

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839

CONVERGENCE DANGER DEGREE ASSESSMENT BASED ON THE DYNAMIC SHIP'S SAFETY DOMAIN

S. V. Smolentsev, A. E. Filyakov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The problem of navigation safety is considered, in particular, the problem of assessing the degree of danger in a situation of ships convergence is studied. The hazard assessment of a ship-approaching situation is based on the safety domain as the minimum area around the ship that an oncoming ship should not enter. The existing safety domains are specified, the requirements for the safety domain are defined. The original configuration of the safety domain is proposed. The proposed safety domain is asymmetric and takes into account not only the requirements of the International Regulations for the Prevention of Collisions at Sea (COLREG-72), but also good maritime practice. In this case, the dimensions of the safety domain of a particular vessel are tied to the maneuverable characteristics of this vessel or, in a simplified form, to its dimensions. Thus, the ship's safety domain defines the area around the ship within which it can safely make an emergency evasion maneuver from an oncoming ship. The position of the safety domain boundary is parameterized and depends on the value of one parameter, which is computationally convenient. In addition, it is noted that the border of the proposed security zone is smooth, which excludes jumps in solutions for different course angles of targets entry into this zone. The concept of a dynamic safety domain is proposed, the size of which can vary depending on the navigation area and weather conditions, which is especially important when the vessel moves in narrow spaces, channels and traffic separation systems, since it excludes the appearance of false alarms when the vessel, which moves in the opposite direction in its lane, enters into domain.

Keywords: ship domain, circulation diameter, channels, narrows, Closest Point of Approach, Time of Closest Point of Approach, Distance to Closest Point of Approach, COLREG, maneuver, domain configuration.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., and Alexey E. Filyakov. "Convergence danger degree assessment based on the dynamic ship's safety domain." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 831–839. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839.

УДК 656.61.052:658.011.56

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ СБЛИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СУДОВОГО ДОМЕНА БЕЗОПАСНОСТИ

С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков

ФГОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена проблема безопасности мореплавания, в частности исследована задача оценки степени опасности в ситуации сближения судов. Оценка опасности ситуации сближения судов строится на основе домена безопасности как минимальной области вокруг судна, в которую не должно заходить встречное судно. Указаны существующие домены безопасности, определены требования к домену безопасности. Предложена оригинальная конфигурация домена безопасности. Предложенный домен безопасности является ассиметричным и учитывает не только требования «Международных правил по предупреждению столкновений судов в море (МППСС-72)», но и хорошую морскую практику. При этом размеры домена безопасности конкретного судна привязаны к маневренным характеристикам этого судна или, в упрощенном

виде, к его размерениям. Таким образом, домен безопасности судна определяет область вокруг судна в пределах которой оно может безопасно совершить аварийный маневр по уклонению от встречного судна. Положение границы домена безопасности параметризовано и зависит от значения одного параметра, что удобно в вычислительном плане. Кроме того, отмечается, что граница предлагаемой зоны безопасности является гладкой, что исключает скачки решений для различных курсовых углов входа целей в эту зону. Предложена концепция динамического домена безопасности, размер которого может изменяться в зависимости от района плавания и погодных условий, что особенно важно при движении судна в узкостях, каналах и системах разделения движения, поскольку исключает появление ложных тревог при попадании внутрь домена судна, которое движется во встречном направлении в своей полосе движения.

Ключевые слова: *судовой домен безопасности, диаметр циркуляции, каналы, узкосты, Closest Point of Approach, Time of Closest Point of Approach, Distance to Closest Point of Approach, МППСС, маневр, конфигурация домена.*

Для цитирования:

Смоленцев С. В. Оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена безопасности / С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 831–839. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-831-839.

Введение (Introduction)

Безопасность судовождения — одна из важных категорий, связанная с эксплуатацией морского транспорта. В настоящее время рост объема морских перевозок и интенсивности движения судов в зонах с повышенным судоходством приводит к повышению нагрузки на судоводителей, вследствие чего наблюдается увеличение риска опасных ситуаций и аварий. Как показывает практика, наибольшее число нештатных ситуаций и аварий происходит в зонах ответственности портов, на подходах к портам и в узких проходах (каналах). Для решения этой проблемы были предложены различные модели и методы оценки безопасности при сближении судов. В данной статье рассматриваются оценка степени опасности сближения на основе динамического судового домена безопасности.

