

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: предупреждение столкновений, расхождение судов, В-маневр, автоматический поиск.

УДК 656.61.052

АЛГОРИТМ ВЫРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО РАСХОЖДЕНИЮ С СУДАМИ

В бортовых системах предупреждения столкновений (СПС) пока еще недостаточно инструментов для полного устранения влияния субъективного фактора на безопасность расхождения судов. Поэтому вероятность ошибок оператора в выборе по данным РЛС, САРП, АИС и ECDIS решений по расхождению с судами все еще существенна. Последствия таких ошибок могут быть катастрофическими. Следует также принимать во внимание, что с течением времени решать задачи расхождения становится сложнее из-за возрастания интенсивности движения на морских путях, роста скоростей и размеров судов. Поэтому нами разработан алгоритм автоматического поиска В-маневра для расхождения с несколькими судами. Полученные результаты могут быть использованы в морских СПС и ECDIS.

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель исследования состоит в разработке алгоритма выработки рекомендаций о В-маневре, рациональном для расхождения судов. Вопросы устранения угрозы столкновений с судами рассматриваются во многих литературных источниках, посвященных проблемам судовождения, например, в книгах [1, 2]. Количественное определение коллизионного риска в процессе сближения судов и оценка эффективности выбираемых для расхождения мер при существующей угрозе столкновения обсуждаются, в частности, в работах [3, 4, 5]. Анализ содержания названных источников показывает, что проблема расхождения судов проработана еще недостаточно полно.

2. ОПОРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ВЫБОРА МАНЕВРА

При устранении угрозы столкновения опыт судоводителя необходим, прежде всего, при оценках параметров, нечетко определяемых МППСС72. Назовем эти параметры опорными. Они должны соответствовать преобладающим обстоятельствам плавания с учетом размеров судна, его маневренных качеств и других особенностей. Совокупность названных факторов ниже называется «условия плавания». Найти математические

выражения для определения значений опорных параметров по данным, характеризующим условия плавания, затруднительно. Более эффективными в этом отношении являются экспертные оценки. На судне таким экспертом является капитан, так как он имеет наибольший опыт и знания в этой области. Для конкретизации предписанных МППСС72 стандартных мер по устранению угрозы столкновений капитану, на наш взгляд, необходимо задать:

D^S - границу безопасных расстояний кратчайшего сближения;

T^S - границу безопасного времени до кратчайшего сближения;

θ^P - предпочтительное в данных условиях значение угла отклонения от курса;

D_A - охранную дистанцию;

S_S, S_P - расстояния от линии пути судна до параллельных ей линий, ограничивающих справа и слева безопасный для движения и маневров район.

По опорным параметрам и информации датчиков СПС должна определить:

- вид сближения с опасной «целью»;
- рациональные значения: D_R, T_R, θ_R дистанции кратчайшего сближения (ДСРА или D), времени до кратчайшего сближения (ТСРА или T), угла отклонения от курса (θ);
- подходящий интервал времени для действий по устранению угрозы столкновения;
- параметры В-маневра для уклонения от «целей».

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА СБЛИЖЕНИЯ С ОПАСНОЙ «ЦЕЛЬЮ»

В зависимости от курсового угла (КУ) и ракурса (РКС) «цели» целесообразно выделить 11 видов опасного сближения судна оператора (СО) с «целью», представленных в табл.1.

Табл.1 – Виды опасного сближения двух судов

	Вид сближения	Условие
1.	Пересечение курсов, «цель» справа впереди траверза СО	$-112.5 \leq PKC < -\Delta_1, \quad \Delta_1 < KY \leq 67.5$
2.	Пересечение курсов, «цель» слева впереди траверза СО	$\Delta_1 < PKC \leq 112.5, \quad -67.5 \leq KY < -\Delta_1$
3.	Пересечение курсов, «цель» справа на траверзе СО	$-112.5 \leq PKC < -\Delta_1, \quad 67.5 < KY \leq 112.5$
4.	Пересечение курсов, «цель» слева на траверзе СО	$\Delta_1 < PKC \leq 112.5, \quad -112.5 \leq KY < -67.5$
5.	Обгон СО «целью», она справа по корме СО	$-112.5 \leq PKC < -\Delta_1, \quad 112.5 < KY \leq 180 - \Delta_2$
6.	Обгон СО «целью», она слева по корме СО	$\Delta_1 < PKC \leq 112.5, \quad \Delta_2 - 180 \leq KY < -112.5$
7.	Обгон «цели» судном оператора, она справа по носу СО	$\Delta_2 - 180 < PKC \leq -112.5$
8.	Обгон «цели» судном оператора, она слева по носу СО	$112.5 < PKC \leq 180 - \Delta_2$
9.	Прямо или почти прямо друг на друга	$ABS(PKC) < \Delta_1, \quad ABS(KY) < \Delta_1$
10.	Обгон «цели» судном оператора, она прямо или почти прямо по носу СО	$ABS(PKC) > 180 - \Delta_2, \quad ABS(KY) < \Delta_2$
11.	Обгон СО «целью», она прямо или почти прямо по корме СО	$ABS(PKC) < \Delta_2, \quad ABS(KY) > 180 - \Delta_2$

