



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра информационных технологий и систем безопасности

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(Магистерская диссертация)

На тему: Алгоритмы определения параметров движения корабля
относительно навигационных опасностей при движении в морском
порту

Исполнитель Аведян Альберт Суменович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

(подпись)

доктор технических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Сикарев Игорь Александрович

(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

доктор технических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Бурлов Вячеслав Георгиевич

(фамилия, имя, отчество)

« » 2024 г.

Санкт-Петербург
2024



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра информационных технологий и систем безопасности

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой

_____/ Бурлов В.Г.

«__» _____ 2024 г.

Задание

на выпускную квалификационную работу

Студенту Аведяну Альберту Суреновичу

1. **Тема:** «Алгоритмы определения параметров движения корабля относительно навигационных опасностей при движении в морском порту»
закреплена приказом ректора Университета от 30.08.2023 года, №935-с
2. **Срок сдачи законченной работы**
3. **Исходные данные к выпускной квалификационной работе:**
Научные статьи, проектная документация, учебные пособия.
4. Перечень вопросов, подлежащих разработке (краткое содержание работы):
 - Введение. Актуальность темы, цели и задачи ВКР.
 - Глава 1. Портовые воды и их опасности

- Глава 2. Влияние гидрометеорологических условий на движение судна в морском порту

- Заключение. Выводы по работе в целом. Оценка степени решения поставленных задач. Практические рекомендации.

5. Перечень материалов, предоставляемые к защите:

- раздаточный материал

6. Консультанты по работе:

Руководитель выпускной квалификационной работы:

Профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности

доктор технических наук

Сикарев Игорь Александрович

(должность, ученая степень, ученое звание, фамилия, имя, отчество) (подпись)

Дата выдачи задания: 08.11.2023

Задание принял к исполнению

Студент Аведян Альберт Суменович МД-М22-1

(фамилия, имя, отчество, учебная группа) (подпись)

Реферат

Выпускная квалификационная работа: 83 страниц, 49 рисунков, 40 источников литературы.

Объект исследования: движение кораблей в морском порту.

Предмет исследования: алгоритмы определения параметров движения корабля в акватории морского порта.

Цель работы: исследования заключается в изучении методов определения параметров движения судна в морском порту относительно потенциальных опасностей для навигации.

Задачи исследования:

1. Анализ акватории морского порта и её особенностей;
2. Изучение потенциальных навигационных угроз и аварийных ситуаций, возможных для судов в акватории порта;
3. Оценка существующих средств оборудования для навигации в портовых водах;
4. Изучение правил и алгоритмов маневрирования судна в условиях навигационных угроз, а также анализ воздействия гидрометеорологических условий на корпус судна в процессе маневрирования;
5. Анализ возможных мер предотвращения навигационных аварийных случаев;
6. Анализ эффективности систем, находящихся на борту судна, а также технологий обеспечивающие безопасности и управления судов в акватории морского порта;
7. Исследование влияния изменений климатических условий на навигацию в акватории морского порта и предложение соответствующих мер адаптации.

Оглавление

Перечень сокращений и условных обозначений	6
Введение	7
Глава 1. Портовые воды и их опасности.....	10
1.1. Навигационные опасности в морском порту	10
1.2. Принципы обеспечения безопасности судна при использовании ГЛОНАСС/GPS в морском порту	15
1.3. Системы управления движением судов	21
1.4. Навигационное оборудование	26
Глава 2. Влияние гидрометеорологических условий на движение судна в морском порту	34
2.1. Архитектура автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов (АИСРС)	35
2.2. Принципы действия и конструкции элементов системы обеспечения безопасного маневрирования судов	39
2.3. Математическая модель, предсказывающая поведение судна в ответ на различные силы	45
2.4. Изучение влияния гидрометеорологических условий на процесс принятия решений при маневрировании судна в ситуациях расхождения	48
2.5. Методы анализа приближения судов с использованием нечеткой логики	61
2.6. Определение навигационной ситуации для двух судов на основе заданных навигационных данных	65
2.7. Стандарты и процедуры, определяющие безопасное расстояние между судами для принятия решений	68
Заключение	79
Список используемых источников.....	80

Перечень сокращений и условных обозначений

АИС – автоматическая идентификационная систем.

АИСРС – автоматизированная интеллектуальная система расхождения судов.

БЗ – база знаний.

СУДС – система управления движением судов.

СППР – система проектирования прикладных решений.

МППСС-72 – международные правила предупреждения столкновений судов в море

Введение

Большинство аварий в морском порту, где условия для навигации более сложны из-за ограниченного маневренного пространства. Кроме того, в портах может быть более высокая концентрация судов, что увеличивает риск столкновений. Судоводители работают под напряжением из-за быстро меняющихся условий, что может привести к утомлению и перегрузке информацией, из-за чего они могут упустить важные детали или не успеть проанализировать всю информацию.

В порту, где навигация сложнее из-за ограниченного маневренного пространства и высокой концентрации судов, нагрузка на все составляющие навигационного комплекса очень высока. Это подчеркивает важность как объективных факторов, так и индивидуальных качеств судоводителя.

В свете изменений в судоходстве, нагрузка на навигационные системы будет постоянно увеличиваться, что требует нового качественного подхода к обеспечению безопасности движения судов в ограниченных акваториях. Это объясняется как увеличением количества судов, так и внедрением новых технологий и методов перевозки грузов, что приводит к постоянному росту интенсивности движения в портах. С каждым годом ограниченные по размерам акватории становятся все более загруженными из-за увеличивающегося числа судов, находящихся в их пределах. С увеличением габаритов судов и водного транспорта в свою очередь приводит к увеличению того, что их путь до полной остановки и другие не мало важные параметры описывающих их маневренность.

Следовательно, с каждым годом увеличивается необходимая для безопасного движения маневровая акватория для каждого судна. Расширение размеров судов и увеличение интенсивности движения в портах усугубляют проблемы обеспечения безопасности плавания. Это создает дополнительное давление на судоводителей и увеличивает их уязвимость в навигационном процессе.

В настоящее время самым эффективным методом обеспечения безопасного хождения по портовым водам, который в свою очередь уменьшает риски влияние фактора человека, является управление судоходством с использованием компьютерных технологий.

При использовании новых методов обеспечения безопасности навигации влечет за собой необходимость изменения требований к структуре и компоновке портовых акваторий, а также упорядочивание движения судов для стандартизации навигационных задач и сведения их числа к минимуму [1]. Это приводит к образованию внутривортовых судопотоков. Поэтому упорядочивание движения судов в узких местах и на акваториях портов с целью снижения аварийности представляет собой сложную задачу, требующую сотрудничества судоводителей, береговых служб и проектировщиков портов.

С увеличением интенсивности и размеров судов, наличие навигационных аварий в портовых водах становится все более вероятным. Поэтому актуальность темы обязательного упорядочения движения судов в портах и на акваториях возрастает, поскольку это позволит снизить риск возникновения аварийных ситуаций.

Цель работы: исследования заключается в изучении методов определения параметров движения судна в морском порту относительно потенциальных опасностей для навигации.

Задачи исследования:

1. Анализ акватории морского порта и её особенностей.
2. Изучение потенциальных навигационных угроз и аварийных ситуаций, возможных для судов в акватории порта.
3. Оценка существующих средств оборудования для навигации в портовых водах.
4. Изучение правил и алгоритмов маневрирования судна в условиях навигационных угроз, а также анализ воздействия гидрометеорологических условий на корпус судна в процессе маневрирования.

5. Проанализировать возможные меры предотвращения навигационных аварийных случаев.
6. Проанализировать эффективность систем, находящихся на борту судна, а также технологий обеспечивающие безопасности и управления судов в акватории морского порта.
7. Исследовать влияние изменений климатических условий на навигацию в акватории морского порта и предложить соответствующие меры адаптации.

Глава 1. Портовые воды и их опасности

1.1. Навигационные опасности в морском порту

Навигационные опасности – это возвышения подводного рельефа дна с уменьшенными глубинами, которые представляют угрозу для навигации [2].

Существуют два вида навигационных в морском порту опасностей:

- постоянные;
- временные.

Одним из примеров постоянной навигационной опасности является резкое возвышение элементов морского дна, создающее препятствие для нормального судоходства (рис. 1).

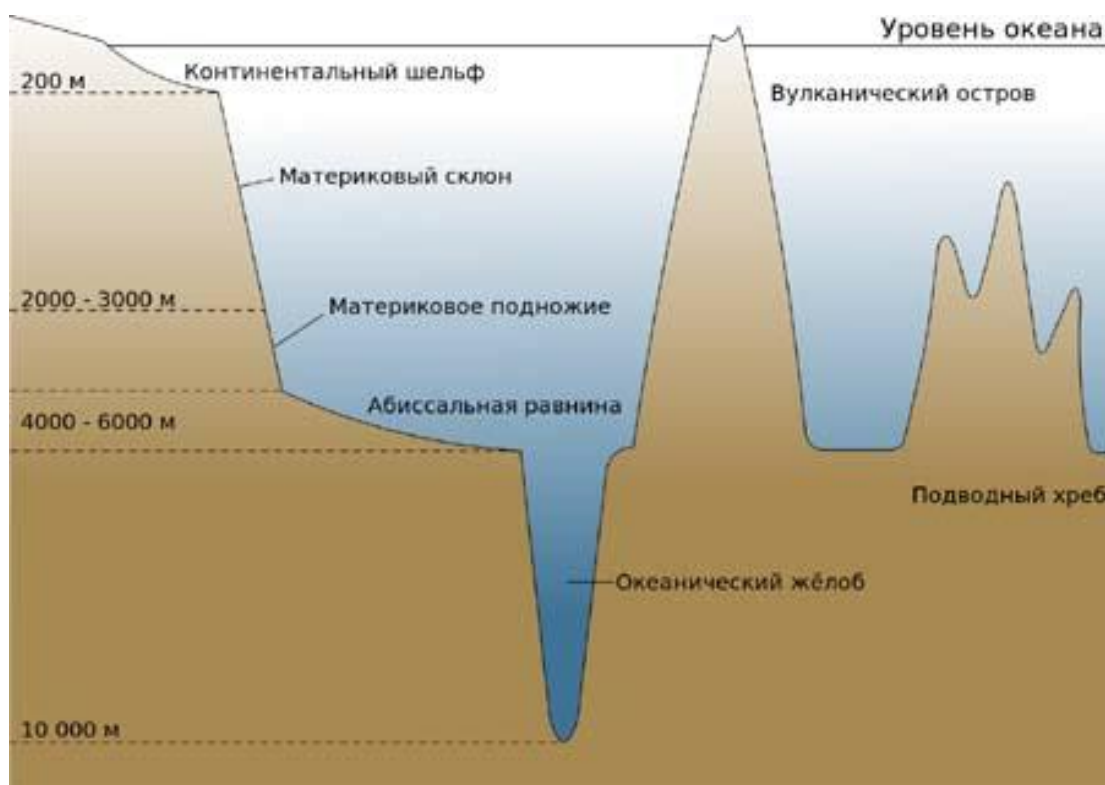


Рисунок 1. Основные ступени морского дна

Препятствия подразделяются на преопределенные и неопределенные. К навигационным опасностям относят неопределенные.

К непостоянным опасностям навигационным опасностям можно отнести гидрометеорологическими явления, к ним относятся дождь, снег, волны, и т.д. А также к ним относят разнообразные объекты, находящиеся на

плаванию такие как: доски, мусор, буи и др. Навигационные препятствия могут включать плавающие льды, которые могут быть временными в средних широтах и постоянными в полярных областях.

Знание характера и типа почвы или отложений в области плавания имеет важное значение для судоходства. Поверхностный слой дна водоёма называется грунтом.

Для классификации рельефа морского дна и расположенных на нем препятствий на нем используют их классификации [3]:

- Мель – тип рельефа дна, который является достаточно обширным по площади возвышенность вблизи материка с малой глубиной. Если глубина мели равна меньше 20 метрам, то она считается опасной для судоходства (рис. 2).

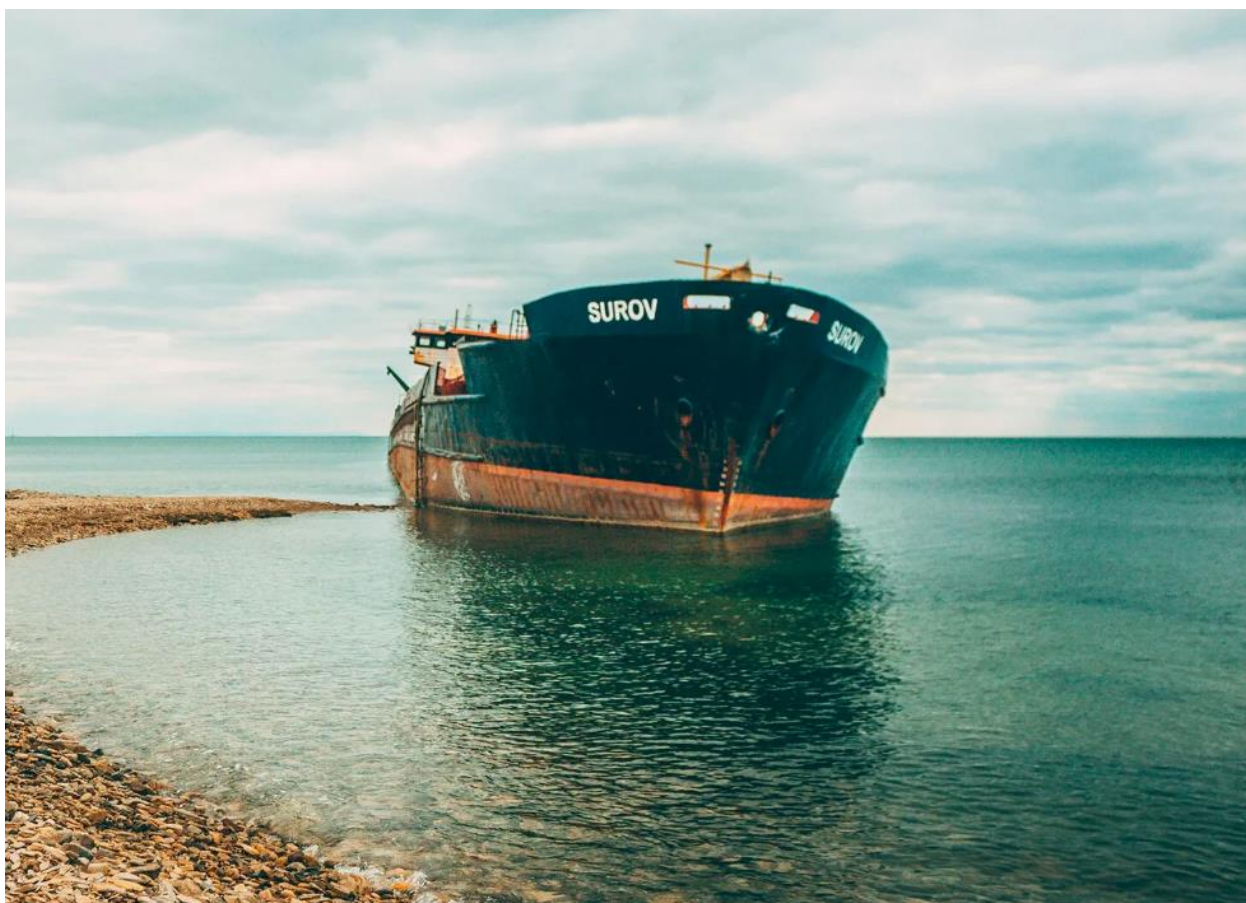


Рисунок 2. Судно «севшее» на мель

- Отмель – это мель, которая берет свое начало с самого берега, и ее глубина постепенно увеличивается (рис. 3).

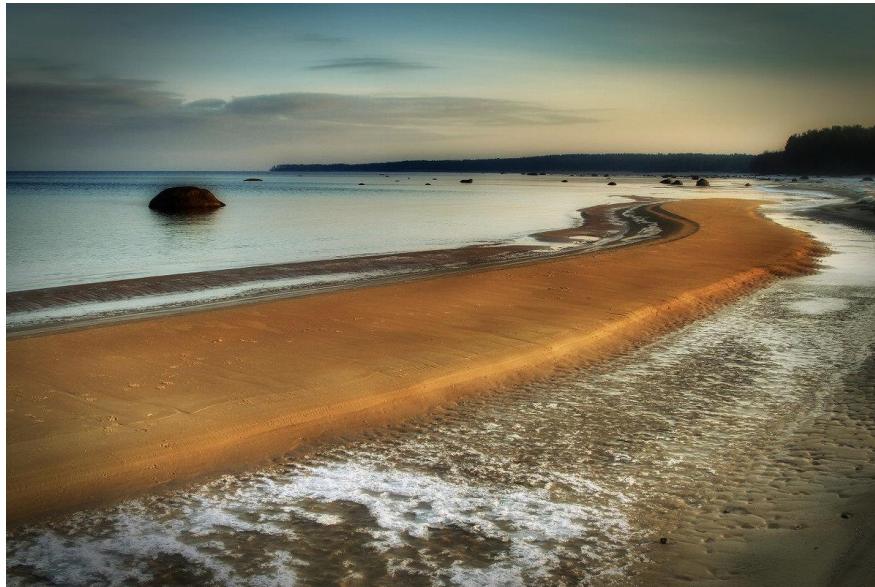


Рисунок 3. Отмель

- Мелководьем принято считать большое неглубокое пространство на море.
- Банка — это разновидность отмели, образованную возвышением морского дна. Если глубина над берегом составляет менее 20 м, то такой банка считается опасным для судоходства и обычно огораживается на местности.
- Риф - это подводная или сухая высота морского дна со скалистой почвой или скопление подводных и сухих пород, кораллов и т. д., опасных для плавания (рис. 4).



Рисунок 4. Риф опасный для судождения

- Камни – часть обломков твердых пород, находящихся вблизи прибрежных зон.
- Подводная коса – узкая длинная отмель (рис 5).



Рисунок 5. Подводная коса вблизи берега

- Мыс – объект материка, выступающая в море (рис. 6).



Рисунок 6. Мыс

- Скала – резкое возвышение дна грунта находящаяся в отдельно от материка (рис. 7).



Рисунок 7. Скала находящаяся в море

- Яма – небольшой участок дна акватории с резким уменьшением глубины.
- Дамба - сооружение предназначения для предотвращения волн и наносов (рис. 8).



Рисунок 8. Дамба в Финском заливе

- Волнолом – оградительное сооружение, не связанное с сушей (рис. 9).

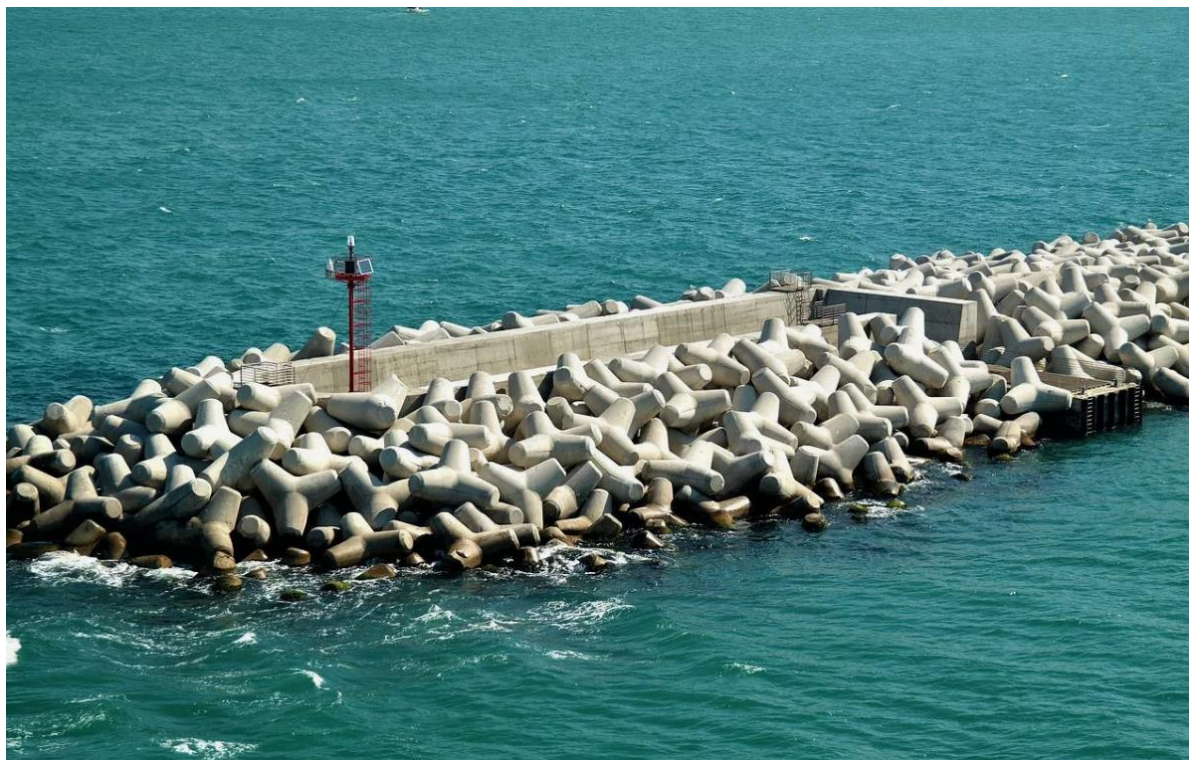


Рисунок 9. Волнолом

Следует также отметить, что условным видом навигационных опасностей (или, точнее, предупреждений) стоит считать запретные зоны, полигоны и районы с выставленными рыболовными снастями.

