

УДК 656.61.052

**DESCRIPTIVE ALGORITHMS OF VESSEL MOTION  
PLANNING IN CONSTRAINED WATERS****СОДЕРЖАТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПУТИ  
ДВИЖЕНИЯ СУДНА В СТЕСНЕННЫХ ВОДАХ***Sokolenko V.I., PhD student, Vorokhobin I.I., PhD, associate professor**Соколенко В.И., аспирант, Ворохобин И.И., к.т.н., доцент**Odessa National Maritime Academy, Ukraine**Одесская Национальная Морская Академия, Украина***ABSTRACT**

The developed system of high-accuracy trajectory planning of moving and hesitate to control movement along it contains first developed in the Maritime Academy of ways and methods of the specified algorithm of ship management and control over the process of movement, including curved. It allows you to automate the process of planning a motion path by turning qualities, characteristics and control of safe maneuvering.

The proposed system is intended to create a navigational training ship, by automating the process for building a high-trajectory and help control movement.

Results can be used by ships during automatic functioning of transition and plans to create a simulator for training navigators to perform motion path planning, including restricted conditions.

**Keywords:** specified algorithm, planning a motion, safe maneuvering, navigational training, restricted conditions.

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

Главными мировыми тенденциями развития и усовершенствования устройств обеспечения безопасного маневрирования в стесненных условиях является уменьшение нагрузки на человека оператора (ЧО) за счет использования устройств навигационного и информационного обеспечения. При этом широко используются устройства автоматизации процессов обработки информации для выдачи ее в виде знания, которое позволяет принять решение, адекватное складывающимся условиям плавания.

При движении по фарватерам, подходных каналам к портам и на их акваториях допустимые неточности перемещения судна невелики, что обуславливает экстремальные условия плавания и необходимость готовить команду управления движением в таких условиях.

Для обработки увеличивающегося объема информации при управлении судном в стесненных условиях требуется несколько операторов, что требует изменения организации команды управления и перераспределения функциональных обязанностей между ее членами.

В стесненных условиях, на каналах и фарватерах ширина судоходной части соизмерима с размерами судна, что значительно осложняет управление движением и не всегда позволяет контролировать его положение классическим способом, путем сравнения заданного и текущего положения.

Это вынуждает создавать автоматические системы планирования и контроля места, в том числе, при криволинейном движении. Однако автоматическое управление требует коренного изменения способов планирования заданного пути и методов контроля при прямолинейном и криволинейном движении.

Развитие судоводительской науки за последние десятилетия, появление новых навигационных устройств требуют разработки новых способов планирования пути и определения места, которые в настоящее время отсутствуют.

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

В работе [1] рассмотрены содержательные модели обеспечения плавания в стесненных условиях, преимущественно описательные.

В работе [2] впервые был предложен графический метод расчета поворота по характеристикам циркуляции. В работах [3-5] рассмотрены содержательные модели процесса маневрирования судна в стесненных условиях, основанные на практическом опыте работы капитанов и лоцманов, а поэтому содержат словесный алгоритм и графические схемы маневрирования без масштаба. Однако результаты работ не доведены до методики учета маневренных характеристик при планировании движения. В работе [6] рассмотрен навигационный информационно – аналитический комплекс «Поворот», который содержит впервые разработанные способы и методики разработки заданного алгоритма функционирования системы управления судном, и контроля над процессом перемещения по траекториям движения, включая криволинейные участки. Приведены алгоритмы контроля над процессом движения, и рассмотрены способы повышения точности оценки места судна. Однако методика построения траекторных точек не рассмотрена.

В работе [7] разработано навигационное устройство автоматического контроля отклонения центра тяжести судна от заданной траектории и информации команды мостика о недопустимом его значении.

В работе [8] рассмотрен навигационный информационно – аналитический комплекс «Планирование траектории», который содержит впервые разработанные способы и методики разработки заданного алгоритма функционирования системы управления судном в виде траекторных точек и автоматического контроля над процессом перемещения по траекториям движения, включая криволинейные участки, с учетом характеристик поворотливости.

Предложенная концепция дает новое направление для обеспечения безопасного плавания судов в прибрежных водах, и позволяет производить высокоточное планирование движения.

### Формулировка целей статьи (постановка задачи)

Целью статьи является решение задачи по созданию системы поддержки высокоточного планирования траектории перемещения центра тяжести судна и непрерывного автоматического контроля процесса безопасного движения.

### Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

При оперативном управлении движением судна и решении задач навигации его рассматривают как материальную точку. При решении задач управления его рассматривают как твердое тело, текущее положение которого описывается координатами центра тяжести, включая линейную и угловую скорость вращения а также угол дрейфа от поворота.

Поэтому текущие координаты определяют место установки приемной антенны спутниковой системы или радиолокатора. Для повышения точности контроля места указанные координаты необходимо пересчитывать на центр тяжести судна, причем такую работу необходимо выполнять путем использования автоматического устройства.

При планировании заданной траектории обычным способом судоводитель выбирает безопасные путевые (ПТ) точки, рассчитывает курс и плавание из предыдущей в последующую и представляет переход в табличной форме, как показано в табл. 1.

Таблица 1 - Предварительная прокладка

№ ПТ	ПУ (ИК)	S, мили	V, узлы	Поворотные точки							
				T, ч.мин	ΣT, ч.мин	Дата, д.мин	φ	λ	ИП	D <sub>к</sub>	Название ориентира
1	-	-	-	-	00.00	02.01	38°06,8' S	144°23,3' E	263	1,1	Мк Пирса Риплсайд
2	147	0,8	3	00.16	00.16		38°07,5' S	144°23,8' E			Канал Холтаун
3	83	2,6	5	00.31	00.47		38°07,2' S	144°27,2' E			Канал Уилсон-Спит
4	102	3,7	7	00.31	01.18		38°07,9' S	144°31,7' E			Канал Поинт-Ричардс
5	55	4,0	7	00.34	01.52		38°05,7' S	144°36,1' E			Канал Поинт-Ричардс
6	67	0,7	7	00.06	01.58		38°05,5' S	144°36,9' E			Канал Поинт-Ричардс
7	73	0,4	7	00.03	02.01		38°05,3' S	144°37,4' E			Канал Поинт-Ричардс
8	80	2,7	7	00.23	02.24		38°04,7' S	144°41,8' E	133	2,6	Мк Принс-Джордж
9	118	3,4	7	00.29	02.53		38°06,4' S	144°45,6' E	263	1,2	Мк Принс-Джордж
10	172	4,9	7	00.42	03.35		38°11,3' S	144°46,4' E	243	1,0	Мк Уест-Чаннел-Пайл
11	226	2,5	7	00.21	03.56		38°13,0' S	144°44,3' E	151	0,25	Мк Нопвуд
12	204	3,7	7	00.31	04.27		38°16,3' S	144°42,3' E	221	0,5	Мк Уэдж
13	254	2,7	7	00.23	04.50		38°17,0' S	144°39,0' E	42	0,7	Мк Хьюм-Тоуер
14	222	8,5	12	00.42	05.32		38°23,0' S	144°32,0' E	36	7,0	Мк Лонсдейл
15	126	94	15,5	06.04	11.36		39°16,8' S	146°09,0' E	23	10,4	Мк Ситадель
16	90	19,1	15,0	01.42	13.18		39°16,8' S	146°33,8' E	337	3,0	Мк Ист-Монкер-Айленд
17	65	75,5	15,5	04.52	18.10	02.01	38°42,5' S	148°16,8' E			СНС
18	55	100	15,5	06.27	00.37	03.01	37°45,0' S	150°00,0' E	340	12,0	Мк Гейбо
19	58	285	15,5	18.23	19.00	03.01	35°14,5' S	155°00,0' E			СНС
20	55	302	15,5	19.30	14.30	04.01	32°20,9' S	160°00,0' E			СНС
21	52	321	15,5	20.42	10.12	05.01	29°02,8' S	165°00,0' E			СНС
22	50	350	15,5	22.35	08.47	06.01	25°19,3' S	170°00,0' E			СНС
23	47	478	15,5	30.38	15.25	07.01	20°00,0' S	176°20,0' E			СНС

