

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ОПАСНЫХ КУРСОВ СУДОВ С УЧЕТОМ ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

При плавании судов в стесненных районах с интенсивными судопотоками безопасность судовождения обеспечивается системами управления движения судов, 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.

В работе [1] рассмотрены вопросы эффективности парных маневров расхождения, а вопросы предупреждения столкновений судов с помощью гибких стратегий расхождения исследуются в работе [2]. Принцип внешнего управления тремя судами для компенсации ситуационного возмущения с помощью опасной области курсов рассмотрен в работе [3]. В работах [3, 4] предложен способ формирования опасной области курсов сближающихся судов, с помощью которой определяется безопасный маневр расхождения изменением их курсов. Однако при расчете границ опасной области курсов, которые используются для определения курсов уклонения, не учитывается инерционность судов, что ведет к сближению судов на дистанциях меньше запланированных и вызывает угрозу столкновения.

Цель публикации – разработка процедуры формирования опасной области курсов судов с учетом их динамических характеристик поворотливости.

В работе [4] показано, что множество парных состояний двух опасно сближающихся судов можно представлять областью опасных курсов Ω , которая отображается на плоскости курсов судов. Причем верхней и нижней границами области Ω 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 $\gamma^{(1,2)} = \alpha \pm \arcsin D_d / D$; α и D - соответственно пеленг и дистанция между судами; D_d - предельно-допустимой дистанции сближения.

Как показано в работе [4], если точка (K_1, K_2) находится на границе или вне области опасных курсов Ω 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 Ω .

Если рассчитать границы области опасных курсов Ω с помощью выражений (1), то, как следует из рис. 1, не будет учтена инерционность судна при повороте, и расхождение произойдет не в предельно-допустимой дистанции D_d , а на величину ΔD_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 .

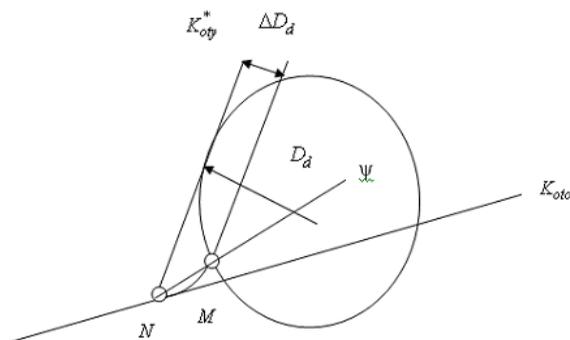


Рис. 1. Определение приращения дистанции ΔD_d

Найдем выражение для расчета приращения дистанции ΔD_d , для чего обратимся к рис. 1, из которого следует:

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

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

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

Если обозначить приращения относительных координат Δx_{ot} и Δy_{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.

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 ΔD_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 [4] 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 ω_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}^* [2],

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

Составляющие прямолинейного движения цели 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 в рассматриваемом случае:

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

$$\Delta y_{ot} = \frac{V_1}{\omega_p} (\sin K_y^* - \sin K_1) - V_2 \frac{K_y^* - K_1}{\omega_p} \cos K_2. \quad (4)$$

С учетом полученных приращений Δx_{ot} и Δy_{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 Ω с учетом инерционности судов при повороте в уравнениях границ необходимо предельно-допустимую дистанцию D_d увеличить на величину приращения дистанции ΔD_d , т.е. уравнения границ (1) с учетом выражения для величины $\gamma^{(1,2)}$ принимает вид:

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

Произведена численная оценка значения приращения предельно-допустимой дистанции сближения ΔD_d для рассмотренной модели вращательного движения судна. В качестве примера выбраны характеристики поворотливости балкера «Sheila Ann» при угле кладки пера руля 10° , которые были получены натурными наблюдениями в реальных условиях эксплуатации [5]: $\omega_p = 0,5422$ градус/с. В примере рассмотрена следующая ситуация опасного сближения: $K_1 = 45^\circ$, $V_1 = 15$ узлов, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 20$ узлов, $\alpha = 100^\circ$, $D = 3$ мили, $D_d = 1$ мили. В данной ситуации прогнозируемая дистанция кратчайшего сближения $D_{\min} = 0,1$ мили. Расчетом параметров уклонения судна вправо, получено $K_{oy}^* = 120^\circ$, $K_y^* = 99^\circ$.

Определены характеристики маневра уклонения при использовании модели вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью. Продолжительность поворота $\tau = 99,6$ с, приращение координат оперирующего судна за это время x_1 , y_1 и цели x_2 , y_2 , рассчитанные с помощью выражений (4):

$x_1 = 703,6$ м; $y_1 = 228,7$ м; $x_2 = -724,3$ м; $y_2 = 723,7$ м, – следовательно $\Delta x_{ot} = 1427,9$ м, $\Delta y_{ot} = -495,0$ м, а также $MN = 1511,2$ м, $\psi = -70,9^\circ$ и $\Delta D_d = 0,154$ мили.