Математические выражения для определения этих видов приведены в правой части таблицы, где

- цифровые значения даны в градусах;
- углы КУ/ РКС до 180^0 вправо от носовой части диаметральной плоскости ОС/«цели» являются положительными, а влево – отрицательными;
- значение Δ_1 лежит в интервале $6-10^0$, Δ_2 берется немного большим.

Демаркационная линия между видами сближения «на траверзе» и «впереди траверза» в МППСС72 четко не определена. В качестве «траверсных» обычно принимаются направления вправо и влево от носовой части диаметральной плоскости судна в пределах от 6 до 10 румбов ($|КУ| = 67.5^0 \div 112.5^0$).

4. ПОДСТРОЙКА ЗНАЧЕНИЙ ОПОРНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Для предписанных МППСС72 стандартных мер рациональным D_R расстоянием кратчайшего сближения является D^S . Если обстоятельства вынуждают отступить от стандартных мер, то D_R должно быть большим D^S . Так, для маневров “give- way” (уступающего дорогу) судна, приводящих к пересечению курса «цели» по носу и уклонений в не рекомендуемую, но разрешенную МППСС72 сторону

$$D_R = k_B \cdot D^S; \quad D_R = k_Y \cdot D^S; \quad (1)$$

где $(1.1 < k_B < 1.5)$, $(1.5 < k_Y < 3.0)$.

Для запрещенных МППСС72 поворотов влево $D_R = D^S / \varepsilon$, где ε достаточно малая величина, например 0.001. Рациональные значения k_B , k_Y и ε определяют эксперты.

В ситуациях «пересечения курсов» и «прямо или почти прямо» навстречу друг другу рациональным значением T_R является T^S . При медленном сближения судов, например при «обгоне», такое значение не всегда рационально. Здесь дистанция до «цели» может быть меньше D^S , когда $T > T^S$. Чтобы избежать таких случаев определяется нижняя граница T_M значений T_R

$$T_M = k_T \cdot D^S / u, \quad (2)$$

где u - скорость нашего судна относительно «цели» и $(3.0 < k_T < 4.0)$.

Значение T_R находится следующим образом

$$\text{IF } T^S \geq T_M \text{ THEN } T_R = T^S \text{ ELSE } T_R = T_M. \quad (3)$$

При заблаговременных стандартных мерах по расхождению значение θ_R равно θ^P . Если применяются уклонения от курса, которых следует избегать, то $\theta_R = k_{\theta 1} \cdot \theta^P$, где $(1.0 \leq k_{\theta 1} < 1.5)$. Если же “stand-on” (которому уступают дорогу) судно вынуждено расходиться с бездействующей “give-way” «целью», то $\theta_R = k_{\theta 2} \cdot \theta^P$, где $(1.3 \leq k_{\theta 1} < 2.0)$.

5. КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В_МАНЕВРА

Частными критериями эффективности В-маневра приняты степени p_D , p_θ , p_T , p_E соответствия такого действия рациональным для заданных условий плавания уровням: безопасности (D_R), заметности (θ_R), заблаговременности (T_R) и экономичности (увеличения Δ_S пути нашего судна). Общим критерием P_0 эффективности В-маневра является

$$C_R = \delta(x) \cdot \frac{w_D \cdot p_D + w_\theta \cdot p_\theta + w_T \cdot p_T + w_E \cdot p_E}{w_D + w_\theta + w_T + w_E}, \quad (4)$$

где w_D , w_θ , w_T , w_E - веса p_D , p_θ , p_T , p_E ;

$$x = p_D \cdot p_T \cdot p_\theta;$$

$$\delta(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq 0 \\ 1 & \text{при } x > 0 \end{cases}.$$

Функция $\delta(x)$ введена, чтобы опасность маневра, либо его несвоевременность, или незаметность не компенсировались за счет значений других критериев.

