

**CONDITION OF EXISTENCE OF MANOEUVRES OF
VESSEL'S PASSING BY SPEED VARIATION****УСЛОВИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ МНОЖЕСТВА МАНЕВРОВ
РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ ИЗМЕНЕНИЕМ СКОРОСТЕЙ****I.A. Burmaka, PhD, associate professor****И.А. Бурмака, к.т.н., доцент***National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine**Національний університет «Одеська морська академія», Україна***ABSTRACT**

In the article the conclusion of condition of existence of unempty set of maneuvers of passing by pair of vessels is presented by the change of their speeds and analytical expressions of the created condition taking into account the chosen mode of braking vessels are resulted. The conclusion is finalised.

Key words: safety of navigation, maneuver of divergence of vessels by the change of speeds, great number of possible maneuvers.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Одной из важнейших проблем повышения безопасности судовождения является снижение аварийности судов при плавании в стесненных водах. Стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением в настоящее время оборудуются станциями управления движением судов, которые предназначены для контроля процесса судовождения и управления движением опасно сближающихся судов. В связи с этим разработка способов управления опасно сближающимися судами, в частности изменением их скоростей, является актуальным научным направлением.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Формализация основных характеристик управляемой динамической системы судов предлагается в статье [1], а принципы управления группой судов при возникновении ситуации опасного сближения рассмотрены в работе [2].

Работы [3, 4] посвящены вопросам применения опасной области курсов судов для безопасного судовождения, причем в работе [3] рассмотрено использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения, а в работе [4] предложен маневр расхождения трех судов изменением их курсов.

Формулировка целей статьи

Данная статья посвящена определению условий существования множества маневров расхождения пары судов изменением скорости.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Первый из признаков возможного существования множества безопасных маневров расхождения изменением скоростей судов заключается в выяснении возможности изменения начального относительного курса при изменении скоростей сближающихся судов. Для этого следует рассмотреть первую производную начального относительного курса $K_{\text{отн}}$ по скорости судна V_1 .

Если первая производная $\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1}$ будет равна нулю, то изменить начальный относительный курс $K_{\text{отн}}$ маневром скорости невозможно. В противном случае следует еще убедиться, можно ли разойтись с целью в допустимой дистанции кратчайшего сближения.

Найдем выражение для $\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1}$, воспользовавшись полученной в работе [3]

зависимостью:

$$K_{\text{отн}} = \arcsin \left[\frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)}} \right].$$

Обозначим $X = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)}}$ и получим $K_{\text{отн}} = \arcsin[X]$.

Искомая производная $\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1}$ принимает вид [4]:

$$\frac{\partial K_{\text{отн}}}{\partial V_1} = - \frac{V_2 \sin \Delta K}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K}. \quad (1)$$

Для характеристики изменения относительного курса при изменении скоростей обоих судов необходимо найти производную от выражения (1) по переменной V_2 :

$$\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2} = - \frac{\partial}{\partial V_2} \left(\frac{V_2 \sin \Delta K}{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K} \right).$$

Дифференцируя правую часть равенства, получим:

$$\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2} = - \frac{[(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K) - V_2 (2V_2 - 2V_1 \cos \Delta K)] \sin \Delta K}{(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)^2}.$$

Обращаем внимание, что:

$$V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K - V_2 (2V_2 - 2V_1 \cos \Delta K) = V_1^2 - V_2^2 = \Delta V (V_1 + V_2),$$

где $\Delta V = V_1 - V_2$.

Следовательно:

$$\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2} = - \frac{\Delta V (V_1 + V_2) \sin \Delta K}{(V_1^2 + V_2^2 - 2V_1 V_2 \cos \Delta K)^2}. \quad (2)$$

Анализ полученного выражения $\frac{\partial^2 K_{\text{отн}}}{\partial V_1 \partial V_2}$ показывает, что при значении $\Delta K = 0$ и

$\Delta K = 180$ числитель выражения обращается в ноль, что означает при следовании судов на контркурсах и параллельными курсами изменение скоростей судов не влияет на величину относительного курса. Поэтому в таких ситуациях маневр расхождения судов изменением скоростей невозможен, т. е. множество безопасных маневров расхождения является пустым.

Из выражения (2) также следует, что при равенстве текущих скоростей судов ($\Delta V = 0$) величина относительного курса $K_{\text{отн}}$ также не меняется. Поэтому в случае равенства начальных судовых скоростей при их одинаковом изменении маневр расхождения судов изменением скоростей невозможен.

