

УДК 519.68:15:681.5

## МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РИСКА СТОЛКНОВЕНИЯ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ

Гриняк В.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Россия, e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

---

Статья посвящена обзору наиболее известных методов оценки риска столкновения судов в условиях их коллективного движения на морской акватории. Обсуждаются особенности использования методов на практике, учёт ими того или иного характера движения судов. В сводном виде оценивается наличие у методов таких характеристик как учёт правил МППСС, способность работать в случае присутствия нескольких судов, корректность работы в ограниченных водах, учёт динамики движения судна, учёт возможности изменения курса и скорости судна. Обзор сделан в исторической ретроспективе на основе материалов отечественной и зарубежной научной печати. Обсуждаются следующие методы: корабельный домен Фудзии и Танака, корабельный домен Гудвин, корабельный домен Дэвиса, корабельный домен Колдуэлла, корабельный домен Колли, корабельный домен Цю. Из отечественных разработок, опубликованных в последние годы, отмечаются корабельный домен Букатого и Морозовой и нечеткая система Коноплёва.

---

Ключевые слова: управление движением судов, оценка риска столкновения, предупреждение столкновений, планирование траектории движения.

## REVIEW OF COLLISION RISK ASSESSMENT METHODS FOR VESSEL TRAFFIC SYSTEMS

Grinyak V.M.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russia, e-mail: LVGer@yandex.ru;

<sup>2</sup>Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok, Russia

---

Maritime navigation is a process that depends heavily and crucially on the navigator's experience and judgement, as there are no specific rules governing the optimum use of navigational systems and techniques apart from the general rules outlined in collision regulations coupled with the traditional practices of seamanship. This paper reviews of ship collision risk assessment methods for ships in close range encounters. Practical using of methods is discussed. Methods are taking into account some factors, such as COLREGS, multi-ships, restricted waters, dynamic ship motion, course and velocity changes. This review based both on Russian- and English- language scientific papers. There are some methods in this paper: Fujii and Tanaka ship domain, Goodwin ship domain, Davis ship domain, Coldwell ship domain, Colley ship domain, Zhu ship domain, Bukatiy and Morozova ship domain, Konoplev fuzzy logic system.

---

Keywords: vessel traffic control, risk assessment, collision avoidance, path planning.

Безопасное судовождение – одна из основных категорий, связанных с эксплуатацией морского транспорта [7]. Последние годы характеризуются постоянным ростом объёмов морских перевозок. При этом всё возрастающая интенсивность движения в зонах оживленного судоходства приводит к постоянному повышению нагрузки на судоводителей [1].

В этих условиях знаний, опыта и интуиции судоводителя уже недостаточно, чтобы гарантировать безопасность движения (здесь и далее под безопасностью движения понимается навигационная безопасность). Поэтому все более востребованными становятся специальные методы предупреждения столкновений судов, ориентированные на реализацию

в автоматизированных информационных системах, используемых на мостике судна или в береговых центрах управления движением судов [3].

Несмотря на развитие технологий автономных движущихся объектов (например, беспилотных летательных аппаратов, наземных роботов и т.п.) методы управления их движением не применимы для судоводительской практики. Это связано с тем, что каждая ситуация, сложившаяся при движении судов, является по-своему уникальной и зависящей от множества факторов: Международных правил предупреждения столкновений судов (МППСС), правил судоходства на конкретной акватории, особенностей морской среды (течение, волнение), погодных условий, особенностей движения других судов, находящихся на акватории и т.д. Кроме того, динамика судна как объекта, движущегося в жидкой среде, также исключительно сложна. Современная правовая база прямо регламентирует, что управление судном есть исключительное право его капитана. В своих действиях судоводитель лишь руководствуется информацией, предоставляемой различными навигационными средствами.

С учетом этой специфики в судовождении сложились и используются свои особые подходы к управлению движением [4, 6]. С исследовательской точки зрения методы обеспечения навигационной безопасности движения судов можно разделить на три категории: методы заблаговременного обнаружения возможности столкновения судов (оценки риска столкновения), способы маневрирования для ухода судна от столкновения (предупреждения столкновений) и методы планирования траектории безопасного движения судна [13]. Настоящая работа посвящена обзору наиболее известных методов оценки риска столкновения судов.