Критерии p_D , p_θ , p_T , p_E являются функциями

$$p_D = F_D(D_M); \quad p_T = F_T(T / T_R); \quad p_\theta = F_\theta(\theta); \quad p_E = F_E(\Delta_S);$$

где D_M - минимальное из значений дистанций до «целей» и до границы безопасной для движения и маневров полосы при прогнозе выполнения плана расхождения.

Функции $F_D(D_M)$, $F_T(T/T_R)$, $F_\theta(\theta)$, $F_E(\Delta_S)$ отражают соответствие получаемых при прогнозе маневра значений D_M , T , θ , Δ_S рациональным уровням. Они выбираются экспертами с учетом требований МППСС72 и хорошей морской практики. При поиске В-маневра, например, можно использовать функции, представленные на рис. 1-4.

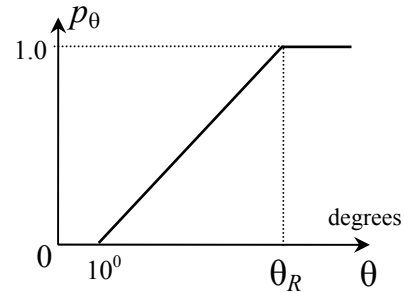
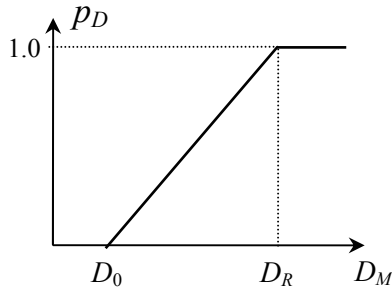


Рис. 1. Выбранная функция $p_D = F_D(D_M)$ Рис. 2. Выбранная функция $p_\theta = F_\theta(\theta)$

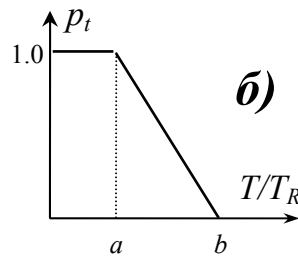
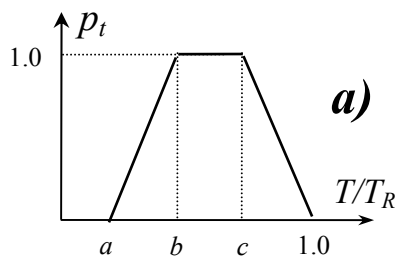


Рис. 3. Выбранные функции $p_T = F_T(T/T_R)$
а) для "give-way" судна; б) для "stand-on" судна.

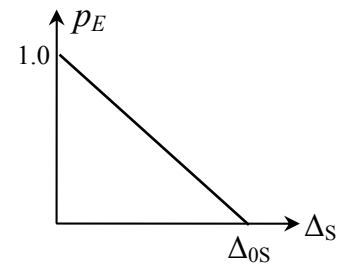


Рис. 4. Выбранная функция $p_E = F_E(\Delta_S)$

6. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОИСКА В-МАНЕВРА

В В-маневре выделяются три отрезка (рис. 5): от текущего места судна до начала уклонения (OF_1); уклонения (F_1F); движения исходным курсом после уклонения (FF_3). Длина последнего отрезка берется равной расстоянию, проходимому судном оператора за время $k_t \cdot T^S$, где $(1.0 \leq k_t < 1.5)$.

Область, в которой ищется В-маневр, задается шириной (S_S, S_P) правой и левой полос допустимых смещений от исходной линии пути. Выбор рационального В-маневра характеризуется ниже для правой полосы допустимых смещений. Алгоритм поиска этого действия в левой полосе аналогичен.

С заданным углом θ В-маневр полностью определяется своей опорной точкой F . Ее положение характеризуется на рис. 5 в косоугольной системе координат ZOU с углом θ между осями. В этой системе θ - угол уклонения;

Z - расстояние между позицией судна оператора и точкой F_1 ;

U - дистанция между точками F_1 и F .

$a_i b_i$ - метка ограничения i -ой «целью» В-маневра СО.

