

Министерство образования и науки Украины  
Национальный университет «Одесская морская академия»

На правах рукописи

Бурмака Алексей Игоревич

УДК 656.61.052.484

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫБОРА СТРАТЕГИИ РАСХОЖДЕНИЯ В  
СИТУАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО СБЛИЖЕНИЯ СУДОВ**

Специальность 05.22.13 – навигация и управление движением

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
к. т. н. Сафин И. В.

Одесса – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                     | Стр. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                                                      | 5    |
| ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ<br>БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ И ВЫБОР ОСНОВНОГО<br>НАПРАВЛЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....                  | 11   |
| 1.1. Обзор и анализ литературных источников по решению проблемы<br>обеспечения безаварийного плавания судов.....                                                    | 11   |
| 1.2. Обоснование основного направления диссертационного<br>исследования .....                                                                                       | 30   |
| 1.3. Выводы по первой главе .....                                                                                                                                   | 32   |
| ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ<br>ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....                                                                                      | 33   |
| 2.1. Выбор темы научного исследования .....                                                                                                                         | 33   |
| 2.2. Методы исследования диссертационной работы.....                                                                                                                | 35   |
| 2.3. Описание методики проведения научного исследования .....                                                                                                       | 41   |
| 2.4. Выводы по второй главе .....                                                                                                                                   | 43   |
| ГЛАВА 3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИТУАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО СБЛИ-<br>ЖЕНИЯ СУДОВ И СТРАТЕГИИ ЭКСТРЕННОГО РАСХОЖДЕНИЯ....                                                           | 45   |
| 3.1. Описание ситуации чрезмерного сближения и определение макси-<br>мальной дистанции кратчайшего сближения.....                                                   | 45   |
| 3.2. Формализация минимальной предельно-допустимой дистанции<br>сближения $\min D_{\text{доп}}$ и условие попадания судна в ситуацию чрезмерного<br>сближения ..... | 56   |
| 3.3. Формирование стратегии экстренного расхождения и зависимость<br>ее структуры от характеристики процесса расхождения.....                                       | 71   |
| 3.4. Учет навигационных опасностей и мешающих судов при расчете<br>маневра экстренного расхождения .....                                                            | 79   |

|                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5. Выводы по третьей главе .....                                                                                                   | 84  |
| ГЛАВА 4. ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ<br>СТРАТЕГИИ ЭКСТРЕННОГО РАСХОЖДЕНИЯ СУДНА .....                                     | 86  |
| 4.1. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного<br>сближения .....                                                | 86  |
| 4.2. Расчет параметров первого этапа стратегии экстренного<br>расхождения .....                                                      | 97  |
| 4.3. Расчет параметров последующих этапов стратегии экстренного<br>расхождения судна.....                                            | 107 |
| 4.4. Экстренное расхождение судна с целью при чрезмерном сближении<br>на попутных курсах .....                                       | 123 |
| 4.5. Выводы по четвертой главе .....                                                                                                 | 131 |
| ГЛАВА 5. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБОРА ЭКСТРЕН-<br>НОЙ СТРАТЕГИИ РАСХОЖДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИ-<br>МЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ..... | 132 |
| 5.1. Алгоритм расчета параметров стратегии экстренного расхождения в<br>ситуации чрезмерного сближения.....                          | 132 |
| 5.2. Экспериментальные исследования поворотливости судна и расчет<br>параметров динамических моделей .....                           | 140 |
| 5.3. Имитационное моделирование полученного метода экстренного<br>расхождения при чрезмерном сближении судна с целью.....            | 146 |
| 5.4. Выводы по пятой главе .....                                                                                                     | 164 |
| ВЫВОДЫ.....                                                                                                                          | 167 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                               | 170 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. ФРАГМЕНТЫ ПРОГРАММНОГО КОДА<br>КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВА-<br>НИЯ .....                           | 187 |
| А1. Программный код процедуры идентификации начальной ситуации<br>чрезмерного сближения.....                                         | 187 |