**Основные понятия, используемые в управлении движением судов.** В судовождении используется специфическая терминология. Так, под управляемым судном понимается судно, находящееся под непосредственным контролем (например, собственное судно). По отношению к остальным судам применяется термин судно-цель. Все объекты, находящиеся на акватории, кроме управляемого судна (как суда, так и не являющиеся судами, например, береговая линия), называются препятствиями. Статические объекты – покоящиеся объекты. Динамические объекты – движущиеся суда, меняющие скорость или курс. Метод считается учитывающим влияние внешней среды, если он учитывает направление и силу ветра или течения. Метод считается оптимизирующим, если он включает оптимизирующие процедуры, например, вычисляет кратчайший путь, определяет траекторию с минимальным количеством маневров и т.п. Ограниченные воды – это акватории, ограниченные береговой линией (например, бухты, проливы). Динамическая модель движения судна – модель движения судна, учитывающая особенности его движения в жидкой среде.

В методах оценки риска столкновения базовым понятием является дистанция наибольшего сближения судов (closest point of approach (CPA)). Считается, что при безопасном движении дистанция наибольшего сближения судов должна быть больше некоторого критического значения. Учитываются также величины: «время движения до точки наибольшего сближения судов» (time of closest point of approach (TCPA)) и «расстояние до точки наибольшего сближения судов» (distance to closest point of approach (DCPA)). Для моделирования риска столкновения используется представление о некоторой «зоне безопасности» вокруг каждого судна, называемой также «корабельный домен».

**Методы оценки риска столкновения.** Фудзии и Танака [14] были первыми, кто ввёл понятие «корабельный домен». Они предложили корабельный домен в форме эллипса, опираясь на результаты статистических исследований движения судов во внутренних водах Японии.

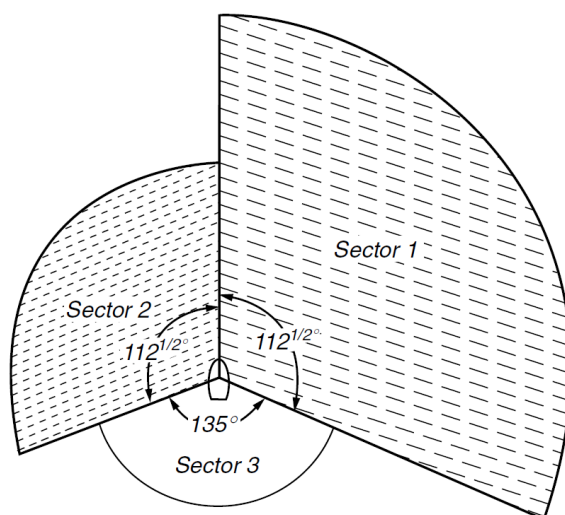


Рисунок 1. Корабельный домен Гудвин

Развивая их идею, Гудвин [12] предложила корабельный домен, разделённый на три сектора. В её модели считается, что домен – область вокруг судна, которую судоводитель предпочитает видеть свободной от других объектов. Размеры этой зоны различны, в зависимости от того, движутся ли суда навстречу друг другу, совершает ли судно обгон или стоит на месте (рис. 1). Радиус секторов корабельного домена Гудвин – это критические значения величины CPA для каждого из этих трёх возможных сценариев движения, зависящие от таких факторов как интенсивность движения, длина судна, максимальная скорость судна и т.п. Меньший радиус левого сектора связан с правилами МППСС, так как нахождение препятствий по левому борту – более вероятная и естественная ситуация, чем нахождение их по правому борту: при встречном движении суда расходятся левыми бортами.

Малый размер кормового сектора также связан с особенностями судовождения: судоводитель не имеет возможности непосредственно контролировать ситуацию у себя за кормой.

Корабельный домен Дэвиса [11] развивает идею Гудвин. Он представляет собой эллипс со смещённым центром, разделённый на секторы, имеющие тот же смысл, что и у Гудвин (рис. 2). Такой «гладкий» домен оказывается удобнее для построения математических моделей. Кроме того, Дэвис также предложил концепцию «активного домена» – это домен увеличенного размера, служащий индикатором для судоводителя: при вторжении в область активного домена других объектов судоводитель должен принять решение о совершении маневра уклонения.

