

9. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

10. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth,

McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.

11. Волков А.Н. Формирование процесса расхождения судна в ситуации опасного сближения методом виртуальных областей / Волков А.Н., Булгаков А.Ю., Голиков А.А. //East European Scientific Journal, №11 (27), 2017, part 1.- С. 4 - 13.

Petrichenko E.A.

PhD, associate professor,

National University «Odessa Maritime Academy»

MANOEVRE OF DIVERGENCE OF VESSELS BY CHANGE OF THEIR COURSES TAKING INTO ACCOUNT NAVIGATION DANGERS

Петриченко Евгений Анатольевич

кандидат технических наук, доцент

Национальный университет "Одесская морская академия"

МАНЕВР РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ ИЗМЕНЕНИЕМ ИХ КУРСОВ С УЧЕТОМ НАВИГАЦИОННЫХ ОПАСНОСТЕЙ

Summary. Analytical expressions describing the scopes of point and distributed linear navigation danger depending on the parameters of situation of dangerous rapprochement are resulted.

Formulas for the calculation of scope courses of deviation are given , dividing the great numbers of safe and dangerous courses, in the case of presence of point or distributed linear navigation danger.

The examples of determination of optimum maneuvers of divergence of vessels by the change of courses at the use of region of dangerous courses taking into account a point and distributed linear navigation danger are considered.

Аннотация. Приведены аналитические выражения, описывающие границы точечной и распределенной линейной навигационной опасности в зависимости от параметров начальной ситуации опасного сближения.

Предоставлены формулы для расчета граничных курсов уклонения, разделяющих множества безопасных и опасных курсов, в случае наличия точечной или распределенной линейной навигационной опасности.

Рассмотрены примеры определения оптимальных маневров расхождения судов изменением курсов при использовании области опасных курсов с учетом точечной и распределенной линейной навигационной опасности.

Keywords: *safety of navigation, warning of collision of vessels, navigation danger, region of dangerous courses*

Ключевые слова: *безопасность судоходства, предупреждение столкновения судов, навигационная опасность, область опасных курсов.*

Постановка проблемы.

При опасном сближении судна с целью, как указывается в работе [1], стандартный маневр расхождения судна изменением курса содержит участок уклонения с программной траектории движения, а после кратчайшего сближения судно ложится на курс выхода на программную траекторию. При следовании курсом выхода и достижении судном программной траектории движения судно ложится на начальный курс.

Если судно находится в стесненных водах, то при его расхождении с опасной целью зачастую приходится учитывать навигационные опасности, имеющиеся в районе маневрирования, что накладывает дополнительное ограничение на выбор параметров стратегии расхождения.

Следовательно, разработка методов безопасного расхождения судов при наличии навигационных опасностей, что является

тематикой данной статьи, представляет собой актуальное и перспективное научное направление.

Анализ последних достижений и публикаций.

В работе [1] представлено подробное исследование проблемы предупреждения столкновения судов и предложен метод формирования гибких стратегий расхождения, а формализация взаимодействия судов при опасном сближении и компенсация ситуационного возмущения рассмотрены в работе [2].

Два подхода к решению задачи безопасного расхождения рассмотрены в работе [3], которыми является локально-независимого и полного внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов, а также приведен анализ их реализации.

Формализация взаимодействия судов при расхождении в рамках теории дифференциальных

игр производится в работах [4, 5], а в монографии [6] предложен метод предупреждения столкновения судна с несколькими целями путем смещения на параллельную линию пути.

В работе [7] рассмотрено внешнее управления тремя судами для безопасного расхождения, а в работе [8] приведены результаты исследования эффективности парных маневров расхождения.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.

В настоящее время для внешнего управления процессом расхождения судов предлагаются области недопустимых значений их курсов [7], которые позволяют оценить опасность ситуации сближения и выбрать оптимальных маневр безопасного расхождения изменением курсом судов. Однако при плавании в стесненных районах необходимо производить учет навигационных опасностей, информацию о которых следует отображать на области недопустимых значений курсов, чему посвящена статья.

