

## Учет инерционности судна при формировании области опасных курсов

Г. Е. Калиниченко

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина  
Corresponding author. E-mail: burmaka-mob@ukr.net

Paper received 08.12.17; Revised 13.12.17; Accepted for publication 15.12.17.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2017-148V16-19>

**Аннотация.** Произведен анализ влияния инерционных характеристик поворотливости судна на величину дистанции кратчайшего сближения судов при выполнении маневра расхождения судов изменением курса. Рассмотрена ситуация, когда оперирующее судно выполняет поворот на курс уклонения, а цель сохраняет неизменные параметры движения. Применена модель вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью поворота. Показано влияние инерционности судна на размеры области опасных курсов и предложены рекомендации по обеспечению безопасного расхождения судов в таких ситуациях. Приведен численный пример, подтверждающий корректность полученных результатов.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, процесс расхождения, область опасных курсов, модель вращательного движения судна, сокращение дистанции сближения.

**Введение.** При плавании судов в стесненных районах с интенсивным движением безопасность судоходства обеспечивается системами управления движения судов (СУДС), которые выбирают стратегию расхождения опасно сближающихся судов. При расчете момента времени начала уклонения судов необходимо учитывать их инерционность, иначе дистанция кратчайшего сближения будет меньше требуемой предельно-допустимой дистанции, что создает ситуацию их возможного столкновения. Поэтому СУДС должны быть оснащены современными средствами предупреждения столкновения судов, использующими способы безопасного расхождения двух и более судов, что обуславливает актуальность и перспективность исследования по данной тематике.

**Краткий обзор публикаций по теме.** Работы [1-6] посвящены различным моделям аналитического описания взаимодействия судов в ситуации опасного сближения и процедурам выбора безопасной стратегии расхождения. Проблема предупреждения столкновений судов подробно исследована в работе [1], в ней предложен метод гибких стратегий их расхождения, который позволяет формировать оптимальную стратегию расхождения судна с несколькими опасными целями с учетом динамики судна, требований МППСС-72, и имеющимися в районе маневрирования навигационными опасностями. Понятию взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения посвящена работа [2], в которой формализованы МППСС-72. В работе [3] для описания процесса расхождения используются методы теории оптимальных дискретных процессов, а применение метода нелинейной интегральной инвариантности предлагается в работе [4]. Формализация взаимодействия судов при расхождении в рамках теории дифференциальных игр производится в работах [5, 6].

В монографии [7] освещен ряд особенностей задачи расхождения судов в море и приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути. Результаты исследования эффективности парных маневров расхождения приведены в работе [8].

Однако, при управлении процессом расхождения судов с помощью СУДС исчезает необходимость во взаимном согласовании маневров судов механизмом взаимодействия, т. е. реализуется принцип внешнего управления процессом расхождения [9].

**Цель.** Цель публикации – разработка процедуры формирования области опасных курсов судов с учетом их инерционных характеристик поворотливости.

**Материалы и методы.** В работе [10] показано, что сближение двух судов характеризуется областью опасных курсов  $\Omega$ , которая отображается на плоскости курсов судов. Верхней и нижней границами области  $\Omega$  являются точки  $(K_1, K_2)$ , которые соответственно удовлетворяют уравнениям:

$$\begin{aligned} K_2^{(1)} &= \gamma^{(1)} + \arcsin\left[\frac{V_1}{V_2} \sin(K_1 - \gamma^{(1)})\right] \\ K_2^{(2)} &= \gamma^{(2)} + \arcsin\left[\frac{V_1}{V_2} \sin(K_1 - \gamma^{(2)})\right], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\gamma^{(1,2)} = \alpha \pm \arcsin D_d / D$ ;  $\alpha$  и  $D$  - соответственно пеленг и дистанция между судами;  $D_d$  - предельно-допустимой дистанции сближения.

Если точка  $(K_1, K_2)$  находится на границе или вне области опасных курсов  $\Omega$  угроза столкновения отсутствует ( $D_{\min} \geq D_d$ ), в противном случае дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min}$  меньше предельно-допустимой дистанции  $D_d$ , и сближение судов является опасным. Для безопасного расхождения необходимо выбрать точку  $(K_{1y}, K_2)$ , соответствующую курсу уклонения оперирующего судна  $K_{1y}$ , которая находится на границе области опасных курсов  $\Omega$ .