Целью и задачами данного исследования является рассмотрение новых подходов для создания более универсального домена безопасности для различных условий плавания, навигационной обстановки и интенсивности движения. Для данного домена предложена оригинальная конфигурация на базе эллипсов со смещением вправо. Такая конфигурация предоставляет больше возможностей для маневрирования судна и отклонения при нештатных ситуациях. Предложенный домен безопасности является ассиметричным и может изменяться в зависимости от той или иной навигационной ситуации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существующие подходы к определению домена безопасности

В методах оценки риска столкновения базовым понятием является «дистанция кратчайшего сближения судов» (Closest Point of Approach (CPA)). Считается, что при безопасном движении дистанция кратчайшего сближения судов должна быть больше некоторого критического значения. Учитываются также величины «время движения до точки кратчайшего сближения судов» (Time of Closest Point of Approach (TCPA)) и «расстояние до точки кратчайшего сближения судов» (Distance to Closest Point of Approach (DCPA)) [1].

Для моделирования риска столкновений используется представление о некоторой «зоне безопасности» вокруг каждого судна, называемой «доменом безопасности», для установления которой обычно используют окружающую судно и жестко связанную с ним область. В настоящее время при исследовании проблемы предупреждения столкновений судов рассматриваются различные виды доменов: круговые, эллиптические, в виде полигонов или более сложных фигур (рис. 1).

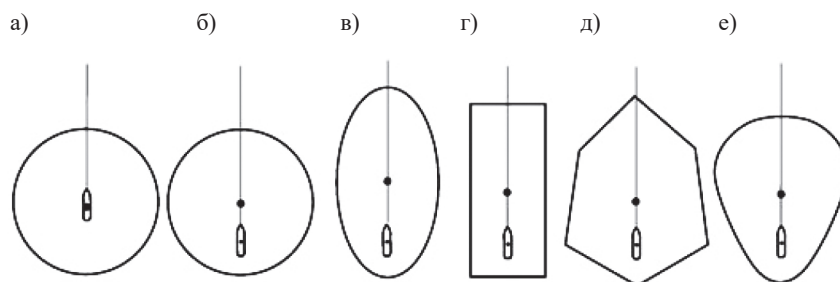


Рис. 1. Возможные формы домена судна: а, б — круговые; в — эллиптическая; г — в виде полигонов; д, е — в виде более сложных фигур

Границу домена можно рассматривать как функцию курсового угла q судна:

$$d^s = Cf_d(q), \quad (1)$$

где d^s — расстояние от точек границы домена до центра массы судна;

C — коэффициент, учитывающий особенности ситуации.

Кроме того, были рассмотрены эллиптические домены безопасности Фудзии и Танака [2], а также корабельный домен Колдуэлла, имеющий различную конфигурацию в зависимости от того или иного сценария сближения судов, и домен Гудвина, разделенный на сектора [3], [4].

Существующий подход к определению домена безопасности рассматривает каждый домен в отдельности. Поэтому в полной мере такой домен не может решить некоторые задачи расхождения, такие как плавания в узкостях и системах разделения движения (СРД) из-за строго определенных границ домена. Поэтому для решения подобных задач предлагается более универсальный и гибкий динамический домен безопасности [5].

Предлагаемая конфигурация домена безопасности

Основные требования к домену безопасности. Предлагаемый домен безопасности создается для более гибкого решения задачи по безопасному расхождению судов. Необходимо создать такой домен, который динамически мог изменяться в зависимости от условий плавания. Для этого нужно учитывать:

1. Правила МППСС [6].
2. Навигационные особенности района плавания:
 - узкости;
 - системы разделения движения;
 - каналы.
3. Интенсивность мореплавания в зоне.
4. Гидрометеорологическую обстановку, в частности условия видимости.
5. Динамику судна, в частности его управляемость и диаметр циркуляции судна.

При этом форма границы домена должна быть гладкой во избежание скачков решений при незначительных изменениях параметров сближения судов.

