

УДК 656.61.052

DOI: 10.31653/2306-5761.30.2020.34-41

CALCULATION OF THE RELEVANT COLREG VARIANTS OF THE COMBINED ACTION TO AVOID COLLISION

РАСЧЕТ ОТВЕЧАЮЩИХ МППСС ВАРИАНТОВ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ УКЛОНЕНИЯ ОТ СТОЛКНОВЕНИЯ

A.L. Vagushchenko, PhD, associate professor, **A.A. Vagushchenko**, 2nd Officer
А.Л. Вагущенко, к.т.н., доцент, **А.А. Вагущенко**, 2-й помощник капитана

*National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine
"Nordic Hamburg Ship Management Ltd.", Odessa*

*Національний університет «Одеська морська академія», Україна
Тов. «Нордик Гамбург Шипменеджемент Лтд», Одесса*

ABSTRACT

An algorithm is proposed for determining the set of corresponding to the COLREG variants of combined action (alteration course with the speed) to avoid collision with several vessels. When establishing compliance with COLREG, 11 types of meeting of the dangerous target and own ship and four stages (planning of maneuver, early, possible and urgent measures) at the segment of COLREG performance in relation to this target were distinguished. It was assumed that the action to prevent a collision is determined at the first stage. We used the general and particular indicators of the COLREG compliance for each of possible variants of combined action. Due to the large number of such options, the formulas used in their analysis for forecasting, assessment of safety and other goals were simplified so that the calculation time was acceptable. On this basis, the danger domain for the targets was selected simple, circular in shape, with the center shifted relative to the target to take into account the greater risk of crossing its course along the bow than at the stern. It was supposed acceptable to replace the trajectories of combined actions with a combination of a straight segment and an arc of a circle; to represent the change in speed during braking by a second-order polynomial; to consider as unrelated the course and speed changes in the joint operation.

An algorithm has been developed for obtaining a matrix of general COLREG compliance estimates of possible combined action variants and flow chart of this algorithm is given. By the elements of this matrix, it is possible to search for an effective variant of the passing by under various assumptions and criteria. As an example, an algorithm for calculating the combined action to avoid a collision with a minimum reduction of the speed is given. The reliability of the proposed algorithms was confirmed by simulation modeling of ships collision avoiding processes in various situations.

Key words: collision avoidance, combined action, compliance with COLREG, collision avoidance algorithm.

РЕФЕРАТ

Запропоновано алгоритм для визначення множини варіантів, що відповідають МППСС, комбінованої дії (зміна курсу разом зі швидкістю) для розходження з декількома суднами. При встановленні відповідності МППСС виділялися 11 видів зближення з небезпечною ціллю власного судна, а на ділянці дотримання ним МППСС по відношенню до цієї цілі - чотири етапи (планування маневру, завчасних, можливих і термінових заходів). Вважалось, що дія для попередження зіткнення визначається на першому етапі по допустимій по МППСС підмножині можливих його варіантів. Використовувалися загальний і окремі показники відповідності МППСС кожного з цих варіантів. Так як число таких варіантів велике, то

вирази, що застосовуються при їх аналізі для прогнозу маневру, оцінки безпеки та інших операцій, бралися спрощеними, щоб час розрахунку було прийнятним. На цій підставі домен небезпеки для цілей обраний простим, круговим за формою, зі зміщенням щодо цілі центром для урахування більшого ризику перетину її курсу по носі, ніж по кормі. При прогнозі маневрів було пораховано допустимим траєкторії комбінованих дій замінювати сукупністю прямолінійного відрізка і дуги кола, зміну швидкості при гальмуванні представляти степеневим поліномом другого порядку, вважати незалежними в цій дії процесі повороту і зміни швидкості.

Розроблено алгоритм отримання матриці оцінок загальних показників відповідності МППСС можливих варіантів комбінованої дії і приведена його блок-схема. За елементами цієї матриці можливий пошук ефективного варіанту розходження при різних припущеннях і критеріях. Як приклад, наводиться алгоритм розрахунку комбінованої дії з мінімальним зменшенням ходу для уникнення зіткнення. Достовірність запропонованих алгоритмів підтверджена імітаційним моделюванням процесів розходження суден в різних ситуаціях.