|                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| А2. Программный код расчета параметров стратегии экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения..... | 210 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения результатов диссертации.....                                                      | 240 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Современное мировое сообщество уделяет все большее внимание обеспечению безопасности судоходства путем повышения его надежности и уменьшения вероятности аварийных случаев, особенно в стесненных районах плавания судов. Интенсивное судоходство и навигационные препятствия в значительной мере осложняют судовождение в стесненных водах и создают повышенные риски возникновения аварийных ситуаций. В случае опасного сближения и возникновения угрозы столкновения судов Международные правила предупреждения столкновений судов (МППСС-72) определяют характер маневра их расхождения. В стесненных водах возникают ситуации чрезмерного сближения судов, когда для предотвращения столкновения каждое из судов должно согласно МППСС-72 предпринять маневр расхождения. В такой ситуации маневрирование судов не координируется МППСС-72, и стратегии расхождения судов не согласованы, что затрудняет выбор безопасных маневров расхождения.

Вопросы экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения исследованы недостаточно, хотя проблема очень актуальна. Анализ литературы по проблеме предупреждения столкновения судов показал, что проблеме чрезмерного сближения судов посвящены всего несколько работ, которые касаются только некоторых ее частных аспектов.

Формализация взаимодействия судов при чрезмерном сближении затруднена неопределенностью их поведения в такой ситуации.

Существующие в настоящее время методы формирования стратегий расхождения судов не учитывают ситуации чрезмерного сближения, что обуславливает актуальность и перспективность данного диссертационного исследования.

### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Работа выполнялась в соответствии с положениями Транспортной стратегии Украины на период до 2020 г. (распоряжение Кабинета Министров Украины от 20.10.2010 г., №2174-р), Стратегии развития морских портов Украины на период до 2015 г. (распоряжение Кабинета Министров Украины от 16.07.2008 г. №1051-р с изменениями, внесенными согласно с распоряжением Кабинета Министров Украины № 1561-р от 07.10.2009 г.), решение Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16.05.2008 г. "О мероприятиях по обеспечению развития Украины как морского государства" и Указу Президента Украины от 20.05.2008 г. №463/2008; а также тесно связанна с научно-исследовательской работой Одесской национальной морской академии, а именно с госбюджетной научно-исследовательской работой "Разработка методов обеспечения безаварийного плавания судов" (№ ГР 0111U001610), в которых соискатель выполнил отдельный раздел.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является безопасное расхождение судов при чрезвычайном сближении.

Для этого принята гипотеза о возможности выбора безопасного маневра уклонения от цели, опасно приближающейся, на принципах лучшего гарантированного результата с учетом необходимых и достаточных условий.

Главной задачей исследования является разработка алгоритма безопасного маневра расхождения при чрезвычайном сближении судов с угрозой столкновения.

Для решения главной задачи были рассмотрены следующие задачи:

- идентификация и формализация ситуации чрезмерного сближения судов;
- разработка метода определения множества параметров стратегии экстренного расхождения судов и выбор оптимального;

- учет ограничивающих факторов при выборе стратегии экстренного расхождения.

**Объектом исследования** является процесс маневрирования судов.

**Предметом исследования** является расхождение судов.

**Методы исследования:**

- дедукции – при анализе основных подходов решения проблемы безопасности судовождения;
- системный анализ – для декомпозиции главной задачи диссертации на независимые составные задачи и для ее методологического обеспечения;
- управления судном – для определения необходимых зависимостей, описывающих ситуацию сближения и стратегию расхождения;
- теории дифференциальных игр - для определения маневра уклонения судна в условиях неопределенного поведения цели;
- математического программирования – для выбора оптимальных параметров экстренной стратегии расхождения.

**Научная новизна полученных результатов** заключается в том, что в зависимости от минимальной дистанции до ближайшего препятствия гарантированно безопасное расхождение судов обеспечивается полученным методом выбора экстренной стратегии с учетом неопределенности в поведении цели; мешающих факторов; динамики судна и структуры маневра выхода на программную траекторию движения.