Учет Правил МППСС-72. В данном случае можно использовать расширенную секторную модель:

- S0 — носовой сектор (10° левого и правого бортов);
- S1 — правый сектор ($10,0$ – $112,5^\circ$ правого борта);
- S2 — левый сектор ($10,0$ – $112,5^\circ$ левого борта);
- S3 — кормовой сектор (от $112,5^\circ$ правого борта до $112,5^\circ$ левого борта).

Расстояния от судна до границы домена безопасности должны зависеть от сектора следующим образом: $DS0 > DS1 > DS2 > DS3$. Эти неравенства формализуют следующие положения: по носу нужно держать максимально свободное пространство, поскольку скорость сближения с целями, которые находятся по носу, максимальна, и кроме того МППСС-72 не рекомендованы

маневры, пересекающие путь другого судна по носу¹. С правого борта нужно держать достаточное пространство для маневрирования собственного судна, поскольку, согласно требованиям МППСС-72, предпочтительными являются маневры судна на правый борт [6]. Судно, пересекающее путь по корме, может считаться менее опасным, чем находящееся с других направлений.

Учет навигационных особенностей района плавания. Навигационные особенности района плавания (береговая линия, ограничивающая изобата, навигационные опасности, наличие районов регламентированного движения и т. п.), видимо, должны учитываться при формировании домена безопасности. Таким образом, домен безопасности в условиях наличия навигационных ограничений должен отличаться от домена безопасности на чистой воде. В частности, необходимо учитывать минимальное расстояние до опасностей в данном районе, а также наличие зон регламентированного движения в системах разделения движения (СРД). При движении в узкости поперечный размер домена безопасности (расстояние от судна до границы зоны навигационной безопасности (ЗНБ)) не должен превышать $\frac{1}{4}$ ширины узкости, в противном случае встречные суда будут ошибочно восприниматься как опасные. При движении по своей полосе в СРД поперечный размер домена безопасности не должен превышать $\frac{1}{2}$ ширины полосы движения, иначе встречные суда, идущие по своей полосе, будут ошибочно восприниматься как опасные.

Учет гидрометеорологической обстановки. Прежде всего необходимо учитывать изменения условий видимости. В условиях ограниченной видимости необходимо увеличивать размеры домена безопасности. Рекомендуемое максимальное расстояние до границы ЗНБ-2 мили определяется по дистанции слышимости судовых сигналов, подаваемых в тумане [6]. Однако современные технические средства позволяют надежно обнаруживать встречное судно в тумане и без звуковых сигналов. Кроме того, в условиях тумана суда, согласно требованиям МППСС, должны двигаться с меньшей скоростью и держать машину в готовности к маневру. Таким образом, можно уменьшить максимальное расстояние до границы ЗНБ как минимум вдвое.

Кроме того, в случае несовпадения вектора движения судна с направлением его диаметральной плоскости (например, вследствие дрейфа из-за влияния сильного бокового ветра или течения) важно определить правильную ориентацию домена безопасности (в случае, если это не круговой домен). При использовании секторной модели сектора должны назначаться относительно диаметральной плоскости (ДП) судна [7].

Учет динамики судна и параметров управляемости судна. Управляемость судна также зависит от конструктивных качеств, эксплуатационных характеристик и внешних факторов, оказывающих влияние на маневренность судна. К основным конструкционным качествам, оказывающим влияние на управляемость, относятся:

- соотношения главных размерений корпуса: длина, ширина.

- тип движительно-рулевого комплекса.

Эксплуатационные причины, оказывающие влияние на управляемость судна:

- степень загрузки (в грузу, порожнем);

- равномерность распределения груза (по длине, ширине, загрузка на ровный киль, наличие крена и дифферента).

Для оценки маневренных характеристик судов ИМО выделяет следующие существенные качества²:

1. Собственная динамическая устойчивость.

2. Устойчивость на курсе.

3. Начальная поворотливость.

4. Контроль рыскливости.

5. Поворотливость.

6. Тормозные характеристики [8], [9].

¹ МППСС-72 (<http://www.mppss.ru/rules/>).

² Assessment of the traffic in the Baltic Sea West. IMO, 2005.