Ключові слова: попередження зіткнень, комбінована дія, відповідність МППСС, алгоритм розходження.

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

Проблема безопасного расхождения судов остается одной из основных в морском судовождении и требует дальнейших мер для ее разрешения.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, и выделение нерешенных вопросов

На современном этапе все большее внимание уделяется использованию для расхождения с судами изменения курса совместно со скоростью, обычно называемого комбинированным действием (КД). Это обусловлено тем, что, во-первых, множество возможных вариантов КД и вероятность нахождения в нем допустимого для безопасного расхождения в сложных ситуациях подмножества значительно больше, чем отдельно для маневра курсом или скоростью. Во-вторых, многие суда уже имеют, а все строящиеся суда оборудуются автоматизированными системами управления скоростью с мостика, что упрощает своевременную и точную реализацию КД. В публикациях, в частности [6-8], для определения таких действий в бортовых системах предупреждения столкновений (CAS - Collision Avoidance System) уже представлен ряд процедур, однако из-за их несовершенства требуется дальнейшее развитие методов решения этой задачи.

Формулировка целей исследования (постановка задачи)

Целью работы является развитие методов определения отвечающих МППСС (COLREG) комбинированных действий для уклонения от столкновения в ситуациях с несколькими судами с учетом динамики оперирующего судна.

Освещение результатов работы

В тексте собственное судно обозначено OS (own ship); судно-цель - TS (target ship); опасная цель - \overline{TS} ; количество учитываемых при расхождении целей - N_{TS} ; образуемый у цели домен опасности - TDD (target's domain of danger); уступающее дорожку судно - GWV («give-way» vessel); имеющее право прохода судно - SOV («stand-on» vessel); точка начала маневра OS – A; курс и скорость OS перед маневром – K_0, V_0 ; положение OS в момент кратчайшего сближения с целью h (TS_h) – CPA_h (closest point of approach); границы возможных для расхождения углов поворота влево и вправо - $\overline{\theta}, \overline{\theta}$; нижний и верхний пределы скорости OS для расхождения - $\overline{V}, \overline{V}$; расстояние кратчайшего сближения – DCPA (distance at CPA); время или расстояние от OS до CPA - TCPA и RCPA (time to CPA, range to CPA). КД OS будет

характеризоваться расстоянием (σ) от OS до начала А маневра, изменением (θ, w) курса и скорости, причем для упрощения принято, что V не будет повышаться ($w \leq 0$).

Рассматриваются ситуации с несколькими целями, из которых опасна одна - \overline{TS} , по отношению к ней учитываются Правила и находится безопасный для всех TS маневр. Положение (Φ_0) OS на момент начала действия COLREG по отношению к \overline{TS} вычисляется по задаваемой границе (ρ_R) безопасных значений РСРА. На участке от Φ_0 до места (Φ_E) OS на момент кратчайшего сближения с \overline{TS} выделяются 4 этапа: планирования КД, заблаговременных мер, допустимых действий после второго этапа, срочных мер. Расстояния от места OS до конечных точек первых трех этапов обозначены S_1, S_2, S_3 . Принято, что КД находится на первом этапе по выделяемому среди возможных вариантов КД допустимому по COLREG их подмножеству. Множество возможных вариантов КД берется дискретным со значениями параметров этого действия в диапазонах (S_1, S_3), (\vec{V}, V_0) и ($\vec{\theta}, \vec{\theta}$) через малый шаг ($\Delta\sigma, \Delta w$ и $\Delta\theta$). Количество значений в этих диапазонах обозначено N_σ, N_w, N_θ . Комбинированное действие со значениями параметров σ_i, W_j, θ_k обозначим КД(i, j, k), а показатель его соответствия COLREG - $p(i, j, k)$ или просто p . Совокупность \mathbf{P} таких показателей для всех анализируемых вариантов КД можно рассматривать как $N_\sigma \times N_w \times N_\theta$ матрицу. Так как число возможных вариантов КД велико, то применяемые при расчете $p(i, j, k)$ выражения для прогноза маневра, оценки безопасности и других целей должны быть приемлемыми по времени выполнения. На этом основании у целей из различного вида TDD [10] использовался простой по форме круговой домен, центр которого смещен от центра массы TS в сторону носа на 1/3 часть радиуса. Такой домен определяется радиусом, учитывает больший риск пересечения курса цели по носу, чем по корме, время оценки по нему опасности чрезмерного сближения практически такое же, как и по самому простому круговому несмещенному TDD. Радиус домена цели h принимался равным

$$r_h = r_R + \Delta_L;$$

где r_R – составляющая, учитывающая ограниченность акватории для маневра в районе R плавания;

$$\Delta_L = (L_{OS} + L_h) / 2 \text{ – поправка на размеры судов } (L_{OS}, L_h \text{ – длина OS и TS}_h).$$