Затонувшими судами считаются постоянные препятствия, которые делятся на две категории: суда, представляющие опасность для всех судов, и полностью погруженные суда с глубиной над ними, превышающей осадку любого судна. Такие затонувшие суда обычно не представляют собой опасности для надводного судоходства [4].

1.2. Принципы обеспечения безопасности судна при использовании ГЛОНАСС/GPS в морском порту

В настоящее время широко используются две спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС и GPS.

GPS (Global Positioning System – система глобального позиционирования) – это спутниковая система навигации, которая измеряет расстояние, время и определяет местоположение во всемирной системе координат WGS 84 (рис. 10) [5].

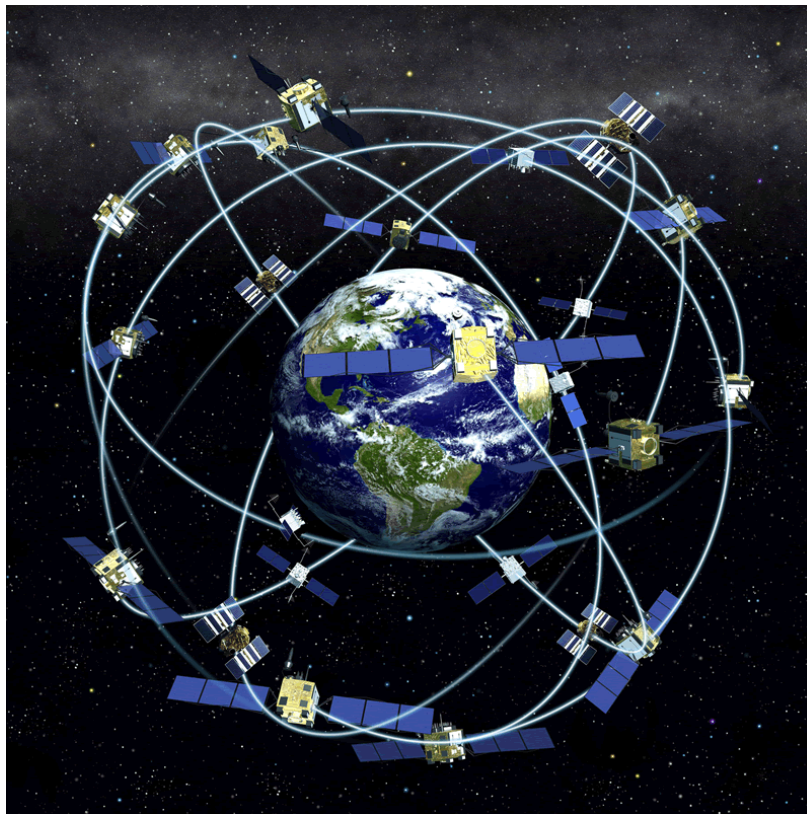


Рисунок 10. Американская система GPS

ГЛОНАСС (глобальная навигационная система) – российская спутниковая система, предназначенная для навигации в воздухе, космосе и морской акватории (рис. 11). Система ГЛОНАСС разрабатывалась, для военных целей, но в 1982 начало использование в гражданской навигации [6].

Спутниковые навигационные системы работают на основе использования средне орбитальных спутников на околоземных орбитах на высоте около 20 000 километров. В системе GPS используется 24 орбитальных спутника, равномерно рассредоточенных по шести орбитам в каждой из которых находится четыре спутника. В свою очередь система ГЛОНАСС использует обратный подход в ней спутники находятся на четырёх орбитах в каждом по шесть независимых спутников.



Рисунок 11. Спутники системы навигации ГЛОНАСС

Главный принцип определения объекта в пространстве является измерение задержки сигнал исходящих от спутников, которые все время передают точное время (измеряемо при помощи атомных часов, находящихся на борту) и свое положение относительно земли [7]. Спутник непрерывно передает радиосигналы, содержащие точное время и свое положение в пространстве (рис. 12).

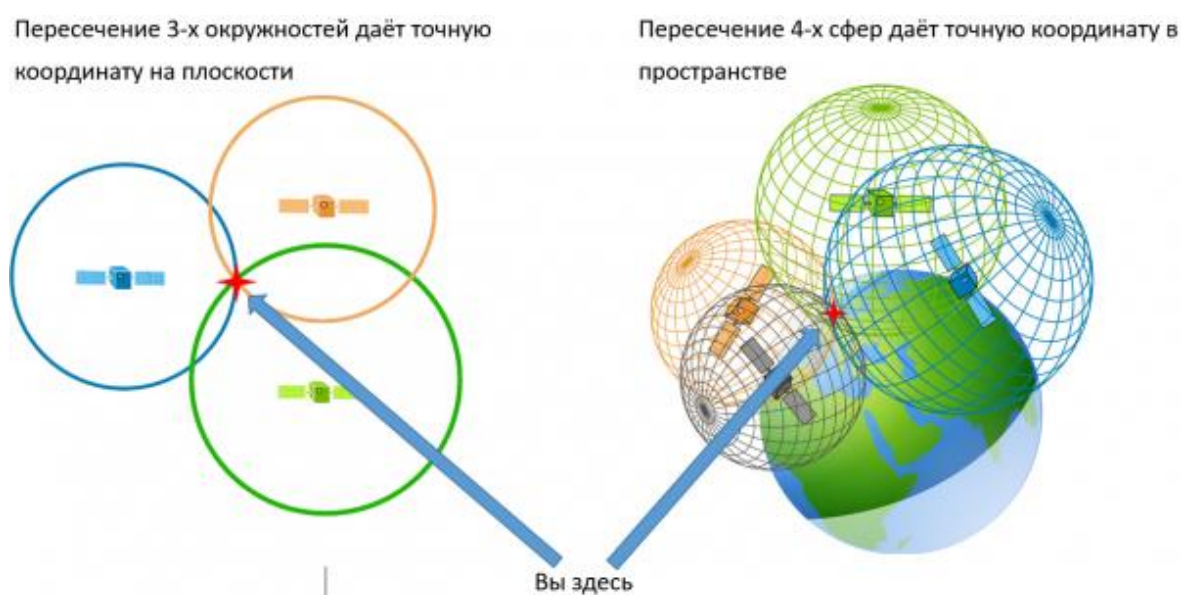


Рисунок 12. Принцип работы системы позиционирования в пространстве

Источники ошибок в спутниковой системе навигации.

1. Одним из основных источников искажения сигнала является неоднородность ионосферы и тропосферы (рис. 13). Точность определения местоположения зависит от стабильности сигнала спутника. Абсолютные ошибки в определении расстояния до спутников могут возникать из-за различных типов неоднородностей в атмосфере, которые могут изменять скорость распространения радиосигналов. Эти ошибки могут быть связаны с влиянием ионосферы (порядка 5 метров) и тропосферы (около 1 метра),

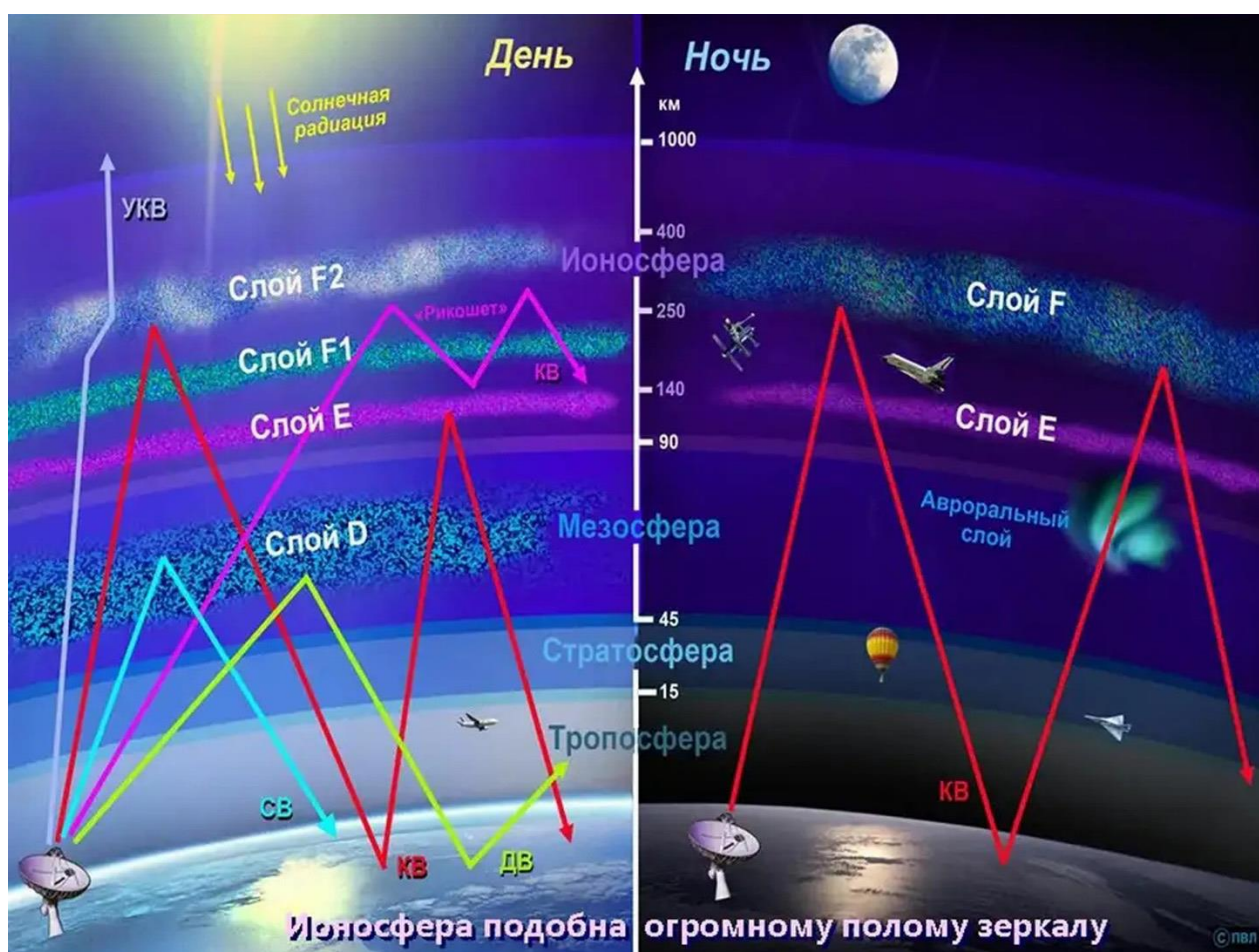


Рисунок 13. Слои атмосферы Земли

2. Многолучевое распространение радиоволн (рис. 14). Данные на GPS-приемник получает не только от спутника, но также отраженные от других объектов. При этом эти сигналы создают дополнительные помехи (неточности) в измерении местоположения

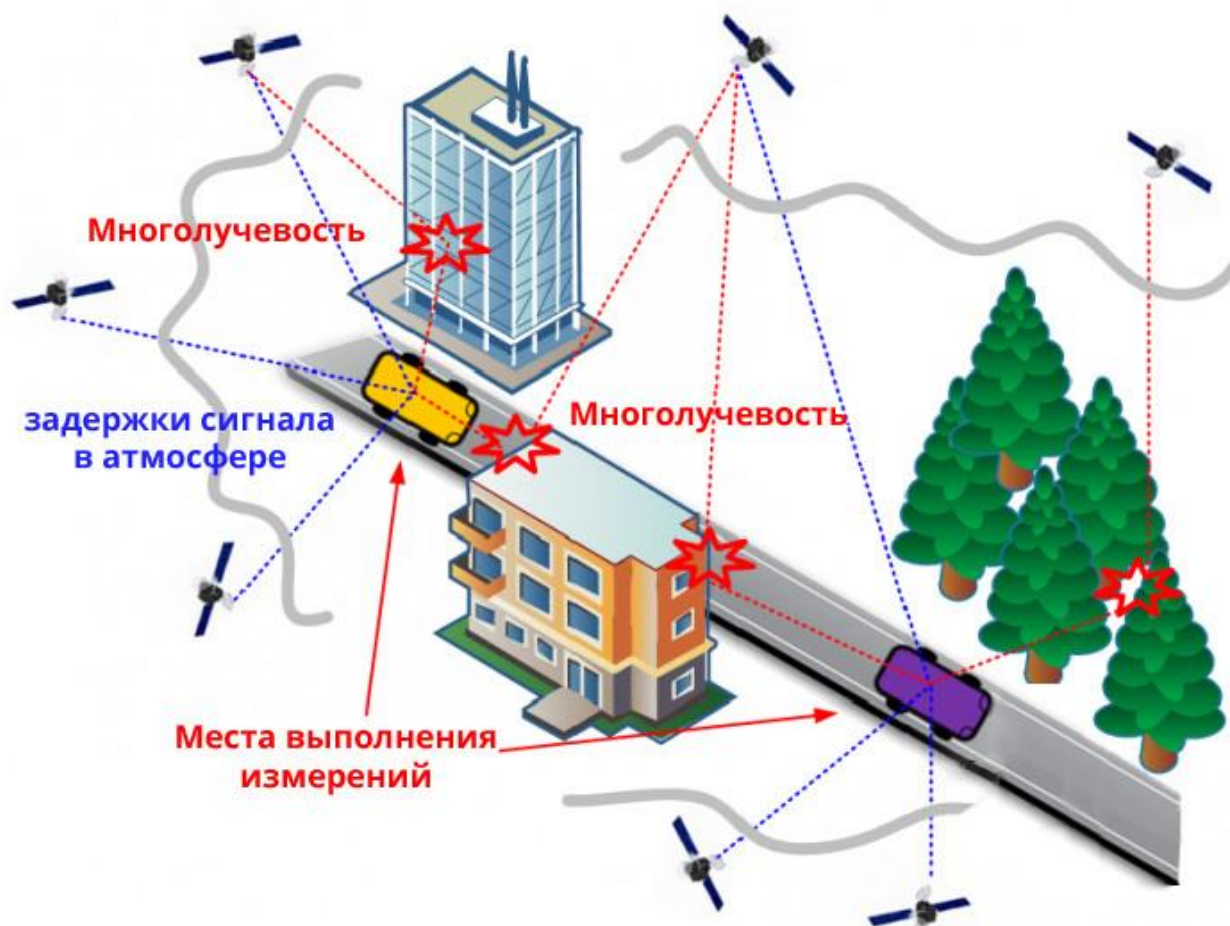


Рисунок 14. Многолучевое отражение радиоволн

3. Ошибки при синхронизации. Для наиболее точного определения задержки радиосигнала необходима синхронизация приемника. На борту спутника установлены атомные часы для синхронизации приемника GPS. При неисправности атомных часов на спутнике приводит к ошибке измерения времени задержки сигнала, а следовательно, и позиционирования.
4. Эфемерические - ошибки, возникающие при неправильном определении положения спутника относительно земли. Из-за этого точность может быть снижена до 2,5 метров.
5. Расположение спутников относительно приемника GPS. При положении спутника под острыми углами, точность позиционирования увеличивается, а при увеличении угла точность уменьшается (рис. 15).

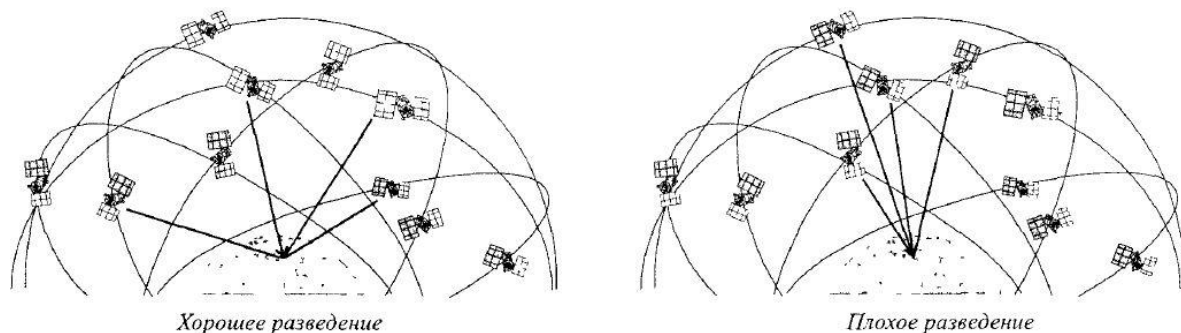


Рисунок 15. Расположение спутников при позиционировании на местности

6. Солнечная радиация. Вспышки на Солнце, несущие за собой гигантские объемы солнечного вещества, что приводит к искажению сигнала (рис. 16).

7. Шифрование сигнала. Точность измерения может быть преднамеренно ухудшена путем его засекречивания. Обще пользовательский короткий код предоставляет точность не порядок хуже, по сравнению с кодом для военных применений [7].

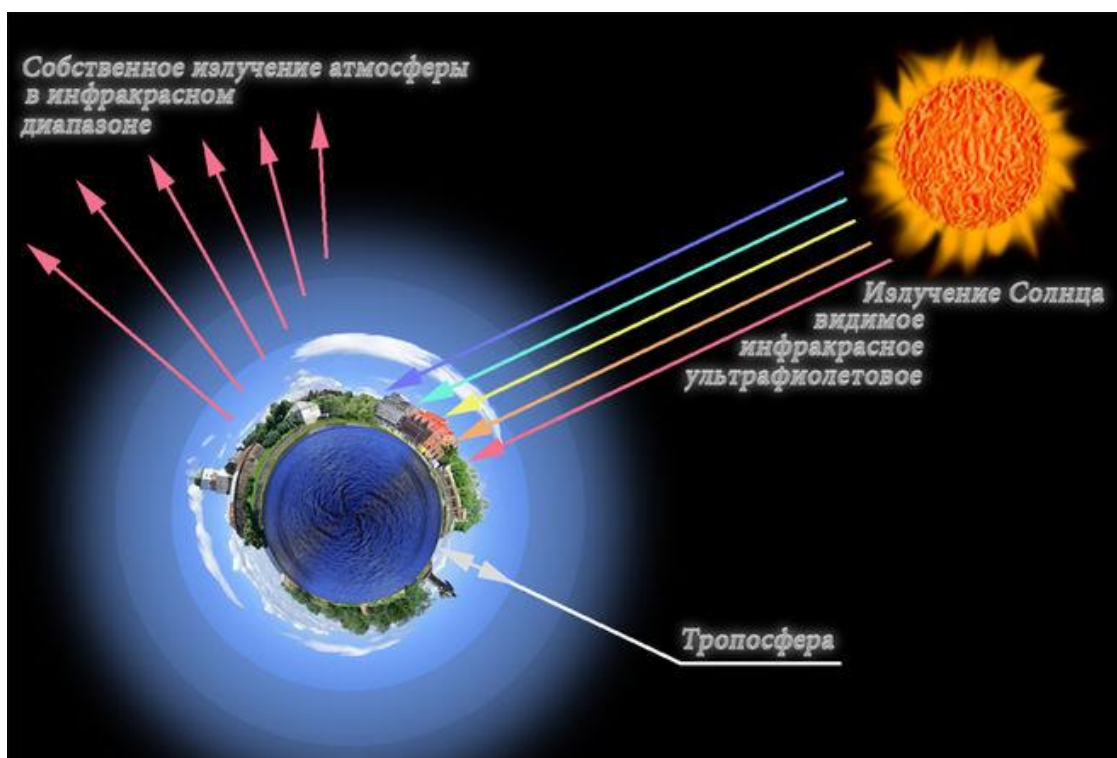


Рисунок 16. Солнечная радиация

Спутниковые системы навигации типа ГЛОНАСС и GPS не имеют возможность обеспечить высокую точность позиционирования, необходимую для безопасной хождения судов в портовых водах. Поэтому в

этой области точность регулируется резолюцией ИМО А. 815 (19) 1995 года. Точность по правилам той резолюции составляет не меньше 10 метров с погрешностью не более 5 процентов [8].