Продолжение таблицы 1											
24	20	130	15,5	08.23	23.48	07.01	17°57,0' S	177°07,0' E	74	5,5	Мк Навула Южный
25	77	6,3	13,0	00.30	00.18	08.01	17°55,8' S	177°13,2' E	285	0,8	Мк Навула Южный
26	10	4,3	10	00.26	00.44		17°51,5' S	177°14,0' E	161	2,0	Мк Навула
27	41	9,2	10	00.55	01.39		17°44,6' S	177°20,4' E	21	5,6	Мк Наикорокора
28	14	6,2	10	00.37	02.16		17°38,5' S	177°21,9' E	330	0,9	Мк Наикорокора
29	50	4,0	8	00.30	02.46		17°36,0' S	177°25,0' E	111	0,7	Мк Вио
30	82	1,6	6	00.16	03.02	08.01	17°35,8' S	177°26,6' E	240	1,0	Мк Вио

Контроль процесса движения по прямолинейным участкам производят обсервационным способом, путем нанесения текущих координат на карту и определения графическим способом бокового отклонения относительно предварительно нанесенного пути. В некоторых случаях поворот планируют путем нанесения точки его начала и окончания. Движение по криволинейной траектории часто не контролируется из-за того, что определение места занимает длительное время, и такая информация запаздывает к моменту принятия решения по управлению.

Недостатком такой формы разработки предварительной прокладки является отсутствие информации о моменте начала поворотов и их окончания. Из анализа перехода видно, что при выходе из порта судно должно было выполнить 12 поворотов и 6 поворотов при заходе с величиной изменения курса от 20 до 95 градусов.

Для выполнения расчета поворота необходимые исходные данные судоводитель получает по данным о поворотливости в виде, пригодном для обработки на ЭВМ до начала поворота. Обычно таким удобным способом является форма, приведенная в табл.2 для т/х «GreenStream». При этом необходимые данные достаточны для значений углов перекладки до 15 градусов, и угла перекладки 35 градусов. Это обусловлено тем, что планировать поворот необходимо с запасом, для того, чтобы иметь резерв управляющих воздействий для корректировки движения, если возникнет непредвиденное отклонение. Знание параметров циркуляции для угла перекладки 35 градусов необходимо, для того, чтобы определить момент чрезмерного, опасного или аварийного сближения с другими судами или препятствиями [9].

Таблица 2 . Параметры циркуляции т/х «GreenStream»

Угол перекладки и руля	Параметры	Условное обозначение	В грузу	В балласте
			Экспериментально-расчетное, кабельтов	Экспериментально-расчетное, кабельтов
5°	Выдвиг	$l_1$	6.25	5.67
	Прямое смещение	$l_2$	4.83	4.32
	Тактический диаметр	$D_T$	10.37	9.31
	Установившийся диаметр	$D_y$	11.14	9.85
10°	Выдвиг	$l_1$	4.22	3.95
	Прямое смещение	$l_2$	2.95	2.73
	Тактический диаметр	$D_T$	6.79	6.0
	Установившийся диаметр	$D_y$	6.79	5.9

Продолжение таблицы 2

15°	Выдвиг	$l_1$	3.32	3.19
	Прямое смещение	$l_2$	2.11	2.02
	Тактический диаметр	$D_T$	4.73	4.53
	Установившийся диаметр	$D_U$	4.86	4.53
35°	Выдвиг	$l_1$	1.94	2.02
	Прямое смещение	$l_2$	0.83	0.94
	Тактический диаметр	$D_T$	2.06	2.27
	Установившийся диаметр	$D_U$	1.9	2.03

Функциональная схема системы высокоточного планирования траектории движения центра тяжести судна и непрерывного автоматического контроля процесса безопасного движения в стесненных условиях приведена на рис. 1.

