

Гриняк Виктор Михайлович

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток. Россия

Обзор методов обеспечения безопасности движения морских судов

Обеспечение безопасности движения морских судов связано с применением специфических математических моделей и методов. В статье обсуждаются наиболее известные методы оценки риска столкновения судов, предупреждения столкновений судов и планирования траекторий судов в условиях их коллективного движения на морской акватории. В сводном виде оценивается наличие у методов таких характеристик, как учет правил МППСС, способность работать с несколькими судами одновременно, корректность работы в ограниченных водах, учет динамики движения судна, учет возможности изменения курса и скорости судна. Обзор сделан в ретроспективе на основе материалов отечественной и зарубежной научной печати.

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

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

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, которые должны быть внедрены в автоматизированные информационные системы, используемые на мостике судна или в береговых центрах управления движением судов.

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) [1], 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, тоже 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, но окончательное решение о движении судна принимает только судоводитель.

С учётом указанной специфики в судовождении сложились и используются свои особые подходы к управлению движением. 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. Настоящая работа посвящена обзору этих методов, анализу их свойств и эффективности использования на практике. Обзор, конечно же, не претендует на полноту, в него включены лишь наиболее цитируемые исследования.

В статье используются некоторые специфические термины. Управляемое судно – это 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.

Методы оценки риска столкновения. 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».

Фудзии и Танака [2] 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.

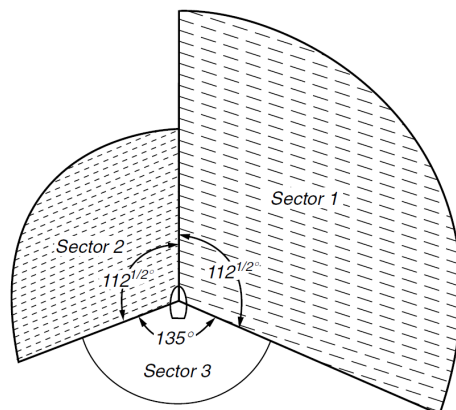


Рис. 1. Корабельный домен Гудвин [3]

Развивая их идею, Гудвин [4] 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 СРА 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 [5] развивает идею Гудвин. Он представляет собой эллипс со смещённым центром, разделённый на сектора, 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.

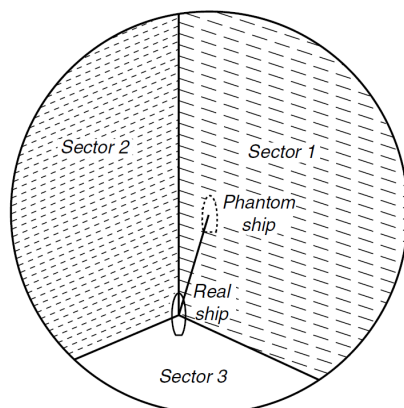


Рис. 2. Корабельный домен Дэвиса [3]

Корабельный домен Кодуэлла [6] 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 [7] 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). При сравнении этой величины с критическим значением модель может определить точку или время начала маневра уклонения. Эта концепция получила широкое распространение и использовалась целым рядом других авторов, например [8]; 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 [9] – 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 явля-

ются безразмерными величинами. Из разработок последних лет стоит отметить оригинальный метод оценки риска столкновения, предложенный В.М. Букатым и С.Ю. Морозовой [10]. 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 [11], где используется корабельный домен в форме эллипса, а оценка риска столкновения делается нечеткой системой, дополнительно учитывающей кинематические свойства движения судна при маневрировании.

Все описанные здесь представления корабельных доменов задают критическую величину CPA для пары «судно-судно». 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; параметры маневра уклонения при этом никак не обозначаются. Все методы также сводят навигационную обстановку на акватории к набору пар «судно-судно», не решая задачу 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 (табл. 1).

Таблица 1

Методы оценки риска столкновения

Метод/модель	МППСС	Кол-во судов > 2	Огранич. воды	Динам. модель движения судна	Изм. курса судна	Изм. скор. судна
1	2	3	4	5	6	7
Корабельный домен Фудзии и Танака	-	-	-	-	-	-
Корабельный домен Гудвина	+	-	-	-	-	-
Корабельный домен Дэвиса	+	-	+	-	-	-
Корабельный домен Кодуэлла	+	-	-	-	-	-
Корабельный домен Колли	+	-	-	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7
Корабельный домен Цзю	+	-	-	-	-	-
«Временной» корабельный домен Букатого и Морозовой	-	-	-	-	-	-
Нечеткая система Коноплева	+	-	-	+/-	-	-

Способы предупреждения столкновений. Первый способ предупреждения столкновения был предложен Калвертом [12]. Он предложил маневр уклонения, при котором судно делает поворот на правый борт таким образом, чтобы линия, соединяющая два судна (sight-line или line-of-sight – LOS) вращалась против часовой стрелки во время маневра.

Для распознавания риска столкновения и вычисления параметров маневра судна Митрофановым [13] был разработан специальный «индикатор столкновения» – электромеханическое устройство, устанавливаемое на мостике судна. Устройство требовало ручного ввода данных, получаемых с радара, о координатах, скоростях и курсах находящихся на аватории судов и определяло возможные параметры маневра, предотвращающего их опасное сближение. Эти возможные значения скоростей и курсов отображались в виде сектора (рис. 3). Из них судоводитель интуитивно выбирал конкретные значения скорости и курса.