В работе [5] показано, что область недопустимых скоростей пары судов имеет границы:

$$V_1^* = k^* V_2, \quad V_{1*} = k_* V_2,$$

$$\text{где } k^* = \frac{\sin(K_2 - \gamma^*)}{\sin(K_1 - \gamma^*)} \text{ и } k_* = \frac{\sin(K_2 - \gamma_*)}{\sin(K_1 - \gamma_*)}.$$

Очевидно, возможное существование множества безопасных маневров расхождения имеет место при условии:

$$\infty > k^* > 0, \quad \infty > k_* > 0 \text{ и } k^* > k_*. \quad (3)$$

В противном случае множество безопасных маневров расхождения является пустым. В этом случае (3) область опасных скоростей имеет вид,

показанный на рис. 1. В данном примере параметры ситуации сближения имеют следующие значения:

$$\alpha_0 = 45^\circ, D_0 = 3 \text{ мили}, D_d = 1 \text{ миля}, K_1 = 90^\circ, K_2 = 180^\circ.$$

При начальных скоростях $V_1 = 18$ уз и $V_2 = 21$ уз дистанция кратчайшего сближения $D_{\min} = 0,23$ мили.

Если условие (3) справедливо, то учет инерционных характеристик судов при выборе безопасного маневра расхождения изменения их скоростей состоит в следующем.

С помощью области опасных скоростей определяется пара безопасных скоростей V_{1y} и V_{2y} . Из-за инерционности судов для достижения необходимых скоростей расхождения V_{1y} и V_{2y} требуется время τ_{1y} и τ_{2y} .

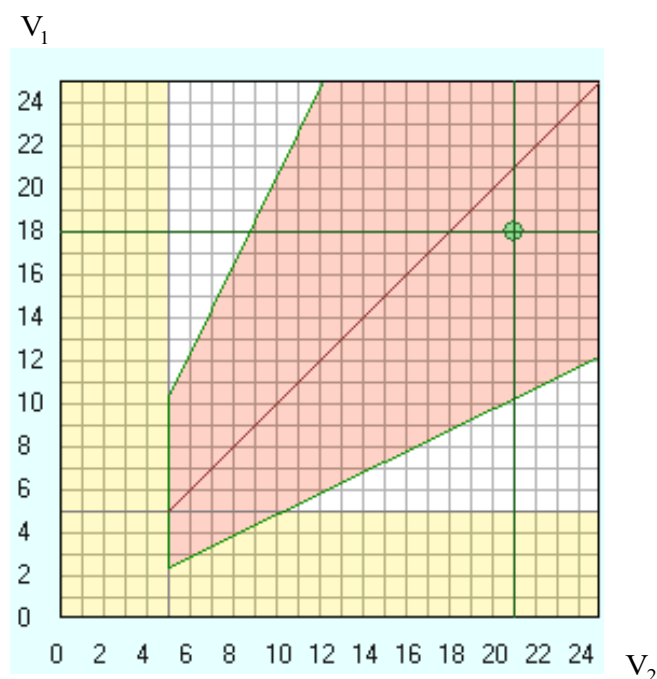


Рис. 1. Область опасных скоростей судов

В общем случае эти интервалы времени не равны между собой. Поэтому длительность переходного процесса t_p от начала изменения скоростей судов до выбранных значений V_{1y} и V_{2y} определяется большим из интервалов τ_{1y} и τ_{2y} , т. е. $t_p = \max(\tau_{1y}, \tau_{2y})$. Если в этот момент времени при неизменных курсах судов K_1 и K_2 , а также установившихся скоростях V_{1y} и V_{2y} дистанция кратчайшего сближения будет равна или больше предельно-допустимой дистанции D_d , то множество безопасных маневров расхождения существует.

Очевидно, значения скоростей V_{1y} и V_{2y} являются меньшими, чем их начальные значения V_1 и V_2 , т. е. маневр расхождения судов изменением скоростей выполняется их торможением, и суда с пониженными скоростями

следуют до момента времени кратчайшего сближения, после чего увеличивают скорости до начальных значений.

Допустим, начальная ситуация опасного сближения судов для начального момента времени $t_0 = 0$ характеризуется пеленгом α_0 и дистанцией D_0 . Так как пеленг α_0 задается с первого судна на второе, то для первого судна целесообразно принять начальные координаты $X_{10} = 0$ и $Y_{10} = 0$. Очевидно, начальные координаты второго судна имеют значения $X_{20} = D_0 \sin \alpha_0$ и $Y_{20} = D_0 \cos \alpha_0$.