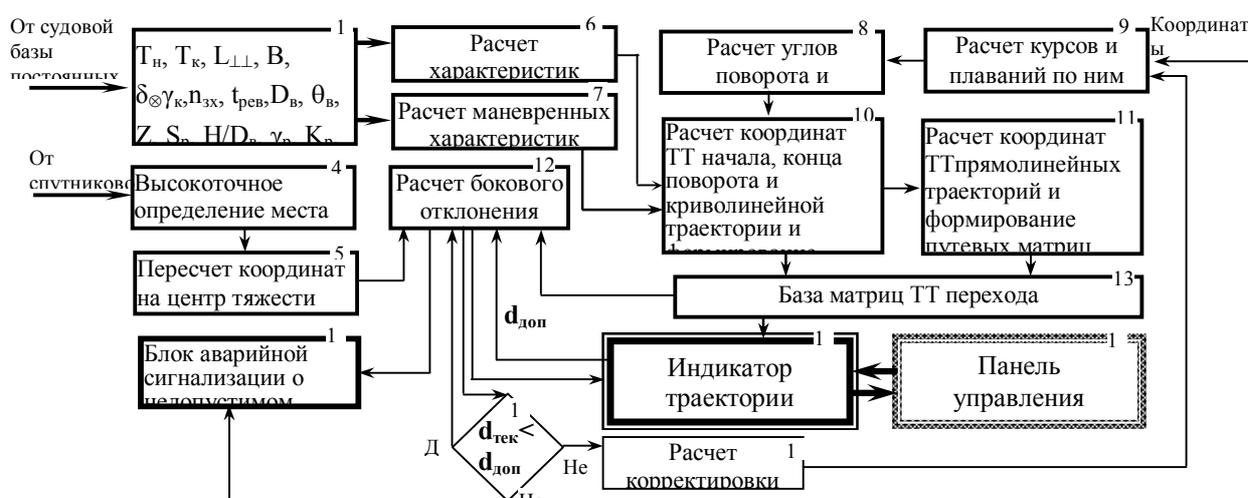


Рис. 1. Функциональная схема системы высокоточного планирования траектории в стесненных условиях и контроля движения

Для выполнения расчетов на рис. 1 приняты следующие обозначения.

- Длина между перпендикулярами:  $L_{\perp\perp}$ , м.
- Ширина наибольшая:  $B$ , м.
- Осадка носом  $T_n$ , м.
- Осадка кормой  $T_k$ , м.
- Число винтов/рулей:  $n/m$
- Скорость уверенного реверсирования:  $9$  уз.
- Число лопастей винта:  $Z$ .
- Диаметр винта:  $D_B$ , м.
- Дисковое отношение винта:  $\theta_B$ .
- Шаговое отношение винта:  $H/D_B$ .
- Площадь пера руля:  $S_p$ , м<sup>2</sup>.
- Число оборотов винта заднего хода  $n_{zx}$ , об/мин.
- Переходный коэффициент по упору  $R_{\gamma_p}$ .
- Расчетный коэффициент сопротивления  $K_p$ .
- Переходной коэффициент по сопротивлению  $\gamma_k$ .
- Коэффициент полноты мидель шпангоута  $\delta_{\otimes}$ .
- Время реверсирования  $t_{рев}$ .

Время прохождения команды  $t^1$ .  
 Допустимое боковое отклонение от заданного пути  $d_{\text{доп}}$ .  
 Текущее боковое отклонение от заданного пути  $d_{\text{тек}}$ .

При автоматическом выполнении поворота процесс движения планирует и осуществляет ЭВМ без участия судоводителя и рулевого. Судоводитель осуществляет контроль над нормальной ее работой и, при возможности, визуально оценивает положение судна относительно знаков навигационной обстановки.

Система работает следующим образом. Из таблицы 1 в систему вводят координаты путевых точек (ПТ), которые получены при предварительной подготовке к переходу и величину допустимого отклонения  $d_{\text{доп}}$ . Система рассчитывает курсы из предыдущей точки в последующую, определяет угол поворота для каждой ПТ и выбирает угол перекладки по их величине.

По полученным данным производится расчет координат движения, включая криволинейные участки, в виде ТТ через 0,05 кбт в стесненных условиях и через 0,2 кбт в открытом море. Результаты оформляются в виде базы матриц ТТ для всего перехода.

По полученным данным производится графическое построение высокоточной траектории, которая представляет собой заданный алгоритм управления движением судна.

В блок 12 поступает рассчитанное текущее значение  $d_{\text{тек}}$ , которое сравнивается с допустимым, определенным судоводителем для каждого района плавания. Его величина для припортовых вод может составлять значение  $2 \div 5$  метров, в зависимости от наличия в данном районе спутниковых систем DGPS, работающих в дифференциальном режиме. Навигационное устройство лоцмана фирмы "Marimatech" имеет блоки определения места в припортовых и портовых водах со СКП равной 2 см.

Блок 17 работает непрерывно и если установлено, что величина отклонения от пути больше, чем допустимая, то срабатывает блок аварийной сигнализации 14, а блок расчета данных для корректировки движения 18 вырабатывает решение для перепланировки ТТ в блоке 9.