Параметр управляемости может быть определен из маневренных элементов судна (рис. 2).

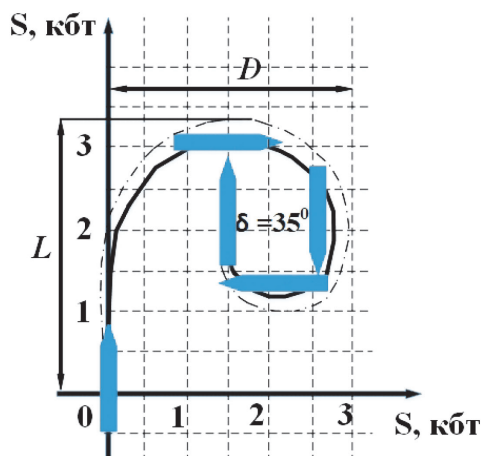


Рис. 2. Циркуляция на правый борт

Для создания динамически изменяющегося домена безопасности, во-первых, важно знать диаметр циркуляции судна. Как показано на рис. 2, чем меньше циркуляция судна, тем быстрее он совершит маневр в случае нештатной ситуации. Во-вторых, необходимо, чтобы в секторе I по носу было достаточно пространства для маневра. Согласно правилам МППСС-72, предпочтительно осуществлять маневры на правый борт [10]–[12].

Результаты (Results)

С учетом требований к домену безопасности, а также изложенной ранее информации предлагается следующая результирующая конфигурация домена безопасности:

1. Ориентация домена безопасности по ДП судна.
2. Домен безопасности определяется относительно геометрического центра судна.
3. Пространство вокруг судна разбивается на четыре четверти.
4. Форма границы домена безопасности формируется по четвертям (рис. 3) для открытого моря:
 - четверть I — эллипс с осями $4S-2S$ (центр совпадает с центром судна);
 - четверть II — эллипс с осями $4S-3S$ (центр совпадает с центром судна);
 - четверти III и IV — эллипс с осями $1S-2,5S$ (центр смещен вправо на $0,5S$).

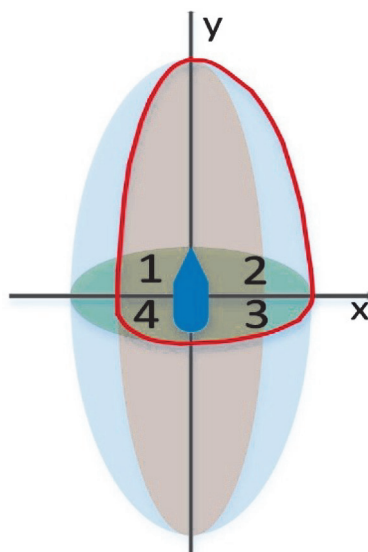


Рис. 3. Конфигурация домена безопасности для открытого моря по четвертям

В узкостях и СРД, если ширина домена безопасности превышает половину ширины безопасного прохода $D_{\min}$:

$$5S > D_{\min}.$$

Для формирования домена безопасности используется ограничивающая ширина (рис. 4):

- четверть 1 — эллипс с осями $4S-2D_{\min}/5$ (центр совпадает с центром судна);
- четверть 2 — эллипс с осями $4S-3D_{\min}/5$ (центр совпадает с центром судна);
- четверти 3–4 — эллипс с осями $1S-D_{\min}/2$ (центр смещен вправо на $0,1D_{\min}$).

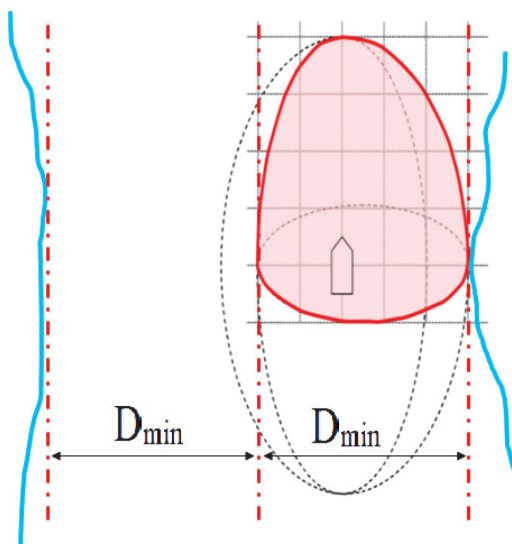


Рис. 4. Конфигурация домена безопасности для условий узкостей

5. Параметр S определяется из маневренных характеристик судна и условий плавания.