Джонс [14] предложил способ предупреждения столкновений на основе «диаграмм маневра». Диаграмма представляла собой изображение области параметров безопасного движения, основанной на геометрических представлениях относительного движения судов и возможных маневров встречного судна-цели. Целью диаграммы было показать области параметров движения, ведущих к столкновению с другими судами с высокой вероятностью. Как и метод Митрофанова, метод Джонса лишь обозначал параметры опасного и безопасного движения, но не позволял определить параметры наиболее подходящего (оптимального) маневра уклонения.

Мерцем и Кармакарром [15] был предложен способ предупреждения столкновений на основе тригонометрической модели, аналитически определявшей параметры движения судов таким образом, чтобы обеспечивалась максимально возможная дистанция между ними. Модель учитывала относительное положение судов, относительную скорость их движения и характеристики их маневренности. При этом движение судов считалось идеализированным: модель не учитывала возможного изменения скорости судна и влияния на судно внешней среды.

До 1980 года навигационные средства, располагавшиеся на мостике судна, решали в основном задачу визуализации навигационной обстановки. Профессиональное сообщество ещё не осознавало возможностей компью-

терной обработки информации. Идеи внедрения компьютеров для обработки навигационной информации воспринимались сдержанно из-за низкой надёжности элементной базы компьютеров того времени. Кроме того, судоводители придерживались мнения, что знания и опыт профессионала гораздо важнее, чем формальные расчеты на основе математических моделей [16]. Тем не менее, в начале 1980 годов появились первые методы предупреждения столкновений, рассчитанные на применение ЭВМ.

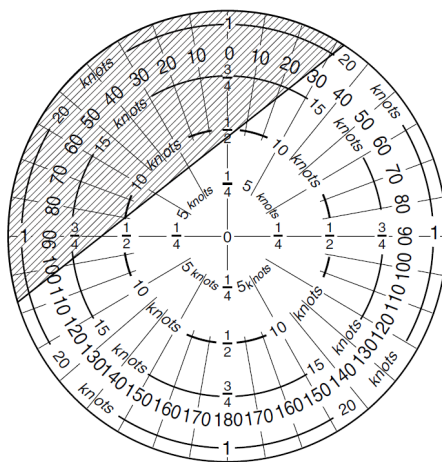


Рис. 3. Схема работы индикатора Митрофанова. Заштрихованная область соответствует опасным значениям скорости и курса судна. Судоводитель выбирает подходящие скорость и курс из незаштрихованной области [3]

Кэнелл [17] описал решение задачи по предупреждению столкновения двух судов путем сведения её к задаче одноэтапной кооперативной игры с целевой функцией максимизации безопасности, основанной на величине отклонения от опасного курса. Была предложена функция безопасности каждого возможного сценария движения судна, в матрице возможных сценариев искались лишь те сценарии, которые не приводили к опасной ситуации. Опасной ситуацией считалась такая, которая приводит к нулевой скорости вращения линии, соединяющей два судна (LOS). Модель задачи учитывала требования МППСС, выделяя в матрице сценариев такие, которые противоречили этим требованиям.

Дегрэ и Лефевр [18] предложили систему предупреждения столкновений на основе принципа «область маневра» (room-to-manoeuvre), который можно было использовать как для визуализации навигационной обстановки, так и для принятия решения о совершении того или иного маневра уклонения. Принцип «область маневра» основан на геометрическом представлении области возможных значений вектора скорости для случаев опасного и безопасного движения (рис. 4). Авторы особенно подчеркивали, что предложенная ими модель пригодна для реализации в специальном вычислительном устройстве. Вместе с тем модель никак не позволяет учитывать

требования МППСС и позволяет лишь предупреждать столкновения, не решая задачу выбора оптимальной траектории для расхождения судов.

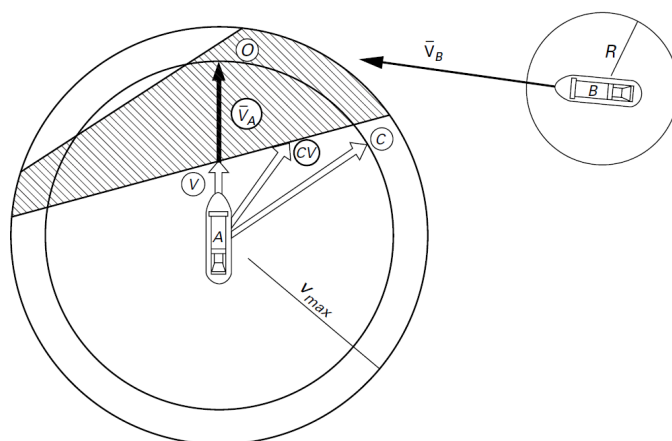


Рис. 4. Идея области маневра Дегрэ и Лефевра: А – управляемое судно; В – судно-цель; \vec{V}_A – вектор скорости управляемого судна; \vec{V}_B – вектор скорости судна-цели; V – вектор скорости, соответствующий безопасному движению управляемого судна без изменения курса; CV – вектор скорости, соответствующий безопасному движению управляемого судна, когда изменяются и скорость, и курс; C – вектор скорости, соответствующий безопасному движению управляемого судна, когда изменяется только курс [3]

Из рисунка видно, что \vec{V}_A находится в опасной (заштрихованной) зоне. Доув [19] разработал систему предупреждения столкновений на основе представлений корабельного домена Колли. RDDR модель используется для определения времени, когда судно должно изменить курс, чтобы избежать столкновения, и параметров манёвра, необходимого для предотвращения столкновения. Маневр начинается, когда происходит «вторжение» другого объекта в область корабельного домена, параметры манёвра зависят от характера сближения судов. Манёвр производится до тех пор, пока другой объект не выйдет из области корабельного домена, после чего судно возвращается на исходный курс. В случае присутствия на акватории множества судов задача решается для каждой пары «судно-судно» последовательно, в соответствии с уровнем опасности для каждой пары. За уровень опасности принимается время ТСРА. В сущности, при решении задачи уклонения для одной пары судов метод никак не учитывает наличие на акватории других судов, что может послужить причиной для неблагоприятного развития событий, например, попадания судна в «ловушку». Метод не позволяет оптимизировать траекторию расхождения судов.