Если рассчитать границы области опасных курсов  $\Omega$  с помощью последних выражений, то не будет учтена инерционность судна при повороте, и расхождение произойдет не в предельно-допустимой дистанции  $D_d$ , а на величину  $\Delta D_d$  ближе. Следовательно, для учета инерционности поворота необходимо предельно-допустимую дистанцию увеличивать до значения  $D_d + \Delta D_d$  и суда разойдутся на дистанции  $D_d$ . Величина поправки  $\Delta D_d$  однозначно определяется динамической моделью вращательного движения судна и приближение ее значения к истинному определяется степенью адекватности динамической модели вращательного движения реальному процессу поворота судна. Таким образом, в рассмотренных случаях использования модели поворотливости судна определяющим обстоятельством является степень соответствия динамической модели вращательного движения судна реальному процессу его поворота.

**Результаты и их обсуждение.** Найдем выражение для расчета приращения дистанции  $\Delta D_d$ , для чего обратимся к рис. 1, из которого следует:

$$\Delta D_d = MN \sin(K_{oty}^* - \psi),$$

где  $K_{oty}^*$  - относительный курс уклонения, который определяется выражением (рис. 1),

$$K_{oty}^* = \alpha - \arcsin(D_d / D).$$

Если обозначить приращения относительных координат  $\Delta x_{ot}$  и  $\Delta y_{ot}$  за время поворота, то

$$\Delta x_{ot} = x_1 - x_2, \quad \Delta y_{ot} = y_1 - y_2 \quad (2)$$

где составляющие  $x_1$  и  $y_1$  - криволинейное движение оперирующего судна при повороте, а вторая составляющая  $x_2$  и  $y_2$  - прямолинейное движение цели без изменения параметров движения.

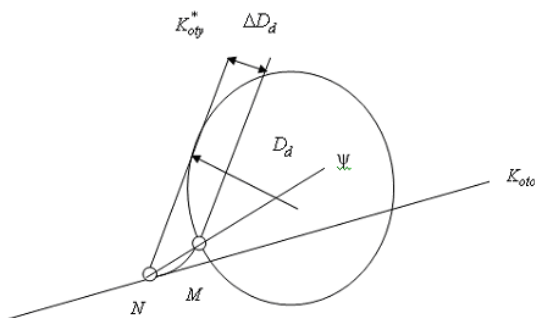


Рис. 1. Определение приращения дистанции  $\Delta D_d$

Очевидно, отрезок  $MN = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2}$ , а угол  $\psi = \arctg(\Delta x_{ot} / \Delta y_{ot})$ . Следовательно, окончательно выражение для расчета  $\Delta D_d$  имеет вид:

$$\Delta D_d = \sqrt{\Delta x_{ot}^2 + \Delta y_{ot}^2} \sin[K_{oty}^* - \arctg(\Delta x_{ot} / \Delta y_{ot})] \quad (3)$$

В работе [10] получены выражения для приращения координат  $x_1$  и  $y_1$  оперирующего судна в результате поворота при расчете их по модели вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью  $\omega_p$ :

$$x_1 = \frac{V_1}{\omega_p} (\cos K_1 - \cos K_y^*), \quad y_1 = \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_y^* - \sin K_1),$$

где  $K_y^*$  - курс уклонения судна, причем его величина для встречных курсов судна и цели зависит от относительного курса  $K_{oty}^*$  [1],

$$K_y^* = K_{oty}^* + \arcsin\left[\frac{V_2}{V_1} \sin(K_2 - K_{oty}^*)\right].$$

Составляющие прямолинейного движения цели  $x_2$  и  $y_2$  выражаются очевидным образом:

$$x_2 = V_2 \tau \sin K_2; \quad y_2 = V_2 \tau \cos K_2,$$

где продолжительность поворота  $\tau = (K_y^* - K_1) / \omega_p$ .

Следовательно, приращение относительных координат  $\Delta x_{ot}$  и  $\Delta y_{ot}$  (2) в рассматриваемом случае:

$$\Delta x_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\cos K_1 - \cos K_y^*) - V_2 \frac{K_y^* - K_1}{\omega_p} \sin K_2,$$

$$\Delta y_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_y^* - \sin K_1) - V_2 \frac{K_y^* - K_1}{\omega_p} \cos K_2.$$

С учетом полученных приращений  $\Delta x_{ot}$  и  $\Delta y_{ot}$  по выражению (3) рассчитывается величина приращения  $\Delta D_d^{(1)}$  предельно-допустимой дистанции сближения для данной модели вращательного движения судна.