Значение r_R может находиться следующим образом. Судоводители выработали определенные значения дистанции расхождения для различных районов плавания с учетом интенсивности движения в них. Логично предположить, что такие оценки отражают целесообразную для этих акваторий степень безопасности при избегании столкновений. Поэтому на основе опроса капитанов можно для разных районов плавания получить обобщенные оценки r_R и поместить их в памяти CAS. Граница ρ_R безопасных значений РСРА может находиться в зависимости от r_R : $\rho_R \approx c_r(\sqrt{r_R} + L_{OS})$, где $c_r \approx 4,0$. Отвечающее проходному участку значение r_R может выбираться в CAS по координатам OS.

Модель для прогноза КД также должна быть адекватна решаемой задаче. Как известно, высокая точность прогноза маневров обеспечивается при описании движения судна системой взаимосвязанных нелинейных дифференциальных уравнений [2]. Траектория и параметры КД в этом случае находятся содержащим большое число операций численным интегрированием этой системы, в частности, по соответствующей ей разностной модели движения судна (РМДС). Время нахождения \mathbf{P} с использованием РМДС слишком велико. Поэтому из упрощенных процедур [2, 3] для прогноза маневров судна выбиралась подходящая с учетом режима выполнения КД. Принималось, что скорость при расхождении будет снижаться работой двигателя на задний малый ход (ЗМХ), а повороты как совместно с уменьшением V , так и без изменения хода, будут осуществляться авторулевым (АР) с заданным радиусом (R_Z), средним для OS. В АР при таком способе поворота определяется задающее воздействие $K_Z(t)$ для изменения курса с R_Z от старого K_C до нового значения, и в зависимости от отклонений текущего курса $K(t)$ от $K_Z(t)$ вырабатываются перекладки руля, чтобы $K(t)$ был равен $K_Z(t)$, где

$$K_Z(t) = K_C + \frac{1}{R_Z} \int V dt.$$

При повороте с R_Z влияние ветра, волнения, изменения скорости, осадки, дифферента на траекторию поворота меньше, чем при применяемом рулевыми изменении курса с заданным углом руля (β_Z). Для иллюстрации зависимости этой траектории от изменения скорости OS на рис. 1 и 2 приведены результаты прогнозирования по РМДС контейнеровоза (водоизмещение 25 тыс. тонн, длина 140 м) его траекторий поворота на 90° с $\beta_Z=15^\circ$ и с $R_Z=2,5$ кб. Между линиями координатной сетки на этих рисунках расстояние 1 кб.

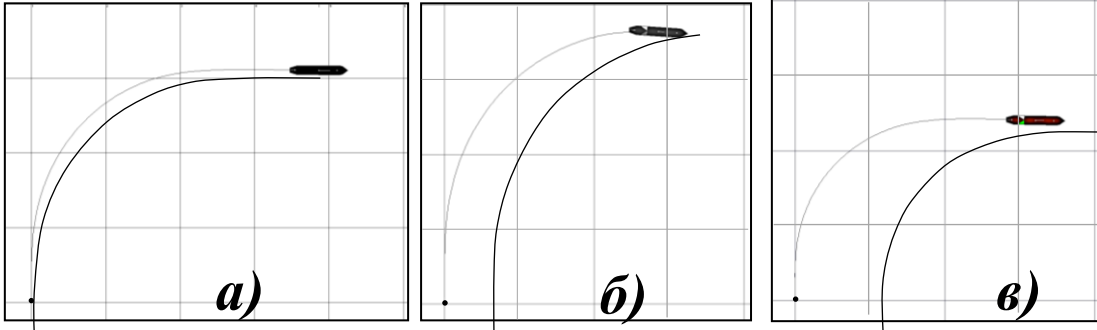


Рис. 1. Траектория поворота OS на 90° с $\beta_Z=15^\circ$

а) без изменения V ($V=17.1$ уз); б) совместно со снижением скорости от $V=17.1$ уз до $V=8.8$ уз с помощью ЗМХ; в) совместно с увеличением скорости от $V=8.8$ уз до $V=13.1$ уз с помощью ППХм