Джеймс [20] предложил нечеткую экспертную систему принятия решений для предотвращения столкновений судов. Возможные действия для предотвращения столкновения были классифицированы в зависимости от

расстояния между судами и их взаимного расположения. Нечеткая система работает для случая двух судов, находящихся в открытом море, и учитывает требования МППСС, однако не учитывает воздействие окружающей среды и не оптимизирует траекторию движения.

Смитон и Кознен [21] также использовали нечеткую систему для принятия решений. Правила их системы основаны главным образом на требованиях МППСС. Система принимает решение путем анализа двух параметров: тип движения пары «судно-судно» (то есть встречное, догоняющее, пересекающееся и т.п.) и степень риска столкновения, основанная на величинах СРА, ТСРА и расстоянии. Ученые взяли при этом за основу представления корабельного домена Дэвиса. Наиболее подходящие параметры маневра определялись путем моделирования развития навигационной ситуации (прогноза) на некоторое время вперед при различных изменениях курса с дискретом 10 градусов. В случае множества судов система решает задачу для каждой пары «судно-судно» в соответствии с заданным приоритетом.

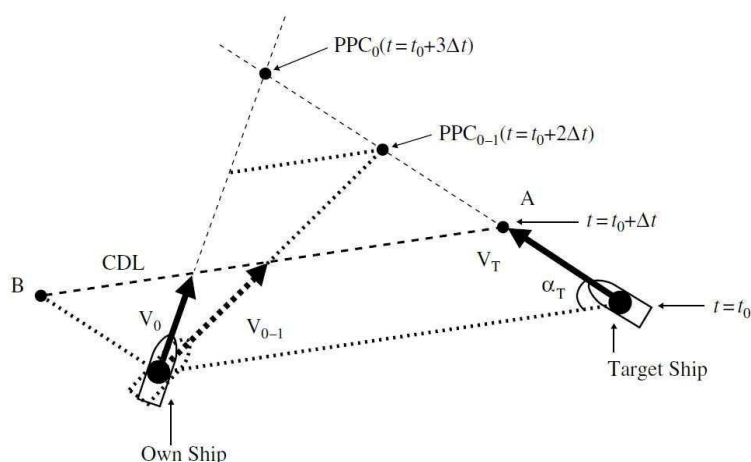


Рис. 5. Иллюстрация «линии опасности столкновения» Педерсена. Конец вектора скорости управляемого судна не должен лежать на линии CDL [3]

Педерсен [22] предложил ещё один вариант индикатора столкновения, основанного на анализе векторов скорости движения судов. Индикатор рассчитывает «линию опасности столкновения» (collision danger line – CDL) и «область опасности столкновения» (collision danger sector – CDS). Если движение судна таково, что конец вектора скорости лежит на «линии опасности столкновения», то это движение ведёт к опасности. Судоводитель должен маневрировать таким образом, чтобы конец вектора скорости не попадал на эту линию (рис. 5). «Область опасности столкновения» дополнительно учитывает значение СРА, судоводитель должен маневрировать таким образом, чтобы конец вектора скорости не попадал в эту область (рис. 6). Так, система служит для предупреждения о возможном столкновении и визуализации возможных параметров маневра, но не решает задачу выбора оптимального

маневра. Метод никак не учитывает МППСС и может приводить к ситуациям, когда судоводитель при формальном выполнении рекомендаций будет вынужден постоянно оставаться в кильватере судна-цели или идти параллельно ему. Кроме того, в случае нахождения на траектории большого количества судов судоводителю будет трудно принять решение из-за особенностей визуализации информации таким способом.

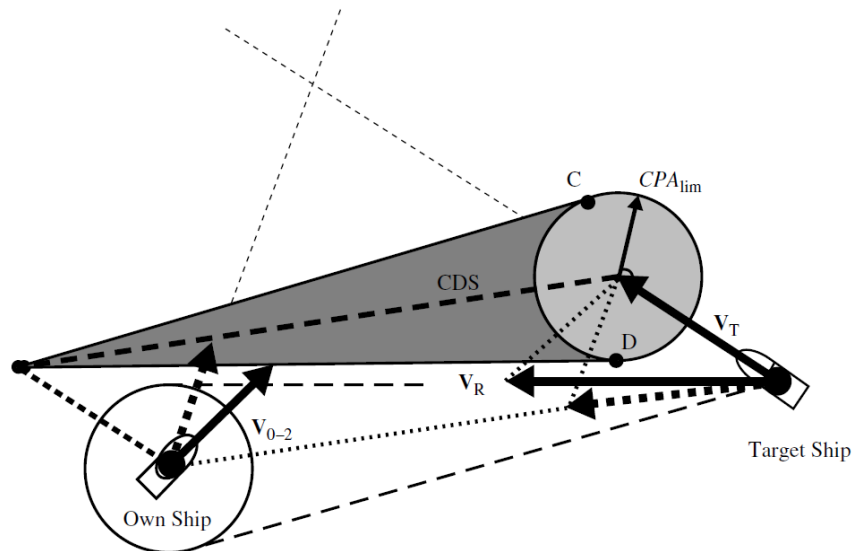


Рис. 6. Иллюстрация «области опасности столкновения» Педерсена. Конец вектора скорости управляемого судна не должен лежать внутри области CDS [3]