После формирования домена безопасности получаем параметризованную модель этого домена с гладкой границей [13].

Базовый динамический домен безопасности для открытого моря. Предложенная конфигурация базового домена безопасности позволяет менять форму от условия плавания и имеет параметризованную модель с гладкой границей рис. 5. Параметр S должен зависеть от маневренных характеристик судна, которые, в свою очередь, зависят от текущей скорости и загрузки судна.

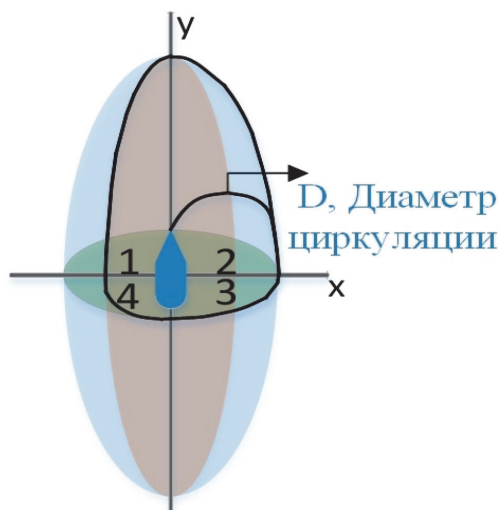


Рис. 5. Базовый динамический домен безопасности для открытого моря

Предлагается следующая зависимость от маневренных характеристик:

$$S = D_{\text{цирк}} / 3, \quad (5)$$

где $D_{\text{цирк}}$ — диаметр циркуляции судна при маневре «Право на борт» в текущем состоянии судна (скорость, загрузка, глубина под килем).

Таким образом, при указанном маневре, который может считаться *маневром последнего момента*, траектория судна полностью находится в собственном домене безопасности.

Однако, поскольку текущие маневренные характеристики судна трудно идентифицируемы, в качестве параметра S предлагается использовать более грубую, но более доступную для определения характеристику, — длину судна. Таким образом, в условиях нормальной видимости: $S = L$ и в условиях ограниченной видимости, в соответствии с ранее изложенными положениями, касающимися результирующей конфигурации домена безопасности, предлагается использовать увеличенное значение: $S = 1,5L$ [14].

Заключение (Conclusion)

Предложенная конфигурация домена безопасности позволяет учитывать в оценке уровня опасности сближения положения МППСС, навигационные особенности района плавания и гидрометеорологическую обстановку. Это важно при движении судна в узкостях, каналах и системах разделения движения поскольку исключает появление ложных тревог при попадании внутрь домена безопасности судна, которое движется во встречном направлении в своей полосе движения. Положение границы домена безопасности параметризовано и зависит от значения одного параметра, что удобно для выполнения вычислений. Кроме того, граница предлагаемой зоны безопасности является гладкой, что исключает скачки решений для различных курсовых углов входа целей в эту зону.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриняк В. М. Методы оценки риска столкновения в системах управления движением судов / В. М. Гриняк // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1-1. — С. 171.
2. Fujii Y. Traffic capacity / Y. Fujii, K. Tanaka // The Journal of navigation. — 1971. — Vol. 24. — Is. 4. — Pp. 543–552. DOI: 10.1017/S0373463300022384.
3. Goodwin E. M. A statistical study of ship domains / E. M. Goodwin // The Journal of navigation. — 1975. — Vol. 28. — Is. 3. — Pp. 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
4. Davis P. V. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas / P. V. Davis, M. J. Dove, C. T. Stockel // The journal of Navigation. — 1980. — Vol. 33. — Is. 2. — Pp. 215–222. DOI: 10.1017/S0373463300035220.
5. Tam C. K. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / C. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // The Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
6. Коккрофт А. Н. Толкование МППСС-72 / А. Н. Коккрофт, Дж. Н. Ф. Ламейер; пер. с англ. (с небольшими сокр.) Н. Я. Брызгина и Н. Т. Шайхутдинова; под ред. Н. Я. Брызгина. — М.: Транспорт, 1981. — 280 с.
7. Егоров И. Б. Концепция зон навигационной безопасности и ее применение в судовождении / И. Б. Егоров, В. А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 13–17.
8. Гриняк В. М. Визуальное представление параметров траектории безопасного движения судна / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, М. В. Трофимов // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3-1 (33). — С. 269–273.
9. Бурмака А. И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.
10. Студеникин Д. Е. Применение систем принятия решений для выбора параметров маневра судна / Д. Е. Студеникин, А. А. Григорян, Н. А. Маковецкая // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 4 (77). — С. 58–62.