Впервые получены следующие научные результаты:

- способ определения ситуации чрезмерного сближения с учетом времени до возможного столкновения, формы и размеров выбранной зоны безопасности, а также соотношение максимальной дистанции наименьшего сближения и минимально допустимой;

- процедура определения структуры маневра экстренного расхождения, которая достигается генерацией стратегий маневрирования, в зависимости от текущей относительной позиции, причем такая структура в общем виде содержит этапы экстренного уклонения судна и выхода на его программную траекторию движения, или, в зависимости от начальной ситуации чрезмерного сближения, судно может предотвратить столкновение применением циркуляции;

- процедура поодиначного и совместного учета наличия навигационных препятствий и судов, мешающих при расчете курса уклонения экстренного расхождения, на что влияют относительные позиции опасного судна и мешающего судна, а также их параметры движения с учетом критерия максимума времени до возможного столкновения.

Усовершенствован способ расхождения судна в случае, когда цель имеет преимущество в скорости на попутных курсах, а судно предотвращает столкновение, выполняя циркуляцию от опасной цели и пропуская ее.

Получил дальнейшее развитие метод расхождения судов с учетом поворотливости судна в ситуации чрезмерного сближения.

**Практическое значение полученных результатов** диссертационной работы определяется тем, что ее основные результаты могут быть использованы судоводителями в ситуациях чрезмерного сближения, разработчиками в новых поколениях САРП, имеющих функции системы поддержки решений при расхождении, а также алгоритмы исследования могут быть применены при создании современных морских тренажеров.

Результаты диссертационного исследования внедрены: в судоходной компании „Бурбон Оффшор Украина” – для расчёта экстренного манёвра расхождения при чрезмерном сближении судов на судах компании (акт от 08.12.2015 г.), крюинговой компании „СМА ШИПС УКРАИНА” – для



предрейсовой подготовки судоводителей (акт от 16.12.2015 г.), в частном высшем учебном заведении „Институт последипломного образования „Одесский морской тренажёрный центр”” – для повышения качества подготовки судоводителей (акт от 22.12.2015 г.), в научные исследования ОНМА (акт от 07.02.2013 г.), а также в учебных программах дисциплин ОНМА на кафедре «Управления судном» в разделах обеспечения мореходной безопасности (акт от 25.12.2015 г.).

**Личный вклад соискателя.** Все результаты диссертационной работы выполнены соискателем самостоятельно без соавторов.

Соискатель сформулировал цель и главную задачу диссертационного исследования, используя системный подход, выполнил обзор и анализ литературных источников по проблеме повышения безопасности судовождения, обосновал методологическое обеспечение диссертации, произвел натурные наблюдения поворотливости судна, обработал экспериментальные данные, определив параметры поворотливости судна, разработал имитационную модель выбора маневра экстренного расхождения и выполнил имитационное моделирование, произвел интерпретацию полученных результатов исследований и получил новые научные результаты. Сам написал диссертацию и автореферат. Самостоятельно выполнил отдельный раздел в госбюджетной научно-исследовательской работе с государственной регистрацией.

Из научных работ, опубликованных в соавторстве, в диссертации использованы только те положения, которые принадлежат автору лично: анализ проблемы, формулировки цели и задач исследования [146], оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения [160], детальное изложение способа определения параметров экстремального маневра расхождения судов при их чрезмерном сближении [167].

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертационной работы докладывались на четырех научно-технических конференциях:

- „Забезпечення безаварійного плавання суден”, 16-17 ноября 2011 г., г. Одесса;
- „Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека”, 14-15 ноября 2012 г., г. Одесса;
- „Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений”, 2-4 октября 2013 г., г. Севастополь.
- «Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека», 19-20 ноября 2013 г., г. Одесса.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований автором опубликованы 14 научных работ (из них 11 единолично), в частности: в научных профильных изданиях, которые входят в перечень МОН Украины — 7 научных статей [146-148, 160, 162, 149, 150]; в зарубежных научных профильных изданиях — 2 научные статьи [151, 161] и 1 монография [167], в сборниках материалов научных конференций - 4 доклада [163-166].

**Структура работы.** Работа состоит из введения, пяти глав, приложений, списка использованных литературных источников 167 наименований. Общий объем работы – 244 стр., в том числе: 169 стр. основного текста, 58 стр. приложений, 17 стр. списка литературы, содержит 50 рис., 7 табл.