Уилсон [23] предложил метод вычисления маневра уклонения судна, похожий на тот, что используется в системах наведения ракет: нужно совместить направление вектора относительной скорости с направлением линии, соединяющей суда (LOC), что является условием столкновения. Условия столкновения сформулированы так: расстояние между «корабельными доменами» должно быть меньше критического; направление вектора относительной скорости должно быть близко к направлению линии, соединяющей суда (LOC); скорость вращения вектора относительной скорости должна быть близка к скорости изменения направления линии, соединяющей суда (LOC). Способ чересчур идеализированно описывает движение судов и не учитывает множества ограничений, например правил МППСС, а также предлагает управлять движением исключительно с помощью изменения курса, что не всегда является лучшим решением на практике.

Из разработок последних лет следует отметить способ, предложенный А.П. Нырковым и П.В. Викулиным [24]. Способ основан на простых представлениях о кинематике движения и адаптирован для использования данных о движении судов, поставляемых автоматической идентификационной системой (АИС).

Все рассмотренные здесь подходы к предупреждению столкновений судов обладают такими общими недостатками, как неполнота для применения в ограниченных водах и невозможность учета сложной динамики движения судов и воздействия окружающей среды (табл. 2).

Таблица 2

Методы предупреждения столкновения

Метод/модель	МППСС	Кол-во судов > 2	Огранич. воды	Динам. модель движения судна	Изм. курса судна	Изм. скор. судна
Способ Калверта	-	-	-	-	+	-
Индикатор Митрофанова	-	-	-	-	+	+
Диаграмма маневра Джонса	-	-	-	-	+	+
Тригонометрическая модель Мерца и Кармакара	-	-	-	-	+	+
Матрица сценариев Кэнелла	+	-	-	-	+	+
Область маневра Дегрэ и Лефевра	-	-	-	-	+	+
Система предупреждения столкновений Доува	-	-	-	-	+	-
Нечеткая система Джеймса	+	-	-	-	+	-
Экспертная система Смитона и Коэнена	+	+/-	-	-	+	-
Индикатор столкновения Педерсена	-	+/-	-	-	+	+
Метод Уилсона	-	-	-	-	+	-
Способ Ныркова и Викулина	+	-	-	-	+	-

Методы планирования траектории безопасного движения судна.

Известные методы планирования траектории безопасного движения судна можно разделить на две категории: детерминированные и эвристические. Детерминированные (или точные) методы основаны на точных математических моделях и строго определённой последовательности вычислений. Эвристические методы ищут решение внутри некоторого подпространства возможных приемлемых решений. Хотя найденное ими решение формально может не являться наилучшим (глобальным экстремумом), оно вполне пригодно для повседневной практики судовождения.

Иидзима и Хагивара [25] разработали экспертную систему предупреждения столкновений и управления маневрированием судна, включающую в себя специальную базу знаний. Система была способна работать полностью автономно: оценивать риск столкновения, планировать траекторию уклонения и управлять маневром судна. Выбор безопасной траектории судна осуществлялся путём поиска среди возможных сценариев движения. Эффективность (целевая функция) каждого сценария движения оценивалась на базе следующих факторов:

- степень опасности столкновения (в качестве корабельного домена используется окружность заданного радиуса);
- длина выбранного пути (наилучший путь – кратчайший);
- степень изменения курса (наилучший путь – с минимальным изменением курса);
- соответствие правилам МППСС (брались из базы знаний).

Система работала итеративно, с 10-секундным интервалом, обрабатывая цели в порядке приоритета (сначала – самые опасные, потом – менее опасные). Планирование траектории осуществлялось в предположении, что суда-цели также стараются придать своему движению безопасный характер. Система не учитывала влияния внешней среды.

В работах Чуркина [26, 27] описаны непрерывная и дискретная математические модели маневра уклонения судна от столкновения. Непрерывная модель основана на методе линейного программирования, где в качестве целевой функции выступает скорость изменения курса (её нужно минимизировать). Дискретная модель основана на дискретизации возможного курса движения судна и выборе оптимального пути с помощью метода ветвей и границ. Непрерывная модель имеет чересчур высокую вычислительную сложность и её нельзя применить для случая нескольких судов. Оба подхода не учитывают влияния внешней среды.

Миль [28] сформулировал задачу управления маневрированием судна для предотвращения столкновения как задачу равномерного приближения Чебышева. В методе Милиа маневр судна подбирается таким образом, чтобы максимизировать время до точки наибольшего сближения судов (ТСРА). Реализация метода возможна для случая координированного движения судов и движения судов независимо друг от друга. При независимом друг от друга движении управляется только управляемое судно, а судно-цель сохраняет своё движение неизменным. При координированном движении суда совершают маневр зеркально по отношению к точке, соответствующей середине дистанции между ними. Такая модель чересчур упрощённо описывает движение расходящихся судов.

Известен рекурсивный алгоритм Хонга и др. [29], основанный на методах аналитической геометрии. Алгоритм рекурсивно рассчитывает множество точек, расположенных в окрестности собственного судна и ограничивающих область безопасного движения.

