

УДК 656.61.052

А.Д. Пипченко

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСТАНЦИИ ОПАСНОГО СБЛИЖЕНИЯ
ПРИ РАСХОЖДЕНИИ МАНЕВРОМ СОБСТВЕННОГО СУДНА**

В статье предложен метод определения минимальной дистанции, на которой можно совершить маневр последнего момента одним судном. Данная задача решается относительно расчетной точки столкновения. Показано, что эта минимальная дистанция зависит от угла пересечения курсов, параметров маневра и размеров судов. В свою очередь, минимальное расстояние между судами зависит от расстояния до расчетной точки столкновения и скоростей сближающихся судов.

Ключевые слова: МППСС, расхождение судов, маневр последнего момента, опасное сближение.

У статті запропоновано метод визначення мінімальної дистанції, на якій можна зробити маневр останнього моменту одним судном. Дана задача вирішується відносно розрахункової точки зіткнення. Показано, що ця мінімальна дистанція залежить від кута перетину курсів, параметрів маневру і розмірів суден. У свою чергу, мінімальна відстань між суднами залежить від відстані до розрахункової точки зіткнення і швидкостей зближуються суден.

Ключові слова: МППСС, розходження суден, маневр останнього моменту, небезпечне зближення.

This paper proposes a method for determining the minimum distance at which vessel can perform the emergency collision avoidance maneuver. The problem solved relatively to the estimated point of collision. Studied distance depends on the angle of headings intersection, the maneuver parameters and the vessels dimensions. The minimum distance between vessels depends on a distance to an estimated point of collision and their speeds.

Keywords: COLREG, collision avoidance, emergency maneuver, close quarters.

Вступление. Столкновение судов является одной из самых серьезных навигационных аварий. Последствиями столкновений часто являются загрязнение окружающей среды, потеря судна, гибель людей. Согласно данным Европейской ассоциации морской безопасности только в водах Евросоюза за последние пять лет произошло 1352 столкновения. При этом среди аварий приведших к значительному загрязнению, потере судна или гибели людей столкновения занимают третье место.

© Пипченко А.Д., 2017

Проблема оценки опасности столкновения не является новой и была изучена большим количеством авторов. Рост интенсивности судоходства с одной стороны и технологический прогресс с другой обуславливают появление более совершенных методов оценки опасности столкновения и поддержки принятия решений судоводителей.

Анализ расследований столкновений, показывает, что в большинстве случаев аварии происходили либо в результате неправильно принятого судоводителем решения, либо ввиду недостаточной оценки ситуации. Часто прослеживается ситуация, когда судоводители продолжают вести радиопереговоры, несмотря на то, что столкновения уже не избежать [2; 4].

Это, в свою очередь, означает, что судоводители не осознают наступления ситуации *маневра последнего момента* (МПМ). «Последний момент» практически характеризует порог времени, после прохождения которого столкновение произойдет независимо от предпринимаемых действий.

Исследования и рекомендации по определению «последнего момента» приведены в ряде публикаций [2; 4; 6; 7; 8; 9].

В статье [7] показана математическая модель для ситуации сближения судов на пересекающихся курсах. В работе [7] даны методы расчета геометрических параметров маневра и рекомендации по выбору МПМ: циркуляция на левый или правый борт, торможение. В работе [8] предложен эмпирический способ оценки ситуации опасного сближения.

Однако, в этих публикациях при расчете геометрических параметров маневра значение скорости маневрирующего судна считается постоянным, в то время как на циркуляции скорость уменьшается практически в два раза, что влияет и на время и на дистанцию расхождения. Размеры судов, также имеют критическое значение при расхождении на близких дистанциях, особенно при учете того, что современные крупнотоннажные суда достаточно часто имеют длину 300-400 метров. Наиболее корректно это учтено в работе [6], где столкновение определяется из условия пересечения двух геометрических областей, характеризующих суда. При этом все расчеты в работе [6] получены в истинном движении, а основным параметром при расчетах является минимальная дистанция между судами. В таком случае значительно увеличивается количество возможных сценариев развития ситуации расхождения, что, соответственно, приводит к значительному увеличению итераций и ухудшению точности в работе алгоритма определения вероятности столкновения.