Цель статьи.

Целью статьи является разработка процедуры учета навигационной опасности при отображении области недопустимых значений курсов.

Изложение основного материала.

В работах [9,10] показано, что навигационные опасности, учет которых необходим при выборе безопасного маневра расхождения, относятся к одному из трех следующих основных типов:

- точечные навигационные опасности, размерами которых можно пренебречь;
- распределенные линейные навигационные опасности, граница которых может быть описана прямой линией (например, изобата, имеющая прямолинейный вид);
- сложные распределенные навигационные опасности, граница такой опасности имеет сложную форму и описывается нелинейными аналитическими зависимостями.

Точечная навигационная опасность ограничивается окружностью с радиусом, равным предельной допустимой дистанции \hat{l}_n кратчайшего сближения, центром которой является сама точечная навигационная опасность. Такая окружность является границей точечной навигационной опасности. Аналитическое выражение для минимальной дистанции $\min l_n$ между судном и точечной навигационной целью, допуская, что задана начальная относительная

позиция и судно следует с неизменными параметрами движения, имеет следующий вид:

$$\min l_n = l_n \sin(K_o - \alpha_n).$$

Условие безопасного прохождения точечной опасности предусматривает превосходство значения дистанции кратчайшего сближения $\min l_n$ над значением предельной допустимой дистанции кратчайшего сближения \hat{l}_n , что аналитически выражается следующим образом:

$$\text{Abs}[l_n \sin(K_y - \alpha_n)] \geq \hat{l}_n,$$

из которого можно найти граничные безопасные курсы уклонения судна K_{y^*} и K_{y^*} :

$$K_{y^*} = \alpha_n - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{l_n};$$

$$K_{y^*} = \alpha_n + \arcsin \frac{\hat{l}_n}{l_n}.$$

Поэтому безопасными курсами уклонения K_y являются те, которые не принадлежат к подмножеству $[K_{y^*}, K_{y^*}]$, т. е. $K_y \notin [K_{y^*}, K_{y^*}]$.

В качестве примера рассмотрена следующая ситуация опасного сближения судов, которая характеризуется параметрами: относительная позиция сближения $\alpha_{12} = 74^\circ$, $D_{12} = 3,0$ мили и параметрами движения судов $K_1 = 45^\circ$, $V_1 = 15$ узлов, $K_2 = 315^\circ$, $V_2 = 15$ узлов, причем $D_d = 1,0$ мили. Прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения составляет 0,8 мили. Данная ситуация опасного сближения при $V_1 = V_2$ показана на рис. 1. Впереди по курсу движения судов расположена точечная навигационная опасность, положение которой относительно первого судна характеризуется пеленгом $\alpha_1 = 40^\circ$ и дистанцией $D_1 = 2,6$ мили, а относительно второго судна $\alpha_2 = 313^\circ$ и $D_2 = 1,63$ мили. По положениям точечной навигационной опасности относительно обеих судов и $\hat{l}_n = 0,25$ были рассчитаны граничные безопасные курсы уклонения. В результате расчета для первого судна были получены следующие граничные безопасные курсы $K_{1y^*} = 15^\circ$ и $K_{1y^*}^* = 65^\circ$, которые показаны на рис. 1 от левого первого судна пунктирными линиями. Для второго правого судна получили следующие граничные безопасные курсы $K_{2y^*} = 296^\circ$ и $K_{2y^*}^* = 330^\circ$. Полученные граничные курсы характеризуют для каждого из судов подмножество недопустимых курсов уклонения.