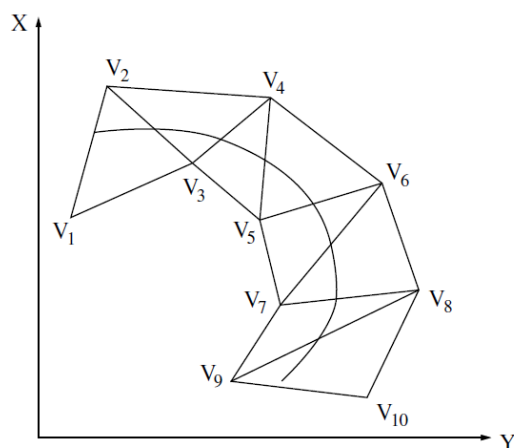


Рис. 7. Иллюстрация алгоритма Хонга и др. Внутри треугольников – область безопасного движения судна [3]

При этом точки множества интерпретируются как вершины треугольников, движение внутри которых безопасно. Управляемое судно движется таким образом, чтобы проходить через середины сторон треугольников (рис. 7). Такой способ трудноприменим на практике, так как вершины треугольников «плывут» вслед за изменением обстановки и судоводителю придется все время корректировать курс собственного судна, то есть траектория движения судна не является оптимальной.

Хванг [30, 31] разработал нечеткую систему принятия решений для оценки риска столкновения и расчета параметров маневра уклонения. Система принимает решение, анализируя «степени близости» судов друг к другу. Алгоритм использует представление корабельного домена в виде окружности заданного радиуса. В случае множества судов алгоритм дает последовательное решение задачи для каждой пары «судно-судно», при этом решение для одной пары не учитывает наличие других судов, что в целом делает решение неоптимальным.

В работе Ли и Ри [32] также предложена нечеткая система, основанная на анализе значений ТСРА и ДСРА. При принятии решения о наличии риска столкновения активируется модуль предотвращения столкновения, который использует экспертную базу возможных маневров судна, сгенерированную на основе МППСС. Из множества возможных выбирается тот маневр, который обеспечивает минимум произведения величин «риск столкновения» и «время выполнения маневра». При этом исследователи считают скорость судна постоянной (что не соответствует реалиям практики) и не учитывают влияние внешней среды.

Чанг [33] предложил модель вычисления траектории безопасного движения судна с использованием алгоритма обхода лабиринта. Используя представление корабельного домена в виде окружности, алгоритм строит

диаграмму препятствий в виде ячеек. В один момент времени в одной ячейке может находиться только одно судно. При этом движение управляемого судна и судна цели экстраполируется вперёд с учетом скоростей их движения. Если какая-либо ячейка диаграммы препятствий, куда «хочет встать» управляемое судно, уже занята судном-целью, то она помечается как запрещённая зона. Затем алгоритм обхода лабиринта ищет в нем кратчайший путь и направляет по нему судно. Хотя алгоритм может быть применен для ситуации со множеством судов, он не учитывает МППСС и воздействие внешней среды.

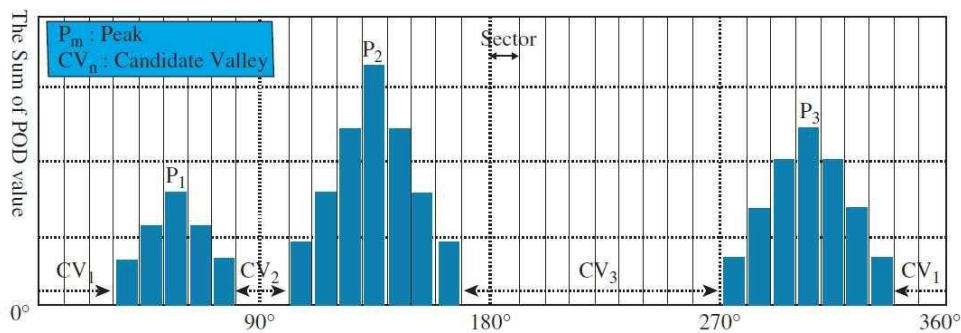


Рис. 8. Иллюстрация гистограммы риска столкновения Ли и Кима: ось абсцисс – курс судна; области CV – значения безопасных курсов движения [3]

Ли и Ким [34] разработали систему предупреждения столкновений, работающую с использованием экспертной базы знаний, учитывающей МППСС. Информация представляется в виде гистограммы, показывающей риск столкновения, соотнесенный с тем или иным курсом движения управляемого судна (рис. 8). На гистограмме выделяются запрещённые и разрешенные области (секторы) возможных значений курса судна. Сначала системой вычисляются секторы, удовлетворяющие критериям безопасности движения. Затем выбранные секторы оцениваются нечеткой системой на соответствие правилам МППСС. Система в принципе допускает применение для случая нескольких судов, но не учитывает воздействие внешней среды.

Бенджамин и Курсио [35] создали навигационную систему для управления безопасным движением судна, которая определяет возможные траектории с учетом МППСС. Система работает на основе множества правил, описывающих различные варианты навигационной обстановки и соответствующие им возможные «действия» судна.

Система выбирает одну из возможных траекторий судна, удовлетворяющую правилам МППСС, не решая при этом задачу оптимизации и не учитывая воздействие внешней среды.