Чтобы повысить точность определения координат объекта в пространстве при эксплуатировании систем позирования ГЛОНАСС/GPS на сложных участках пути движения с использованием дифференциального режима можно обеспечить при помощи моделей (базовых станций) в режиме «реального времени» [9]. Для этого необходимо установить на береговой линии порта станцию с антенной и модулем, которая принимает сигнал ГЛОНАСС/GPS, а также совместно с ней установить радиоантенну с направленным углом действия, чтобы уменьшения потерь и искажения при приеме сигнала. Так же на борту судна необходимо установить модуль приемник сигнала от береговых станций ГЛОНАСС/GPS. Антенны радиоприемника должны работать в диапазоне СВ (средние волны) частот 283,5–325,0 кГц с дискретностью 500 Гц и УКВ (ультракороткие волны) частотами $433,92 \text{ МГц} \pm 0,2 \%$.

1.3. Системы управления движением судов

Система управления движением судов (СУДС) – это программно-аппаратный комплекс, которая применяется в акватории с активным трафиком судоходства [10]. Комплекс включает аппаратно-программные средства такие, как:

- диспетчерское оборудование;
- радиолокационное оборудование;
- специализированное программное обеспечение.

Упрощенная модель СУДС представлена на рисунке 17.

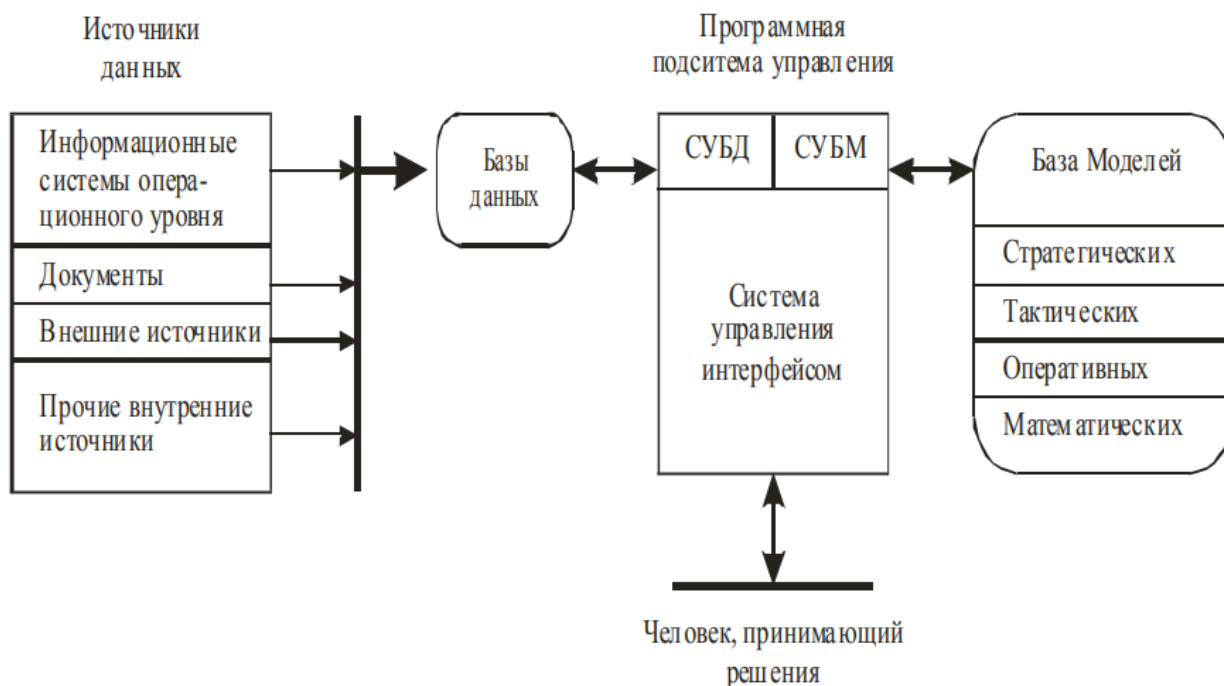


Рисунок 17. Модель СУДС

Системой оснащают береговые линии, а также непосредственно на самом судне [11]. Основанные положения СУДС:

1. СУДС предназначена для повышения безопасности в морском пространстве и увеличение эффективности судоходства, охрана морской среды и акваторий порта.
2. СУДС — это неотъемлемая часть Государственной системы обеспечения безопасности судоходства.
3. Администрирование СУДС являются организации под руководством Министерством транспорта РФ.

Основная структура СУДС включает в себя:

1. СУДС работает в определенном районе, который имеет официальные границы. В этом районе система выполняет свои функции, такие как контроль движения судов, организация движения и предотвращение столкновений. СУДС также имеет определенные права, например, право останавливать суда и проверять их документы. Кроме того, система отвечает за безопасность судоходства в своем регионе.
2. Типы СУДС представлены на рисунке 18.

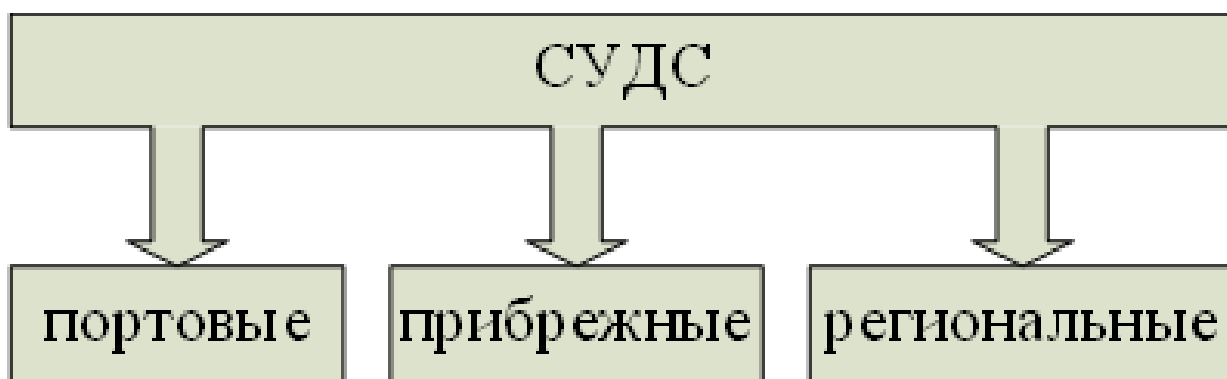


Рисунок 18. Классификация СУДС

3. Район действия системы управления движением судов (СУДС) должен охватывать территорию порта, и в свою очередь основные маршруты прохождения водного транспорта к акватории порта. СУДС, находящиеся в порту, имеют возможность координации нескольких портов, которые имеют общие подходные пути и/или общие акватории для использования судами.
4. Центры портовых служб создаются для обеспечения повседневной деятельности, эксплуатации оборудования и размещения сотрудников.
5. Для обеспечения координации и эксплуатации оборудования, а также его размещения создаются центры СУДС
6. Количество этих секторов в зоне действия центров СУДС должно быть минимально необходимым для корректной их работы. Границы этих секторов не должны пересекаться с местами, где суда изменяют свое направление, скорость движения, а также в том месте, где пересекаются пути прохождения судна.

Функционалом СУДС являются:

1. Основные функции представлены на рисунке 19.
2. СУДС осуществляет контроль за движением судов и их местоположением на якорных стоянках с целью обнаружения и предотвращения опасных ситуаций и нарушений «Правил судоходства».
3. Принципы организации движения судов представлена на рисунке 20.
4. Информация передаваемая в СУДС представлена на рисунке 21.

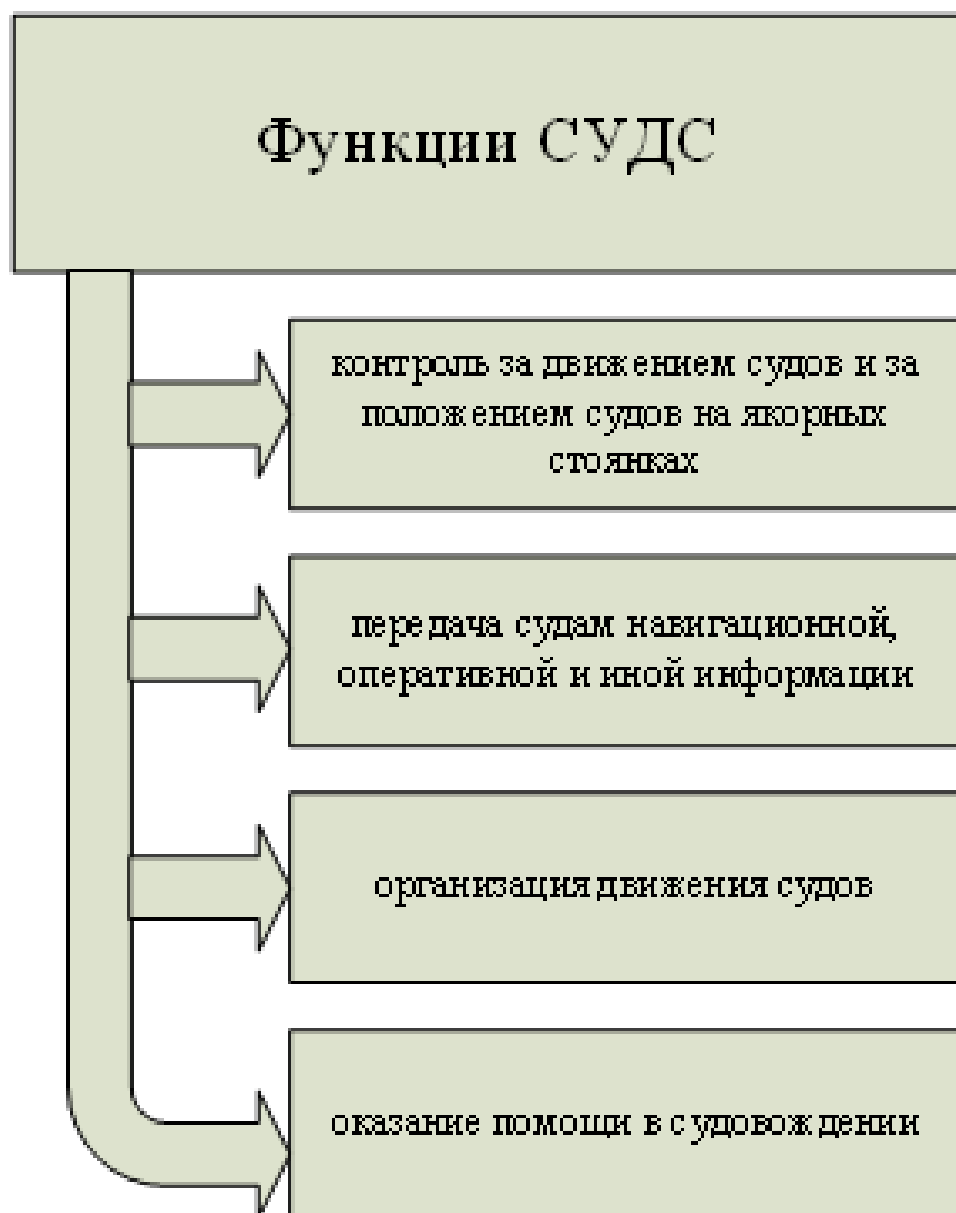


Рисунок 19. Главные функции



Рисунок 20. Основные принципы организации судоходства



Рисунок 21. Передаваемая информация

Режимы движения судов в зоне действия системы управления движением судов (СУДС) могут устанавливаться центром СУДС непрерывно или оперативно при помощи различных мер:

- Регулирование скорости движения судов: центр СУДС может устанавливать максимально допустимую скорость движения судов в зависимости от погодных условий, наличия других судов в зоне и других факторов.
- Регулирование интервалов между судами: центр СУДС может требовать от судов сохранять определенные расстояния между ними для предотвращения столкновений.
- Регулирование движения судов по определенным маршрутам: центр СУДС может направлять суда по определенным маршрутам, чтобы обеспечить их безопасное движение.

- Регулирование порядка движения судов: центр СУДС может определять порядок, в котором суда должны двигаться, чтобы предотвратить столкновения.
- Предоставление информации о погодных условиях и других опасностях: центр СУДС может предоставлять информацию о погодных условиях, течениях, наличии других судов и других опасностях, которые могут повлиять на движение судов.
- Предоставление рекомендаций по прохождению сложных участков: центр СУДС может давать рекомендации по прохождению сложных участков [12].

СУДС позволяет контролировать движение судов, предотвращать столкновения, а также обеспечивать безопасность плавания в сложных условиях.

Одним из главных преимуществ СУДС является то, что она позволяет снизить количество аварий на воде. Кроме того, СУДС повышает эффективность работы портов и водных путей, так как позволяет оптимизировать движение судов и сократить время ожидания в портах [13].

Однако, несмотря на все преимущества, СУДС также имеет ряд недостатков. Во-первых, она требует значительных инвестиций в оборудование и инфраструктуру. Во-вторых, она может быть не доступна для небольших судов и лодок. В-третьих, некоторые люди могут считать СУДС ограничением свободы судоходства.

Тем не менее, СУДС остается важным инструментом для обеспечения безопасности на воде и повышения эффективности судоходства.

1.4. Навигационное оборудование

Навигационное оборудование включает в себя различные средства, помогающие судам ориентироваться на воде [14]. Например, буи, маяки,

знаки и другие устройства используются для обозначения фарватеров, каналов, навигационных опасностей и других важных элементов судового хода. Это помогает судам безопасно передвигаться в условиях ограниченной видимости или в темное время суток. Все это позволяет судну эффективно выполнять свои функции и обеспечивать безопасность экипажа и пассажиров.

- Гирокомпас (Gyro compass). Гирокомпас играет важную роль в навигации моряков, помогая им ориентироваться на море и точно направлять судно к нужному порту. В отличие от магнитного компаса, гирокомпас не подвержен влиянию дополнительных ошибок, вызванных магнитными полями. Поэтому на каждом судне в местах управления устанавливают ретранслятор курса гирокомпаса (рис. 22).



Рисунок 22. Гирокомпас

- Радар (Radar). Радары с частотой S-Band и X-Band являются неотъемлемой частью оборудования морских судов, поскольку они способны обнаруживать различные объекты вокруг судна, что особенно важно в условиях плохой видимости или тумана. С помощью радара можно обнаружить различные объекты, такие как суда, берег, острова, яхты и навигационные буи (рис. 23).

- Магнитный компас (Magnetic Compass). Магнитный компас использует магнитное поле Земли для определения направления движения судна, то есть курса. Он устанавливается в центре пеленгаторной палубы, и его показания передаются на навигационный мостик для использования (рис. 24).



Рисунок 23. Радар



Рисунок 24. Магнитный компас

- Авторулевой (Autopilot). На навигационном мостике установлено множество навигационного оборудования, но одним из наиболее ценных является авторулевой. Его главная функция заключается в поддержании установленного гирокомпасного курса, а в случае неисправности

гироскопа можно переключиться на менее точный магнитный компас. Авторулевой обеспечивает офицеру на мостике достаточно времени для анализа обстановки вокруг судна и принятия своевременных и правильных мер в случае необходимости (рис. 25).



Рисунок 25. Авторулевой

- ARPA (Automatic Radar Plotting Aid). Основная функция ARPA радара заключается в определении местоположения нашего судна и судов, находящихся поблизости, а также предоставлении информации о курсе, скорости, дистанции, времени до соприкосновения и предполагаемом расхождении с другими судами. Этот навигационный прибор автоматически отслеживает все движущиеся объекты на радаре, такие как суда, яхты, буи и другие, отображая их скорость и курс с помощью вектора. При необходимости можно получить более подробную информацию о конкретной цели, просто нажав на нее (рис. 26).
- Лаг (Speed and Distance Log Device). Этот навигационный прибор измеряет скорость и пройденное расстояние судна от определенной точки. С его помощью можно точно определить время прибытия судна в порт и

передать эту информацию соответствующим портовым властям или агенту (рис. 27).



Рисунок 26. Пример работы оборудования ARPA



Рисунок 27. Прибор лаг

- Эхолот (Echo sounder). На борту современных судов установлено множество новейших устройств, эхолот, который применяется уже более ста лет, остается одним из наиболее древних приборов. Его основное назначение

- измерение глубины воды под корпусом судна путем отправки звукового импульса, который отражается от дна и возвращается обратно к источнику (рис. 28).

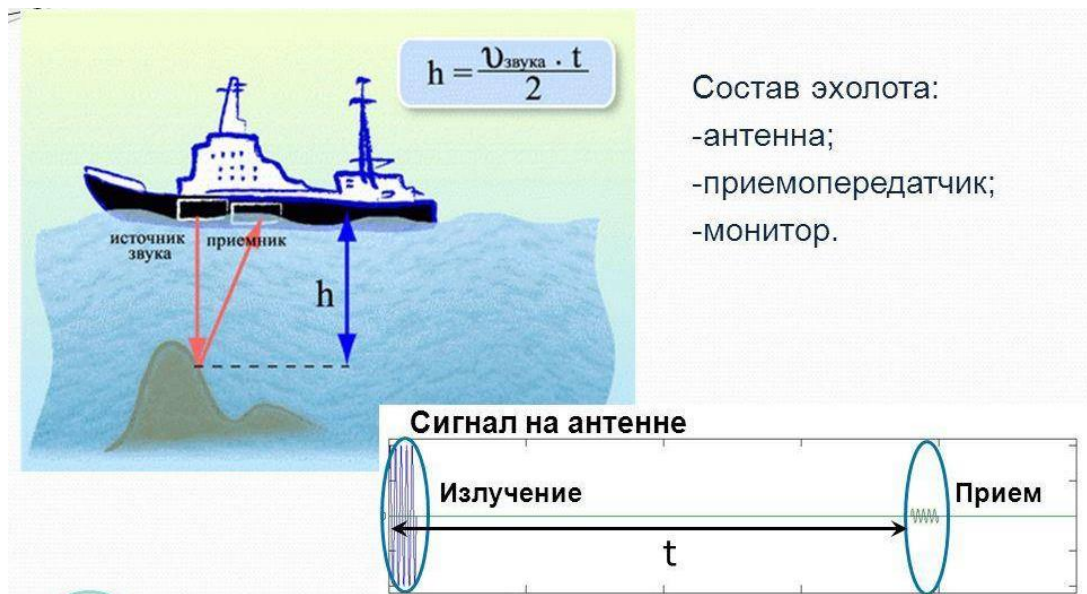


Рисунок 28. Принцип действия эхолота

- Электронные карты ECDIS. ECDIS — это электронная навигационная система, которая объединяет все карты мира в цифровом формате. Распространена на всех типах судов по всему миру и значительно ускоряет процесс планирования маршрутов для навигационных офицеров (рис. 29).



Рисунок 29. Электронные карты ECDIS

- Автоматическая идентификационная система (AIS). АИС — это навигационное устройство на борту судна, которое обнаруживает расположение ближайших судов и предоставляет информацию о них.

Это позволяет вахтенному офицеру быстро определить данные о соседних судах, например, узнать название судна, с которым необходимо связаться по радио (рис. 30).

- Рулевой указатель (Rudder angle indicator). Этот инструмент отображает угол поворота руля и установлен на различных местах на мостике судна, включая близость к штурвалу, на крыльях мостика и в машинном отделении (рис. 31).
- Скорость поворота судна (Rate of turn). Этот навигационный прибор отображает скорость поворота судна при постоянном угле поворота руля и измеряется в углах в минуту.
- GPS приемник (GPS/DGPS receiver). Эта система обеспечивает точное определение местоположения судна. С ее помощью вахтенный помощник может получить координаты судна, информацию о скорости, курсе и времени, необходимом для преодоления расстояния между двумя указанными точками (рис. 32).



Рисунок 30. Автоматическая идентификационная система



Рисунок 31. Рулевой указатель



Рисунок 32. GPS приемник

- Система приема звука (Sound reception system). Эта система необходима для судов с закрытым мостиком, позволяя вахтенному офицеру находиться внутри и одновременно слышать внешние звуковые сигналы, такие как сигналы идентификации в тумане, от других судов поблизости. Установленная на навигационной консоли, эта технология помогает офицеру соблюдать правила Международной практики предотвращения столкновений на море (МППСС) во время вахты.