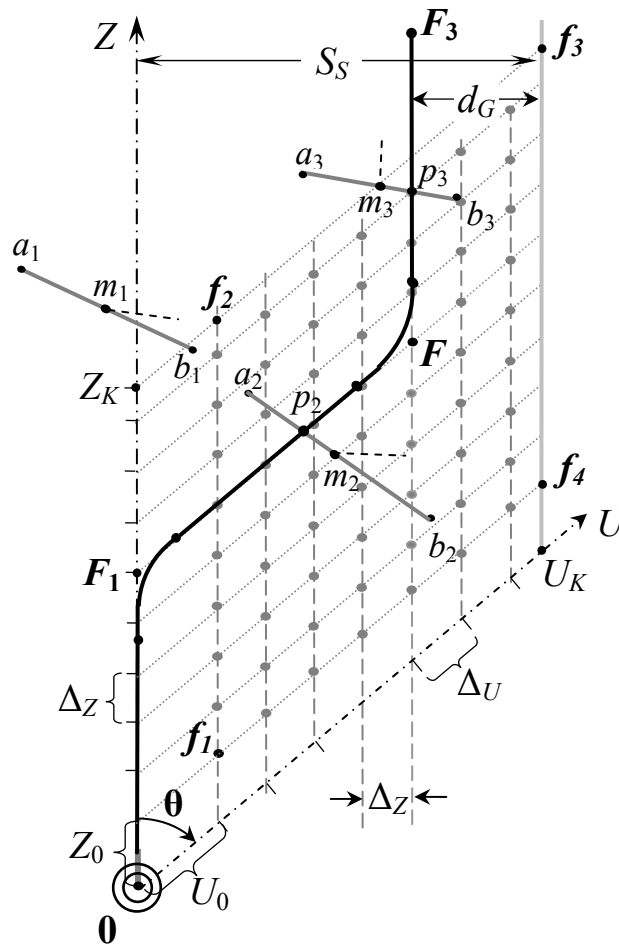


Рис. 5. К поиску рационального В-маневра

Чтобы уменьшить погрешности планирования В-маневров, метки $a_i b_i$ должны определяться с учетом инерционности судна. По расстоянию от центра m_i метки до точки p_i пересечения ее линии с планируемой траекторией $0F_1FF_3$ расхождения находятся расстояния кратчайшего сближения с «целями» [3].

Область допустимых значений координат точки F задается границами параметров θ, Z, U :

$$\theta_0 \leq \theta \leq \theta_K, \quad Z_0 \leq Z \leq Z_K, \quad U_0 \leq U \leq U_K; \quad (5)$$

где Z_0, U_0 зависят от угла θ .

Для одного значения θ область $(f_1 f_2 f_3 f_4)$ допустимых значений координат Z и U точки F представлена на рис. 5. Так как уклонение при

расхождении должно быть заметным, то θ_0 должно превышать 10^0 . Правая граница θ_K назначается 150^0 или меньше.

Границы Z_0 и Z_K приняты такими

$$Z_0 = S_\theta + s_m, \quad Z_K = V \cdot T^S - s_m;$$

где S_θ - расстояние до путевой точки, на котором надо начать поворот, чтобы выйти на новый отрезок пути;

s_m - расстояние, проходимое судном оператора за 1 минуту.

V - скорость судна оператора.

В-маневр с заданным углом уклонения θ может быть нормально выполнен, когда U_0 (см. рис. 5) не короче $2 \cdot S_\theta$. Значение U_K равно

$$U_K = S_S / \sin\theta.$$

Количество возможных позиций точки F в допустимой области является бесконечным. Для поиска маневра эта область представляется конечным числом положений, взятых через определенные интервалы приращений Δ_θ , Δ_Z , Δ_U координат θ , Z , U :

$$\theta_h = \theta_0 + h \cdot \Delta_\theta, \quad Z_i = Z_0 + i \cdot \Delta_Z, \quad U_j = U_0 + j \cdot \Delta_U, \quad (6)$$

где $h = 0, 1, 2, \dots, n_\theta$, $i = 0, 1, 2, \dots, n_Z$, $j = 0, 1, 2, \dots, n_U$.

Значения n_θ , n_Z , n_U находятся по формулам:

$$n_\theta = INT\left(\frac{\theta_K - \theta_0}{\Delta_\theta}\right), \quad n_Z = INT\left(\frac{Z_K - Z_0}{\Delta_Z}\right), \quad n_U = INT\left(\frac{U_K - U_0}{\Delta_U}\right);$$

где функция INT дает целую часть аргумента.

Пример дискретных положений точки F при одном значении θ показан на рис. 5. Для нахождения рационального В-маневра можно использовать метод перебора его вариантов, соответствующих возможным позициям точки F . Время поиска этим методом зависит от величины Δ_θ , Δ_Z , Δ_U , от значений θ_K , Z_K , U_K и от количества «целей», метки которых попадают в допустимую область. Один вариант ($0F_1FF_3$) траектории В-маневра показан на рис. 5 жирной линией.