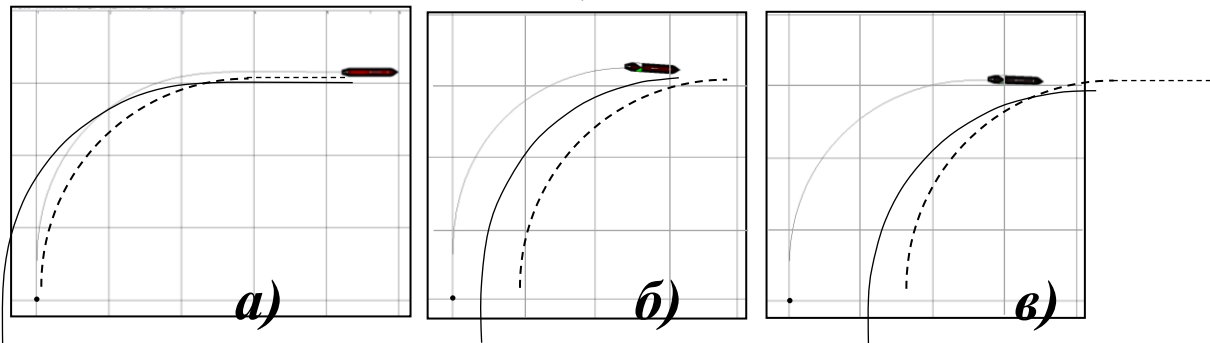


Рис. 2. Траектория поворота OS на 90° с $R_Z=2,5$ кб

а) без изменения V ($V=17.1$ уз); б) совместно с изменением скорости от $V=17.1$ уз до $V=8.8$ уз с помощью ЗМХ; в) совместно с изменением скорости от $V=8.8$ уз до $V=13.1$ уз с помощью ППХм

На основе анализа полученных по РМДС разных судов имитаций совместных с изменением V поворотов с R_Z было посчитано допустимым:

- траектории КД заменять совокупностью прямолинейного отрезка и дуги окружности с радиусом R_Z ;
- изменение V при торможении представлять выражением $W = a_1 t_\tau + a_2 t_\tau^2$, где t_τ , – время торможения;
- считать независимым при расчете КД процесс поворота со средним значением R_Z от процесса изменения скорости.

Длина l прямолинейного отрезка траектории КД берется пропорциональной длине L судна: $l=k_Z L$, где k_Z - коэффициент, зависящий от отзывчивости судна на перекладки руля. Этот коэффициент лежит в диапазоне от 0.6 до 1.7. Нередко его принимают равным единице. На рис. 2 пунктиром показана полученная упрощенно ($k_Z=0,9$) траектория контейнеровоза для выполняемого КД.

Коэффициенты a_1 , a_2 выражения для снижения V можно найти по приведенным в формуляре маневренных характеристик OS данным торможения. Расчет времени и расстояния снижения V на величину Δ выполнялся по формулам

$$t_\Delta = (-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2\Delta}) / (2a_2). \quad S_\Delta = V_0 t_\Delta + a_1 t_\Delta^2 / 2 + a_2 t_\Delta^3 / 3.$$

При нахождении процедуры для оценки соответствия маневра Правилам учитывалось их несовершенство. Оно состоит [5] в ограниченности ситуаций, в которых регулируются

действия, в нечеткости предписаний, в отсутствии для ряда ситуаций даже нечетких указаний по расхождению. Для непредусмотренных COLREG случаев соответствие действий определялось по отношению к рекомендациям хорошей морской практики (ХМП). Рассматриваемые в COLREG ситуации расхождения двух судов, за исключением парусных, могут быть представлены 11-тью видами их сближения [1],

Общие требования к действиям по расхождению при любых условиях видимости представлены в правиле 8 COLREG. Взаимодействие судов при ограниченной видимости и «на виду друг у друга» регулируется соответственно правилами 19 и 12-18. Правило 12 посвящено координации действий парусных судов, 13 – судов при обгоне, 14 и 15 - судов с механическим двигателем в ситуациях «Прямо друг на друга» и «Пересечение курсов», 16 и 17 - GWV и SOV, 18 - судов с разным навигационным статусом.