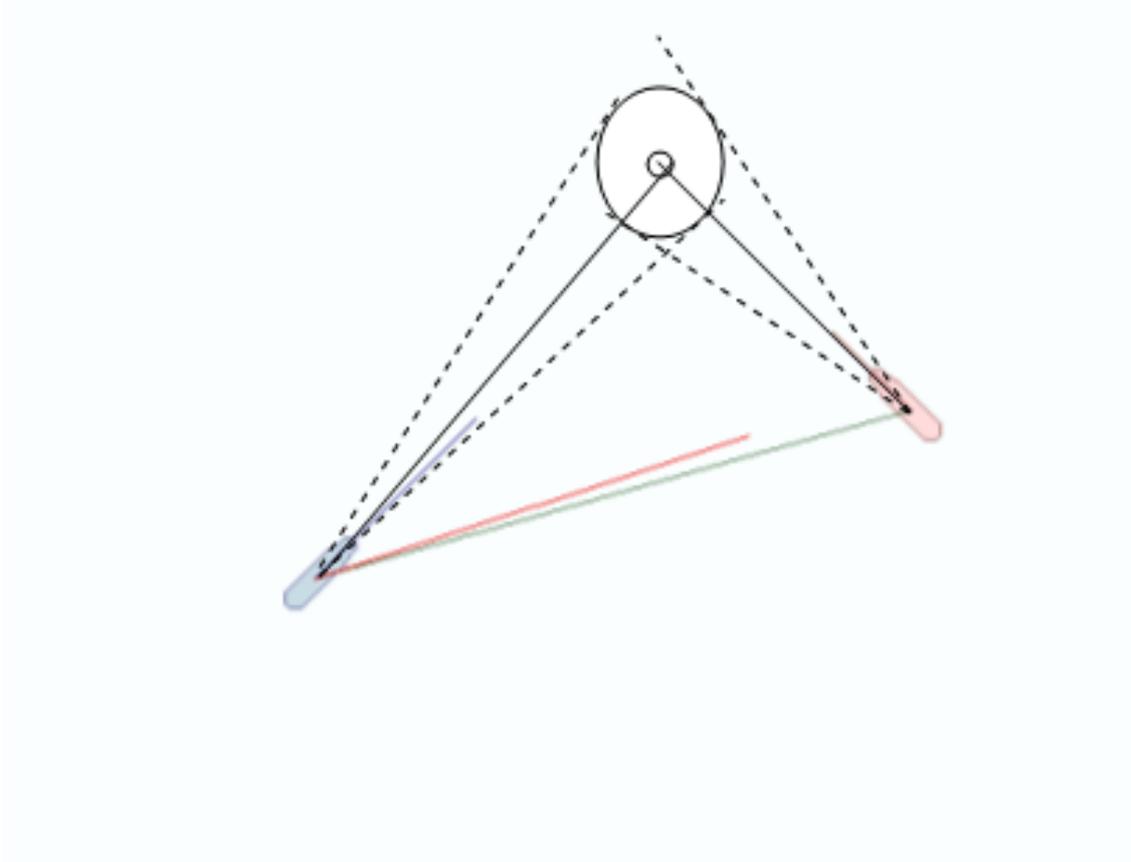


Рис. 1. Ситуация опасного сближения при наличии точечной опасности

Для рассмотренной ситуации опасного сближения на рис. 2 показана область опасных курсов судов S_{Dij} , специфическая форма которой вызвана равенством скоростей сближающихся судов. На расширенную плоскость курсов судов пунктирными линиями нанесены граничные безопасные курсы уклонения. При выборе курсов уклонения судов запрещается использовать курсы находящиеся между соответствующими

граничными значениями. В рассматриваемом примере совместный безопасный маневр расхождения соответствует точке верхней границы области S_{Dij} , в которой пересекаются граничные безопасные курсы $K_{1y}^* = 65^\circ$ и $K_{2y}^* = 296^\circ$, а их значения соответствуют курсам уклонения, при которых суда безопасно расходятся не подвергаясь риску со стороны навигационной опасности.