Глава 2. Влияние гидрометеорологических условий на движение судна в морском порту

Для решения проблемы безопасного расхождения судов в море и морском порту в прошлом веке была принята Конвенция о Международных правилах предупреждения столкновений судов в море. Приложением к этой конвенции являются Правила МППСС-72.

Правила МППСС-72 представляют собой свод правил, которые регулируют поведение судов в море и направлены на предотвращение столкновений [15]. Эти правила охватывают широкий спектр вопросов, включая:

- Сигналы и огни, которые должны использоваться судами для обозначения своего местоположения и намерений.
- Действия, которые должны предпринимать суда при встрече друг с другом.
- Меры предосторожности, которые должны приниматься судами в условиях ограниченной видимости.
- Правила обгона и расхождения судов.

Правила МППСС-72 являются обязательными для всех судов, плавающих в международных водах. Они помогают обеспечить безопасность судоходства и предотвратить столкновения судов.

Для ослабления влияния человеческого фактора на безопасность судоходства разрабатываются интеллектуальные системы поддержки принятия решений (СППР). Эти системы используют различные датчики и технологии для оценки навигационной ситуации и предлагают рекомендации по управлению судном, обеспечивающие безопасное расхождение с другими судами [16].

Алгоритмы поддержки принятия решений (СППР) — это инструменты, которые помогают людям принимать более взвешенные и обоснованные решения. Они используются во многих областях, включая бизнес,

здравоохранение, финансы и производство. СППР анализируют данные, выявляют закономерности и предоставляют рекомендации, основанные на этих закономерностях. Это позволяет пользователям принимать более обоснованные решения, основанные на фактах, а не на интуиции или догадках. СППР могут быть особенно полезны в ситуациях, когда необходимо учитывать большое количество факторов и данных.

Интеллектуальные системы СППР работают следующим образом:

1. Датчики, установленные на судне, собирают информацию о местоположении судна, его скорости, курсе и других параметрах.
2. Собранная информация передается в систему СППР.
3. Система СППР анализирует информацию и оценивает навигационную ситуацию.
4. На основе оценки ситуации система СППР предлагает рекомендации по управлению судном.
5. Капитан судна может принять или отклонить рекомендации системы СППР.

Интеллектуальные системы СППР могут значительно повысить безопасность судоходства за счет:

- Уменьшения влияния человеческого фактора.
- Повышения точности и скорости оценки навигационной ситуации.
- Предоставления рекомендаций по управлению судном, основанных на данных в реальном времени.

2.1. Архитектура автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов (АИСРС)

АИСРС основана на мультиагентном подходе. Это означает, что различные функции системы выполняются независимыми агентами. Агенты имеют доступ к общим структурам данных и решают общую задачу.

В данном случае это задача выработки управляющего воздействия, которое обеспечит безопасное расхождение с другими судами с учетом их поведения и внешних условий плавания [17].

Преимущества мультиагентного подхода:

- Повышение гибкости и масштабируемости системы;
- Возможность решения сложных задач, которые требуют взаимодействия между несколькими агентами;
- Упрощение разработки и внедрения системы.

Агенты АИСРС:

- Агент сбора данных: собирает информацию об окружающей обстановке, такую как положение судов, скорость, курс и другие параметры.
- Агент обработки данных: обрабатывает информацию, полученную от агента сбора данных, и формирует единую картину обстановки.
- Агент принятия решений: анализирует картину обстановки и принимает решения о том, какие действия необходимо предпринять для предотвращения столкновений судов.
- Агент управления судном: реализует решения, принятые агентом принятия решений, и управляет судном.

Взаимодействие агентов АИСРС: агенты АИСРС взаимодействуют друг с другом через общие структуры данных. Например, агент сбора данных передает информацию об окружающей обстановке агенту обработки данных. Агент обработки данных передает единую картину обстановки агенту принятия решений. Агент принятия решений передает решения агенту управления судном.

Динамическая составляющая базы знаний АИСРС содержит последовательность векторов навигационной ситуации. Вектор навигационной ситуации описывает состояние судна и окружающей обстановки в определенный момент времени. Он включает в себя следующие параметры:

- Положение судна (широта, долгота).

- Скорость судна.
- Курс судна.
- Угол рысканья судна.
- Положение других судов вблизи.
- Скорость других судов вблизи.
- Курс других судов вблизи.
- Угол рысканья других судов вблизи.
- Глубина воды.
- Наличие препятствий (например, мелей, островов, мостов).
- Погодные условия (ветер, волны, видимость).

Динамическая составляющая базы знаний АИРС постоянно обновляется в реальном времени [18]. Это позволяет системе иметь актуальную информацию об окружающей обстановке и принимать обоснованные решения о том, как избежать столкновений судов формулы 1,2.

$$S = \{S_t\}_{t \in [-T, 0]} \quad (1)$$

где T – глубина хранения истории навигационных ситуаций,

S_t - вектор навигационной ситуации:

$$S_t = \langle S_t^c, S_t^f, S_t^e, S_t^d \rangle \quad (2)$$

где S_t^c - текущая навигационная ситуация;

S_t^f - прогноз навигационной ситуации;

S_t^e - оценка навигационной ситуации;

S_t^d - решение по управлению судном в данной навигационной ситуации.

Решение для управления судами — это набор возможных действий, которые могут быть предприняты для управления судном в данной ситуации формулы 3,4.

$$S_t^d = \{S_t^{di}\}_{i \in I} \quad (3)$$

$$S_t^{di} = \langle S_t^{dci}, S_t^{dfi}, S_t^{dei}, p_t^i \rangle$$

где S_t^{dci} - навигационная ситуация с учетом i варианта управления;

S_t^{dfi} - прогноз навигационной ситуации с учетом i варианта управления; (4)

S_t^{dei} - оценка навигационной ситуации с учетом i варианта управления;

p_t^i - вес i варианта управления.

Система управления судном работает следующим образом [19]:

1. Система собирает информацию о текущей ситуации с помощью различных датчиков.
2. Система обрабатывает собранную информацию и формирует вектор навигационной ситуации.
3. Система принимает решение по управлению судном на основе вектора навигационной ситуации.
4. Система формирует управляющее воздействие или рекомендацию для судоводителя или оператора СУДС.

Вектор навигационной ситуации представляет собой набор параметров, которые описывают текущую ситуацию. Эти параметры могут включать в себя:

- Координаты судна.
- Скорость судна.
- Курс судна.
- Положение других судов.
- Положение береговой линии.
- Погодные условия.
- Состояние моря.

2.2. Принципы действия и конструкции элементов системы обеспечения безопасного маневрирования судов

Диспетчер доски объявлений.

Этот процесс управляет доступом к информации на информационной доске, где агенты работают независимо и вносят изменения в общие данные. Чтобы обеспечить согласованный доступ к этой информации, диспетчер информирует агентов о любых изменениях на доске объявлений и последовательно передает им данные для анализа текущей навигационной ситуации.

Агент модуля.

Агент модуля измерений — это компонент системы, который ответственен за получение и обработку данных от различных навигационных датчиков для определения текущего положения и состояния судна [20].

С заданной периодичностью агент формирует новый вектор навигационной ситуации, который представляет собой комплексную информацию о текущем положении судна, его скорости, курсе, а также о близлежащих объектах, определенных с помощью навигационных датчиков, таких как ПИ ГНСС ГЛОНАСС/GPS, САРП и АИС. Этот вектор навигационной ситуации является ключевой информацией для принятия решений и обеспечения безопасности судна.

Правильно, сформированный вектор навигационной ситуации агент модуля измерений передает диспетчеру, который размещает его на доске объявлений для дальнейшей обработки формула 5.

$$S_t \rightarrow S_t^c \quad (5)$$

где, S_t - полученных измерительных данных заполняет его компонент,

S_t^c - текущую навигационную ситуацию

Это позволяет диспетчеру и другим членам экипажа иметь доступ к актуальной информации о навигационной ситуации судна и принимать соответствующие решения для обеспечения безопасности и эффективности плавания. Важно, чтобы информация была доступна всем заинтересованным сторонам и обновлялась регулярно для поддержания актуальности.

Модуль прогноза.

Агент модуля прогноза создает прогноз навигационной ситуации, определяя траектории движения собственного судна и других судов на определенный временной интервал [21]. Этот процесс позволяет предсказать возможные сценарии и принять необходимые меры заранее для обеспечения безопасности и эффективности плавания.

Для прогнозирования навигационной ситуации агент модуля учитывает динамические характеристики собственного судна и информацию о характеристиках других судов, полученную от АИС, если доступно. При вычислении траекторий также принимается во внимание район плавания, включая ограничения, обусловленные глубинами, специальными зонами и рекомендованными маршрутами. Это позволяет более точно предсказывать возможные сценарии и принимать соответствующие меры для обеспечения безопасности и эффективности плавания.

В дополнение к этому, агент модуля прогноза определяет траектории движения судна для различных вариантов управления во время маневрирования. Эти расчеты выполняются по запросу модуля генерации решений, что позволяет предвидеть последствия различных маневров и принимать обоснованные решения для эффективного управления судном в различных ситуациях.

Для каждого сгенерированного варианта решения S_t^{di} модулем генерации, в модуле прогноза создается соответствующая компонента S_t^{dfi} формула 6.

$$S_t^{dfi} = F(S_i, R, M, K_f) \quad (6)$$

где $S_i = \langle S_{-1}, S_i^{dci} \rangle$ – последовательность векторов предшествующих навигационных ситуаций и предлагаемая при управлении i текущая навигационная ситуация

Модуль оценок.

Агент модуля оценки навигационной ситуации — это компонент системы, ответственный за анализ и оценку текущего положения на море на основе прогноза развития ситуации, имеющейся информации о районе плавания и знаний из базы данных [22]. Этот агент играет важную роль в обеспечении безопасной и эффективной навигации, помогая экипажу принимать обоснованные решения и реагировать на изменяющиеся условия в море.

Кроме того, программа в рамках модуля оценки анализирует уровень безопасности для вариативных сценариев управления судном и для каждого из этих сценариев формирует отдельный элемент в базе данных формула 7.

$$S_t^{dei} = \langle e(Tr_0^{di}), \{e(Tr_0^{di} \circ Tr_j)\}_{j \in J} \rangle = E(S_t^{dfi}, R, K_e) \quad (7)$$

где S_t^{dfi} - прогноз навигационной ситуации с учетом i варианта управления;

Tr_0^{di} - прогноз траектории собственного судна с учетом i варианта управления.

Прогноз навигационной обстановки - создается на основе предсказания траекторий движения своего корабля и кораблей-целей на определенный временной интервал формула 8.

$$S_t^f = \langle Tr_0, \{Tr_j\}_{j \in J} \rangle = F(S_{-1}, R, M, K_f) \quad (8)$$

где Tr_0 – прогноз траектории собственного судна;

Tr_j – прогноз траектории судна-цели;

$S_{-1} = \{S_t\}_{t \in [-T, -1]}$ – последовательность векторов предшествующих навигационных ситуаций;

M – множество моделей динамики своего судна и судов-целей;

K_f – знания о прогнозировании траектории с учетом ограничений.

Для прогнозирования траекторий собственного судна и целевых судов используются динамические характеристики судов и данные об их положении от системы идентификации автоматической идентификации (АИС), если доступны. При расчете траекторий также учитываются условия района плавания, включая глубины, специальные зоны и рекомендованные маршруты.

При анализе навигационной ситуации учитываются следующие ключевые риски:

- риск столкновения с другими судами;
- риск попадания на мелководье;
- риск попадания в навигационные опасности;
- риск входа в зоны, где запрещено плавание.

Для оценки вероятности столкновения с другими судами проводится анализ безопасности пути собственного судна относительно прогнозируемых траекторий каждого целевого судна [23]. Этот процесс включает анализ типичных параметров, таких как время и расстояние до ближайшей точки сближения, которые используются для создания различных показателей оценки риска формулы 9,10.

$$P^s = \{P_j^s\}_{j \in J} \quad (9)$$

$$P_j^s = \langle D_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j), T_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j) \rangle \quad (10)$$

Точно так же формируются различные критерии оценки риска, связанные с возможным попаданием на мелководье, в запретные зоны и в зоны навигационных опасностей. Для этого устанавливаются параметры времени и расстояния до ближайшей точки сближения с определенной навигационной угрозой формулы 11,12.

$$P^N = \{P_l^N\}_{l \in L} \quad (11)$$

$$P_l^N = \langle D_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l), T_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l) \rangle \quad (12)$$

Путем объединения этих наборов данных формируется общий набор критериев для оценки риска формула 13.

$$P = P^s \cup P^N = \{P_i\}_{i \in I} \quad (13)$$

Следовательно, каждому навигационному объекту или целевому судну присваивается оценка безопасности в соответствии с предложенной шкалой риска формула 14.

$$\begin{aligned} e(Tr_0) &= \min(Q_l), l \in L \\ e(Tr_0 \circ Tr_j) &= Q_j, j \in J \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом общая оценка безопасности определяется исходя из наиболее критического объекта или события.

Модуль генерации решений.

Когда текущая навигационная обстановка рассматривается как опасная, диспетчер обращается к агенту модуля поиска решений [24].

Агент модуля решений формирует раздел управления судном, создавая S_t^d разнообразные варианты управления судном на основе информации из базы знаний формулы 15,16.

$$S_t^d = \{S_t^{di}\}_{i \in I} \quad (15)$$

$$S_t^{di} = \langle S_t^{dci}, S_t^{dfi}, S_t^{dei}, p_t^i \rangle \quad (16)$$

В данном модуле для каждого i -го варианта решения создается S_t^{dci} описание навигационной ситуации с учетом принятого в данном варианте управления формула 17.

$$S_t^{dci} = D(S_t^c, S_t^f, U_t^i, M_0, K_d) \quad (17)$$

где U_t^i - принятый вариант управления для i варианта;

M_0 - модель собственного судна;

K_d - знания по управлению судном

Модуль выбора решений.

Агент, ответственный за выбор решений в управлении судном, выбирает из сгенерированных вариантов [25]. Для этого каждый вариант S_t^{di}

сначала передается агенту прогнозирования, который заполняет соответствующий компонент S_t^{dfi} , а затем - агенту оценки, который заполняет другой компонент S_t^{dei} . Затем, с применением знаний из базы знаний, агент по выбору решений назначает веса всем предварительно разработанным решениям формула 18.

$$P_t^i = P(S_t^{dfi}, S_t^{dei}, K_p, Q) \quad (18)$$

где K_p - знания по оцениванию вариантов решений;

Q - критерий оптимальности решения.

Следовательно, агент модуля выбора решений завершает заполнение вектора навигационной ситуации.

Модуль интерфейса.

Агент модуля интерфейса регулярно отображает оценки текущей навигационной ситуации и предлагаемые варианты решений для пользователя. Для судоводителя могут быть представлены лучшие варианты, несколько наилучших или все доступные решения. При автоматизированной системе управления лучшее решение передается в систему управления судном. В случае интеграции системы в комплекс СУДС, оператору предоставляется информация об оценках опасности столкновения для всех судов в акватории, а также рекомендации по управлению судами в случае определения опасной ситуации.

Диспетчер БЗ.

Диспетчер базы знаний обрабатывает запросы от других агентов и извлекает необходимую информацию из базы данных [26].

В базе знаний содержится информация:

- K_f - прогнозировании траекторий движения судов в различных районах плавания и с учётом морских правил и стандартов безопасности;
- K_e - критериях и методах оценки навигационной обстановки на основе прогнозируемых траекторий движения судов и целей;

- K_d - вариантах управления судном в зависимости от траекторий целей, района плавания, морских правил и стандартов безопасности;
- K_p - критериях и методах выбора вариантов управления судном.

2.3. Математическая модель, предсказывающая поведение судна в ответ на различные силы

Для прогнозирования навигационной обстановки необходимо рассчитать параметры движения судна. Траектории судна и других судов в определенный период времени прогнозируются на основе текущего состояния судна, запланированного маршрута и модели, описывающей поведение судна представленная в формуле 19 [27].

$$\begin{aligned} Tr_0 &= f_{Tr}(S_i^*, VP^*, M^*) \\ Tr_j &= f_{Tr}(S_i^j, VP^j, M^j), j \in J \end{aligned} \quad (19)$$

Результирующий путь описывается набором точек, где каждая точка включает координаты и характеристики движения в этой точке, представленной в формуле 20.

$$Tr = \{P_i\}_{i \in [0, I_F)} \quad (20)$$

где $P_i = \langle F_i, L_i, K_i, V_i, \omega_i, a_i^t, a_i^s \rangle$ - точка траектории,

I_F - количество точек траектории (зависит от установленного периода прогноза).

Маршрут движения определяется рядом контрольных точек, которые включают координаты точек изменения скорости и скорость на последующем участке пути формула 21.

$$VP = \{P_i\}_{i \in [0, I_M)} \quad (21)$$

где $P_i = \langle F_i, L_i, K_i, V_i \rangle$ - поворотная точка маршрута,

I_M - количество точек в маршруте.

Динамические модели собственного судна и судов-целей различаются по уровню детализации. Модель собственного судна учитывает широкий спектр параметров, в то время как модели судов-целей упрощены для повышения эффективности вычислений.

Динамическая модель собственного судна представлена в следующем формате 22.

$$M^* = \langle MTP_R^{35}, MTP_R^{15}, MTP_L^{35}, MTP_L^{15}, MSP \rangle \quad (22)$$

где MTP_C^A - параметры поворота для стандартной перекладки руля ($A = 35$ или 15 градусов, $C = R/L$ - правый или левый борт):

MSP - параметры торможения/разгона.

Параметры поворота состоят из следующих элементов формула 23:

$$MTP = \langle R_{circ}, L_{90}, L_0, \omega, a_T \rangle \quad (23)$$

где R_{circ} - тактический радиус циркуляции,

L_{90} - выдвиг,

L_0 - мертвый промежуток,

ω - угловая скорость поворота,

a_T - ускорение торможения при повороте.

Параметры торможения состоят из следующих элементов формула 24:

$$MSP = \langle \{RPM_i\}_{i \in I}, A, B, A_R, B_R, C_R, \alpha \rangle \quad (24)$$

где $\{RPM_i\}_{i \in I}$ - набор оборотов винта (RPM) для фиксированных ходов судна,

A, B - коэффициенты модели формула 25:

$$V = A * RPM + B \quad (25)$$

A_R, B_R, C_R - коэффициенты модели ускорения разгона формула 26:

$$a_R = A_R * RPM^2 + B_R * RPM + C_R \quad (26)$$

α - коэффициент модели ускорения торможения формула 27:

$$a_S = \alpha * V^2 \quad (27)$$

Модель судна-цели в упрощенном виде представлена в следующей формуле 28:

$$M^j = \langle MTP^{35}, RPM, V \rangle \quad (28)$$

Модели судов-целей не учитывают процессы торможения и разгона, а модель поворота не различает повороты вправо и влево.

На рисунке 33 представлена диаграмма алгоритма, моделирующего траекторию движения судна.