При оценке каждого из возможных варианта КД(i,j,k) кроме общего (p) показателя соответствия КД COLREG использовались и частные (по заблаговременности - p_τ , по ДСРА - p_d , по заметности – p_u , по приоритету - p_p). Частные показатели могут получаться по четким или нечетким [9] границам оцениваемых ими элементов КД, для упрощения брался первый вариант. Показатели p_τ , p_d , p_u равны единице, когда действие отвечает COLREG, и «0» - в противном случае. По приоритету в Правилах для разных ситуаций в общем случае можно выделить:

1. действие, которое нужно применить, если позволяют обстоятельства, например, поворот в предписываемую сторону;
2. действие, которое следует выполнить, когда из-за существующих ограничений первое действие неэффективно или невозможно;
3. нерекондуемое или которое следует избегать действие.

Для ряда ситуаций может быть выделено только два из этих варианта.

Охарактеризуем пути оценки частных показателей. Для получения p_τ использовалась процедура:

Case OS of

GWV: if ($\sigma \geq S_1$) and ($\sigma < S_2$) then $p_\tau := 1$ else $p_\tau := 0$;

SOV: if ($\sigma \geq S_2$) and ($\sigma < S_3$) then $p_\tau := 1$ else $p_\tau := 0$.

Допустимым по ДСРА считалось действие OS, не сопровождаемое пересечением доменов опасности целей, учитываемых при расхождении. Показатель p_d находился по динамическим данным о судах на момент окончания планируемого КД с помощью процедуры

$p_d := 1$; for $h=1$ to N_{TS} do (if $CPA_h \in TDD_h$ then $p_d := 0$).

Значение p_u устанавливалось по задаваемым границам \bar{w} и $\bar{\theta}$ заметных изменений скорости и курса:

If ($|w/\bar{w}| + |\theta/\bar{\theta}| \geq 1$) then $p_u := 1$ else $p_u := 0$.

Для значения w_j граница $\bar{\theta}_j$ заметных θ будет следующей

$\bar{\theta}_j = \text{ROUND}((1 - |w_j/\bar{w}|) \cdot \bar{\theta})$.

Для получения p_p предварительно действия, разрешаемые COLREG и ХМП для судов в разных ситуациях и условиях видимости, распределяются по приоритету. Эта информация помещается в памяти CAS. Когда при расчете допустимых в рассматриваемой ситуации действий OS вариант КД не принадлежит к разрешаемому COLREG, то $p_p = 0$, если относится к первому либо ко второму или к третьему по приоритету рангу, то соответственно $p_p = 5$, $p_p = 3$, $p_p = 1$.

Общий показатель соответствия КД COLREG определялся по формуле

$p = p_\tau \cdot p_d \cdot (p_u + p_p)$.

Он равен нулю, когда КД не отвечает COLREG по моменту начала или ДСРА, а при соответствии по этим признакам p принимает значения:

- 1 – для не относящихся к заметным действиям третьего ранга;
- 2 - для заметных действий третьего ранга;
- 3 - для не относящихся к заметным действиям второго ранга;

- 4 - для заметных действий второго ранга;
- 5 - для не относящихся к заметным действиям первого ранга;
- 6 - для заметных действий первого ранга.

Блок-схема алгоритма оценки в сложившейся ситуации соответствия COLREG возможных вариантов КД показана на рис. 3.