## ГЛАВА 1

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ПРОБЛЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ  
СУДОВОЖДЕНИЯ И ВЫБОР ОСНОВНОГО НАПРАВЛЕНИЯ  
ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ1.1. Обзор и анализ литературных источников по решению проблемы  
обеспечения безаварийного плавания судов

Проблема обеспечения безаварийного плавания судов, как показал обзор и анализ литературных источников, решается по следующим направлениям:

- предупреждение столкновений судов;
- обеспечение требуемой точности определения места судна;
- использование современных информационно-управляющих технологий и средств для обеспечения безопасности судовождения;
- совершенствование методов управления судном в стесненных районах плавания, в частности использованием систем управления движением судов (СУДС).

Проблеме обеспечения безопасности судовождения в целом посвящены работы известных ученых [1-13].

В работе [1] изложены основные проблемы управляемости и управления морских судов, а в работах [2-5] рассмотрены вопросы расчета инерционных характеристик судов, а также их переходных процессов движения.

Проблема управления судами при расхождении на небольших дистанциях рассмотрена в работах [6-8].

Явление присасывания судов описано в работах [6-8], в этих же работах приведены меры по его предупреждению.

При плавании в каналах и на мелководье, как показано в работе [6], в случае движения судов параллельными курсами на незначительных

расстояниях между ними возможна потеря их управляемости и столкновение. Это возникает из-за появления значительных по величине гидродинамических поперечных сил и моментов рыскания, которые превосходят по величине управляющие моменты рулевого устройства. Для предупреждения появлений таких ситуаций требуется выбирать достаточные траверзные расстояния между судами и снижать скорость их хода.

В работах [7,8] отмечается, что согласно статистическим данным аварии от столкновений зачастую происходят вследствие явления «присасывания» судов, которые перемещаются друг относительно друга на небольших расстояниях.

В работе [7] показано, что явление взаимодействия судов при совместном движении хорошо изучено и это позволяет установить наиболее опасные фазы процесса взаимодействия и предложить меры по предотвращению их столкновения.

Как показано в работе [8], при изучении процесса взаимодействия расходящихся судов гидродинамическую поперечную силу и гидродинамический момент можно считать зависящими только от взаимного расположения судов в рассматриваемый момент времени. Указывается, что такая постановка гидродинамической задачи возможна, и ее решение в принципе осуществимо.

Общие вопросы навигационной безопасности судовождения изложены в работе [9].

Применение современных систем автоматического управления движением судна для обеспечения безопасности судовождения отражено в работе [10], а в работе [11] изложены основные вопросы и пути их решения проблемы безопасного расхождения судов.

Основные вопросы теории и практики управления судов в различных ситуациях и вопросы предупреждения столкновения судов рассмотрены в работах [12, 13].

Центральной проблемой обеспечения безопасного плавания является предупреждение столкновений судов, причем проблема особенно актуальна в прибрежных районах интенсивного судоходства.

Путям решения указанной проблемы за последние десятилетия посвящено большое количество научных работ. В обзоре рассмотрены лишь те работы, которые отражают основные направления решения проблемы безопасного расхождения [14-102].

Университет отрасли морского транспорта (Китай), как указывается в работе [14], разработал систему поддержки принятия решений управления морским судном, которая минимизирует риски столкновения судов. Применение системы представляется актуальным, поскольку в настоящее время не менее 60% всех аварий с морскими судами имеют основной причиной столкновение.

В работах [15-17] отмечается, что задача выбора оптимального маневра расхождения очень сложная, так как процесс управления движением судна является многомерным с нелинейными и нестационарными характеристиками, причем задача носит игровой характер.

Основные направления обеспечения безаварийного плавания судов отражены в работе [18].

Вопросы расхождения с несколькими судами в ситуации опасного сближения рассмотрены в работах [19, 20].

В работе [21] рассмотрены перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания с целью предупреждения столкновений судов.

Правила по предотвращению столкновений судов в море разбираются в работе [22], в частности комментируются положения пунктов 2 и 3 статьи 17 этих Правил. При этом обсуждается, возможно ли применение принципа — Principle of Confidence при общих действиях (Cooperated action) в ситуации уклонения от столкновения при разборе случая в Морском арбитражном суде. Из-за того, что размеры судов и их скорости увеличились и требуется

больше времени и большее расстояние до их полной остановки предлагается, что пункт 2 статьи должен иметь преимущество перед пунктом 3 статьи.