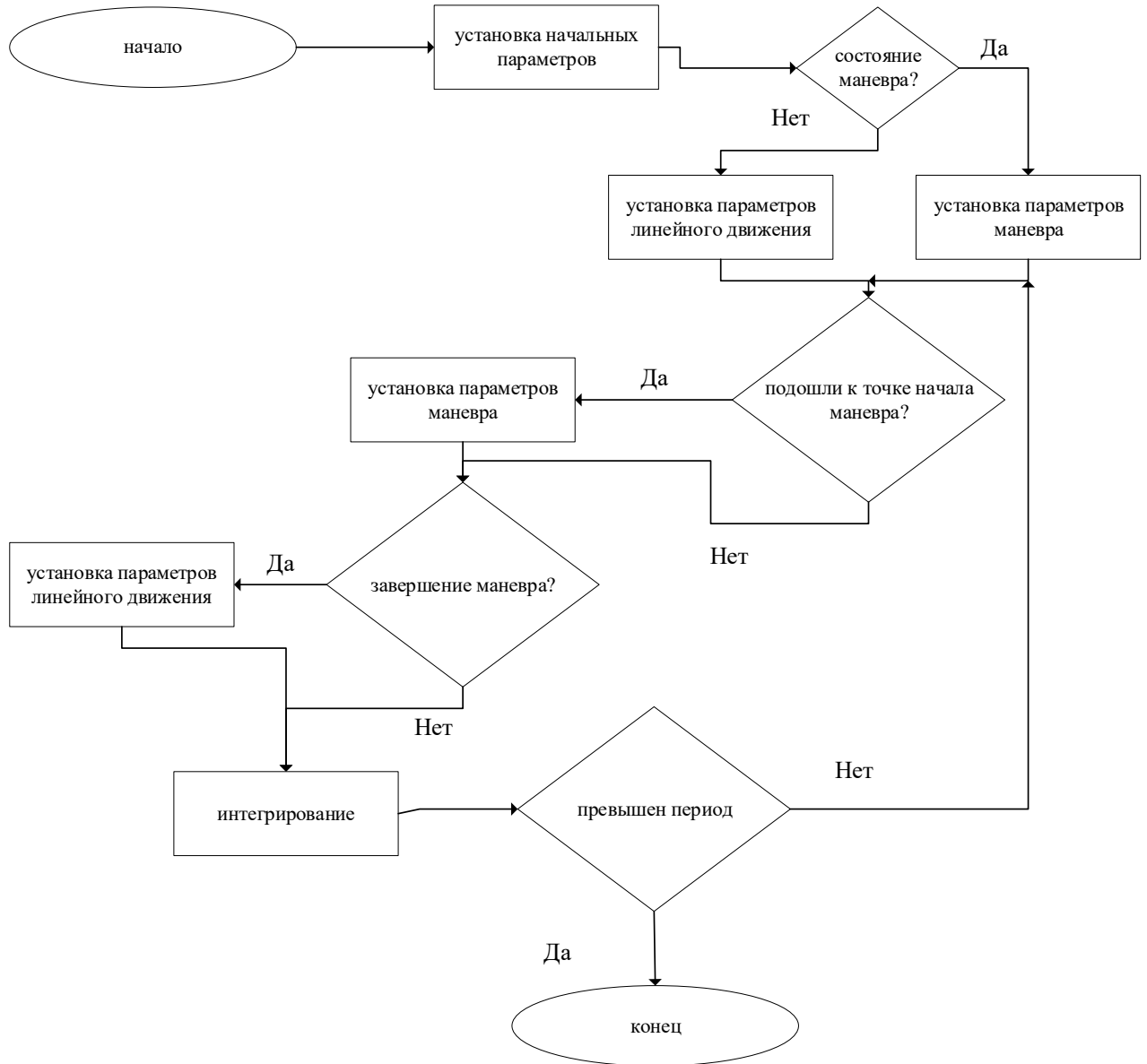


Рисунок 33. Диаграмма алгоритма моделирования траектории движения судна

Последовательность вычислений каждого блока представлена в формуле 29.

$$\begin{aligned}
a_S &= \alpha * V_t^2 - (A_R * RPM_t^2 + B_R * RPM_t + C_R), \\
a_{t+1} &= a_S + a_T, \\
V_{t+1} &= V_t + a_{t+1} * dt, \\
K_{t+1} &= K_t + \omega * dt, \\
dVF_{t+1} &= V_{t+1} * \cos(K_{t+1}), \\
dVL_{t+1} &= V_{t+1} * \sin(K_{t+1}) / \cos(F_t), \\
F_{t+1} &= F_t + dVF_{t+1} * dt, \\
L_{t+1} &= L_t + dVL_{t+1} * dt
\end{aligned}
\tag{29}$$

2.4. Изучение влияния гидрометеорологических условий на процесс принятия решений при маневрировании судна в ситуациях расхождения

Учет текущих гидрометеорологических условий в районе плавания позволяет повысить точность модели динамики судна при маневрировании и, следовательно, улучшить качество принимаемых решений [28].

Гидрометеорологические факторы, которые необходимо учитывать при принятии решений по маневрированию судна при расхождении:

1. Погодные условия: ветер, штормы, туман, дождь и другие атмосферные условия могут оказывать значительное влияние на маневрирование судна.
2. Морские течения: сила и направление течений могут влиять на движение судна, необходимо учитывать их при планировании маневров.
3. Волнение: высота и направление волн также могут повлиять на способность судна маневрировать, особенно в открытых морях.
4. Видимость: достаточная видимость играет важную роль при маневрировании, поэтому уровень видимости и наличие тумана или осадков следует учитывать.

5. Температура воды: различия в температуре воды могут влиять на работу судовых двигателей и другого оборудования.

В автоматической идентификационной системе судов (АИСРС), установленной на судне, требуется обеспечить взаимодействие с судовым модулем метеоданных. В АИСРС, функционирующей в составе системы управления движением судов (СУДС), требуемые метеоданные могут быть получены от системы метеорологических буев, размещенных в акватории.

Влияние условий видимости на принятие решений относительно маневров корабля.

В нормальных условиях видимости решения по расхождению регулируются разделом II части В Международных правил предотвращения столкновений на море (МППСС). Однако, в условиях ограниченной видимости решения по безопасному расхождению должны соответствовать разделу III части В, а именно Правилу 19 "Плавание судов при ограниченной видимости".

Поведение судов в условиях ограниченной видимости, согласно этому правилу, должно отличаться от поведения в условиях прямой видимости, поскольку суда не могут видеть друг друга напрямую.

Правило 6 "Безопасная скорость" определяет, что при движении в любых условиях плавания судно должно следовать с безопасной скоростью, учитывая различные факторы. Один из таких факторов - состояние видимости. Правило 19 также подчеркивает важность следования безопасной скоростью в условиях ограниченной видимости.

Эффективная безопасная скорость судна должна быть выбрана так, чтобы при неожиданном маневре торможения оно могло остановиться в пределах своего домена безопасности, учитывая свои тормозные характеристики и условия плавания.

Хотя модуль расхождения не решает задачу назначения скорости для судна, он может обнаружить и отметить суда, движущиеся с превышением безопасной скорости для предоставленных условий. Это особенно важно при

использовании автоматизированной системы идентификации и отслеживания судов (АИСРС) в рамках системы управления движением судов (СУДС). В таком случае суда, движущиеся с опасной скоростью в условиях ограниченной видимости, могут быть выделены, и оператор СУДС может оперативно связаться с их судоводителями для обсуждения текущей ситуации и указания на необходимость соблюдения безопасной скорости.

При выборе маневра по расхождению необходимо избегать назначения маневров, которые могут привести к увеличению скорости судна. Это может противоречить требованию соблюдения безопасной скорости и создать дополнительные опасности во время маневра.

В условиях ограниченной видимости, с учетом Правила 8, необходимо производить более значительные маневры, чтобы обеспечить заметность предпринимаемых действий, чем в условиях нормальной видимости.

В условиях ограниченной видимости необходимо учитывать следующее:

1. производить более значительные маневры, чтобы обеспечить заметность действий;
2. соблюдать безопасную скорость и избегать маневров, которые могут привести к увеличению скорости судна;
3. иметь учет особенностей окружающего трафика и возможные препятствия;
4. проявлять особую бдительность и использовать все доступные средства обеспечения безопасности судна.

Влияние глубины на принятие решения при маневрировании.

Характеристики маневрирования судна в глубокой воде отличаются от его поведения при движении в мелководье [29].

С уменьшением глубины воды по отношению к осадке судна начинается воздействие мелководья, которое можно определить через соответствующее выражение 30.

$$H \leq 4d + \frac{3 \cdot V^2}{g} \quad (30)$$

где d – осадка судна, м;

V – скорость судна, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

При выполнении практических задач по маневрированию судна можно считать, что мелководье начинается, когда отношение глубины воды к осадке судна равно единице.

При движении судна в мелководье, кроме распространяющихся волн, возникают боковые волны в носовой и кормовой части судна. При взаимном наложении этих волн (интерференции) волновое сопротивление возрастает, что приводит к уменьшению скорости судна. Факторами, оказывающими существенное влияние на формирование волн, являются отношение глубины воды к осадке судна и относительная скорость, определяемая числом Фруда формула 31.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (31)$$

Когда число Фруда меньше 0,6, волны формируются похожим образом на волны на глубокой воде. При числе Фруда, равном единице ($Fr = 1$), угол между волнами и диаметральной плоскостью судна достигает максимального значения в 90°, что приводит к увеличению волнового сопротивления и уменьшению скорости судна до "критической" значения формула 32.

$$V_{кр} = \sqrt{gH} \quad (32)$$

При числе Фруда больше 1 ($Fr > 1$) сопротивление воды уменьшается, однако у большинства судов недостаточно мощности для достижения критической скорости. При плавании в зонах, где скорость ниже критической, потери скорости на мелководье можно примерно оценить по эмпирической формуле С.И. Демина формула 33.

$$\Delta V = 4,4 \frac{H}{d} - 34 \frac{V}{\sqrt{gH}} \quad (33)$$

где V – скорость на глубокой воде, м/с;

H – глубина, м;

d – средняя осадка судна, м.

Малая глубина воды оказывает существенное воздействие на маневренность судна. Для определения диаметра установившейся циркуляции на мелководье можно использовать следующую формулу 34.

$$D_m = \frac{D_u}{1 + 0,1 \cdot (d/H) - 0,71 \cdot (d/H)^2} \quad (34)$$

где D_u – диаметр установившейся циркуляции на глубокой воде, м.

Влияние трех основных факторов на инерционно-тормозные характеристики судна при движении в мелководье заключается в увеличении сопротивления воды, увеличении присоединенных масс и моментов инерции, а также изменении коэффициента влияния корпуса на движение.

При движении судна на мелководье, коэффициент упора винта изменяется по сравнению с движением в глубокой воде. Изменение этого коэффициента зависит от глубины водоема, как показано на графике $P_e = f(H)$ на рисунке 34. Кривая $P_e = f(H)$ соответствует приблизительно одинаковым скоростям, т.е. для одинаковых значений в контексте движения при числе Фруда (Fr) = 0,5.

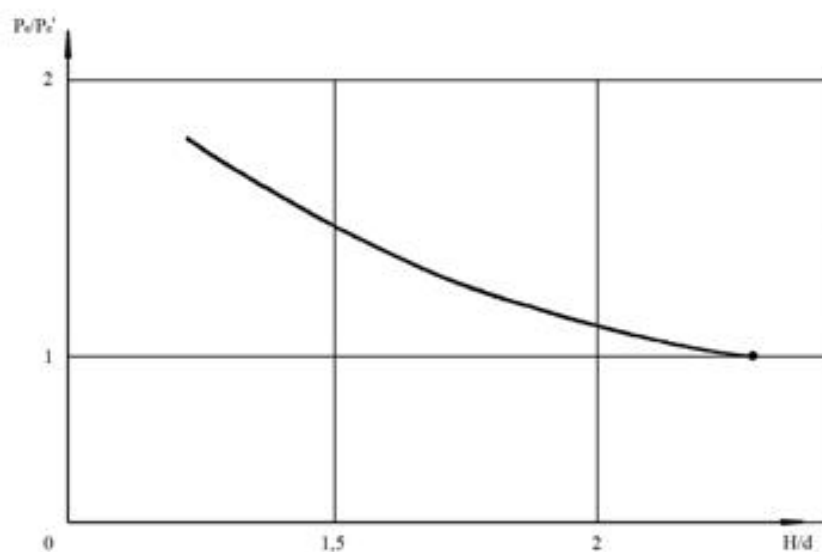


Рисунок 34. Изменение коэффициента упора винта (P_e) в зависимости от глубины воды

Следовательно, для более простого учета воздействия мелководья на маневренность судна можно предположить следующее:

- влияние мелководья принято во внимание при глубинах $H/d < 4$, то есть менее четырех раз осадки судна.
- при маневрировании с курсом на глубинах $H/d = 1,5$ выдвижение судна по начальному курсу S_0 увеличивается на 50%.
- влияние мелководья на глубинах $H/d = 1,5$ также приводит к увеличению диаметра циркуляции на 50%.
- при маневрировании со изменением скорости влияние мелководья можно пренебречь.

Эффекты ветра и течения на движение судна при выполнении маневров.

Модель динамики судна, основанная на его маневренных характеристиках, обычно разрабатывается для условий без ветра и течения. Чтобы учесть влияние ветра и течения, необходимо исследовать возможность внесения корректировок в модель динамики судна [30].

Влияние ветра:

- ветер оказывает давление на надводную часть судна, создавая боковую силу, которая влияет на его курс и скорость.
- корректировки модели динамики судна должны учитывать площадь парусности судна, направление и скорость ветра.

Для анализа влияния ветра на движение судна важно различать истинную скорость ветра, действительную для окружающей среды, от кажущейся или относительной скорости ветра, которую ощущает движущееся судно. При движении судна скорость истинного ветра складывается с погонной скоростью ветра, которая равна скорости судна.

Судно ощущает наибольшее воздействие, когда ветер дует перпендикулярно или под углом к направлению движения судна. В таких случаях возникают боковая дрейф, наклон (крен), изменение курса судна против ветра или с ветром, а также изменение скорости движения.

При движении встречным ветром, выбег обычно уменьшается, размер циркуляции несколько увеличивается, а траектория смещается в подветренную сторону (рис. 35).

При циркуляции судна по ветру (т.е. когда судно поворачивает в сторону ветра) обычно наблюдается значительное увеличение выбега (расстояния, которое судно проходит по прямой линии после начала поворота) и диаметра циркуляции (расстояния, которое судно проходит по дуге поворота) (рис. 36).

Когда судно движется в условиях сильного бортового ветра, его циркуляционное движение существенно отличается от циркуляции в штиль. У большинства судов параметры циркуляции (такие как выбег и диаметр циркуляции) при повороте в сторону ветра значительно лучше, чем при повороте под ветер (рис. 37).

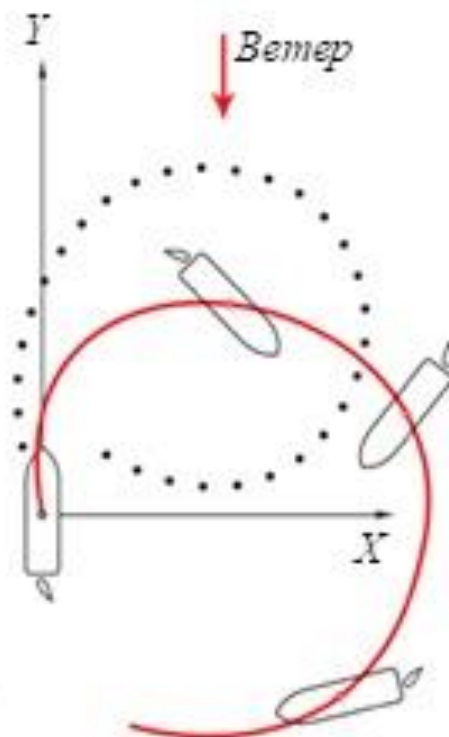


Рисунок 35. Движение судна против ветра

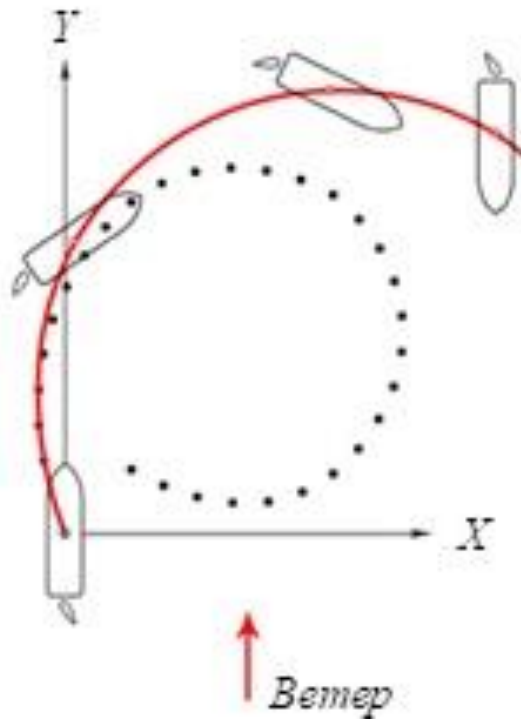


Рисунок 36. Движение судна в направлении ветра

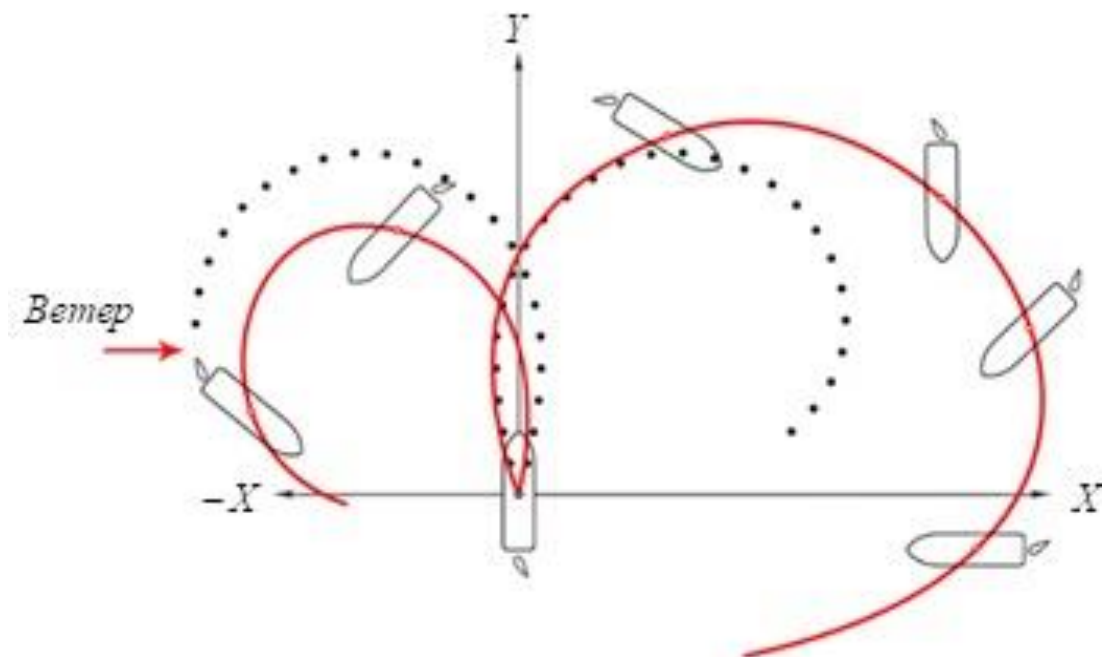


Рисунок 37. Движение судна при сильном бортовом ветре

Воздействие течения на маневренность судна. При направлении течения воды под углом к носу судна происходит одновременное изменение скорости и траектории движения судна. Истинная скорость судна зависит от суммы или разности скорости течения и скорости судна. Величина сноса, определяемая углом между течением и носом судна, а также скоростью

течения и скоростью судна, будет больше при увеличении угла между направлением течения и носом судна и уменьшении скорости судна.

При движении судна по течению, происходит медленное развитие эволюционного периода циркуляции после перекладки руля. Судно некоторое время перемещается в направлении, почти перпендикулярном течению, а затем резко совершает поворот в сторону, где была произведена перекладка руля. Циркуляция на 360° завершается ниже (по течению), чем при циркуляции без влияния течения. В таком случае циркуляция по течению сопровождается сильной раскаткой кормы и повышенным общим дрейфом судна под действием течения (рис. 38).