Рис. 2. Область опасных курсов S_{Dij} с учетом точечной опасности

Ко второму типу навигационных опасностей, как отмечалось выше, относятся распределенные линейные опасности, которые в первом приближении геометрически могут быть представлены прямой линией. Поэтому для формализации навигационного ограничения этого типа навигационных опасностей необходимо найти аналитическое выражение, описывающее границу навигационной опасности. Для этого следует произвести обоснование выбора направления границы навигационной опасности, учитывая, что ее граница разделяет район плавания судна на область безопасного в навигационном отношении плавания и аварийную область. Направление линейной границы навигационной опасности

выбрано таким образом, чтобы безопасная область всегда находилась справа от направления границы навигационной опасности. Так, если граница навигационной опасности расположена горизонтально и безопасная область находится под границей, то ее направление равно углу $\beta = 90^\circ$. Если же безопасная область находится над границей навигационной опасности, то $\beta = 270^\circ$, как показано на рис 3. Данное правило выбора направлений линейной границы навигационной опасности позволяет получать положительное значение кратчайшей дистанции до границы $minl_n$, если судно находится в безопасной области, и отрицательное значение, - в противном случае.

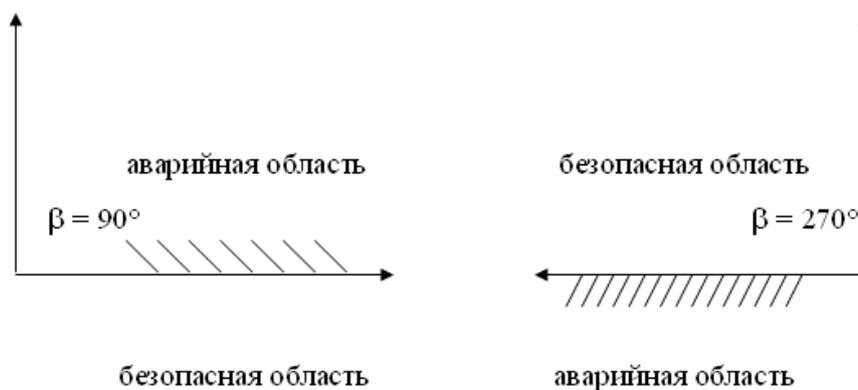


Рис. 3. Определение направления линейной границы опасности

Аналитическое выражение для навигационных ограничений в случае распределенной линейной навигационной опасности записывается следующим образом [11]:

$$\sin(\eta_y - \beta) \cos(\xi_y - \xi_o) \geq V_o(t_b - t_y) \sin(\beta - K_y) \geq \hat{l}_n.$$

Координаты начала уклонения судна ξ_y, η_y зависят от t_y поэтому величина дистанции кратчайшего сближения $\min l_n$ судна с границей линейной распределенной навигационной опасности зависит от выбранного курса уклонения K_y , момента времени начала уклонения t_y и момента времени начала поворота к заданной траектории t_b . При прочих равных условиях, дистанция кратчайшего сближения $\min l_n$ уменьшается с ростом моментов времени t_y и t_b . Аналогично, чем ближе разность $\beta - K_y$ к величине $\pi/2$, тем меньше, при прочих равных условиях,

будет величина дистанции кратчайшего сближения $\min l_n$ судна с границей линейной распределенной навигационной опасности. Обращаем внимание на то, что полученное условие характеризует возможность судна, следующего курсом K_y , который ведет к линейной навигационной опасности, успеть разойтись со вторым судном и повернуть к программной траектории движения прежде, чем достигнуть навигационной опасности. Такой маневр уклонения весьма рискованный. Поэтому безопасные курсы уклонения должны исключать движение судна на навигационную безопасность с учетом предельно-допустимой дистанции \hat{l}_n , как показано на рис. 4.