Предложенный алгоритм формирования заданного алгоритма движения судна на переходе в виде базы матриц ТТ перехода позволяет обеспечить высокую точность плавания по линии заданного пути и автоматического контроля параметров процесса движения. Это создает предпосылки для безопасности управления. В систему управления не включены навигационные устройства определения параметров возмущающих воздействий. Это сделано преднамеренно, поскольку высокоточный контроль места и наличие заданного ТТ пути движения позволяют своевременно определить наличие отклонения и скорректировать движение.

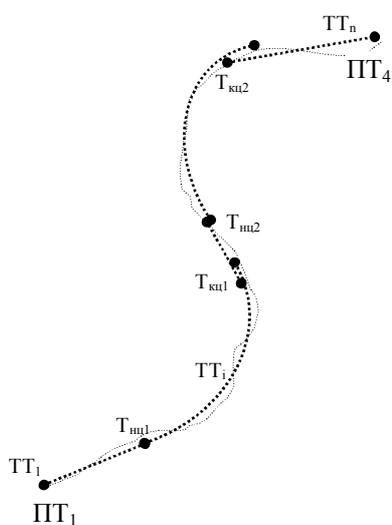


Рис. 2. Изображение движения на индикаторе 15

Имитационное моделирование процесса движения приведено на рис. 2. Пересчет координат приемной спутниковой антенны на центр тяжести производился автоматически, по зависимостями приведенным в [6]. Величина  $d_{\text{зад}}$  была установлена равной 5 метров. Управляя курсом и скоростью, судоводитель должен провести точку фактического положения судна, данные о котором поступают от блока 3, по линии заданного пути. Обычно при управлении судном в качестве такой точки принимают пересечение мидель – шпангоута и диаметральной плоскости. При этом полагают, что центр тяжести находится именно в ней.

Если управление производится вручную, то при обнаружении недопустимого отклонения судоводитель дает команду на средства управления. В качестве меры величины  $d_{\text{зад}}$  должна служить радиальная СКО определения места судна, чувствительность человеческого глаза, которая позволяет определить смещение либо соотношение ширины маневренного смещения и судоходной части морской акватории. С учетом точности современных дифференциальных спутниковых систем определения места и способности человеческого глаза обнаружить смещение величину  $d_{\text{зад}}$  можно принять равной 5 м.

Для приближенного определения характеристик торможения в длинах корпуса  $\bar{S}$  можно использовать значение обобщенного коэффициента энерговооруженности  $K_{\text{эн}}$  [5,9]:

$$K_{\text{эн}} = \frac{0,8 \cdot N_e}{D}, \quad (2)$$

где 0,8 - коэффициент, учитывающий использование главной машины в маневренном режиме при работе на задний ход;  $N_e$  - мощность главного двигателя, л.с.;  $D$  - водоизмещение судна, т.

Эмпирическая формула, полученная проф. Мальцевым А.С. [5,9] имеет вид:

$$\bar{S} = -0.569 + 8.721 \cdot \frac{Fr}{K_{\text{эн}}} + 1.171 \cdot \frac{D_e}{T_k}, \quad (3)$$

где  $Fr$  - число Фруда ( $V/\sqrt{g \cdot L}$ );  $D_e$  - диаметр винта;  $T_k$  - осадка кормой.

Для получения сведений о тормозном пути достаточно знать четыре параметра  $D_b, T_k, Fr, N_e$ , которые обычно имеются на мостике судна. Если судоводитель будет менять режим работы главной силовой установки, то при этом изменяется  $K_{\text{эн}}$ , а соответственно и тормозной путь.

При автоматическом выполнении контроля движения с поступлением координат от навигационного комплекса производится расчет расстояний и пеленгов от обсервованных точек до ТТв блоке 12 по известным формулам:

$$ИП_i = \arctg[(\lambda_0 - \lambda_i) \cdot \cos \varphi_0 / (\varphi_0 - \varphi_i)], \quad (18)$$

$$D_i = 1852(\varphi_0 - \varphi_i) / \cos ИП_i. \quad (19)$$

Методом перебора выбирается значение минимальной дистанции и ее величина определяется как  $d_{\text{тек}} = D_{i \min}$ .

Непрерывный мониторинг бокового смещения автоматически позволяет своевременно оценить недопустимое смещение относительно плановой

траектории, определенной высокоточным способом массивом ТТ.

Предложенный алгоритм формирования заданного алгоритма движения судна на переходе в виде матриц ТТ перехода позволяет создать высокоточную траекторию движения и создает предпосылки безопасного управления при плавании в стесненных условиях.