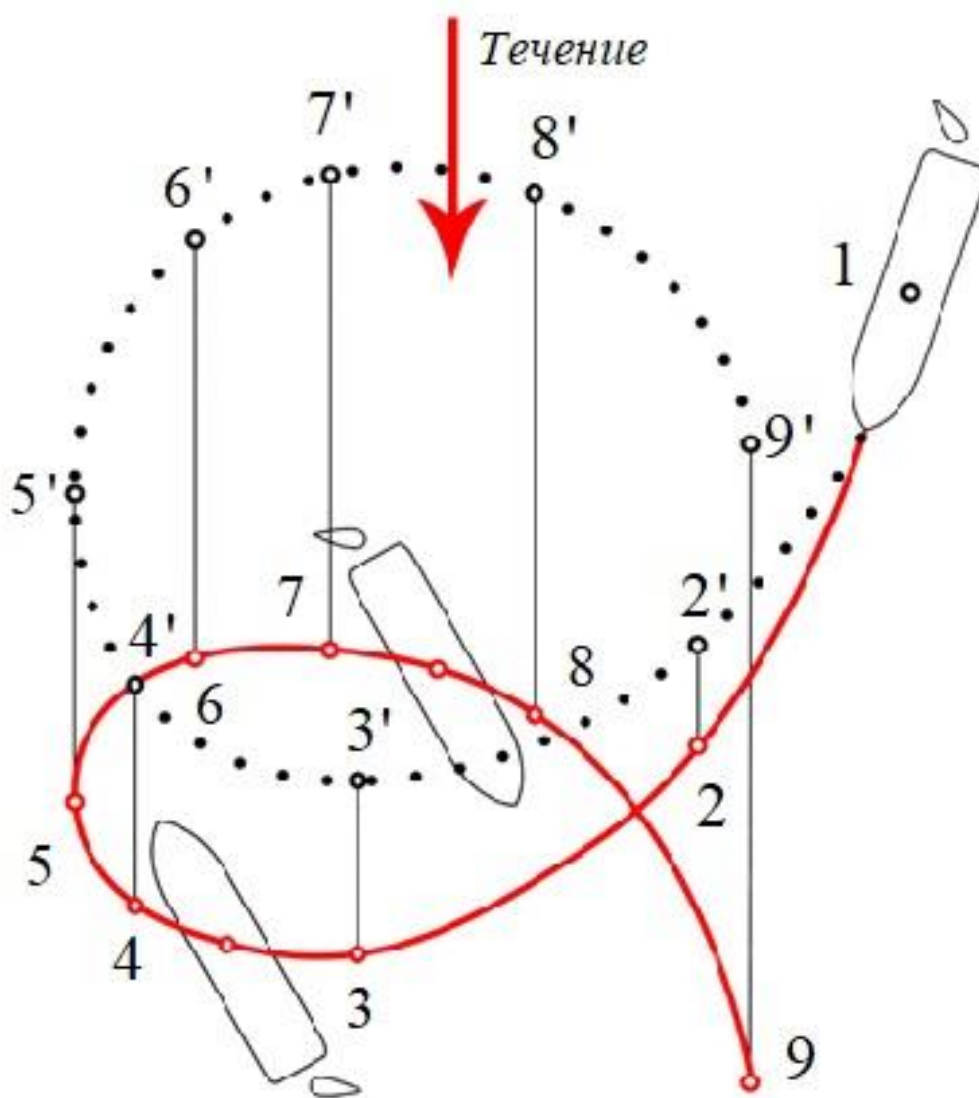


Рисунок 38. Движение судна по течению

Циркуляция судна против течения характеризуется равномерным развитием своего эволюционного периода, а также близким к окружности распределением центра тяжести. Следует учитывать, что при повороте судна на угол более 180° влияние течения может привести к сильному сносу в направлении течения. Важно отметить, что в начальной части циркуляции судна до поворота на угол около 90° наблюдается небольшая раскатка кормы, и только после этого угол дрейфа и угловая скорость вращения судна значительно возрастают, достигая максимума после поворота на $180\text{—}270^\circ$ (рис. 39).

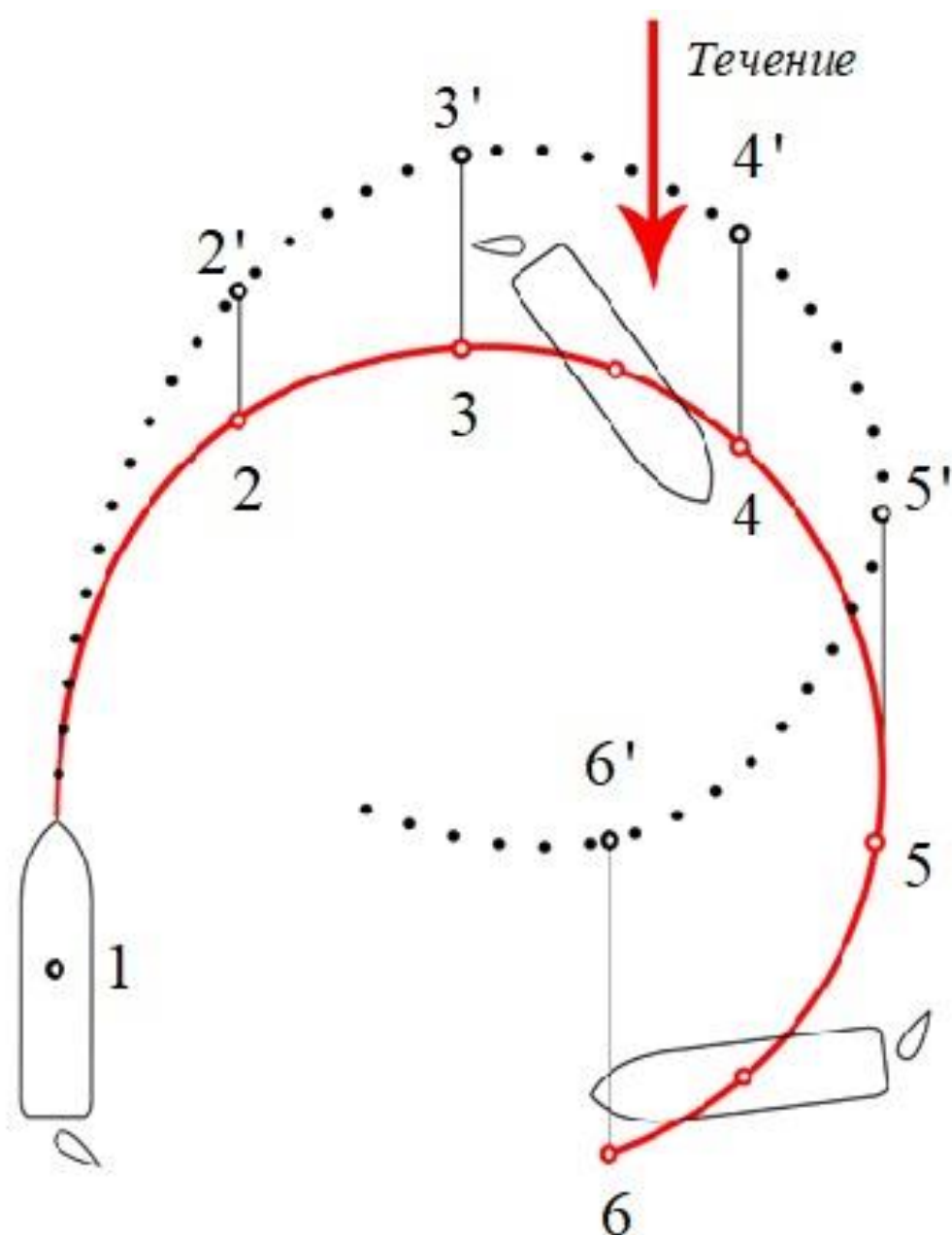


Рисунок 39. Движение судна против течения

При моделировании динамики поворота судна учет влияния течения может быть осуществлен следующим образом:

1. Скорости судна в условиях влияния течения формула 35.

$$\begin{aligned}V_{cx}^* &= V_c \sin(K_c) + V_T \sin(K_T) \\V_{cy}^* &= V_c \cos(K_c) + V_T \cos(K_T)\end{aligned}\quad (35)$$

2. Позиция судна в момент времени t с момента начала поворота формула 36.

$$\begin{aligned}X_c^* &= X_c + V_T \cdot t \cdot \sin(K_T) \\Y_c^* &= Y_c + V_T \cdot t \cdot \cos(K_T)\end{aligned}\quad (36)$$

где V_c, K_c - скорость и курс судна,

V_T, K_T - скорость и направление течения.

Эффекты волнения на поведение судна во время маневрирования.

При маневрировании судна, воздействие волнения может привести к возникновению резонансных значений его качки, если определенные курсовые углы волн и скорости судна совпадают [31]. Это может привести к потере груза или даже к опасности для самого судна в случае совпадения периода собственных колебаний судна с периодом волн. Опасные значения курсовых углов волн можно определить с помощью универсальной диаграммы Ремеза (рис 40). Однако для использования этой диаграммы необходимо знать период качки судна, направление волнения и длину волн в районе маневрирования судна.

Для определения опасных секторов с помощью диаграммы Ремеза необходимо следовать определенной последовательности действий:

1. определить период собственной бортовой качки судна (T): Этот период можно найти в технических характеристиках судна или рассчитать с помощью эмпирических формул.
2. определить направление волнения (β): это направление можно получить из прогнозов погоды или из наблюдений за волнами.
3. определить длину волны (λ): длину волны можно получить из прогнозов погоды или из наблюдений за волнами.

4. найти кажущийся период волны (T'): кажущийся период волны рассчитывается по формуле 37:

$$T' = T / \cos(\beta) \quad (37)$$

5. найти кажущуюся длину волны (λ'): кажущуюся длина волны рассчитывается по формуле 38:

$$\lambda' = \lambda / \cos(\beta) \quad (38)$$

6. нанести на диаграмму Ремеза точку с координатами (T' , λ'): Эта точка будет находиться в определённом секторе диаграммы.

7. опасные секторы: Секторы диаграммы, в которых находится точка (T' , λ'), считаются опасными. В этих секторах возможно возникновение резонансных колебаний судна.

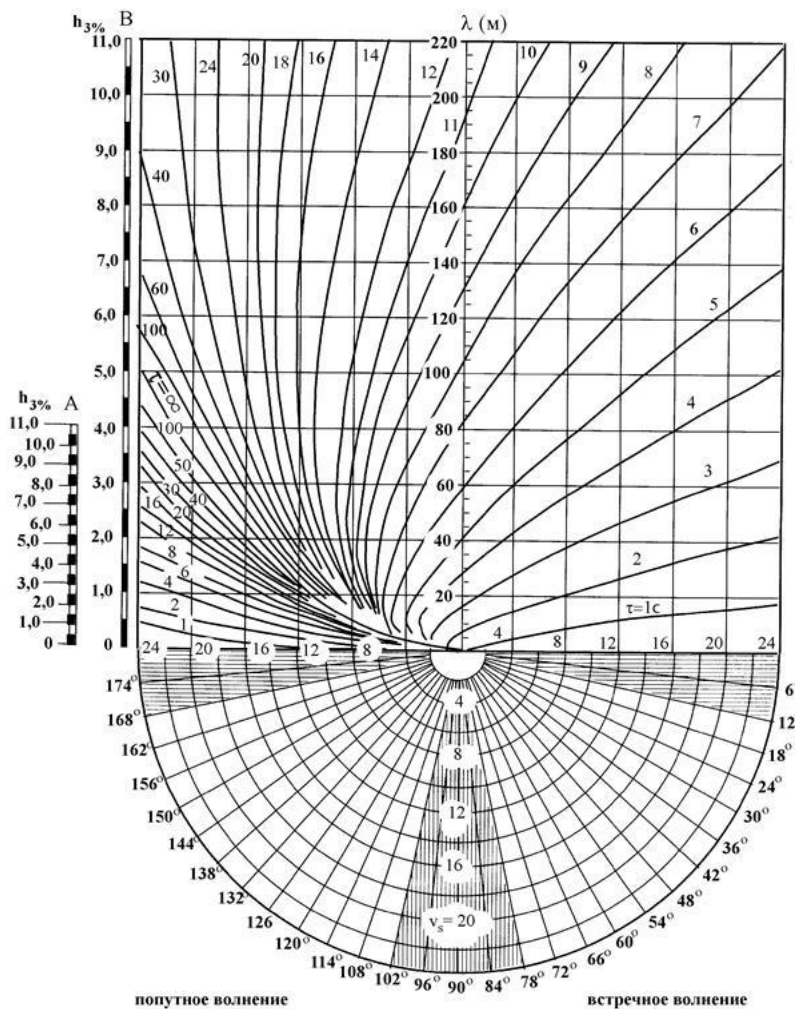


Рисунок 40. Диаграмма Ремеза

С помощью определенной формулы 39 можно достаточно точно вычислить период собственных колебаний.

$$T_c = \frac{f \cdot B}{\sqrt{h}} \quad (39)$$

где h – поперечная метацентрическая высота, м;

B - ширина судна, м;

f – коэффициент, зависящий от водоизмещения, отношения H/B , коэффициентов общей полноты и полноты ватерлинии, который находится в пределах 0,6 - 1.

Опасность возникновения резонанса для судна при качке проявляется в случае, когда период его собственных колебаний совпадает с кажущимся периодом волны. Однако считается, что опасным является диапазон [0.7, 1.3], где отношение периода собственных колебаний к кажущемуся периоду волны находится в этом диапазоне формула 40.

$$\frac{T_c}{0,7} \leq T_e \leq \frac{T_c}{1,3} \quad (40)$$

Выражение для определения кажущегося периода волны имеет следующий вид формула 41:

$$T_e = \frac{\lambda}{1,25 \cdot \sqrt{\lambda} \pm 0,514 \cdot V \cdot \cos q} \quad (41)$$

где λ – истинная длина волны, м;

V – скорость судна, уз;

q – курсовой угол направления бега волны, град.;

Знак «+» относится к случаю движения судна против волны, «-» – по волне.

Поэтому, стоит избегать выбора таких маневров, которые могут вызвать возбуждение волнения в опасных секторах курсовых углов. Для этого нужно рассчитать кажущийся период волны для запланированного маневра и сравнить его с собственным периодом колебаний судна. Если полученное неравенство выполнено, то маневр может привести к опасным резонансным явлениям.

2.5. Методы анализа приближения судов с использованием нечеткой логики

Интеллектуальная система оценки навигационной обстановки соответствует требованиям Международных правил предупреждения столкновений судов в море (МППСС-72).

Модуль оценки по измеренным параметрам использует принципы нечеткой логики для анализа навигационной ситуации с участием встречных судов [32]. Он оценивает ситуацию для каждого судна и выдает комплексную оценку, учитывая всю совокупность факторов.

Определение различных категорий навигационных ситуаций в соответствии с условиями плавания и правилами Международных правил предупреждения столкновений судов в море (МППСС).

При приближении двух судов возможны различные варианты реагирования, которые в этом случае называются "ситуациями встречи". На рисунке 41 представлен полный перечень этих ситуаций встречи с их соответствующими идентификаторами.

ID	Ситуации встречи
A	Ситуация сближения на встречных курсах
B	Ситуация пересечения курса с права
C	Ситуация пересечения курса слева
D	Ситуация обгона цели
E	Ситуация обгона нашего судна
F	Ситуация ухода с курса
G	Ситуация движения параллельным курсом
H	Ситуация движения параллельным встречным курсом

Рисунок 41. Различные варианты сближения судов вместе с их идентификаторами

Международные правила предотвращения столкновений судов на море также учитывают различные сценарии встречи между судами.

Ситуации встречи с судами:

- встречные суда (Правило 14),
 - суда, идущие почти встречными курсами (Правило 15),
 - суда, идущие пересекающимися курсами (Правило 16),
 - суда, идущие сближающимися курсами (Правило 17),
 - суда, идущие в узкости (Правило 18),
 - суда, идущие по кругу в системе разделения движения (Правило 19).
- Ситуации встречи с другими объектами:
- Рыболовные суда (Правило 2),
 - суда на якоре или стоянке (Правило 9),
 - суда с ограниченными возможностями маневрирования (Правило 10),
 - суда, ограниченные в осадке (Правило 11),
 - парусные суда (Правило 12),
 - суда на воздушной подушке (Правило 13),
 - гидросамолеты (Правило 13),
 - военные корабли и суда государственной службы (Правило 14),
 - суда, буксирующие или толкающие другое судно (Правило 16),
 - суда, буксирующие или толкающие плот, или другое плавучее сооружение (Правило 17).

Критерии, используемые для оценки ситуации при встрече судов.

Необходимо использовать навигационные характеристики для оценки ситуации, когда два судна встречаются, и эти характеристики могут быть получены от каждого из двух судов (измеримые навигационные параметры). Измеримые параметры включают данные, полученные от датчиков или рассчитанные на основе информации от датчиков [33].

Этот набор параметров включает в себя следующие характеристики:

- K_o - направление, по которому движется собственное судно,
- K_c - направление, по которому движется другое судно,
- KY_c - угол направления, по которому движется другое судно,

- KY_o - угол направления собственного судна относительно направления на другое судно.

Для определения степени опасности при встрече с другим судном необходимо установить, под каким углом к собственному курсу оно находится. В соответствии с Международными правилами предотвращения столкновений (МППСС) выделяются следующие секторы обзора:

- нос: от прямого курса до $22,5^\circ$ влево и вправо
- носовой траверз: от $22,5^\circ$ до $67,5^\circ$ влево и вправо
- борт: от $67,5^\circ$ до $112,5^\circ$ влево и вправо
- кормовой траверз: от $112,5^\circ$ до $157,5^\circ$ влево и вправо
- корма: от $157,5^\circ$ до 180° влево и вправо

На рисунке 42 эти секторы показаны схематично.

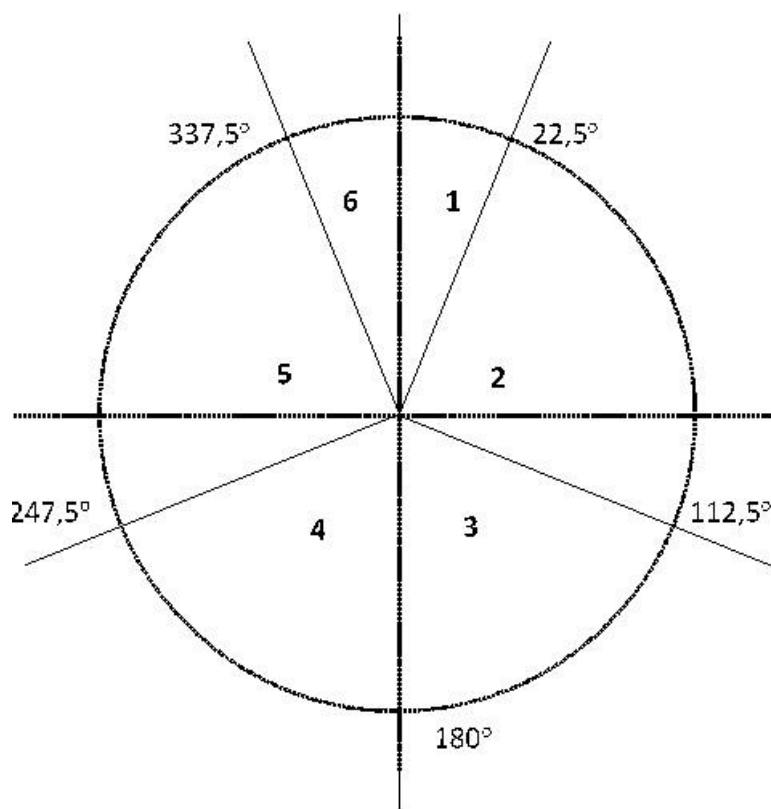


Рисунок 42. Зоны вокруг судна

На рисунке 43 показано соответствие между навигационными ситуациями и значениями навигационных параметров. Эти параметры используются для оценки степени опасности и принятия соответствующих мер по предотвращению столкновения.

Сектор	Ситуации встреч	KY_c	KY_o
1	A Ситуация сближения на встречных курсах	$0^0-22.5^0$	$0^0-22.5^0$
1	F Ситуация ухода с курса	$0^0-22.5^0$	$22.5^0-112.5^0$
1	F Ситуация ухода с курса	$0^0-22.5^0$	112.5^0-180^0
1	D Ситуация обгона цели	$0^0-22.5^0$	$180^0-247.5^0$
1	B Ситуация пересечения курсов справа	$0^0-22.5^0$	$247.5^0-337.5^0$
1	A Ситуация сближения на встречных курсах	$0^0-22.5^0$	337.5^0-360^0
2	B Ситуация пересечения курсов справа	$22.5^0-112.5^0$	$0^0-22.5^0$
2	F Ситуация ухода с курса	$22.5^0-112.5^0$	$22.5^0-112.5^0$
2	F Ситуация ухода с курса	$22.5^0-112.5^0$	112.5^0-180^0
2	F Ситуация ухода с курса	$22.5^0-112.5^0$	$180^0-247.5^0$
2	B Ситуация пересечения курсов справа	$22.5^0-112.5^0$	$247.5^0-337.5^0$
2	B Ситуация пересечения курсов справа	$22.5^0-112.5^0$	337.5^0-360^0
3	E Ситуация обгона нашего судна	112.5^0-180^0	$0^0-22.5^0$
3	F Ситуация ухода с курса	112.5^0-180^0	$22.5^0-112.5^0$
3	F Ситуация ухода с курса	112.5^0-180^0	112.5^0-180^0
3	F Ситуация ухода с курса	112.5^0-180^0	$180^0-247.5^0$
3	F Ситуация ухода с курса	112.5^0-180^0	$247.5^0-337.5^0$
3	E Ситуация обгон нашего судна	112.5^0-180^0	337.5^0-360^0
4	E Ситуация обгон нашего судна	$180^0-247.5^0$	$0^0-22.5^0$
4	F Ситуация ухода с курса	$180^0-247.5^0$	$22.5^0-112.5^0$
4	F Ситуация ухода с курса	$180^0-247.5^0$	112.5^0-180^0
4	F Ситуация ухода с курса	$180^0-247.5^0$	$180^0-247.5^0$
4	F Ситуация ухода с курса	$180^0-247.5^0$	$247.5^0-337.5^0$
4	E Ситуация обгона нашего судна	$180^0-247.5^0$	337.5^0-360^0
5	C Ситуация пересечения курсов слева	$247.5^0-337.5^0$	$0^0-22.5^0$
5	C Ситуация пересечения курсов слева	$247.5^0-337.5^0$	$22.5^0-112.5^0$
5	F Ситуация ухода с курса	$247.5^0-337.5^0$	112.5^0-180^0
5	F Ситуация ухода с курса	$247.5^0-337.5^0$	$180^0-247.5^0$
5	F Ситуация ухода с курса	$247.5^0-337.5^0$	$247.5^0-337.5^0$
5	C Ситуация пересечения курсов слева	$47.5^0-337.5^0$	337.5^0-360^0
6	A Ситуация сближения на встречных курсах	337.5^0-360^0	$0^0-22.5^0$
6	C Ситуация пересечения курсов слева	337.5^0-360^0	$22.5^0-112.5^0$
6	D Ситуация обгона цели	337.5^0-360^0	112.5^0-180^0
6	D Ситуация обгона цели	337.5^0-360^0	$180^0-247.5^0$
6	F Ситуация ухода с курса	337.5^0-360^0	$247.5^0-337.5^0$
6	A Ситуация сближения на встречных курсах	337.5^0-360^0	337.5^0-360^0

Рисунок 43. Соотношение между ситуациями на море и различными параметрами навигации

2.6. Определение навигационной ситуации для двух судов на основе заданных навигационных данных

Для решения этой задачи используются методы нечеткой логики, в которых вводится параметр неопределенности (uncertainty parameter), который определяет размытую область вокруг границы ситуации.