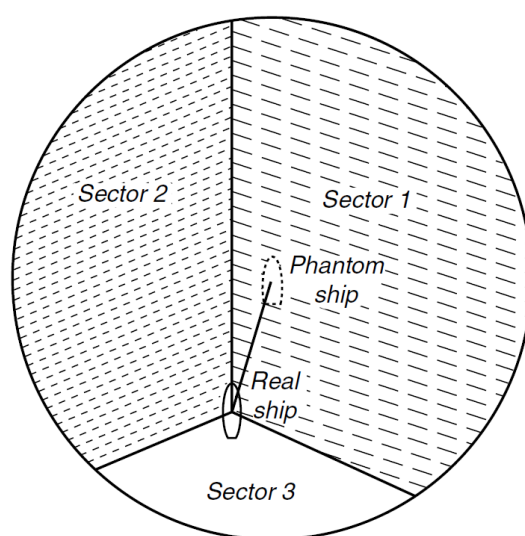


Рисунок 2. Корабельный домен Дэвиса

Корабельный домен Колдуэлла [8] имеет различную конфигурацию в зависимости от того или иного сценария сближения судов. Так, в случае встречного движения в домене полностью отсутствует кормовая часть, поскольку в этом случае ею можно пренебречь. В случае обгона домен имеет эллипсоидальную форму, аналогично модели Фудзии и Танака.

Корабельный домен Колли [9] был разработан на основе домена Дэвиса. Модель безопасности движения, разработанная Колли, берёт начало из области управления воздушным движением и названа «range-to-domain over range-rate (RDRR)». В основу модели было положено отношение расстояния от судна-цели до домена управляемого судна (range-to-domain) к скорости изменения этого расстояния (range-rate). Сравнивая эту величину с критическим значением, модель может определить точку или время начала маневра уклонения. Эта концепция получила широкое распространение и использовалась целым рядом других авторов, например [10]; в этой работе модель RDRR модифицирована для автоматического обнаружения опасного сближения и определения типа такого сближения

(обгон или встречное движение) путем дополнительного учета расстояния и времени до сближения.

Корабельный домен Цзю [15] – это особое представление зоны безопасности вокруг судна, учитывающее субъективные особенности восприятия судоводителем окружающей обстановки. Его определение основано на нейронных сетях, обучаемых методом обратного распространения ошибки, что позволяет частично учесть влияние внешней среды, не прибегая при этом к сложным классическим детерминированным математическим моделям её описания. Структура нейронной сети подобрана так, чтобы оперировать безразмерными переменными, такими как соотношение длины домена к его ширине, нормированное расстояние, нормированная дальность видимости и т.п. Настраиваемые коэффициенты нейронной сети также являются безразмерными величинами.

Из разработок последних лет стоит отметить оригинальный метод оценки риска столкновения, предложенный В.М. Букатым и С.Ю. Морозовой [2]. В этом способе вычисляются моменты времени выхода двух сближающихся судов на одну и ту же параллель и один и тот же меридиан. Если разница между этими моментами времени окажется меньше критической, то суда считаются опасно сближающимися. Таким образом, фактически данный способ неявно использует корабельный домен в форме эллипса.

Следует также отметить разработку М.А. Коноплёва [5], где используется корабельный домен в форме эллипса, а оценка риска столкновения делается нечеткой системой, дополнительно учитывающей кинематические свойства движения судна при маневрировании.

Характеристики описанных здесь методов оценки риска столкновения с точки зрения их возможности учитывать правила судоходства (МППСС), решать задачу для коллективного движения множества судов, решать задачу не только на открытой воде, но и в ограниченных водах, учитывать динамику движения судна, учитывать возможность изменения судном-целью скорости и курса, сведены в таблицу.