Различные аспекты проблемы оценки ситуации расхождения судов рассмотрены в работах [23-26], а в работах [27-31] представлены подробные исследования ситуации опасного сближения пары судов, причем рассмотрены условия существования множества безопасных маневров расхождения и выбор оптимального маневра.

В работе [32] рассмотрена задача расхождения судна с несколькими целями с учетом требований МППСС-72 в рамках теории оптимального управления. В модели учитываются инерционные характеристики судна, и решение задачи производится с помощью двух приближений. В алгоритме выбора оптимального безопасного маневра расхождения судна допускается постоянство курсов и скоростей движения окружающих целей, с известными предельно-допустимыми дистанциями кратчайшего сближения.

В качестве критерия оптимальности выбрана проекция вектора скорости судна на направление начального движения. Оптимальный маневр предлагается рассчитывать методами линейного программирования. Формализация требований МППСС-72 производится введением логической функции пяти двоичных переменных, которые отражают относительное положение оперирующего судна и цели.

В дальнейшем улучшение модели производилось в направлении использования методов позиционных дифференциально-разностных игр для нескольких игроков [33]. В случае наличия навигационных опасностей накладываются ограничения на фазовый вектор динамической системы. Ограничения имеет и стратегия судна, причем ограничения учитывают условия безопасности расхождения с другими судами, требования МППСС-72 и возможности судна. В работе дифференциальная игра преобразуется к многошаговой игре, для чего делается допущение о постоянстве стратегий и параметров движения встречных судов в течение одного шага на заданном интервале времени.

Проблема обеспечения безопасного выхода судов на программные траектории движения после безопасного уклонения рассмотрена в работах [34-36].

В работах [37, 38] показано, что судовые подсистемы управляют одним из подпроцессов движения судна, который описывается дифференциальными уравнениями кинематики или динамики судна, причем к таким подпроцессам относятся стабилизация судна на курсе или траектории, точное управление судном на малых скоростях в порту, динамическая стабилизация судна при бурении или положение танкера при грузовых операциях в море и корректировка скорости судна.

Оценка риска столкновения для опасно сближающихся судов в районе с навигационными опасностями рассмотрена в работе [39]. Наличие навигационных опасностей в районе маневрирования расходящихся судов порождает верхнюю допустимую границу для времени уклонения судна от опасной цели. В такой ситуации при уклонении от цели судно может перемещаться в направлении навигационной опасности, и до поворота на программную траекторию может оказаться на мели.

В работах [40, 41] изложены вопросы координации судов при расхождении, а особенностям расхождения судна с целью изменением скорости при низменном курсе посвящены работы [42-44].

В работах [45-52] изложен системный подход к решению задачи безопасного расхождения судов, причем показаны возможности применения методов теории динамических и управляемых систем и разработка концепции гибких стратегий расхождения судов.

Метод *neural fuzzy system* для оценки риска столкновения судов, полученный на основе результатов последних исследований технических проблем морского судоходства, предлагается в работе [53]. Новый тип системы *neural network system* может быть создан с учетом преимущества искусственной нейронной сети в системе *fuzzy*. Некоторые проблемы, которые трудно решались традиционными методами *fuzzy*, могут быть

разрешены легко и эффективно в новой системе. Полученные результаты показали, что новый метод более эффективен по сравнению с традиционными методами.

Понимание содержания автономной судовой системы уклонения от столкновения СА (Collision avoidance) и её теоретическое обоснование поясняется в работе [54]. Совместно с алгоритмом по уклонению от столкновения рассмотрены дополнительно познавательные возможности человека и Правила уклонения от столкновения COLREG. С учетом факторов, влияющих на процесс уклонения от столкновения, рассматриваются требования к автономной навигации. Эти факторы способен оценить человек и осуществить управление судном на удовлетворительном уровне, однако принятые решения являются субъективными и могут быть ошибочными, в результате чего может возникнуть столкновение.

Исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены в классическом или компьютерном категориях. Классическая техника основана на математических моделях и алгоритмах. Программы основаны на использовании искусственного интеллекта AI (Artificial Intelligence). Областью AI для систем автономного уклонения от столкновения, рассматриваемых в статье, являются эволюционные алгоритмы, логика фуззи, экспертные методы, нейросеть NN (Neural networks) и комбинация этих методов — гибридные системы (hybrid system).