В базе знаний содержатся сведения о ситуациях встречи, которые определяют четкие границы для каждой ситуации. Использование нечеткости позволяет размыть данные границы, что позволяет ситуации пересечения границ секторов иметь одновременно две ситуации встречи, каждая с соответствующим весом.

Модуль оценки ситуаций использует измеренные навигационные параметры для определения ситуации встречи или комбинации ситуаций с присвоением им соответствующих весов формула 42 [34].

$$\langle KY_o, KY_c \rangle \rightarrow \{ \langle Sit_1, P_1 \rangle, \langle Sit_2, P_2 \rangle \} \quad (42)$$

Если происходит пересечение границы секторов, множество будет включать в себя две ситуации встречи, каждая с присвоенным весом.

Несмотря на то, что МППСС определяют обязательства судов с различными статусами при встрече, система может получать только навигационные статусы судов-целей из АИС. Для определения статуса судна по МППСС также необходима информация о скорости цели, которая является измеримым параметром.

На основе этих параметров система определяет статус судна по МППСС, который включает:

- судно с правом пути;
- судно, уступающее дорогу;
- судно с ограниченной маневренностью;
- судно, стесненное своими осадкой или размерами;
- судно, занятое ловом рыбы;
- судно, занятое тралением;

- судно, занятое проводкой или буксировкой;
- парусное судно.

После определения статусов всех судов-целей и с учетом статуса собственного судна, можно определить обязанности всех судов в отношении друг друга в данной ситуации.

Правило 18 Международных правил предупреждения столкновений в море (МППСС) устанавливает взаимные обязанности судов при приближении друг к другу так, что существует риск столкновения.

Рисунок 44 иллюстрирует эти обязанности:

Судно А:

- Должно держать курс и скорость.
- Если возможно, должно помочь в определении намерения судна В.

Судно В:

- Должно уступить дорогу судну А.
- Должно принять своевременные и надлежащие меры для того, чтобы держаться в стороне от пути судна А.

Оба судна:

- Должны вести постоянное наблюдение друг за другом и за окружающей обстановкой.
- Должны использовать все имеющиеся средства для определения риска столкновения.
- Должны предпринимать своевременные и надлежащие действия для предотвращения столкновения.

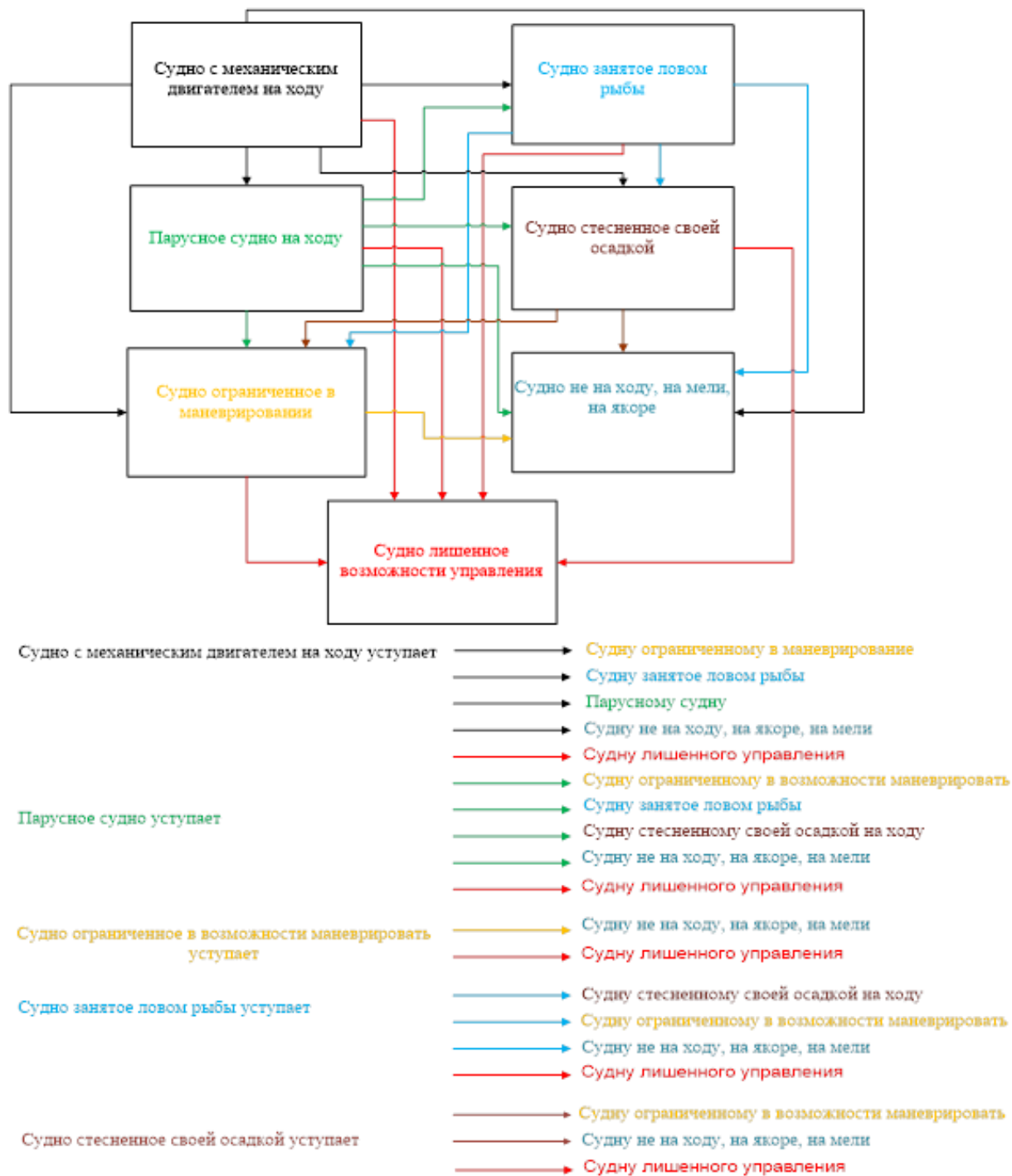


Рисунок 44. Обязанности судов по МППСС, определяющие их действия и ответственности во время встречи или обгона

2.7. Стандарты и процедуры, определяющие безопасное расстояние между судами для принятия решений

В системе создается последовательность навигационных векторов, характеризующих ситуацию [35], формулы 43,44.

$$S = \{S_t\}_{t \in [-T, 0]} \quad (43)$$

где T – глубина хранения истории навигационных ситуаций,

S_t - вектор навигационной ситуации:

$$S_t = \langle S_t^c, S_t^f, S_t^e, S_t^d \rangle \quad (44)$$

где S_t^c - текущая навигационная ситуация;

S_t^f - прогноз навигационной ситуации;

S_t^e - оценка навигационной ситуации;

S_t^d - решение по управлению судном в данной навигационной ситуации.

Затем будут изучаться основные принципы создания составляющей S_t^d - управления судном.

Каждое решение по управлению судном представляет собой один из множества возможных вариантов управления, обозначаемых как i из I формула 45.

$$S_t^d = \{S_t^{di}\}_{i \in I} \quad (45)$$

$$S_t^{di} = \langle S_t^{dci}, S_t^{dfi}, S_t^{dei}, p_t^i \rangle$$

где S_t^{dci} - навигационная ситуация с учетом i варианта управления;

S_t^{dfi} - прогноз навигационной ситуации с учетом i варианта управления;

S_t^{dei} - оценка навигационной ситуации с учетом i варианта управления;

p_t^i - вес i варианта управления.

Основные принципы принятия решений.

Если ситуация на морском порту определена как опасная, необходимо предпринять меры для обеспечения безопасного расхождения с другими

судами [15]. Для принятия решения по безопасному обходу, требуется определить новое направление движения судна таким образом, чтобы оно оставалось в безопасном расстоянии от других судов и навигационных опасностей. Однако в управлении судном используется последовательность маневров, а не исключительно направление движения, чтобы достичь этой новой траектории.

Таким образом, решением здесь является последовательность маневров, обеспечивающая заданную траекторию движения судна.

Маневр должен соответствовать установленным требованиям и обеспечивать безопасное изменение траектории движения судна:

- маневр должен быть выполнен с помощью управляющих средств судна;
- маневр должен быть интуитивно понятен для судоводителя и основан на стандартных управляющих действиях, таких как изменение курса или скорости;
- маневр не должен нарушать правила МППСС-72 (Международные правила предупреждения столкновений в море);
- маневр должен обеспечить безопасное избегание столкновений с другими судами и навигационными опасностями в районе плавания.

Поиск безопасного маневра осуществляется путем создания и проверки различных предположений. Каждое предположение (маневр) оценивается в определенной последовательности:

- Создается измененный маршрут, который соответствует ожидаемому маневру.
- С использованием моделей собственного судна и целевых судов формируется прогноз их движения на определенный промежуток времени, чтобы предсказать навигационную ситуацию при выполнении данного маневра.
- Если прогнозируемая траектория движения судна нарушает навигационные ограничения, например, выходит за пределы безопасных зон

или в зоны запретного плавания, то предлагаемый маневр не поддерживается.

- Если предполагаемая траектория судна учитывает навигационные ограничения, то производится оценка риска возможного опасного сближения с другими судами-целями. В рамках процесса оценки строится оценка потенциальной опасности сближения с каждым из судов-целей, а также комплексная оценка, которая представлена шкалой цветов RGB с тремя категориями (красный, желтый, зеленый) и соответствующими значениями (опасно, внимание, безопасно).
- Если комплексная оценка безопасности относится к категории "красный" (опасно), данная гипотеза отвергается. В противном случае, этот вариант маневра сохраняется в списке потенциальных гипотез.

После проверки всех созданных гипотез, если есть хотя бы одна подходящая, выбирается наилучшее решение.

Процесс выбора пути для судна включает набор маневров, которые в свою очередь определяют траекторию движения в соответствии с динамикой судна [36]. Для прогнозирования этой траектории используется модель динамики судна формула (46).

$$Tr_0^{di} = F(L^i, M) \quad (46)$$

где Tr_0^{di} – прогноз траектории собственного судна;

L^i - маршрут судна (i решение: $i \in I$);

M - модель динамики собственного судна.

Если текущий выбранный маршрут приводит к прогнозируемой опасной траектории для судна, необходимо найти новый маршрут, который гарантирует безопасное движение судна.

На рисунке 45 изображены следующие наборы возможных вариантов.

S'' — это множество возможных решений охватывает все возможные маршруты, которые могут быть достигнуты из начальной точки до конечной точки, определяемые различными маневрами.

S^r — это множество применимых решений, ограниченное динамикой судна, включает в себя маршруты, по которым судно может двигаться, учитывая его специфические динамические свойства.

S^e — это набор реалистичных решений, учитывающих условия плавания, содержит безопасные и утвержденные маршруты в указанной морской зоне, учитывая навигационные ограничения, ограниченные области плавания и другие соответствующие факторы.

S^s — это набор безопасных решений, который учитывает параметры приближения к другим судам и включает маршруты, которые безопасны в плане навигационных ограничений и обеспечивают безопасное расхождение со всеми судами в районе плавания.

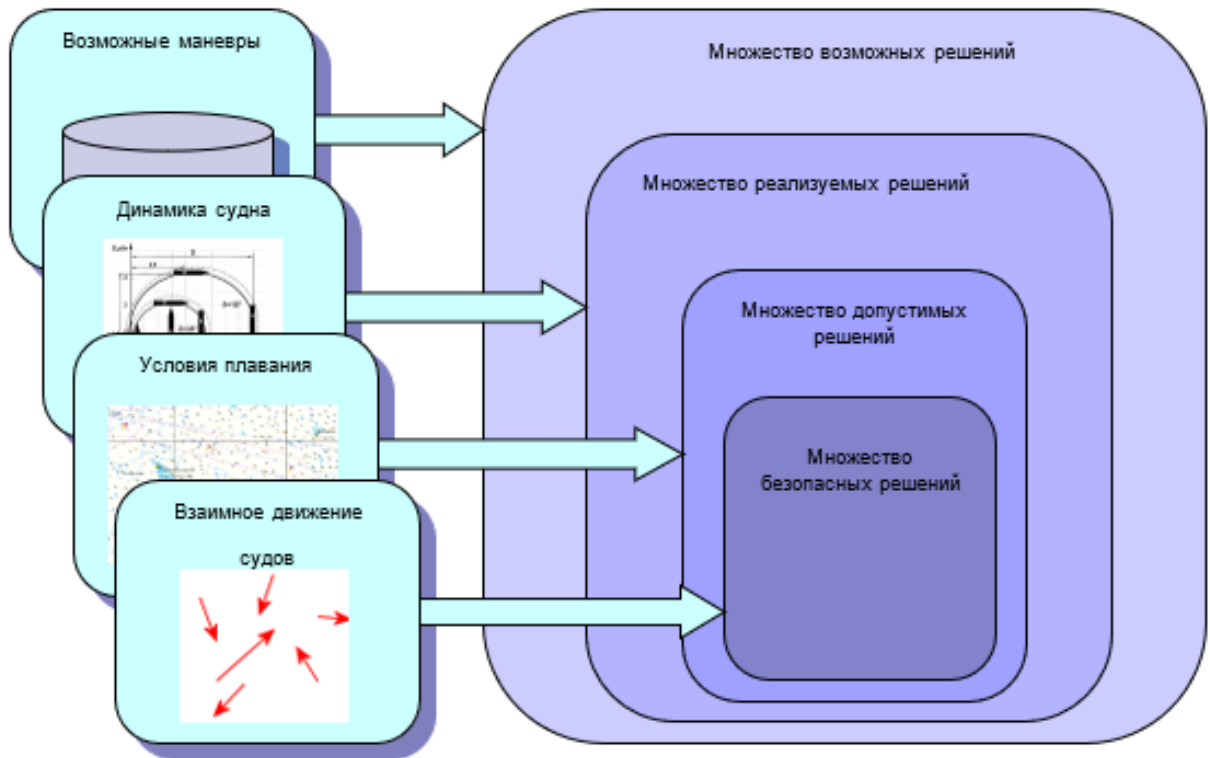


Рисунок 45. Отношения множеств решений

Эти множества можно связать следующим образом формула 47.

$$S^s \subset S^e \subset S^r \subset S^u \quad (47)$$

Таким образом, целью модуля принятия решений является создание набора безопасных решений. Если этот набор не является пустым $S^s \neq \emptyset$, то требуется найти оптимальное решение формула 48.

$$S^* \in S^s$$

$$Crit(S^*) \rightarrow \min \quad (48)$$

На рисунке 46 показан универсальный алгоритм разработки маневровых решений.

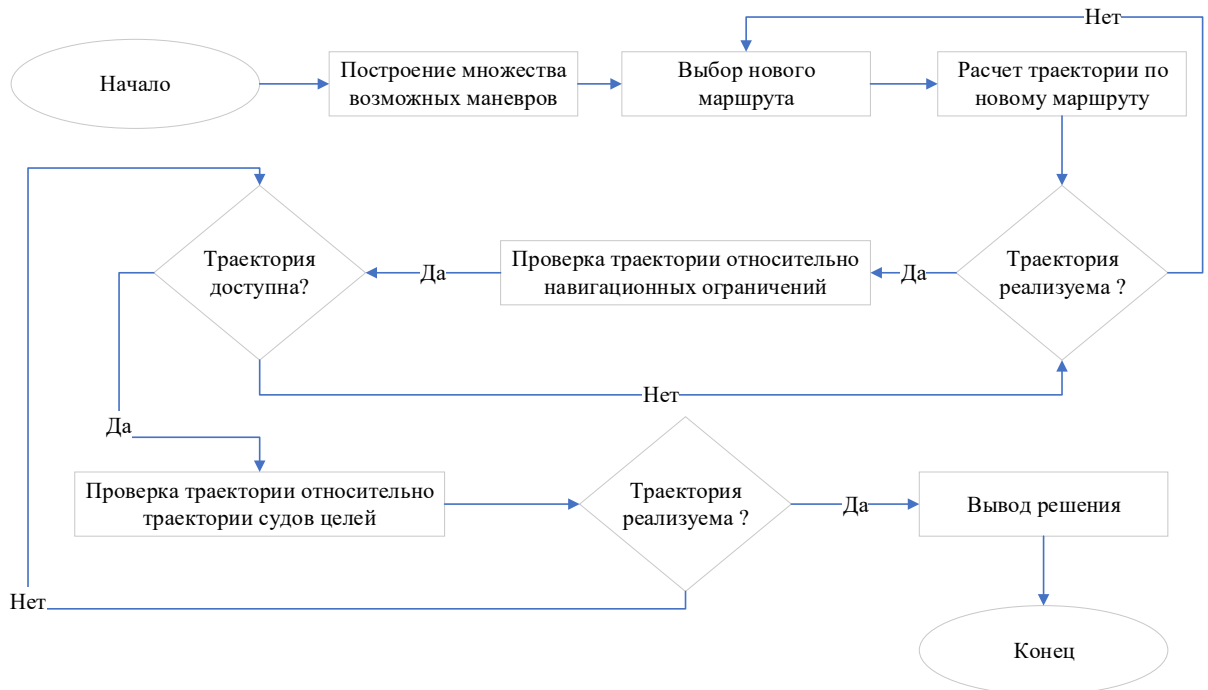


Рисунок 46. Универсальный метод разработки маневровых решений

Параметризация решений.

Для определения множества потенциальных решений необходимо задать допустимые маршруты [37]. Пусть имеется исходный маршрут (заданный план движения собственного судна - Voyage Plan) - L^0 , маршрут, определяющий i -е возможное решение - L^i , и разность между этими маршрутами: $DL = |L^0 - L^i|$. Тогда маршрут $L^i \in S^u$ (считается допустимым), если он соответствует определенным условиям:

1. Маршрут L^i (потенциальное решение) отличается от исходного маршрута только на ограниченном участке (DL ограниченное отклонение).
2. DL для формирования маршрута требуется не более трех маневров изменения курса.

3. DL для формирования маршрута требуется не более двух маневров изменения скорости.

Поэтому рассматриваются маневры, которые могут быть выполнены либо изменением курса (не более трех поворотов, последний из которых должен вернуть к исходному маршруту), либо изменением скорости (не более двух изменений скорости, последнее из которых должно вернуть планируемую скорость на соответствующем участке исходного маршрута).

Представим рассмотрим исходный маршрут как комбинацию двух отрезков формула 49.

$$L^0 = L^0_S \cup L^0_F \quad (49)$$

Аналогичным образом рассмотрим потенциальный маршрут как комбинацию двух сегментов формула 50.

$$L^i = L^i_S \cup L^i_F \quad (50)$$

Разделив их на участки таким образом, чтобы единственное различие между этими маршрутами было в начальных участках формула 51.

$$\begin{aligned} L^0_F &= L^i_F \\ DL &= |L^0_S - L^i_S| \end{aligned} \quad (51)$$

При изучении различных маршрутов можем сосредоточиться только на их начальных участках. Следовательно, можем ввести следующую параметризацию для начальных участков маршрутов (и, следовательно, возможных решений):

- $L_S^K = \langle L_0^K, L_1^K, \alpha_0^K, \alpha_1^K \rangle$ - для изменения направления движения,
- $L_S^V = \langle L_0^V, L_1^V, V_0^V \rangle$ - для изменения скорости движения.