В работе [8] оценка опасной ситуации производится относительно предполагаемой точки столкновения, что является более корректным, однако функция определения минимальной дистанции до этой точки зависит только от длины и скорости судна, что не позволяет учесть его маневренные характеристики.

Определение «последнего момента» и «дистанции опасного сближения» является важным не только для того, чтобы обозначить судоводителю момент начала выполнения аварийного маневра, но и, в зависимости от маневренных свойств и размеров судна, произвести оценку ситуации в целом и определить безопасную дистанцию и время кратчайшего сближения, что на сегодняшний день является возможным благодаря данным получаемым с АИС (автоматической идентификационной системы).

Задачей данного исследования является разработка метода определения минимальной дистанции опасного сближения при расхождении маневром собственного судна.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов. В правилах по предотвращению столкновений COLREGS [3] приведен термин close quarters – *опасное сближение*. Однако, официальное определение этому термину в публикациях ИМО не приводится.

Логично заключить, что МПМ производится в ситуации опасного сближения судов, при этом *последний момент* – момент времени, после которого столкновение произойдет независимо от предпринимаемых действий.

Отсюда, *маневр последнего момента (МПМ)* – маневр, приводящий к расхождению судов на кратчайшей дистанции стремящейся к нулю.

МПМ можно разделить на два вида:

- *одиночный* – маневр, совершаемый одним судном, при условии, что другое сохраняет курс и скорость;

- *взаимный* – маневр, совершаемый обоими судами.

Схема выполнения МПМ показана на рис. 1.

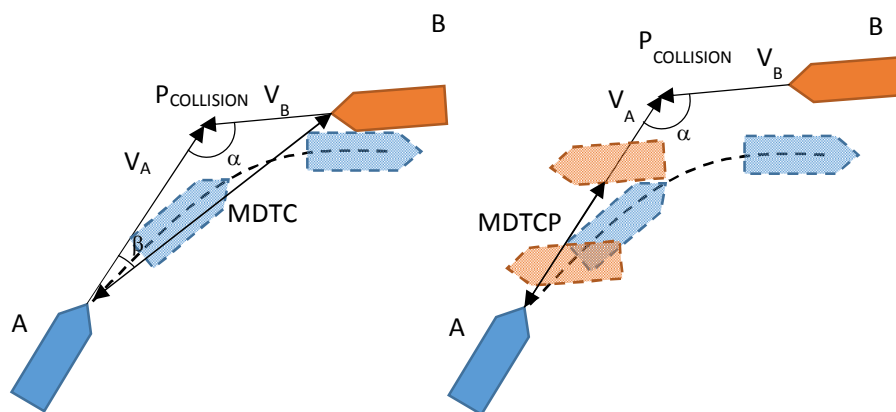


Рис. 1. Маневр последнего момента. Слева – истинное движение. Справа – определение MDTSP путем удаления судна B по курсу судна A

В случае программной реализации алгоритма оценки опасности столкновения с учетом размеров судна справедливо будет следующее:

Лемма 1: *опасность столкновения* существует, если курсовой угол β на другое судно с течением времени не меняется, при скорости сближения судов $V_{\text{COLLISION}}$ не равной нулю.

Лемма 2: *столкновение* судов A и B , определенных соответствующими множествами точек наступает, когда $A \cap B$.

Если суда маневрируют, тогда *столкновение* судов A и B , определенных соответствующими множествами точек наступает, когда геометрические множества точек их траекторий $AA \supset A$ и $BB \supset B$ пересекаются: $AA \cap BB$.

При условии, что после начала выполнения маневра судно не изменяет заданные параметры управления (например, угол перекадки руля или обороты винта), его траектория на тихой воде будет неизменной.

Также следует учитывать следующее:

- Маневр циркуляции является гораздо более эффективным, чем маневр активного торможения. Так выдвиг на циркуляции согласно стандартам ИМО [5] должен быть не более $4.5-5L$ (L – длина судна), в то время как дистанция активного торможения должна быть не более $15-20L$.

- Параметры циркуляции с установившегося режима хода мало зависят от скорости судна [4]. Так разница между выдвигом на полном ходу и малом ходу составляет около 10-15 %.