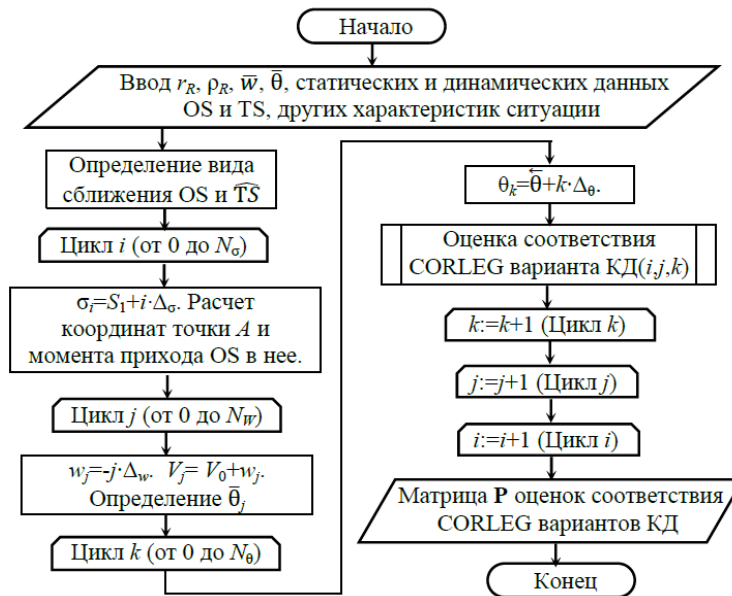


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оценки соответствия COLREG возможных вариантов КД

Схема оценки КД(i, j, k) в этом алгоритме представлена на рис. 4. Процедуры получения $p(i, j, k)$ при разных навигационных статусах в статье не рассматриваются. На рисунке статус OS обозначен \overline{NS} , а статус \overline{TS} - \overline{NS} .

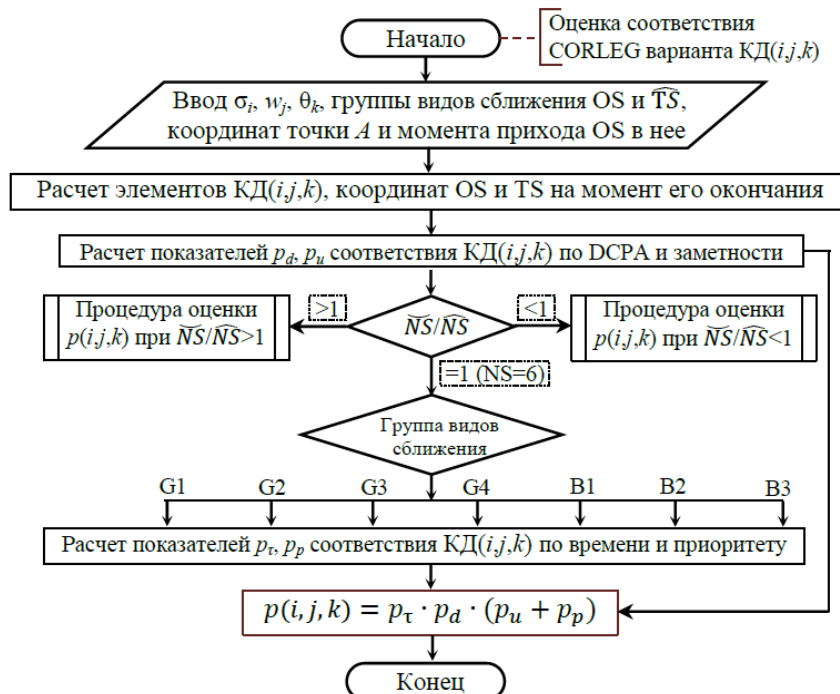


Рис. 4. Схема оценки соответствия COLREG варианта КД(i, j, k)

По элементам матрицы \mathbf{P} возможен поиск КД при разных допущениях и критериях качества. Довольно часто при решении задач расхождения начало маневра определяется судоводителем ($\sigma = \sigma_z$). В этом случае показатель соответствия Правилам варианта КД со значениями параметров σ_z, w_j, θ_k будем обозначать $p_{j,k}$. Как известно [2], с уменьшением V ухудшается управляемость судна по курсу. С этой точки зрения для уклонения от

столкновения рациональным можно считать КД с минимальным изменением хода. Алгоритм для нахождения параметров w_μ , θ_μ такого КД с $\theta \geq 0$ приведен на рис. 5.