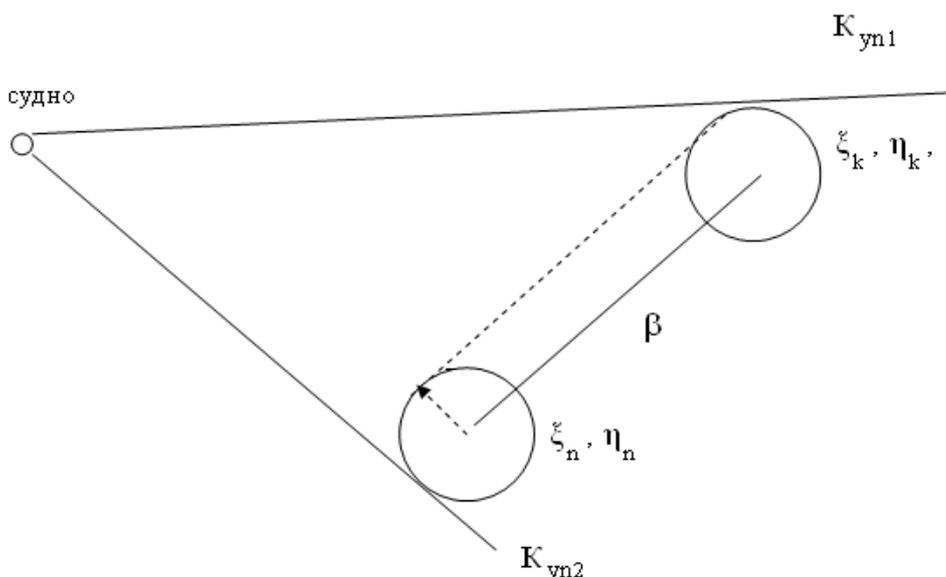


Рис. 4. Граничные курсы уклонения K_{yn1} и K_{yn2} при линейной опасности

Граничными курсами уклонения K_{yn1} и K_{yn2} являются касательные к окружностям радиуса \hat{l}_n , центры которых находятся в конечных точках распределенной линейной навигационной опасности. Поэтому граничные безопасные курсы K_{yn1} (нижняя граница) и K_{yn2} (верхняя граница) определяются выражениями:

$$K_{yn1} = \alpha_1 - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{D_1};$$

$$K_{yn2} = \alpha_2 - \arcsin \frac{\hat{l}_n}{D_2},$$

где α_1 и D_1 - пеленг и дистанция на конечную точку ξ_k и η_k линейной навигационной опасности;

α_2 и D_2 - пеленг и дистанция на начальную точку ξ_n и η_n линейной навигационной опасности.

Очевидно, при выборе курса уклонения судна при опасном сближении с целью для учета линейной навигационной опасности необходимо избегать курсов уклонения $K_y \notin [K_{yn1}, K_{yn2}]$.

В качестве примера опасного сближения судов при наличии мешающей распределенной линейной навигационной опасности и выбора в такой ситуации безопасного маневра расхождения изменением курса компьютерной программой была сгенерирована следующая ситуация опасного сближения с параметрами: относительное положение судов $\alpha_{12} = 54^\circ$, $D_{12} = 2,5$ мили и параметрами движения судов $K_1 = 12^\circ$, $V_1 = 15$ узлов, $K_2 = 268^\circ$, $V_2 = 20$ узлов, причем $D_d = 1,0$ мили.

Прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения составляет 0,1 мили. Данная ситуация опасного сближения при $V_1 < V_2$ показана на рис. 5. Впереди по направлению движения судов расположена распределенная линейная навигационная опасность, положение которой относительно первого судна характеризуется пеленгом $\alpha_{1n} = 325^\circ$ и дистанцией $D_{1n} = 2,0$ мили на ее начальную точку и пеленгом $\alpha_{1k} = 0^\circ$ и дистанцией $D_{1k} = 2,4$ мили на ее конечную точку, а относительно второго судна $\alpha_{2n} = 270^\circ$, $D_{2n} = 3,1$ мили, $\alpha_{2k} = 300^\circ$, $D_{2k} = 2,45$ мили. По положениям оконечностей распределенной

линейной навигационной опасности относительно обеих судов и $\hat{l}_n = 0,25$ были рассчитаны граничные безопасные курсы уклонения. В результате расчета для первого судна были получены следующие граничные безопасные курсы $K_{1y^*} = 320^\circ$ и $K_{1y^*} = 9^\circ$, которые показаны на рис. 5 от левого первого судна пунктирными линиями. Для второго правого судна были получены следующие граничные безопасные курсы $K_{2y^*} = 263^\circ$ и $K_{2y^*} = 310^\circ$. Полученные граничные курсы характеризуют для каждого из судов подмножество недопустимых курсов уклонения.