Как указывается в публикации [55], СУДС как правило не имеет технических возможностей контролировать движение судов на участках скопления судов для обеспечения безопасности судоходства. В статье как дополнение к средствам возможности уклонения от столкновения системы СУДС/АИС предложен новый фуззи-метод. Ввод данных СУДС совместно с данными АИС в Морскую географическую информационную систему MGIS (Marine Geographic Information System) дает платформу для расчета сведений об области нахождения судна, инерционных сил, действующих на судно, а также используется для определения модели защитного круга и опасного



индекса. Используя аналитическую модель морской системы GIS может быть получено точное прогнозирование времени столкновения и позиции,. Предложенный метод дает оператору СУДС возможность принятия решений по предупреждению столкновения судов.

Как показано в работе [56], столкновения судов происходят сразу же перед входом в узкость и после выхода из неё; сразу же перед подходом к препятствию и после огибания его. В работе определена зависимость числа столкновений от количества судов в группе, её конфигурации, соотношения ширины группы и ширины узкости, а также отстояния намеченной точки пересечения курса группы судов с центральной осью узкости от входа в узкость.

Работы [57-59] посвящены учету навигационных опасностей при выборе безопасного маневра расхождения судна с целью в ситуации опасного сближения.

Нетрадиционный подход заблаговременного определения ситуации сближения судов, который заключается в нахождении моментов времени одновременного выхода их на одинаковые широты и одинаковые долготы, учитывая информацию о движении судов с помощью АИС, обсуждается в работе [60]. Если эти моменты времени совпадают, то неизбежно столкновение судов, и сразу по значению их получаем время до столкновения. Если эти моменты времени не равны, то суда не смогут одновременно выйти в одну и ту же точку и столкновение не состоится. Произведен анализ различных случаев сближения судов и определены признаки того или иного вида сближения.

В монографии [61] освещен ряд особенностей задачи расхождения судов в море, приведены результаты разработки и анализа метода предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути.

В публикации [62] приведен анализ достоверности разных методов прогнозирования развития опасной ситуации сближения судов.

В работах [63-69] рассмотрен расчет параметров маневра безопасного расхождения судов с учетом их инерционности, при этом используются различные модели поворотливости судна.

В статье [70] рассмотрена ситуация обгона оперирующим судном цели. Методами оптимального управления получены формулы расчета оптимальной траектории обгоняющего судна по критерию минимума времени обгона и выхода судна в заданную точку.

Практическая реализация предлагаемых современных теоретических концепций создания систем синтеза безопасного маневра, как отмечается в работах [71-74], встречает значительные затруднения в части синтеза множества безопасных маневров расхождения, удовлетворяющих накладываемым ограничениям по безопасному расхождению с целями, учету навигационных опасностей и мешающих судов, а также не противоречат МППСС-72. В данных работах предложен способ индивидуального учета каждого из перечисленных ограничений, после чего был разработан метод их совместного учета. Причем стратегией расхождения является маневр изменением курса, который может содержать несколько участков уклонения и участка возвращения на заданную траекторию движения.

В статье [75] показано, что для повышения безопасности и эффективности управления судами разработана система ATSM (Autonomous Traffic Management System), в которой первоначально используются данные АИС, получаемые с судна — тренажера Shioji Maru и данные о перемещении судов в Токийском заливе, получаемые по радиолокационным наблюдениям для оценки условий судоходства. Следующим шагом является вычисление оптимальных траекторий для всех судов в районе по системе ATSM, используя программы Forward Dynamics Programming. На пути имеется много опасных сближений, вызванных одновременным входом судов, свободно выбирающих путь в зоне разделения на входе в Токийский залив, где часть судов движется в южном направлении из Токио/Чиба, а часть судов движется в обоих направлениях из района Иокогама. Оптимальный путь,

предлагаемый по системе ATSM, позволяет сократить время прохода на 3,88% при входе в Токийский залив.