С течением времени координаты судов X_{1t} , Y_{1t} , X_{2t} и Y_{2t} , а также текущие значения дистанции D_t и пеленга α_t изменяются. Обозначим через c_{mx} судно, переходной период которого больше и равный длительности общего переходного процесса t_p . Судно с меньшим переходным периодом обозначим c_{mn} . Если время начала маневра расхождения t_n превосходит начальный момент времени t_0 , то суда в течение переходного процесса t_p проходят следующие дистанции:

$$L_{mx} = V_{mx} t_n + S_{mx},$$

$$L_{mn} = V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny} (t_p - \tau_{mn}),$$

где S_{mx} и S_{mn} - расстояния, которые проходят соответственно суда c_{mx} и c_{mn} за время переходного процесса изменения скоростей τ_{mx} и τ_{mn} .

К моменту времени окончания общего переходного процесса t_p координаты судов X_{mxp} , Y_{mxp} , X_{mnp} и Y_{mnp} определяются следующими выражениями:

$$X_{mxp} = L_{mx} \sin K_{mx} = (V_{mx} t_n + S_{mx}) \sin K_{mx};$$

$$Y_{mxp} = L_{mx} \cos K_{mx} = (V_{mx} t_n + S_{mx}) \cos K_{mx};$$

$$X_{mnp} = L_{mn} \sin K_{mn} = [V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny} (t_p - \tau_{mn})] \sin K_{mn};$$

$$Y_{mnp} = L_{mn} \cos K_{mn} = [V_{mn} t_n + S_{mn} + V_{mny} (t_p - \tau_{mn})] \cos K_{mn}.$$

Значения пеленга α_p и дистанции D_p на момент времени t_p :

$$D_p = \sqrt{(X_{mxp} - X_{mnp})^2 + (Y_{mxp} - Y_{mnp})^2},$$

$$\alpha_p = \arcsin \frac{X_{mxp} - X_{mnp}}{D_p},$$

причем четверть, в которой находится пеленг α_p , определяется знаками выражений $(X_{mxp} - X_{mnp})$ и $(Y_{mxp} - Y_{mnp})$.

В момент времени t_p параметры движения обоих судов становятся неизменными, как и относительный курс $K_{отр}$. Поэтому дистанция кратчайшего сближения судов D_{min} рассчитывается с помощью формулы:

$$D_{min} = \Delta_p D_p \sin(K_{отр} - \alpha_p),$$

где $\Delta_p = \text{sign}[\sin(K_{отр} - \alpha_p)]$.

Если полученное значение D_{min} равно или больше величины D_d , то существует множество допустимых маневров расхождения с помощью выбранных скоростей V_{1y} и V_{2y} . В противном случае следует выбрать другую пару скоростей V_{1y} и V_{2y} , которые не принадлежат области опасных скоростей, и повторить проверку существования множества допустимых маневров.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Таким образом, в данной статье получено условие существования непустого множества маневров расхождения скоростей опасно сближающихся судов с учетом их инерционности. В дальнейшем целесообразна разработка процедуры выбора оптимального маневра расхождения из полученного множества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тюпиков Е.Е. Особенности расхождения с целью изменением скорости судна / Тюпиков Е.Е. // Судовождение: Сб. научн. трудов.- Вып.11/ ОНМА, – Одесса: ИздатИнформ, 2006. – С. 122 - 126.
2. Тюпиков Е.Е. Зависимость момента начала маневра расхождения изменением скорости от инерционных характеристик судна / Тюпиков Е.Е., Цымбал Н.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов.- Вып. 14/ ОНМА, – Одесса: Издатинформ, 2007 – С. 130 – 135.
3. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
4. Пятаков Э.Н. Учет в автоматизированных системах принятия решений влияния изменения скорости судна на относительный курс / Пятаков Э.Н. // Проблемы техники: Научно-виробничий журнал. - 2013. № 4 . – С. 140 – 144.
5. Бурмака И.А. Управление парой судов в ситуации опасного сближения / Бурмака И.А., Калиниченко Г.Е., Кулаков М.А.// Вестник Государственного университета морского и речного флота им.адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2016. – выпуск 3 (37). – С. 64 - 70.