Для формирования модифицированной области опасных курсов  $\Omega_m$  с учетом инерционности судов при повороте в уравнениях границ необходимо предельно-допустимую дистанцию  $D_d$  увеличить на величину приращения дистанции  $\Delta D_d$ , т. е. уравнения границ (1) с учетом выражения для величины  $\gamma^{(1,2)}$  принимает вид:

$$K_2^{(1,2)} = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{D} + \arcsin \left\{ \frac{V_1}{V_2} \left[ \sin(K_1 - \alpha \mp \arcsin \frac{D_d + \Delta D_d}{D}) \right] \right\}$$

В этом случае границы области опасных курсов  $\Omega_m$  изменяют свой первоначальный вид, а значения безопасных курсов уклонения отличаются от первоначальных.

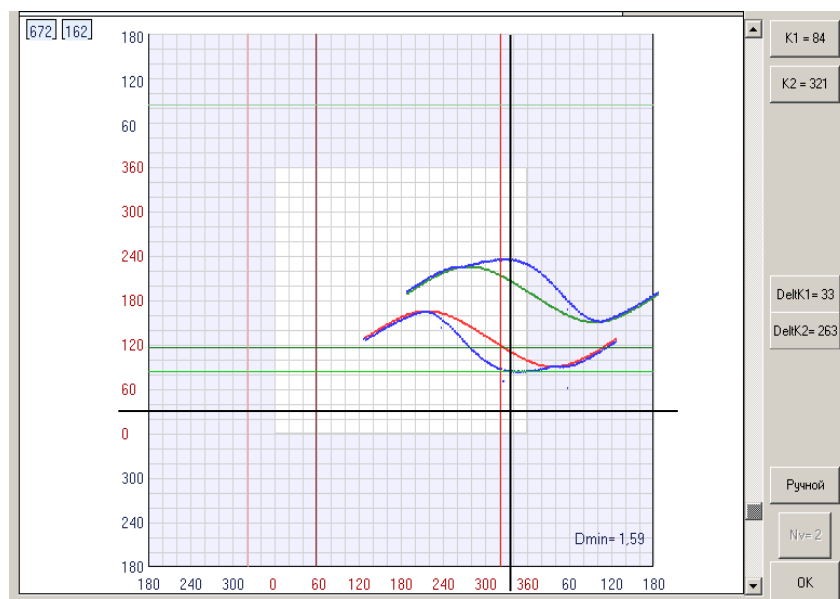


Рис. 2. Границы областей  $\Omega$  и  $\Omega_m$

В качестве примера рассмотрим ситуацию опасного сближения судов с параметрами: относительная позиция сближения  $\alpha_{12} = 158^\circ$ ,  $D_{12} = 2,0$  мили и параметры движения обеих судов  $K_1 = 117^\circ$ ,  $V_1 = 23$  узла,  $K_2 = 58^\circ$ ,  $V_2 = 14$  узлов, величина предельно-допустимой дистанции сближения судов  $D_d$  выбрана равной 1 миле. Прогнозируемое значения дистанции кратчайшего сближения в рассматриваемой ситуации равно 0,16 мили, что меньше величины  $D_d$ . Границы области опасных курсов с учетом инерционности судов и без него представлены на рис. 2. В данной ситуации границы области опасных курсов при учете инерционности судов (синего цвета) значительно отличаются от границ без учета их инерционности (красного и зеленого цвета). Без учета инерционности для безопасного расхождения достаточно было бы изменить курс второго судна влево на значение  $\kappa_{2y} = 321^\circ$ , не меняя курса первого судна. В этом случае соответствующая вертикальная темная линия проходит через красную нижнюю границу области опасных курсов, пересекаясь с горизонтальной линией начального курса первого судна  $\kappa_1 = 117^\circ$ . Однако нижняя граница области опасных курсов с учетом инерционности судов синего цвета проходит гораздо ниже и для безопасного расхождения необходимо еще

и уклонение первого судна влево на курс  $K_{1y} = 84^\circ$  (нижняя горизонтальная темная линия). Таким образом, для безопасного расхождения судов с учетом их инерционности на допустимой дистанции  $D_d = 1$  мили судам следует лечь на курсы уклонения  $\kappa_{1y} = 84^\circ$  и  $\kappa_{2y} = 321^\circ$ .

#### Выводы

1. Получено выражение для расчета величины сокращения дистанции кратчайшего сближения при повороте судна из-за его инерционности. Показано, что оценка его величины зависит от применяемой модели вращательного движения судна для прогноза его поворота.

2. Показано влияние инерционности судна на размеры области опасных курсов и предложена процедура расчета границ модифицированной области для выбора безопасных курсов расхождения сближающихся судов с учетом их инерционности.

