существующей навигационной ситуации;</li> <li>• коммуникационная взаимосвязь с другими судами и объектами;</li> <li>• организация работы мостика.</li> </ul>

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-



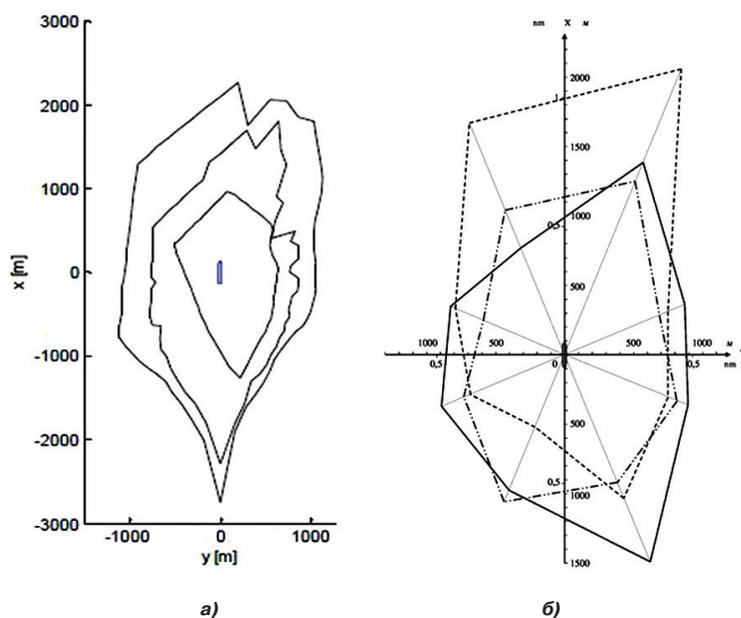


Рис. 1. ЗНБ сложной формы.

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, соответствию 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.  $\text{ισος}$  – 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

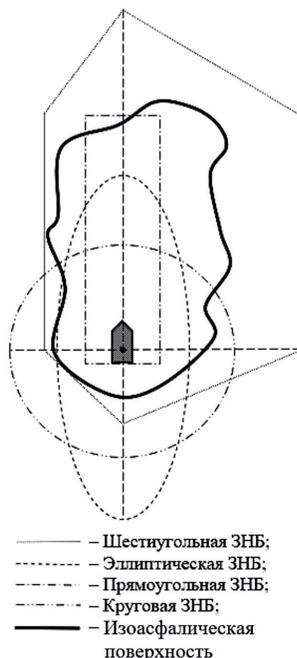


Рис. 2. Концептуальное представление об абстрактной изоасфалической поверхности.

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

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



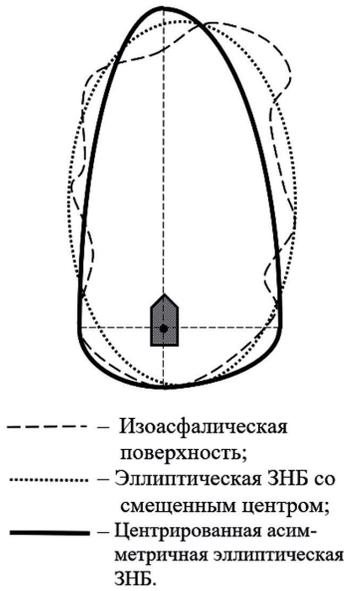


Рис. 3. Вариации идеализированных поверхностей ЗНБ.

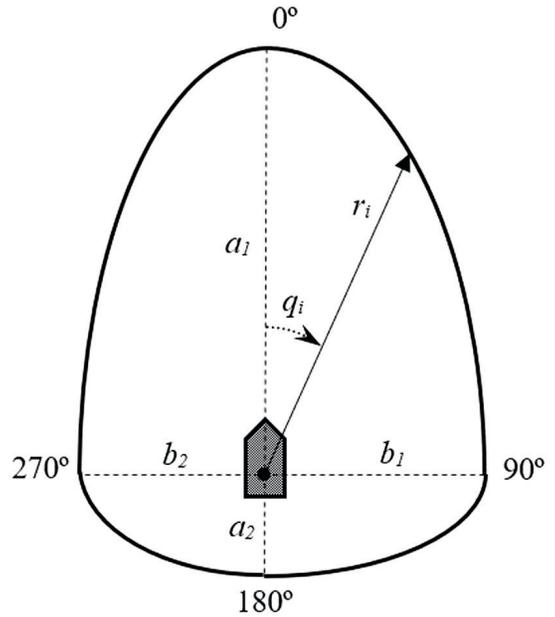


Рис. 4. Модель асимметричной эллиптической ЗНБ.

безопасных дистанций  $P_{ЗНБ}$  задаётся кусочно: различными комбинациями функции (2) на определённых секторных интервалах, ограниченных продольными и траверсными 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 траверсных 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.