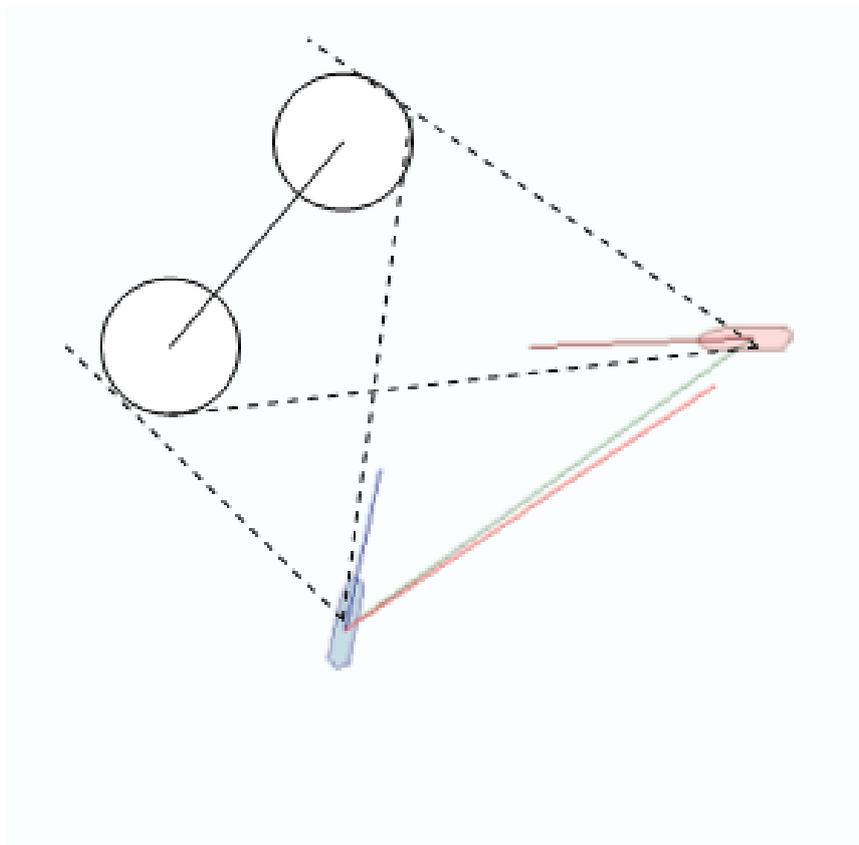


Рис. 5. Ситуация сближения при наличии линейной опасности

Для данной ситуации опасного сближения на рис. 6 показана область опасных курсов судов S_{Dij} . На расширенную плоскость курсов судов пунктирными линиями нанесены граничные

безопасные курсы уклонения, между которыми запрещается использовать курсы уклонения в процессе выбора маневра безопасного их расхождения. В данном примере для выбора



Рис. 6. Область опасных курсов S_{Dij} с учетом линейной опасности

совместного безопасного маневра расхождения следует выбрать точку нижней границы области S_{Dij} , которая пересекаются граничным безопасным курсом $K_{1y}^* = 9^\circ$, при этом второму судну следует уклоняться курсом $K_{2y} = 230^\circ$. При этих курсах уклонения суда безопасно расходятся без угрозы посадки на мель.

Выводы и предложения.

1. В работе приведены аналитические выражения границ точечной и распределенной линейной навигационной опасности.
2. Предоставлены формулы для расчета безопасных граничных курсов уклонения в случае наличия точечной или распределенной линейной навигационной опасности.
3. Рассмотрены примеры определения оптимальных маневров расхождения судов изменением курсов при использовании области опасных курсов с учетом точечной и распределенной линейной навигационной опасности.