В статье [6] авторы применяют модели динамики судов без учета возмущающих воздействий. Суда удаляются друг от друга пока их траектории и советующие геометрические множества относительно этих траекторий не будут пересекаться. Минимальное расстояние между судами MDTC (minimum distance to collision) является функцией скорости взаимного сближения судов $V_{\text{COLLISION}}$, угла пересечения курсов α , массива параметров маневра M и размеров судов

$$\text{MDTC} = f(V_{\text{COLLISION}}, \alpha, M, BB, AA).$$

Массив M характеризует параметра управления судном в самом общем случае – угол перекадки руля δ и режим хода n .

Если $\alpha = 0$ – курсы судов совпадают, если $\alpha = 180$ – курсы судов противоположны.

Такой подход не позволяет получить однозначного решения задачи, так как при одном значении MDTC, но различных скоростях сближения судов, опасности столкновения может не быть.

При условии постоянства траекторий обоих судов задачу определения MDTC необходимо решать относительно точки предполагаемого столкновения, изначально определяя дистанцию до этой точки MDTCP (*minimum distance to a collision point*).

MDTSP – минимальная дистанция до расчетной точки столкновения, на которой планируемый маневр будет эффективным; геометрически определяется как расстояние между ближайшими к друг другу точками множеств А и В.

Теорема. Если опасность столкновения существует и маневр предпринимается одним судном, для одного значения минимальной дистанции до точки столкновения MDTSP (α, M, B, AA) существует множество MDTC (V_A, V_B).

В случае *одиночного* маневра судно-цель сохраняет свои курс и скорость. Таким образом, справедливо утверждение, что независимо от маневра судна А судно В окажется в предполагаемой точке столкновения $P_{COLLISION}$ с курсом ψ_B .

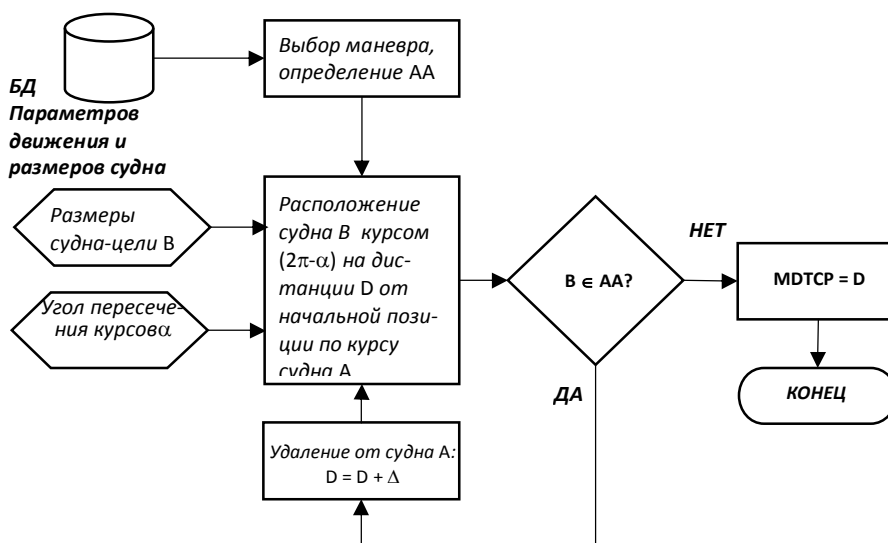


Рис. 2. Блок-схема алгоритма программы определения MDTSP

Для того чтобы найти MDTSP, задача решается инверсным способом от момента столкновения (рис. 2). Судно В под углом α располагается в начальной позиции судна А, а затем удаляется по курсу судна А с шагом Δ , до тех пор пока множество точек AA не перестанет пересекаться с В. Дистанция между начальной позицией судна А и позицией судна В, в которой $B \notin AA$ определяется как MDTSP. В данном случае при решении задачи нет необходимости учитывать скорость движения судов

$$MDTSP = f(\alpha, M, B, AA).$$

Исследуемые две дистанции связаны между собой как

$$MDTC = MDTSP \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Условие столкновения судов, предполагает, что истинные вектора движения судов сомкнутся в одной точке $P_{COLLISION}$. Отсюда, скорость взаимного сближения определяется по теореме косинусов

$$V_{COLLISION} = \sqrt{V_A^2 + V_B^2 - 2V_A V_B \cos\alpha}.$$

Так как курсовой угол $\beta = \text{const}$, независимо от расстояния между судами

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{V_B \sin\alpha}{V_{COLLISION}} \right).$$

Отсюда, для одного значения MDTCP существует множество MDTC(V_A, V_B).