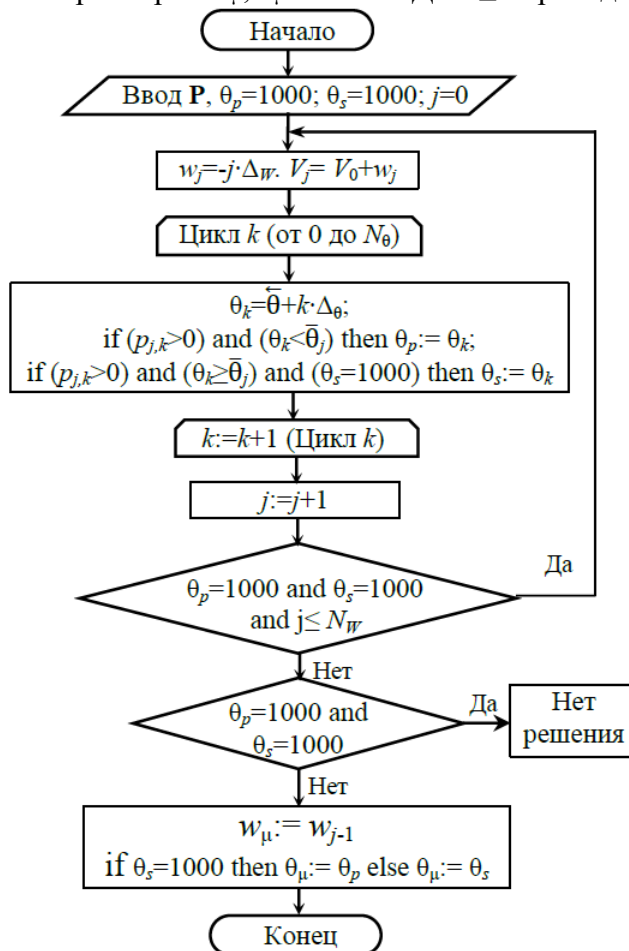


Рис. 5. Блок-схема алгоритма нахождения КД с минимальным снижением хода

Когда решения нет, то причиной этого чаще всего является несоответствие показателя r_R ограниченности акватории для маневра в районе плавания. В этом случае значение r_R нужно уменьшить.

Достоверность предложенных алгоритмов была подтверждена имитационным моделированием процессов расхождения судов в различных ситуациях.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Разработанный метод нахождения множества соответствующих COLREG вариантов комбинированного действия для уклонения от столкновения обеспечивает возможность определения в CAS их оптимального варианта при использовании разных критериев качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагущенко Л.Л. Численный метод выбора маневров расхождения с несколькими судами / А.А.Вагущенко, Л.Л.Вагущенко // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, - VIII(27), -Issue: 224, - 2020. - С. 74-80.
2. Мальцев А.С. Управление движением судна / А.С. Мальцев – Одесса: Весть, 1995 – 232 с.
3. Смоленцев С. В. Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7-21.

4. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов / Н.Н.Цымбал, Р.Ю.Бужбецкий // Судовождение: Сб. науч. трудов ОНМА. - 2006. – Вып. 11. - С. 134-138.
5. Banas, P. Knowledge Base in the Interpretation Process of the Collision Regulations at Sea / P. Banas, M. Breitsprecher // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2011. - 5(3). - P. 359-364.
6. Degre T. A collision avoidance system / T. Degre, X. Lefevre //The Journal of Navigation. - 1981. – 34. - P. 294-302.
7. Hirayama K. DSSA+: Distributed Collision Avoidance Algorithm in an Environment where Both Course and Speed Changes are Allowed / K. Hirayama, K. Miyake, T. Shiota, T.Okimoto //TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2019. - 13(1). - P. 23-29.
8. Pedersen E. Simulator studies on a collision avoidance display that facilitates efficient and precise assessment of evasive manoeuvres in congested waterways / E. Pedersen, K. Inoue, M. Tsugane //The Journal of Navigation. - 2003. – 56. - P. 411 - 427.
9. Pietrzykowski Z. Applicability of fuzzy logic to the COLREG rules interpretation / Z. Pietrzykowski, R.Malujda //Scientific Journals, Maritime University of Szczecin. - 30(102) – 2012. - pp. 109–114
10. Szlapczynski R. Review of ship safety domains: Models and applications / R. Szlapczynski, J.Szlapczynska //Ocean Engineering. - 2017. - vol. 145. - P. 277–289.