Для каждого из положений точки F в допустимой области находятся значения D_M , θ , T and Δ_S , где

$$T = (Z_K - Z)/V, \quad \Delta_S = U \cdot (1 - \cos \theta) + \frac{U}{\sin \theta_B} (1 - \cos \theta_B);$$

θ_B - угол В-маневра для возвращения к исходной линии пути.

Критерий эффективности каждого варианта В-маневра находится по формуле (4). Из перебираемых вариантов В-маневра эффективным считается тот, у которого значение критерия качества максимально.

Алгоритм поиска эффективного В-маневра представлен на рис. 6. При расчетах по этому алгоритму используется прямоугольная система координат XOY . Ее ось OY направлена на север, а ось OX - на восток.

В представленной блок-схеме алгоритма использованы следующие обозначения:

C_R , C_{PJ} - критерий эффективности и его значение, соответствующее одному из перебираемых вариантов пути;

W - вид сближения с опасной «целью»;

S_1, S_2, S_3 - длина отрезков OF_1, F_1F, FF_3 ;

$\Delta_{ZX}, \Delta_{ZY}, Z_{0X}, Z_{0Y}, \Delta_{UX}, \Delta_{UY}, U_{0X}, U_{0Y}$ - соответственно координаты $\Delta_Z, Z_0, \Delta_U, U_0$ в системе XOY ;

J_B - признак стороны уклонения (1 – вправо, 2 – влево);

$m(J_B)$ - количество меток «целей» в правой или в левой полосе допустимых смещений от линии пути;

J_m - номер метки «цели»;

$N_{Ц}, J_{Ц}$ - количество наблюдаемых «целей» и номер «цели»;

$K_{ГЦ}$ - курс наиболее опасной «цели».

Расчеты подтвердили корректность разработанного алгоритма и позволили установить, что при $\Delta_\theta = 5^\circ$, $\Delta_Z = 0.5$ кб, $\Delta_U = \Delta_Z / \sin \theta$ время, затрачиваемое компьютером на поиск маневра расхождения с несколькими «целями», редко превышает 5 с. Обычно этот поиск занимает около одной секунды.

Выводы. Выполнение поиска В-маневра методом перебора позволяет получать результаты в реальном времени. Вырабатываемые на основе поиска рекомендации по расхождению облегчают и ускоряют выбор судоводителем эффективных решений для избежания столкновений и уменьшают влияние субъективного фактора на их качество.