Список литературы:

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 / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. - Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
3. 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.

4. 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.
5. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / В. Е. Кудряшов // Судостроение. - 1978.- №5. - С. 35-40.
6. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. - Одесса: Фенікс, 2013. - 180 с.
7. 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.
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. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей/ Е.А. Петриченко // Судовождение. - 2003. - № 6. - С. 103 - 107.
10. Петриченко Е.А. Основные принципы учета навигационных опасностей различных типов при расхождении судов/ Е.А. Петриченко, Н.Н. Цымбал // Судовождение: Сб. научн. трудов. - ОНМА, Вып. 20. - Одесса: «ИнформИздат», 2011 -

11. Петриченко Е.А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов/

Omelchenko T.Y.

senior lecturer,

National University «Odessa Maritime Academy»

PLAYING OF PROCESS OF DIVERGENCE OF VESSELS WITH DIFFERENT FORMS OF RELATIVE TRAJECTORIES

Омельченко Тарас Юрьевич

старший преподаватель кафедры Морские перевозки,

Национальный университет "Одесская морская академия"

ПРОИГРЫВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ФОРМАМИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Summary. Analytical expressions of calculation of moments of time of change of course of operating ship during realization of maneuver of divergence are resulted. It is shown that for verification of method of choice of safe maneuver of divergence of operating ship with a target the change of course developed the imitation computer program which contains the module of design of process of divergence of vessels with the expected parameters of maneuver.

The results of imitation design of maneuvers of divergence of ship with a target are considered, expected by the imitation computer program for the chosen situations of dangerous rapprochement of ship with a target.

Аннотация. Приведены аналитические выражения расчета моментов времени изменения курса оперирующего судна при реализации маневра расхождения. Показано, что для проверки метода выбора безопасного маневра расхождения оперирующего судна с целью изменением курса была разработана имитационная компьютерная программа, которая содержит модуль моделирования процесса расхождения судов с рассчитанными параметрами маневра.

Рассмотрены результаты имитационного моделирования маневров расхождения судна с целью, рассчитанных имитационной компьютерной программой для выбранных ситуаций опасного сближения судна с целью.

Key words: safety of navigator, warning of collision of vessels, maneuver of divergence, imitation design

Ключевые слова: безопасность судоходства, предупреждение столкновения судов, маневр расхождения, имитационное моделирование.

Постановка проблемы.

Снижение аварийности судов является важнейшей проблемой обеспечения безопасности мореплавания. Особенно высокий уровень аварийности по причине столкновений судов, чем обуславливается необходимость разработки эффективных мер по предупреждению их столкновений.

Поэтому разработка методов повышения безопасности процесса расхождения сближающихся судов с учетом относительной формы траектории расхождения и проверка их корректности, чему посвящена данная статья, является актуальным и перспективным научным направлением.

Анализ последних достижений и публикаций.

Метод нелинейной интегральной инвариантности для формализации процесса расхождения предлагается в работе [1], а в работе [2] предлагаются методы теории оптимальных дискретных процессов для описания процесса расхождения. Экстренная стратегия расхождения в ситуации чрезмерного сближении судов предложена в работе [3].

В работе [4] исследованы методы локально-независимого управления и для предупреждения столкновений судов предложен метод формирования гибких стратегий расхождения, а в работе [5] рассмотрены принципы локально-независимого и внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов, а также приведен анализ методов их реализации. Процедура выбора оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрена в работе [6], а взаимодействие судов в ситуации опасного сближения рассмотрены в работе [7] и предложена процедура выбора стратегии расхождения для предупреждения их столкновения. Вопросы учета навигационных опасностей и инерционности судна при выборе стратегии расхождения судна освещены в работах [8, 9].

В работе [10] излагается теоретическое обоснование автономной судовой системы уклонения от столкновения СА. Совместно с алгоритмом по уклонению от столкновения рассмотрены дополнительно Правила уклонения от столкновения COLREG. Также рассматриваются требования к автономной навигации, учитывающие