Алгоритм программы определения MDTCP приведен на рис. 2.

Для того, чтобы реализовать описанный метод определения минимальной дистанции до точки столкновения, в среде Matlab Simulink R2016b автором была написана соответствующая программа. Расчеты были произведены для контейнеровоза класса панамакс (длина – 282 м, ширина 32 м, осадка 12.2 м). Кривые циркуляций были получены методом математического моделирования маневрирования судна на плоскости и сверены данными маневренного буклета. Параметры циркуляций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры циркуляции контейнеровоза класса панамакс

Угол перекладки руля	10 °	20 °	35 °
Параметр			
Выдвиг, м	1495	1128	930
Тактический диаметр, м	1971	1470	1152
Начальная скорость, узлов	24	24	24
Скорость на момент поворота на 90°, узлов	18.9	16.7	14.5

На рис. 3-5 представлены расчеты MDTCP для различных ситуаций. Так на рис. 3а четко прослеживается зависимость минимальной дистанции от угла перекладки руля и, соответственно, параметров циркуляции.

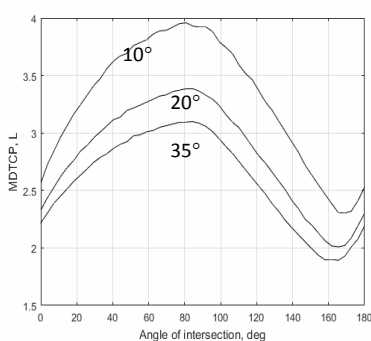


Рис. 3а. Минимальная дистанция до точки столкновения, судно-цель (длина 282 м, ширина 32 м) – справа

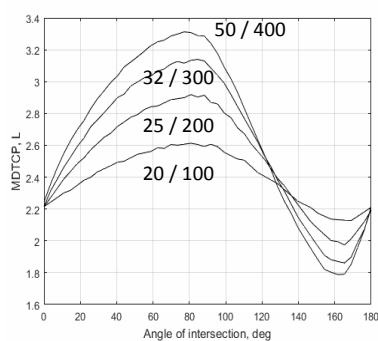


Рис. 3б. Минимальная дистанция до судов-целей справа различных размеров (В / L, м)

На рис. 3б также видно, что при увеличении размеров судов MDTCP увеличивается. Уменьшение MDTCP на встречных курсах ($\alpha \in (130, 180)$) связано с тем, что алгоритм определяет дистанцию от носа судна до ближайшей точки судна-цели. Таким образом, когда судно-цель проходит к нам на встречном курсе близком к параллельному, двигаясь справа налево, MDTC будет тем меньше, чем длиннее судно-цель. Обратная ситуация будет наблюдаться, если судно движется слева направо.

На рис. 4 наглядно видно, что попутных курсах ($\alpha < 90^\circ$) более эффективным будет отворот в сторону движения цели, в данном случае – влево. На встречных курсах более эффективным будет отворот вправо.

При этом, учитывая особенности COLREGS [3], на практике поворота влево стараются избегать.

На рис. 5 четко прослеживается зависимость дистанции опасного сближения MDTC от предполагаемой дистанции до точки столкновения MDTCP. Так при увеличении скорости судна-цели на встречных курсах MDTC увеличивается, а на попутных – уменьшается.

Выводы. В результате исследования был разработан алгоритм определения минимальной дистанции до предполагаемой точки столкновения судов, на которой можно совершить маневр последнего момента. Данная дистанция зависит от вида выполняемого судном маневра, угла пересечения курсов и размеров судов.

Показано, что задав значения скоростей судов, можно определить также минимальную дистанцию между судами, на которой можно совершить маневр последнего момента.

Полученный алгоритм может быть внедрен в автоматическую идентификационную систему или электронные карты с целью заблаговременного оповещения судоводителей о развитии ситуации опасного сближения.