L_0^K - расстояние от текущего местоположения судна до точки, где будет выполнен первый поворот;

L_1^K - расстояние между точками первого и второго поворотов (пройденное расстояние по новому курсу);

α_0^K - угол поворота при выполнении первого маневра;

α_1^K - угол поворота при выполнении второго маневра;

L_0^V - расстояние от текущего местоположения судна до начала изменения скорости движения;

L_1^V - пройденное расстояние при новой скорости;

V_0^V - новое значение скорости движения.

На рисунке 47 представлены характеристики маршрута для маневра изменения курса.

а) $L_s^K = \langle L_0^K, L_1^K, \alpha_0^K, \alpha_1^K \rangle$

б) $L_s^K = \langle L_0^K, 0, \alpha_0^K, 0 \rangle$

в) $L_s^K = \langle L_0^K, L_1^K, \alpha_0^K, 0 \rangle$

где 1 - L_0^K , 2 - α_0^K , 3 - L_1^K , 4 - α_1^K .

На рисунке 48 представлены характеристики маршрута для маневра изменения скорости.

$L_s^V = \langle L_0^V, L_1^V, V_0^V \rangle$

где 1 - L_0^V , 2 - V_0^V , 3 - L_1^V .

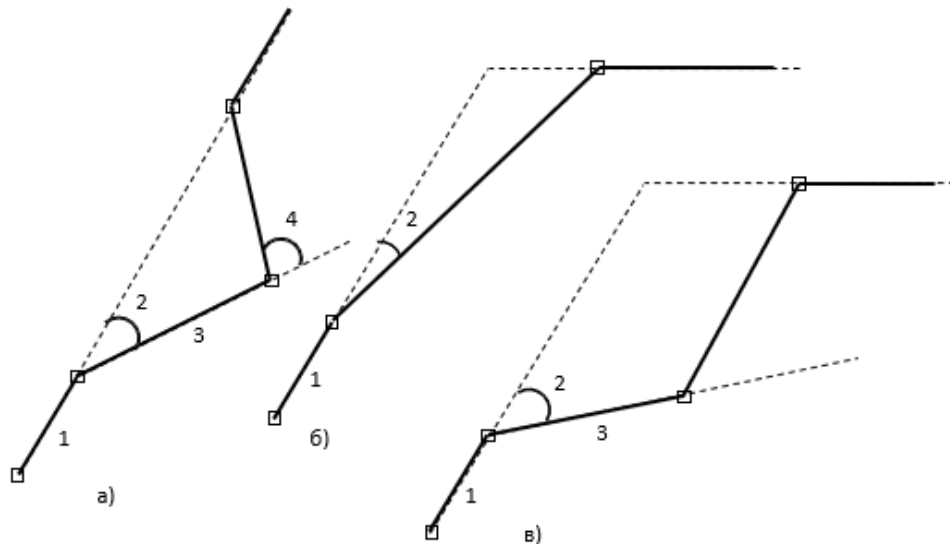


Рисунок 47. Представлены характеристики маршрута для маневра изменения скорости.

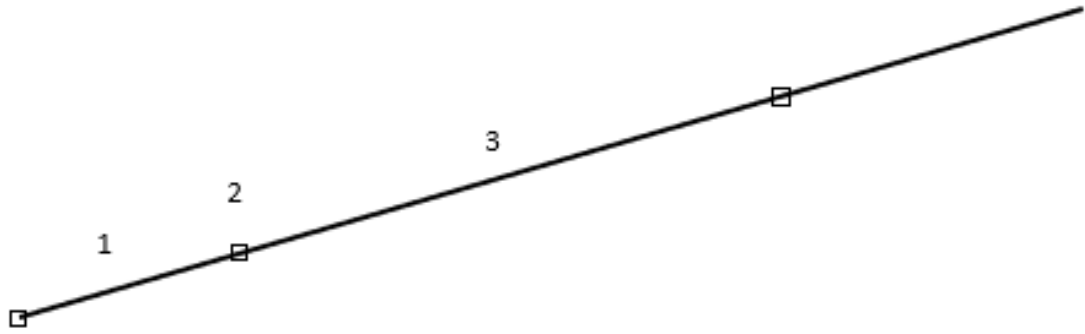


Рисунок 48. Параметры маршрута для изменения скорости во время маневра
Формирование вариантов решений.

В разделе формирования решений заполняется элемент S_t^d - варианты управления судном. Это включает создание разнообразных вариантов управления судном на основе информации из базы знаний, содержащей сведения о различных маневрированиях судном, формула 52 [38].

$$S_t^d = \{S_t^{di}\}_{i \in I} \quad (52)$$

$$S_t^{di} = \langle S_t^{dci}, S_t^{dfi}, S_t^{dei}, p_t^i \rangle$$

В данном модуле для каждого i -го варианта решения из набора возможных решений I генерируется информация о S_t^{dci} навигационной обстановке с учетом принятого в данном варианте управления формула 53,54.

$$S_t^{dci} = D(S_t^c, S_t^f, U_t^i, M_0, K_d) \quad (53)$$

где U_t^i - принятый вариант управления для i варианта, который представляет собой маршрут L_t^i :

$$U_t^i = L_t^i \quad (54)$$

M_0 - модель собственного судна;

K_d - знания по управлению судном.

Для каждого созданного решения в модуле прогнозирования разрабатывается прогноз развития обстановки S_t^{dfi} , который учитывает предполагаемую траекторию собственного судна в соответствии с выбранным маршрутом $Tr_{0i} = F(L_t, M)$. При этом траектории других судов,

являющихся целями, остаются неизменными по сравнению с прогнозом S_t^f формула 55.

$$S_t^{dfi} = \langle Tr_0^{di}, \{Tr_j\}_{j \in J} \rangle \quad (55)$$

После этого, в модуле оценок осуществляется анализ безопасности навигационной обстановки с учетом обновленной траектории движения Tr_0^{di} и заполняется соответствующий компонент S_t^{dei} формула 56.

$$\begin{aligned} e(Tr_0^{di}) &= \min(Q_l), l \in L \\ e(Tr_0^{di} \circ Tr_j) &= Q_j, j \in J \end{aligned} \quad (56)$$

где Q_i - оценка безопасности i решения по шкале RYG;

$e(Tr_0^{di})$ - оценка безопасности траектории относительно навигационных опасностей по шкале RYG в случае, если $e(Tr_0^{di}) = R$ (т.е. она является опасной), это решение отбрасывается. Таким образом, множество допустимых решений S^e содержит в себе только те решения, для которых $e(Tr_0^{di}) > R$.

Для оставшихся вариантов осуществляется оценка безопасности их траекторий по отношению к траекториям целевых судов. Множество безопасных решений S^s включает в себя все варианты, у которых траектории соответствуют следующему критерию формула 57.

$$\min(e(Tr_0^{di} \circ Tr_j)) = \min Q_j > R, j \in J \quad (57)$$

Поэтому, набор безопасных решений включает только те траектории, которые являются безопасными с учетом навигационных опасностей и целевых судов.

Процесс выбора наилучшего варианта решения.

Из множества безопасных вариантов выбирается оптимальное решение, которое может быть результатом управления как курсом, так и скоростью формула 58 [39].

$$S^s = J_K \cup J_V \quad (58)$$

При определении наилучшего маневра по курсу учитываются следующие критерии оптимальности:

- минимизация пройденного расстояния на измененном сегменте маршрута формула 59.

$$R_1^K = \min_{j \in J_K} \left(\sum_{i=1..N_j} d_{ij} \right) \quad (59)$$

где $d_j = \sum_{i=1..N_j} d_{ij}$ - сумма длин участков движения судна на модифицированном участке маршрута L_S^K

- минимизация общей суммы углов поворота во время маневрирования по курсу формула 60.

$$R_2^K = \min_{j \in J_K} \left(\sum_{i=1..N_j} \Delta K_{ij} \right) \quad (60)$$

где $\Delta K_\Sigma = \sum_{i=1..N_j} \Delta K_{ij}$ - сумма углов поворотов при маневрировании курсом, включая поворот на прежний (заданный исходным маршрутом) курс.

Поскольку два критерия оптимальности, они применяются в соответствии со следующим планом действий.

1. При использовании первого критерия оптимальности на множестве безопасных управляющих курсом решений получается набор субоптимальных решений формула 61.

$$J_K^* = \{j \mid R_1^K(j) < \rho, j \in J_K\} \quad (61)$$

где ρ - заданный уровень.

Из этого следует формула 62.

$$J_K^* \subset J_K \quad (62)$$

2. Из набора субоптимальных вариантов выбирается оптимальное решение с использованием дополнительного критерия формула 63.

$$j^* = j : \min(R_2^K(j)), j \in J_K^* \quad (63)$$

При выборе наилучшего маневра судна с учетом измененной скорости применяется критерий минимизации времени формула 64.

$$R^V = \min_{j \in J_V} \left| \frac{D_j}{V_j} - \frac{D_j}{V} \right| \quad (64)$$

где V - первоначальная скорость собственного судна;

V_j - скорость движения при маневре скоростью;

D_j - расстояние движения с новой скоростью.

Таким образом, в случае возможности существуют два оптимальных варианта решения: маневрирование по курсу и маневрирование по скорости [40]. Эти варианты представляются в качестве рекомендаций для судоводителя. Кроме того, система предоставляет возможность отображения множества субоптимальных решений, которое определяется ρ -уровнем оптимальности. Пользователь может задать значение этого уровня рисунок 49.

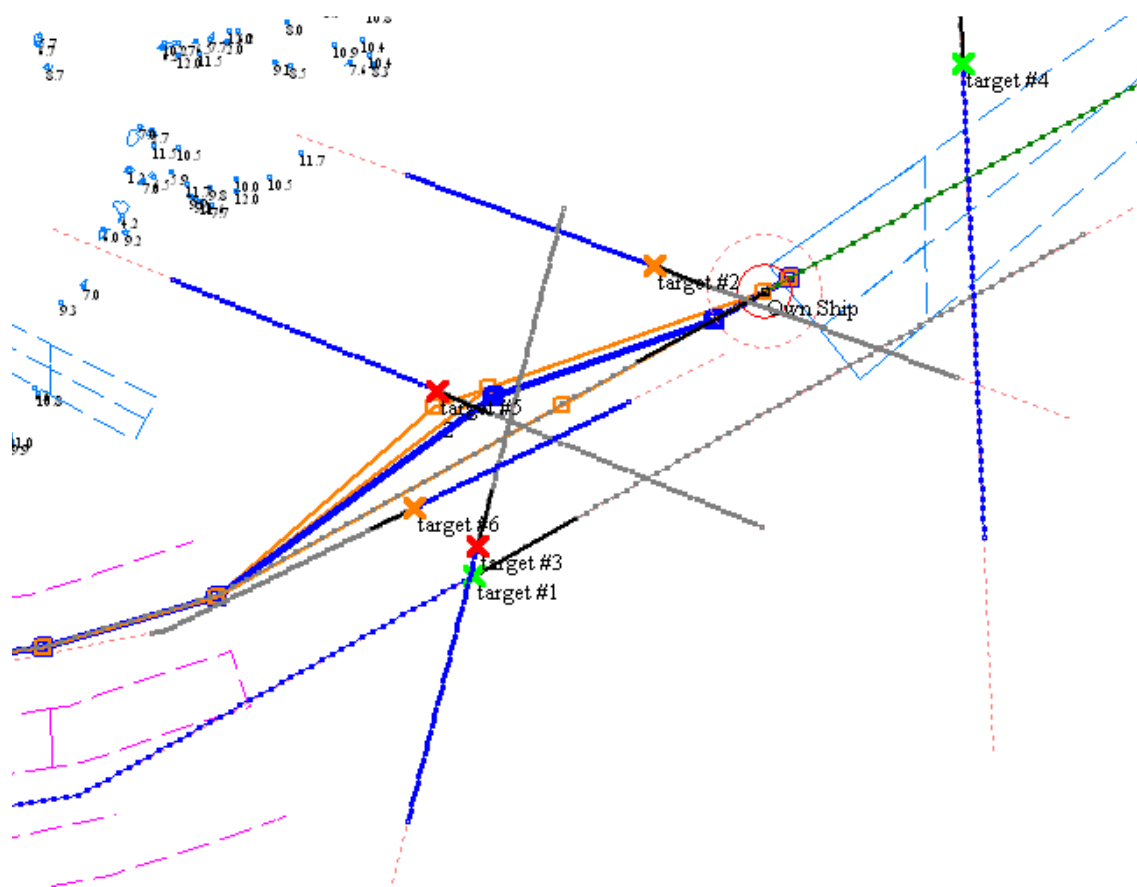


Рисунок 49. Оптимальное и субоптимальные решения

Заключение

Главной целью данной работы было изучение способов управления движением судна в пределах морского порта с учетом различных навигационных опасностей.

В рамках исследования были выполнены следующие задачи:

1. Проанализированы акватории морского порта и её особенностей.
2. Изучены потенциальные навигационные угрозы и аварийные ситуации, возможные для судов в акватории порта.
3. Проведена оценка существующих средств навигационного оборудования и систем управления судами.
4. Проведено исследование алгоритмов маневрирования судна в условиях навигационных угроз, а также анализ воздействия гидрометеорологических условий на корпус судна в процессе маневрирования.
5. Проанализированы возможные меры предотвращения навигационных аварийных случаев и улучшения безопасности судоходства в акватории морского порта.
6. Проведена оценка эффективности существующих систем и технологий для обеспечения безопасности и управления движением судов в морском порту.
7. Проведено исследование влияние изменений климатических условий на навигацию в акватории морского порта и предложить соответствующие меры адаптации.

Морской порт представляет собой опасную зону для навигации из-за высокой концентрации судов на ограниченной территории. Особое внимание следует уделить подходам к порту, где усложненные участки могут стать местом возникновения аварий. Для предотвращения инцидентов необходимо осуществлять строгий контроль за движением судов, обеспечивать сложные участки пути с помощью навигационного оборудования и улучшать квалификацию судоводителей.

Список используемых источников

1. В.В. Каретников, А.И. Зайцев, Е.А. Ратнер [Статья] Внедрение автоматизированных траловых комплексов для обеспечения безопасности навигации на внутренних водных путях РФ, стр. 5-10.
2. Навигационные опасности [Электронный ресурс] (<https://flot.com/publications/books/shelf/rulkov/49.htm>) дата обращения 23.05. 2023.
3. Средства навигационного оборудования морей [Электронный ресурс] (<https://helpiks.org/2-85239.html>) дата обращения 24.05. 2023.
4. Навигационное оборудование [Электронный ресурс] (<https://kamstorm.ru/info/sudov/sredstv.php>) дата обращения 24.06. 2023.
5. Спутниковая навигационная система [Электронный ресурс] (<https://npcas.ru/wiki/gnss-global-navigation-satellite-system-globalnaya-sputnikovaya-navigatsionnaya-sistema.html>) дата обращения 24.06. 2023.
6. ГЛОНАСС — российская глобальная навигационная система [Электронный ресурс] (<https://www.roscosmos.ru/21923/>) дата обращения 25.06. 2023.
7. Спутниковые навигационные системы [Электронный ресурс] (<http://sea-library.ru/gmdss/74-sputnikovye-navigatsionnye-sistemy.html>) дата обращения 25.06. 2023.
8. ГЛОНАСС vs GPS [Электронный ресурс] (<https://onlinepatent.ru/journal/glonass-gps-future/>) дата обращения 26.06. 2023.
9. И.В. Рябов, А.Д. Чернов [Статья] Повышение точности позиционирования подвижных объектов при помощи сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, стр. 7-13.
10. Система СУДС [Электронный ресурс] (<https://radiocomplex.ru/sistemy/sistemy-navteks-1>) дата обращения 01.07. 2023.
11. Средства навигационного оборудования [Электронный ресурс] (<https://shipshub.com/ru/article/1414-2.html>) дата обращения 01.07. 2023.

12. Положение о системах управления движением судов. Москва – 2002 стр. 5-15.
13. Система управления движением судов [Электронный ресурс] (https://studwood.net/1819868/tehnika/sistema_upravleniya_dvizheniem_sudov) дата обращения 01.07. 2023.
14. Навигационных оборудования современного морского судна [Электронный ресурс] (<https://zora.ru/?p=1385>) дата обращения 02.07. 2023.
15. Международные правила предупреждения столкновения судов в море (МППСС-72) [Электронный ресурс] (<https://kamstorm.ru/info/sudov/mejd.php>) дата обращения 02.09. 2023.
16. Д.А. Мельников, И.А. Сумарченкова, Е.А. Чернышево [Статья] Снижение влияния человеческого фактора на состояние техносферной безопасности, стр. 15-23.
17. А.Ю. Рыгалов, Ю.П. Кубарьков, Я.В. Макаров [Статья] Специфика взаимодействия агентов архитектуры мультиагентных систем, стр. 7-15.
18. Т.А. Стефанюк [Статья] Обновление базы знаний в динамических системах принятия решения, стр. 3-9.
19. Системы автоматизации на судах [Электронный ресурс] (<https://akvylon.ru/tpost/b5kbrvi1r1-sistemi-avtomatizatsii-na-sudah-effektiv>) дата обращения 05.10. 2023.
20. Информационное обеспечение морских навигационных систем. Международный научный журнал № 1 (15) / 2020.
21. С.В. Смолнец [Статья] Эксплуатация водного транспорта, судовождение, стр. 5-19.
22. С.В. Смолнец [Статья] Проблема оценки навигационной ситуации на море, стр. 8-13.
23. С.В.Смоленцев, А.Е. Сазанов, Ю.М. Искандеров [Статья] Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море, стр. 13-25.

24. С.В.Смоленцев, А.Е. Сазанов, А.Е. Пелевин [Статья] Значение контекста в задаче кооперативного маневрирования безэкипажных судов, стр. 20-27.
25. Исследовательское проектирование в кораблестроении на основе гибридных экспертных систем [Электронный ресурс] (https://swsys.ru/print/article_print.php?id=41) дата обращения 11.10. 2023.
26. Система базы знаний [Электронный ресурс] (<https://hrpedia.ru/blog/osnovnyye-komponenty-sistemy-bazy-znaniy-cto-nuzhno-znat/>) дата обращения 11.10. 2023.
27. Выбор и планирование методов контроля за местоположением и движением судна [Электронный ресурс] (<https://sea-man.org/metodov-kontrolya-za-mestopolozheniem.html>) дата обращения 11.10. 2023.
28. Учет гидрометеорологических условий при выборе наивыгоднейшего маршрута [Электронный ресурс] (<https://cyberpedia.su/7xad39.html>) дата обращения 11.11. 2023.
29. Д.А. Акмайкин, Д.Б. Хоменко [Статья] Обзор траекторий маневрирования судов различных типов на глубокой воде и мелководье, стр. 5-19.
30. А.А. Андреев, Ю.О. Шклярова [Статья] Модель динамики управляемого судна, стр. 7-16.
31. Влияние ветра и волнения на корабль [Электронный ресурс] (<https://flot.com/publications/books/shelf/conning/34.htm>) дата обращения 13.12. 2023.
32. Модель динамического формирования приоритетов радиолокационных целей с помощью методов нечеткой логики [Электронный ресурс] (<https://ru.readkong.com/page/model-dinamicheskogo-formirovaniya-prioritetov-1382092>) дата обращения 13.12. 2023.
33. Ситуация сближения судов, идущих друг на друга [Электронный ресурс] (<https://helpiks.org/1-128921.html>) дата обращения 13.01. 2024.

34. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы глонасс, В. Н. Тяпкин, Е. Н. Гарин Красноярск 2012
35. Глобальные навигационные спутниковые системы, А.О. Куприянов Москва 2017 стр. 54-63.
36. А.П. Нырков, П.В. Викулин [Статья] Алгоритм управления движением судов, идущих пересекающимися курсами, стр. 3-17.
37. Н.И. Погожих, М.С. Софронова, Д.П. Панасенко [Статья] Способ преобразования множества возможных решений в теории принятий решений, стр. 23-27.
38. А.А. Климов, В.П. Куприяновский, В.В. Аленьков [Статья] Умные технологии в портах и в судоходстве, как связанные цифровые двойники берега и судна в мультимодальном окружении, стр. 5-23.
39. Методы принятия оптимальных решений [Электронный ресурс] (https://spravochnick.ru/ekonometrika/metody_prinyatiya_optimalnyh_resheniy/) дата обращения 13.02. 2024.
40. С.В. Смоленцев [Статья] Эксплуатация волногон транспорта, судовождение, стр. 2-9.