Модель US-model, являющаяся методом оценки потенциального риска столкновения рассмотрена в работе [76]. Стандартная модель оценки риска столкновения была усовершенствована с учетом малых препятствий на пути судна, такие как опоры мостов. Усовершенствованная модель дает возможность более точно оценить опасность ситуации для судна. На предлагаемом тренажере моделируется ряд навигационных ситуаций. По результатам экспериментов рассмотрен риск столкновений для судов длиной менее 80 м и при углах пересечения курса другого судна под углом 135 град. Величина интервала между судами может различаться при использовании стандартного метода или по усовершенствованной модели.

Оценочная система действий по уклонению от столкновения с одиночным судном рассмотрена в работе [77]. В статье описывается трехуровневая моделирующая схема, базирующаяся на технологии синтеза. Модули, описывающие трассу движения судна и параметры движения, базируются на преобразовании координат и геометрической модели. По этим данным определяются идентификация маневрирования, оценка риска столкновения и этапы действий по уклонению от столкновения.

В работе [78] для судов, следующих встречными курсами прямо друг на друга, сделана попытка определить минимально допустимую дистанцию между судами для осуществления маневра безопасного расхождения на заданном расстоянии кратчайшего сближения с учетом маневренных характеристик судов.

В работе [79] отмечается, что крупнейшие морские катастрофы, как, например, гибель "Адмирала Нахимова", произошли по причине столкновений, которые являются одним из наиболее опасных аварий, могущих привести к гибели обоих судов с пассажирами и экипажем. Существующая подготовка судоводителей направлена в основном на предотвращение столкновений судов в море, как это требуют МППСС-72. От

судоводителя требуется умение правильно выбирать решения в чрезвычайных ситуациях.

В работе [80] показано, что аналитический метод определения безопасных курсов и скоростей более эффективен, чем методы перебора и комбинированные методы при расчете на ЭВМ маневра расхождения судов, а в работе [81] указывается, что одним из фундаментальных действий при уклонении от столкновения является измерение азимутального пеленга цели, причем безопасность собственного судна зависит также от скорости изменений курсового угла. Дистанция до цели является важнейшим фактором при расчете по числовой формуле. В заключении указано, что выражение, использующее время (ТСРА), имеет большее значение, чем расстояние до цели.

Модель, позволяющая оценить риск столкновения высокоскоростных судов в порядке значимости, представлена в статье [82]. По основной модели прогнозируется степень риска в результате поворота рулей, изменения скорости и величины дистанции кратчайшего сближения, что позволяет вахтенному штурману определить, где может случиться столкновение и делать вывод о степени риска.

Вопросам вычисления предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения и разработки аналитического аппарата определения реализовавшейся области взаимных обязанностей расходящихся судов посвящены работы [83-85].

В работе [86] рассмотрены сложные ситуации в стесненных водах, когда ограниченная пропускная способность восприятия информации судоводителем не дает возможности произвести переработку ее необходимого объема, и затрудняет принятие корректных решений, особенно в ситуациях опасного сближения.

Возможные критерии установления факта сближения судов противоположными курсами прямо друг на друга проанализированы в работе [87] и показано, что ни по одному из них не возможно уверенно судить о

сближении судов прямо друг на друга, так что в реальности следует ориентироваться на рекомендации правила 14 МППСС-72, т. е. заблаговременно отворачивать вправо.

В статье [88] на основе исследований по автоматизации маневром уклонения судна от столкновения, электронных карт и информационных систем, предложен новый тип автоматизированной системы VICAN (Vessel Intelligent Collision Avoidance Navigator). Поясняются состав, функции и рабочий процесс системы VICAN и новые пункты для дальнейшей разработки.

Модель автоматизированной системы предупреждения столкновений судов, которая может использоваться для построения базы знаний, проработана в статье [89]. Также предложен алгоритм модели и программа, имитирующая сближения судов. Результаты имитации доказывают осуществимость, применимость и эффективность модели.

В статье [90] указывается, что глобальный контроль систем управления стал слишком дорогостоящим и неэффективным, так как он требует большого числа измерений вектора управления и определения статуса процесса. Динамика судна описывается нелинейными и нестационарными характеристиками, а управляющие воздействия зависят от течения, ветра и волнения моря.

Вопрос выбора оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении рассмотрен в публикации [91].