Лиу и Ши [36] описали способ предупреждения столкновений, основанный на нейронных сетях и нечетких системах принятия решений. Нейронная сеть состоит из трёх подсетей, анализирующих три аспекта, определяющих безопасность движения. Первая сеть анализирует тип сближения

(определяемый на основе ДСРА, курса и расстояния) и возвращает соответствующий тип маневра (вправо, влево или не изменять курс). Вторая сеть анализирует соотношение скоростей сближающихся судов и возвращает величину, описываемую лингвистическими переменными «большое», «равное» или «малое». Третья сеть анализирует выход первых двух и возвращает управляющее воздействие, описываемое лингвистическими переменными, соответствующими величине воздействия и его длительности. Разработанная система генерирует управляющее воздействие, имея в виду наличие только одного судна-цели (с наибольшим риском столкновения). В сущности, это аналогично подходу Джеймса [20]. Система, таким образом, не учитывает случай множества судов, не оптимизирует траекторию движения и не учитывает воздействие внешней среды.

Злапчинский [37, 38] предложил оригинальную модифицированную систему Чанга [33], основанную на методе обхода лабиринтов, дополнив её понятиями «штраф за поворот», «временно запрещённая зона» и возможностью изменять не только курс, но и скорость движения судна. Штраф за поворот моделировался увеличением времени движения до выбранной точки всякий раз, когда судно совершало поворот (что соответствует реальной динамике движения судна, когда его скорость на повороте уменьшается). Запрещённые зоны так стали зависеть ещё и от времени, что активировались только в определенном временном интервале, когда судно-цель находилось рядом с ними. Это позволило рассчитывать траекторию движения управляемого судна в узких проливах и каналах.

Если изменение только лишь курса судна не позволяет обеспечить безопасное движение, то управление осуществляется изменением и скорости судна: изменение скорости моделируется как линейная функция расстояния до запрещенной зоны и округляется до ближайшей скорости, достижимой возможностями конкретного двигателя. В способе применяется двоичный поиск для нахождения необходимого изменения скорости таким образом, чтобы оно было минимальным, обеспечивая вместе с тем уход судна от столкновения. Систему Злапчинского следует признать наиболее продвинутой с точки зрения количества учитываемых ею факторов, влияющих на безопасность движения, большинство из которых не были учтены в предыдущих моделях. Однако, несмотря на то, что система учитывает уменьшение скорости судна при повороте, все же она учитывает влияние внешней среды не в полной мере.

К эвристическим методам планирования траектории безопасного движения судна следует отнести метод Смержалевского [39], основанный на генетическом алгоритме. Изменение скорости управляемого судна возможно дискретно, на основе процедуры мутации на отдельных участках траектории движения. Первоначальное пространство решений образуется с помощью представления корабельного домена многоугольником. Затем возможные траектории движения судна скрещиваются, образуя множество траекторий-

потомков, из которых выбираются наилучшие с точки зрения целевой функции, учитывающей длину траектории, время движения и гладкость траектории. Учет правил МППСС реализуется формой корабельного домена, который смещен в одну из сторон, в зависимости от типа сближения судов. Метод Смержальского был взят за основу интеллектуальной системы управления движением судном [40], реализованной в модели симулятора корабля, разработанной в Гдынском морском университете (Gdynia Maritime University). Метод не учитывает влияние внешней среды.

Генетический алгоритм был использован также Ито [41]. Как и в методе Смержальского, первоначальное пространство решений формировалось с использованием представлений о корабельном домене как безопасной зоне, первоначальные точки возможного пути судна генерировались случайным образом. Затем генетический алгоритм использовался для нахождения среди них оптимальных точек траектории движения судна. Целевая функция учитывала следующие параметры: уровень опасности (вероятность попадания в опасную зону), дистанция (длина траектории движения судна), прямолинейность (сумма косинусов углов изменения курса), потеря энергии (суммарная кинетическая энергия, потерянная при движении по траектории). По сравнению с моделью Смержальского эта модель проще, не учитывает МППСС и влияние внешней среды.

Цзенг [42] также предложил генетический алгоритм для вычисления траектории безопасного движения судна. Его метод позволяет сгенерировать такую траекторию движения судна, чтобы оно не сближалось недопустимо близко с другими судами. При этом метод не учитывает явно правил МППСС.

Проведённый анализ методов планирования безопасного движения судна позволяет говорить о следующих общих существенных недостатках этих методов:

- 1) все методы практически не позволяют в полной мере учесть влияние внешней среды при планировании движения и маневров судна;
- 2) планирование траектории осуществляется в предположении о том, что все препятствия либо являются статическими, либо движутся прямолинейно и равномерно. Ни один метод не учитывает возможных динамических препятствий;
- 3) все методы используют сильно упрощенную модель движения судна (например, или вообще без изменения скорости, или в предположении о её мгновенной потере при повороте).

Большинство методов слишком упрощают задачу управления судном: рассматривают только открытое море или случай только двух судов, не учитывают состояние окружающей среды, игнорируют МППСС (табл. 3). Следует отметить, что только методы Смержальского [39] и Злапчинского [37] учитывают наличие статических и подвижных препятствий.