Методы оценки риска столкновения

Метод/модель	МППСС	Кол-во судов > 2	Огранич. воды	Динам. модель движения судна	Измен. курса судна	Измен. скор. судна
Корабельный домен Фудзии и Танака	-	-	-	-	-	-
Корабельный домен Гудвина	+	-	-	-	-	-

Корабельный домен Дэвиса	+	-	+	-	-	-
Корабельный домен Колдуэлла	+	-	-	-	-	-
Корабельный домен Колли	+	-	-	-	-	-
Корабельный домен Цзю	+	-	-	-	-	-
«Временной» корабельный домен Букатого и Морозовой	-	-	-	-	-	-
Нечеткая система Коноплёва	+	-	-	+/-	-	-

Во всех методах экстраполяция движения судов происходит в предположении, что движение является прямолинейным и равномерным. Если экстраполяция движения судов приводит к «вторжению» в область корабельного домена, то считается зафиксированным риск столкновения и судоводителю нужно принять решение о начале маневра уклонения. Все описанные здесь представления корабельных доменов требуют задания критической величины СРА для пары «судно-судно», что является нетривиальной задачей.

**Заключение.** Существенным недостатком рассмотренных методов является сведение ими навигационной обстановки на акватории к набору пар «судно-судно» и отсутствие решения задачи для нескольких судов в целом. За исключением «активного домена» Дэвиса все описанные представления не дают полноценной возможности для работы в ограниченных водах. За исключением нечеткой системы Коноплёва (частично) все они не учитывают динамику движения судов и возможность их неравномерного движения. Таким образом, остаются актуальными исследования в области обеспечения навигационной безопасности коллективного движения судов, направленные на разработку новых подходов, лишённых перечисленных недостатков. Наиболее перспективным путем для решения указанной задачи представляется использование модельных представлений, основанных на идеях систем нечеткой логики. Они позволяют гармонично учесть особенности судовождения на конкретной акватории и «субъективную» компоненту при принятии решений судоводителем (капитаном судна) и/или оператором береговой системы управления движением судов.

### Список литературы

1. Бродский П.Г., Румянцев Ю.В., Некрасов С.Н. К вопросу оценки влияния интенсивности судоходства на аварийность // Навигация и гидрография. – 2010. – № 30. – С. 36-42.
2. Букатый В.М., Морозова С.Ю. Нетрадиционный метод выяснения ситуации сближения судов // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – № 1. – С. 18-21.
3. Дмитриев В.И., Соляков О.В., Турецкий Н.В. Автоматизированное рабочее место судоводителя – настоящее и будущее // Вестник государственного морского университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – № 4. – С. 42-47.
4. Ермаков С.В. Метод формализованной оценки сложности навигационной ситуации // Вестник государственного морского университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – № 4. – С. 26-31.
5. Коноплёв М.А. Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – № 2. – С. 34-39.
6. Мироненко А.А. Модель программного движения судна в стеснённых водах // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 2. – С. 65-70.
7. Моисеев Г.А. Безопасность морского судоходства // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – № 12. – С. 43-45.
8. Coldwell T.G. Marine traffic behaviour in restricted waters // Journal of Navigation. – 1983. – Vol. 36. – P. 430-444.
9. Colley B.A., Curtis R.G., Stockel C.T. Manoeuvring times, domains and arenas // Journal of Navigation. – 1983. – Vol. 36. – P. 324-328.
10. Curtis R.G., Goodwin E.M., Konyn M. The automatic detection of reallife ship encounters // Journal of Navigation. – 1987. – Vol. 40. – P. 355-365.
11. Davis P.V., Dove M.J., Stockel C.T. A computer simulation of marine traffic using domains and arenas // Journal of Navigation. – 1980. – Vol. 33. – P. 215-222.
12. Goodwin E.M. A statistical study of ship domains // Journal of Navigation. – 1975. – Vol. 28. – P. 328-341.
13. Tam Ch.K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters // Journal of Navigation. – 2009. – Vol. 62. – No. 3. – P. 455-476.
14. Fujii Y., Tanaka K. Studies in marine traffic engineering: Traffic capacity // Journal of Navigation. – 1971. – Vol. 24. – P. 543-552.
15. Zhu X., Xu H., Lin J. Domain and its model based on neural networks // Journal of Navigation. – 2001. – Vol. 54. – P. 97-103.

**Рецензенты:**

Ноконова Н.Н., д.т.н., профессор, профессор кафедры Информационных технологий и систем Владивостокского государственного университета экономики и сервиса Минобразования РФ, г. Владивосток;

Кривошеев В.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры Информационных технологий и систем Владивостокского государственного университета экономики и сервиса Минобразования РФ, г. Владивосток.