11. Васьков А. С. Способы представления зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, М. А. Гарашенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 3 (84). — С. 38–44.
12. Гриняк В. М. Нечеткая система распознавания опасного сближения судов на морских акваториях / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 11 (125). — С. 36–42.
13. Zhao J.-S. Comments of ship domains / J.-S. Zhao, Z.-L. Wu, F.-C. Wang, E. M. Goodwin // The Journal of Navigation. — 1993. — Vol. 46. — No. 3. — Pp. 422–436.
14. Головченко Б. С. Нечеткая система предупреждения о опасном сближении морских судов / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 15–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-15-25.

REFERENCES

1. Grinyak, V. M. “Review of collision risk assessment methods for vessel traffic systems.” *Modern problems of science and education* 1-1 (2015): 171.
2. Fujii, Yahei, and Kenichi Tanaka. “Traffic capacity.” *The Journal of navigation* 24.4 (1971): 543–552. DOI: 10.1017/S0373463300022384.
3. Goodwin, Elisabeth M. “A statistical study of ship domains.” *The Journal of navigation* 28.3 (1975): 328–344. DOI: 10.1017/S0373463300041230.
4. Davis, P. V., M. J. Dove, and C. T. Stockel. “A computer simulation of marine traffic using domains and arenas.” *The journal of Navigation* 33.2 (1980): 215–222. DOI: 10.1017/S0373463300035220.
5. Tam, CheeKuang, Richard Bucknall, and Alistair Greig. “Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters.” *The Journal of Navigation* 62.3 (2009): 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.
6. Cockcroft, A. N., and J. N. F. Lameijer. *A guide to the collision avoidance rules*. London: Stanford Maritime Ltd., 1976.
7. Egorov, I. B., and V. A. Loginovskiy. “Review of ship domain concept and it’s application in navigation.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(69) (2012): 13–17.
8. Grinyak, V. M., A. S. Devyatisil’nyi, and M. V. Trofimov. “Vizual’noe predstavlenie parametrov traektorii bezopasnogo dvizheniya sudna.” *Marine Intelligent Technologies* 3-1(33) (2016): 269–273.
9. Burmaka, A. I. “The strategy of divergence of ships in a situation of excessive convergence.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.
10. Studenikin, D., A. Grigoryan, and N. Makovetskaya. “The use of decision support systems for choosing parameters of vessel’s maneuvering.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(77) (2015): 58–62.
11. Vaskov, A. S., and M. A. Garashchenko. “The methods for conception of ship’s domain.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 38–44.
12. Grinyak, V. M., and A. S. Devyatisilny. “Fuzzy logic decision-making system for ships collision avoidance.” *Herald of computer and information technologies* 11(125) (2014): 36–42.
13. Zhao Jing-Sung, Zhao-Lin Wu, Feng-Chen Wang, and E.M. Goodwin. “Comments of ship domains.” *The Journal of Navigation* 46.3 (1993): 422–436.
14. Golovchenko, B. S., V. M. Grinyak, and A. S. Devyatisilny. “Fuzzy logic decision-making system for ships collision avoidance.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 15–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-15-25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sswasily@mail.ru,
SmolencevSV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, Sergey V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sswasily@mail.ru,
SmolencevSV@gumrf.ru

Филяков Алексей Евгеньевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, icedi@rambler.ru

Filyakov, Alexey E. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru, icedi@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 10 октября 2020 г.
Received: October 10, 2020.*