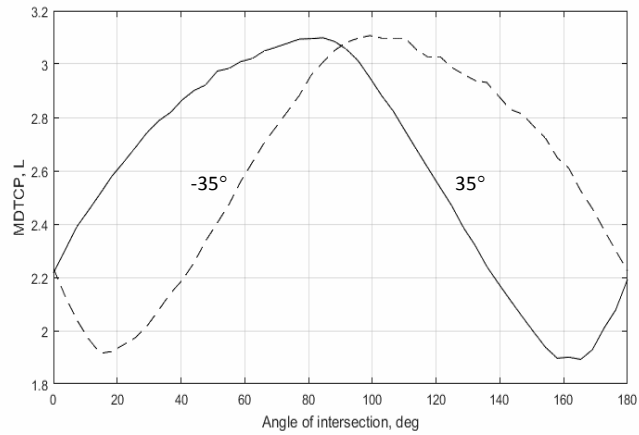


Рис. 4. Минимальная дистанция до точки столкновения;
судно-цель (длина 282 м, ширина 32 м) – справа,
при отвороте влево и вправо

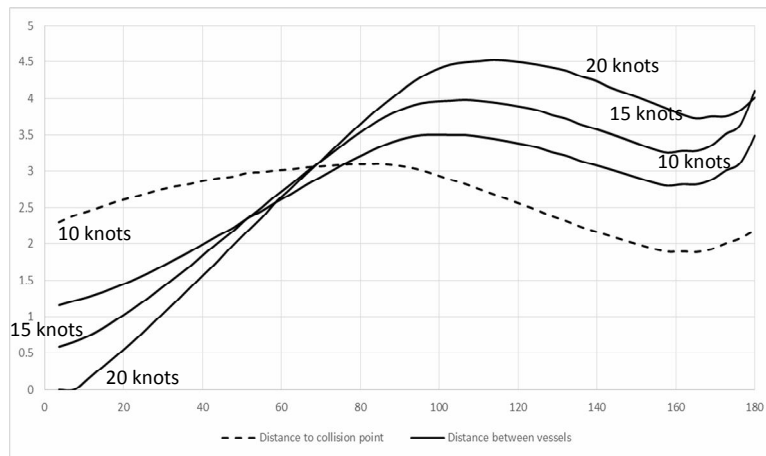


Рис. 5. Минимальная дистанция до точки столкновения;
судно-цель (длина 282 м, ширина 32 м) – справа,
при отвороте влево и вправо

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *ABS Guide for Vessel Maneuverability*, 2006
2. *Bridge watchkeeping and collision avoidance. Loss prevention bulletin. Japan P&I club. – Vol. 34. – 2015. – 10 p.*
3. *COLREGS-International Regulations for Preventing Collisions at Sea. Consolidated Edition, IMO, 2003.*
4. *Gilbert WU Lee. Managing collision avoidance at sea. A practical guide / G.WU Lee, C.J. Parker. – London, England: Nautical Institute, 2007. – 181 p.*
5. *IMO MSC 76/23, «Resolution MSC.137 (76), Standards for Ship Manoeuvrability», Report of the Maritime Safety Committee on Its Seventy-Sixth Session-Annex 6. – 2002.*
6. *Montewka J. A method for assessing a causation factor for a geometrical MDTC model for ship-ship collision probability estimation / J. Montewka, F. Goerlandt, H. Lammi & P. Kujala // Proceedings of TransNav. – Vol. 5. – № 3. – 2011.*
7. *Вагущенко Л.Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л.Л. Вагущенко, А.Л. Вагущенко. – Одесса: Феникс, 2010. – 229 с.*
8. *Ермаков С.В. Математическая модель маневра последнего момента с пассивным фактором: Вестник ГУ МРФ. – № 2(30). – 2015. – С. 41-48.*
9. *Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении: Учебное пособие. – Одесса: ОМТЦ, 2005. – 208 с.*
10. *Пупченко А.Д. Анализ аварийности мирового флота 2005-2015 // Судовождение: Сб. научн. трудов ОНМА. – Вып. 27. – Одесса: ИздатИнформ, 2017. – С. 148-157.*

Стаття надійшла до редакції 12.05.2017

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор Національного університету
«Одеська морська академія» **М.М. Цимбал**

кандидат технічних наук, професор, директор Одеського
морського тренажерного центру **Ю.В. Пашенко**