3. Приведен численный пример, подтверждающий корректность полученных теоретических результатов

4. Показана целесообразность использования полученной процедуры расчета границ модифицированной области опасных курсов в компьютерной информационной системе внешнего управления процессом расхождения судов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н.Цымбал, И.А.Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. - 424 с.
2. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков - Херсон: Гринь Д.С., 2015.-312 с.
3. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. - 1984. - № 12. - С. 22-24.
4. Павлов В.В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ В.В. Павлов, Н.И. Сеньшин // Кибернетика и вычислительная техника. - 1985. - № 68. - С. 43-45.
5. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation/ Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. - 2005. - Vol. 2. - London-Singapore, Balkema Publishers. - P. 1285-1292.
6. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / В. Е. Кудряшов // Судостроение. - 1978.- №5. - С. 35-40.
7. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. - Одесса: Феникс, 2013. - 180 с.
8. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков., С.И. Заичко // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, - Вып.15. - Одесса: "ИздатИнформ", 2008. - С. 166 - 171.
9. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. - 2014. - Вып. 20. Одесса: ОНМА. - С. 18 -23.
10. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А Бурмака., Э.Н Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), - 2016. - 585 с.

#### REFERENCES

1. Tsimbal N.N. Flexible strategies of divergence of vessels/ Tsimbal N.N., Burmaka I.A. and Tyupikov E.E. - Odessa: KP OGT.- 2007.- 424 p.
2. Pyatakov E.N. Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / Pyatakov E.N., Buzhbeckij R.Y., Burmaka I.A., Bulgakov A. Y. - Kherson: Grin D. S.- 2015.- 312 p.
3. Kulikov A.M. Optimum management by divergence of vessels / Kulikov A.M., and Poddubnyy V.V.// Sudostroenie. -1984.- №12.- p. 22 - 24.
4. Pavlov V.V. Some questions of choice of maneuver in the situations of divergence of vessels/ Pavlov V.V., Senshin N.I. // Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika. - 1985.- №68. - p. 43 - 45.
6. Kudryashov V.E. Synthesis of algorithms of safe management by a ship at divergence with a few objects/Kudryashov V.E. //Sudostroenie .- 1978.- №5.- p. 35 - 40.
7. Vagushchenko L.L. Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way / Vagushchenko L.L.- Odessa: Feniks.- 2013.- 180 p.
8. Pyatakov E. N. Estimation of efficiency of pair strategies of going away vessels / Pyatakov E. N., Zaichko S.I.// Sudovozhdenie.- 2008.- №15 .- p. 166 - 171.
9. Burmaka I.A. Maneuver of divergence of three vessels by the change of courses/ Burmaka I.A., Bulgakov A. Y.// Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. - 2014.- №20 . - p. 18 -23.
10. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A.- LAP LAMBERT Academic Publishing, - Saarbryukken (Germany), - 2016. - 585 p.

### **Учет инерционности судна при формировании области опасных курсов**

**Г. Е. Калинин**

**Аннотация.** Произведен анализ влияния инерционных характеристик поворотливости судна на величину дистанции кратчайшего сближения судов при выполнении маневра расхождения судов изменением курса. Рассмотрена ситуация, когда оперирующее судно выполняет поворот на курс уклонения, а цель сохраняет неизменные параметры движения. Применена модель вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью поворота. Показано влияние инерционности судна на размеры области опасных курсов и предложены рекомендации по обеспечению безопасного расхождения судов в таких ситуациях. Приведен численный пример, подтверждающий корректность полученных результатов.

**Ключевые слова:** *безопасность судовождения, процесс расхождения, область опасных курсов, модель вращательного движения судна, сокращение дистанции сближения.*

### **Accounting for inertia of the vessel in the formation of the area of dangerous courses**

**G. E. Kalinichenko**

**Abstract.** The analysis of the influence of the inertial characteristics of the ship's swing ability on the distance of the shortest approach of vessels during the manoeuvring of the difference of vessels by the course change is made. The situation is considered when the operating vessel performs a turn on the course of evasion, and the target retains the unchanged parameters of the movement. A model of rotational motion of a vessel with a constant angular velocity of rotation is used. The influence of inertia of the vessel on the size of the area of dangerous courses is shown and recommendations are proposed for ensuring safe passing of vessels in such situations. A numerical example confirming the correctness of the obtained results is given.

**Keywords:** *safety of navigation, process of passing, area of dangerous courses, model of ship's rotational motion, reduction of approach distance.*