Таблица 3

Методы планирования траектории судна

Метод/модель	МППСС	Кол-во судов > 2	Огранич. воды	Динам. модель движения судна	Изм. курса судна	Изм. скор. судна
Экспертная система Иидзима и Хагивара	+	+/-	-	-	+	-
Модель Чуркина	-	+/-	-	-	+	-
Метод Миля	-	-	-	-	+	-
Метод Хонга	-	+	+	-	+	-
Нечеткая система Хванга	-	+/-	-	-	+	-
Нечеткая система Ли и Ри	+	+/-	-	-	+	-
Метод лабиринта Чанга	-	+	+	-	+	-
Экспертная система Ли и Кима	+	+	-	-	+	-
Экспертная система Бенджамина и Кур-сио	+	+	-	-	+	+
Нейро-нечеткая система Лиу и Ши	+	-	-	-	+	-
Метод лабиринта Злапчинского	-	+	+	+/-	+	+
Генетический алгоритм Смержальского	+	+	+	-	+	+
Генетический алгоритм Ито	-	+	+	-	+	+
Генетический алгоритм Цзенга	-	+	+	-	+	+

Как следует из предложенного обзора, регулярные исследования проблемы безопасного движения судов начались в конце 1950-х годов (когда резко выросла интенсивность движения судов) и продолжают по настоящее время. Большинство исследований опираются на понятие «корабельный домен» как на основной инструмент оценки риска столкновения. Считается, что в безопасном состоянии в область корабельного домена не допускается вторжение препятствий. Конфигурация корабельного домена определяется исходя из конкретной навигационной обстановки: вычисляется по формулам или формируется базой данных.

Основные исследования в области предупреждения столкновений были проведены до 1990-х годов. В этих исследованиях предупреждение столкновения рассматривается как интуитивное или обусловленное целевой функцией маневрирование судна, зависящее от конкретной навигационной ситуации и имеющее своей целью придать движению судна безопасный характер. Как правило, все модели рассматривают только случай для двух судов. В случае присутствия на акватории нескольких судов задача решается для наиболее опасного судна-цели, временно игнорируя другие, менее опасные суда-цели.

Современные средства, имеющиеся на мостике судна, включают в себя системы по оценке риска и планированию траектории. Задача систем оценки риска – предупредить судоводителя о том, что существует риск столкновения с препятствием или сближения с ним на недопустимо малое расстояние. Системы планирования траектории судна позволяют прогнозировать будущую навигационную ситуацию на основе текущей. Они позволяют рассчитать траекторию судна таким образом, чтобы обеспечить движение управляемого судна на безопасной дистанции от других объектов. Эти системы могут быть интегрированы с системами автоматизированной прокладки курса (авторулевыми).

Одной из особенностей судовождения является полная ответственность судоводителя за любые инциденты до тех пор, пока судно не пришвартовано. Это правило закреплено во всей судоводительской правовой базе. Такая специфика делает в принципе неправомерным полностью автоматизированное судовождение (без участия человека). Вместе с тем в условиях высокой интенсивности движения и быстро меняющейся обстановки судоводители не застрахованы от ошибок (человеческий фактор). Затруднять принятие правильного решения судоводителем могут следующие факторы:

- неоднозначность интерпретации информации, вызванная неопределённостью действий других участников движения;
- недоступность информации (сбои оборудования);
- наличие на акватории большого количества посторонних, менее опасных объектов (малых или тихоходных судов);
- неожиданные события, например, неожиданное прекращение запланированного маневра или появление новых препятствий.

Таким образом, судоводителям требуются специальные средства поддержки принятия решений, способные учесть максимальное количество факторов, влияющих на безопасность движения (в том числе влияние внешней среды), и помогать планировать оптимальную траекторию движения судна. Путь дальнейшего развития технологий обеспечения безопасности движения судов видится в повышении уровня автоматизации судовождения: разработке и внедрении систем с проблемно-ориентированным поль-

зовательским интерфейсом, позволяющих максимально застраховать судоводителя от принятия заведомо ошибочных управленческих решений.

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 (МППСС-72). – М.: РКонсульт, 2004. – 80 с.
2. Fujii, Y., Tanaka, K. Studies in marine traffic engineering: Traffic capacity // *Journal of Navigation*. – 1971. – Vol. 24. – P. 543–552.
3. 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. – №3. – P. 455–476.
4. Goodwin, E.M. A statistical study of ship domains // *Journal of Navigation*. – 1975. – Vol. 28. – P. 328–341.
5. 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.
6. Coldwell, T.G. Marine traffic behaviour in restricted waters // *Journal of Navigation*. – 1983. – Vol. 36. – P. 430–444.
7. Colley, B.A., Curtis, R.G., Stockel, C.T. Manoeuvring times, domains and arenas // *Journal of Navigation*. – 1983. – Vol. 36. – P. 324–328.
8. Curtis, R.G., Goodwin, E.M., Konyon, M. The automatic detection of reallife ship encounters // *Journal of Navigation*. – 1987. – Vol. 40. – P. 355–365.
9. Zhu X., Xu H., Lin J. Domain and its model based on neural networks // *Journal of Navigation*. – 2001. – Vol. 54. – P. 97–103.
10. Букатый В.М. Нетрадиционный метод выяснения ситуации сближения судов / В.М. Букатый, С.Ю. Морозова // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2012. – №1. – С. 18–21.
11. Коноплёв, М.А. Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения / М.А. Коноплёв // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2009. – №2. – С. 34–39.
12. Calvert, E.S. Manoeuvres to ensure the avoidance of collision // *The Journal of Navigation*. – 1960. – Vol. 13. – P. 127–137.
13. Mitrofanov, O. An anti-collision indicator // *The Journal of Navigation*. – 1968. – Vol. 21. – P. 163–170.
14. Jones, K.D. Application of a manoeuvre diagram to multi-ship encounters // *Journal of Navigation*. – 1974. – Vol. 27. – P. 19–27.
15. Merz, A.W., Karmakar, J.S. Collision avoidance systems and optimal turn manoeuvres // *Journal of Navigation*. – 1976. – Vol. 29. – P. 160–174.
16. Benford, H., Fox, W.A. A Half century of maritime technology, 1943–1993 – written by a group of authorities. – Jersey City, N.J.: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1993.
17. Cannell, W.P. Collision avoidance as a game of co-ordination // *Journal of Navigation*. – 1981. – Vol. 34. – P. 220–239.
18. Degre, T. Lefevre, X. A collision avoidance system // *Journal of Navigation*. – 1981. – Vol. 34. – P. 294–302.