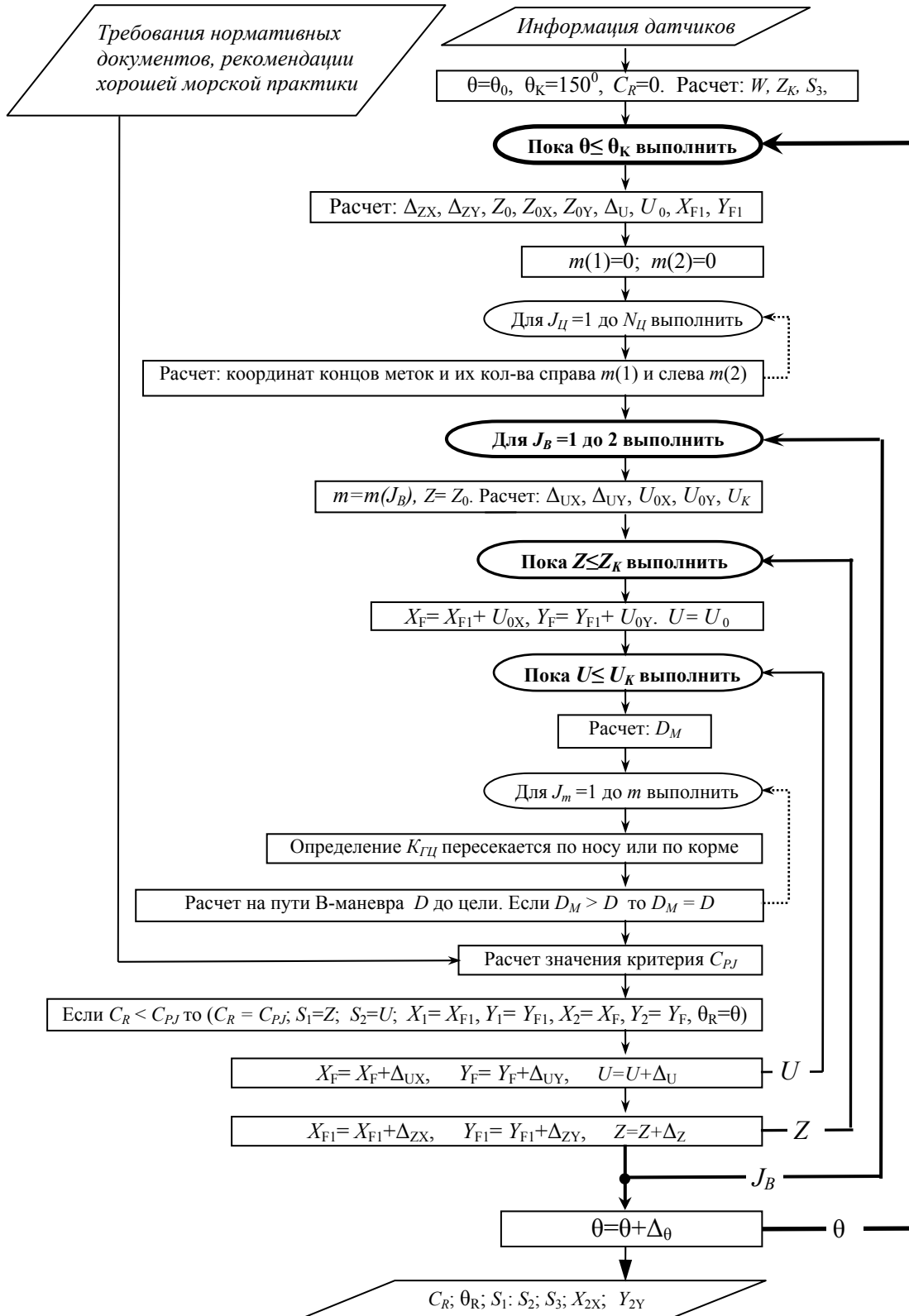


Рис. 6. Алгоритм поиска эффективного В-маневра

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин С.И. Управление судном: учебник (для вузов) / С.И.Демин, Е.И.Жуков, Н.А.Кубачев и др.; под ред. В.И.Снопкова. – М.: Транспорт. 1991. – 359 с.
2. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении /А. С. Мальцев – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
3. Вагущенко Л.Л. Поддержка решений по расхождению с судами /Л.Л.Вагущенко, А.Л.Вагущенко – Одесса: Феникс, 2010. – 296 с.
4. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н.Цымбал, И.А.Бурмака, Е.Е.Тюпиков – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
5. Lee H.J. Development of collision avoidance system by fuzzy theory / H.J.Lee, W.J.Yoo and K.P.Rhee - Osaka, 1993, pp. 164-169 (The Second Japan-Korea Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics).

ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА ПОИСКА В-МАНЕВРА

Убедиться в достоверности предложенного алгоритма можно, используя программу МАНЕВРЫ-12И в режиме «Управление судном»/ «Цели» / «Кмб». Эту программу можно бесплатно скачать на сайте www.nav-eks.org.ua в разделе «НАУКА» и загрузить в память компьютера. Программа помещена в файле **STEERS** и активируется при его открытии. При активации программы по умолчанию устанавливается режим «Управление судном», в котором и происходит проверка предложенной методики.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОВЕРКИ

1. Активировать программу МАНЕВРЫ-12И.
2. Нажав на панели справа от поля карты кнопку «Спис», в появившемся диалоговом окне найти и открыть один из файлов «Isx J-I.mrs», содержащий данные ситуации.
3. Вызвать форму «САРП», нажав клавишу «Цели» на нижней панели в центре. На этой форме можно задать значения опорных параметров.
4. Подключить режим «Кмб», нажав одноименную кнопку на нижней панели.
5. Нажать кнопку «ПОИСК» (В-маневра) на стр. А формы «САРП». На экране появится рекомендуемый системой план расхождения, который будет задан системе вождения нашего судна по маршруту. (*Track Control Systems - TCS*). Внизу экрана на табло будет представлено значение критерия эффективности и его составляющих

6. Щелчком по пункту «Старт» в главном меню (вверху экрана) начать моделирование движения судов, в процессе которого TCS проведет судно по заданной траектории и выполнит расхождение. Контролируя моделируемое движение судов, можно проверить эффективность рекомендуемого системой В-маневра. (Автоматический поиск В-маневра можно инициировать нажатием кнопки «ПОИСК» как до щелчка по пункту «Старт» в главном меню так и после его в процессе моделирования движения судов).