Таким образом, при расчете границ области опасных курсов Ω с помощью выражения (1) выбор маневра расхождения курсом уклоне-

ния судна K_{1y} , обеспечивающего положение точки (K_{1y}, K_2) на границе области Ω , вместо ожидаемой дистанции расхождения 1 миля обеспечит меньшую дистанцию, как следует из примера, равную 0,846 мили. Поэтому при расчете границ области опасных курсов Ω надлежит предельно-допустимую дистанцию сближения увеличить на ΔD_d , т.е. в приведенном примере при расчете границ области опасных курсов следует выбрать предельно-допустимую дистанцию сближения вместо 1 мили, равную 1,154 мили, что обеспечит кратчайшее сближение на расстоянии 1 миля при использовании области Ω .

Для расчета границ области $\tilde{\Omega}$ с учетом инерционности судов при повороте разработана компьютерная программа, в которой приращенные координат судов при повороте рассчитывались с помощью модели вращательного движения с постоянной угловой скоростью. Вначале в режиме отсутствия учета инерционности судна при повороте программой рассчитывались границы опасной области Ω с предельно-допустимой дистанцией D_d для ситуации опасного сближения, параметры которой приводились выше. На рис. 2 показана область опасных курсов Ω , которая сформирована без учета инерционности судна и по ее верхней границе определяется стандартный курс уклонения равный 99° , при этом расчетное значение $D_{\min} = 1,00$, хотя реальная дистанция кратчайшего сближения составляет 0,846 мили. При учете инерционности судна программой рассчитываются границы модифицированной области опасных курсов $\tilde{\Omega}$ по предельно-допустимой дистанции $D_d + \Delta D_d$, в нашем примере равной 1,154 мили, которые показаны на рис. 3. Следует обратить внимание, что размеры области опасных курсов $\tilde{\Omega}$ увеличились. По верхней границе области $\tilde{\Omega}$ определен курс уклонения $K_{1y} = 106^\circ$, при котором расчетное значение $D_{\min} = 1,154$ мили, а реальное значение с учетом инерционности равно 1,00 мили.

Для расхождения в заданной предельно-допустимой дистанции сближения с учетом инерционности судна курс уклонения отличается от стандартного курса (в приведенном примере на 7°). Это обстоятельство учтено при формировании модифицированной области опасных курсов $\tilde{\Omega}$.

Предложена процедура формирования опасной области курсов судов с учетом их инерционности, которая позволяет уточнить курс уклонения судна, повышая безопасность процесса расхождения.

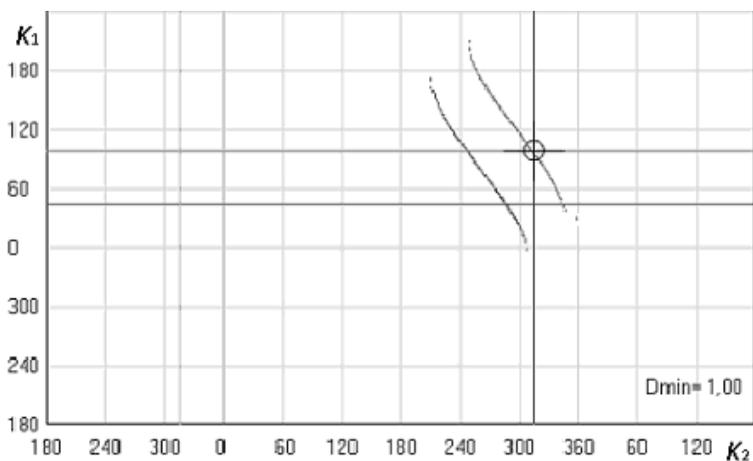


Рис. 2. Определение курса уклонения судна по границе области Ω

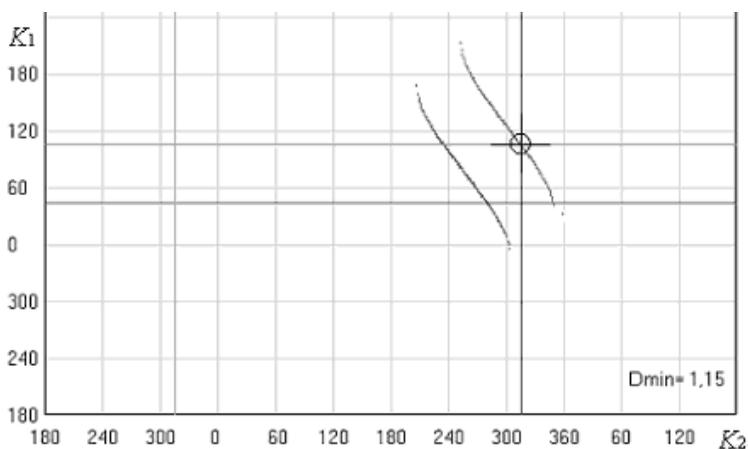


Рис. 3. Выбор курса уклонения судна с помощью границы области $\tilde{\Omega}$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков., С.И. Заичко // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. – 2008. – Вып. 15. - С. 166 – 171.

2. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.

3. 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.

4. 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.

5. Чапчай, Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Е.П. Чапчай // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА. – 2006. – Вып. 11. - С. 139 – 142.