19. Dove M.J., Burns R.S., Stockel C.T. An automatic collision avoidance and guidance system for marine vehicles in confined waters // *Journal of Navigation*. – 1986. – Vol. 39. – P. 180–190.
20. James, M.K. Modelling the decision process in computer simulation of ship navigation // *Journal of Navigation*. – 1986. – Vol. 39. – P. 32–48.
21. Smeaton, G.P., Coenen, F.P. Developing an intelligent marine navigation system // *Computing & Control Engineering Journal*. – 1990. – Vol. 1. – №2. – P. 95–103.
22. Petersen, E., Inoue, K., Tsugane, M. Simulator studies on a collision avoidance display that facilitates efficient and precise assessment of evasive manoeuvres in congested waterways // *Journal of Navigation*. – 2003. – Vol. 56. – P. 411–427.
23. Wilson, P.A., Harris, C.J., Hong, X. A Line of sign counteraction navigation algorithm for ship encounter collision avoidance // *Journal of Navigation*. – 2003. – Vol. 56. – №1. – P. 111–121.
24. Нырков, А.П. Алгоритм управления движением судов, идущих пересекающимися курсами / А.П. Нырков, П.В. Викулин // *Журнал университета водных коммуникаций*. – 2011. – №1. – С. 100–105.
25. Iijima, Y., Hagiwara, H. Results of collision avoidance manoeuvre experiments using a knowledge-based autonomous piloting system // *Journal of Navigation*. – 1991. – Vol. 44. – P. 194–204.
26. Чуркин, В.И. Оптимальное управление расхождением судов / В.И. Чуркин // *Известия РАН. Теория и системы управления*. – 1999. – №2. – С. 61–67.
27. Churkin, V.I., Zhukov, Yu.I. Procedures for ship collision avoidance // *OCEANS'98 Conference Proceedings*. – 1998. – Vol. 2. – P. 857–860.
28. Miele, A., Wang, T., Chao, C.S., Dabney, J.B. Optimal control of a ship for collision avoidance manoeuvres // *Journal of Optimization Theory and Applications*. – 1999. – Vol. 103. – P. 495–519.
29. Hong, X., Harris, C.J., Wilson, P.A. Autonomous ship collision free trajectory navigation and control algorithms // *Proceedings of 1999 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA'99*. – 1999. – P. 923–929.
30. Hwang, C.N. The integrated design of fuzzy collision-avoidance and h1-autopilots on ships // *Journal of Navigation*. – 2002. – Vol. 55. – P. 117–136.
31. Hwang, C.N., Yang, J.M., Chiang, C.Y. The design of fuzzy collision avoidance expert system implemented by h1-autopilot // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2001. – Vol. 9. – P. 25–37.
32. Lee, H.J., Rhee, K.P. Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm // *Journal of International Shipbuilding Progress*. – 2001. – Vol. 48. – P. 197–212.
33. Chang, K.Y., Jan, G.E., Parberry, I. A method for searching optimal routes with collision avoidance on raster charts // *Journal of Navigation*. – 2003. – Vol. 56. – P. 371–384.
34. Lee, Y.I., Kim, Y.G. A collision avoidance system for autonomous ship using fuzzy relational products and COLREGS // *Proceedings of Intelligent Data Engi-*

neering and Automated Learning (IDEAL) 2004: 5th International Conference, Exeter, UK. – 2004. – P. 247–252.

35. Benjamin, M., Curcio, J. Colregs-based navigation of autonomous marine vehicles // IEEE/OES autonomous underwater vehicles. – 2004. – P. 32–39.

36. Liu, Y.H., Shi, C.J. A fuzzy-neural inference network for ship collision avoidance // Proceedings of the 4th international conference on machine learning and cybernetics, Guangzhou, China. – 2005. – Vol. 8. – P. 4754–4759.

37. Szlapczynski, R. A new method of ship routing on raster grids, with turn penalties and collision avoidance // The Journal of Navigation. – 2006. – Vol. 59. – P. 27–42.

38. Szlapczynski, R. A unified measure of collision risk derived from the concept of a ship domain // Journal of Navigation. – 2006. – Vol. 59. – P. 477–490.

39. Smierzchalski, R. Evolutionary trajectory planning of ships in navigation traffic areas // Journal of Marine Science and Technology. – 1999. – Vol. 4. – P. 1–6.

40. Lebkowski, A., Smierzchalski, R., Gierusz, W., Dziedzicki, K. Intelligent ship steering system // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2008. – Vol. 2. – №1. – P. 63–68.

41. Ito, M., Zhang, F., Yoshida, N. Collision avoidance control of ship with genetic algorithm // Proceedings of the 1999 IOOO international conference on control applications. – 1999. – P. 1791–1796.

42. Zeng, X. Evolution of the safe path for ship navigation // Applied artificial intelligence. – 2003. – Vol. 17. – №2. – P. 87–104.