Техника выполнения поворотов предусматривает два способа управления маневрированием – рулем и курсом. Они отличаются способом отдачи команды рулевому. При управлении рулем оператор, управляющий судном, назначает угол перекладки руля, контролируя процесс движения. При управлении курсом оператор, управляющий судном, назначает курс, предоставляя рулевому выбор угла перекладки и одерживания поворота. Для выполнения поворотов рекомендуется использовать способ управления рулем. Это дает возможность изучить характеристики судна тому, кто им управляет. К ним следует отнести время запаздывания управляющих воздействий, характеристики поворотливости и одерживания. В результате судоводитель будет хорошо чувствовать судно и уверенно управлять им в стесненных водах. Способ управления курсом рекомендуется использовать при уточнении направления движения для небольших отклонений.

Планирование траектории рекомендуется производить для циркуляционного способа его выполнения, когда поворот выполняется разовой перекладкой руля. Фактическое выполнение поворота, при ручном управлении, будет производиться циркуляционным способом, при автоматическом - способом последовательных перекладок руля.

### **Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению**

Разработанная система высокоточного планирования траектории в стесненных условиях и контроля движения по ней содержит впервые разработанные в морской академии способы и методики разработки заданного алгоритма функционирования системы управления судном и контроля над процессом перемещения по траекториям движения, включая криволинейные. Она позволяет автоматизировать как процесс планирования траектории движения по характеристикам поворотливости, так и контролировать безопасное маневрирование.

Предлагаемая система предназначена для создания навигационных комплексов подготовки судового плана проводки судна, путем автоматизации процесса для построения высокоточной траектории и облегчения контроля над процессом движения.

Результаты могут быть использованы на судах при автоматическом планировании перехода и при создании тренажера для подготовки судоводителей для выполнения планирования траектории движения, включая стесненные условия.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Таратынов В.П. Судовождение в стесненных районах./В.П. Таратынов. – М.: Транспорт, 1980. – 128 с.

2. Мальцев А.С. Графический метод расчета элементов поворота судна при плавании в стесненных условиях / А.С. Мальцев //Морской транспорт. Серия "Судовождение и связь". Экспресс-информация. / А.С. Мальцев, Г.Г.Куликов. - М.: В/О " МТИР", 1987. Вып. 4(199). - С. 11-15.
3. Кондрашихин В.Т. Справочник судоводителя по навигационной безопасности мореплавания. /В.Т. Кондрашихин, Б.В. Бердинских, А.С. Мальцев, Л.А. Козырь. – Одесса: Маяк, 1990. – 167 с.
4. Мальцев АС. Поворот судна в стесненных водах. //Морской транспорт. Серия "Судовождение, связь и безопасность мореплавания". /Экспресс-инф. /А.С. Мальцев, И.А.Тимофеев, Г.Г. Куликов - М.:В/О"МТИР", 1991. Вып. 6(253).-С. 1-10.
5. Вильский Г.Б. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов./ Г.Б.Вильский, А.С.Мальцев, В.В Бездольный, Е.И.Гончаров – Одесса.: Феникс, 2007.-330 с.
6. Мальцев А.С.Информационно – аналитический комплекс лоцмана «Поворот»./А.С.Мальцев, И.И. Ворохобин, В. И. Соколенко, А.К. Ищук. // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА Вып.19 –Одесса: «ИздатИнформ», 2010. – С. 103 – 113.
7. Патент на корисну модель. Мальцев А.С., Ворохобін І.І., Соколенко В.І.. Пристрій для попередження посадки судна на мілину. МПК (2011.01) G08G 3/00. Номер заявки: U 2010 09828. Приоритет от 10.03.2011 г.
8. Соколенко В.И.Планирование заданного пути движения в стесненных условиях траекторными точками и контроль процесса движения./ В.И.Соколенко// Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА Вып..21 – Одесса: «ИздатИнформ», 2012. – С. 220-227.
9. Мальцев А.С. Теория маневрирования подвижных объектов при чрезмерном сближении. /А.С.Мальцев, И.В.Сафин,, В.В. Мамонтов // Тезисы доклада. Конфер. «Забезпечення безаварійного плавання суден». – Одесса.: «ИздатИнформ» ОНМА, 2011. – С. 38-46.