Формализация МППСС с помощью алгебры логики предложена в работе [92]. Автор рассматривает три области на плоскости времени и дистанции кратчайшего сближения. Каждая из областей, при попадании в нее судна, характеризует предписанное МППСС поведение одного судна при встрече с другим.

В публикации [93] контроль и управление движением судна рассматривается, как многоуровневая система, которая управляет системами

судна при его переходе между портами, причем судовым подсистемам поставлены в соответствие слои системы контроля.

В работах [94-96] предложено решение проблемы безопасного расхождения судов с помощью метода нелинейной интегральной инвариантности, причем рассмотрена возможность применения двухэлементных безопасных маневров расхождения, представляющих собой одновременное изменение курса и скорости или последовательное изменение курса судна через некоторый интервал времени. Также в указанных работах рассмотрены вопросы иерархической структуры целей эргатической системы управления судном с возможной формализацией МППСС-72.

Метод расчета дистанции и времени кратчайшего сближения по наблюдениям со своего судна предложен в статье [97], который позволяет непосредственно получить информацию о величине риска столкновения своего судна с судном-целью, что обеспечивает вахтенного офицера и экспертную систему по предотвращению столкновения эффективным средством для уточнения принятых решений по уклонению от столкновения.

Приложения игровых подходов в навигационных математических моделях безопасного управления судами и методов теории игр для автоматизации регулирования процессов перемещения судов рассматриваются в работе [98]. На начальном этапе было дано определение контрольной цели, затем выполнено описание основной модели и аппроксимированной модели многоступенчатой позиционной многошаговой матричной игры безопасного управления судна в ситуациях опасного сближения.

В работе [99] рассмотрены соотношения между истинными и относительными параметрами движения оперирующего судна и цели для различных случаев. В зависимости от начального относительного положения и параметров движения маневрирующих судов получены формулы зависимости допустимых областей их безопасных курсов и скоростей.

В работе [100] освещается проблема учета маневренных характеристик судна для обеспечения безопасности плавания в стесненных условиях, а в работе [101] изложен инверсный метод планирования траектории движения объектов управления, согласно которому в кинематические уравнения движения объекта вводится отрицательное время, а в качестве начальных условий выбирается желаемое финальное состояние объекта. Решение уравнений дает момент времени начала маневра и его параметры.

В работе [102] рассматривается алгоритм автоматического расхождения встречных судов на основе локально-оптимального слежения за движущейся фиктивной точкой.

Проблема обеспечения безопасности судовождения путем повышения точности контроля места судна рассмотрена в работах [103-114].

В работах [103-108] был решен ряд вопросов, посвященных данной проблеме, в которых были изложены основы теории погрешностей [103], рассмотрена зависимость между точностью и надежностью навигации [104], разработаны методы снижения влияния систематических и случайных погрешностей измерений на точность обсерваций [105], предложен новый подход к модели формирования случайных величин навигационных измерений, который отличается от модели предложенной для обоснования нормального закона распределения вероятностей случайных величин [106]. Работы [107,108] посвящены погрешностям измерений навигационных параметров.

Исследование возможности применения исходных поправок станции Dziwnow в районе порта Щецин при использовании радионавигационной системы DGPS проведено в работе [109]. Исследование показало целесообразность использования таких поправок. Измерения, которые были проведены во время исследований, и полученные результаты будут способствовать более широкому применению системы DGPS для навигационных целей в порту Щецин.

В работе [110] получены аналитические выражения для оценки вероятности навигационной безопасности плавания при наличии неравноточных коррелированных погрешностей положения кромок фарватера. Достоверность полученных зависимостей доказана методом статистического моделирования.

В работе [111] произведен анализ различных подходов для оценки точности определения места судна с помощью приёмника спутниковой радионавигационной системы. Показано, что классический метод оценки, основанный на предположении о распределении случайных погрешностей определения широты и долготы по закону Гаусса не является корректным и требует альтернативного подхода.

В работе [112] приведены модели для оценки вероятности безопасного плавания в стесненных районах, в которых стесненность выражается в виде распределения частот боковых расстояний от середины фарватера до его границ, причем вероятность безопасного плавания заданным маршрутом рассчитывается при известной плотности распределения погрешности бокового отклонения судна и длительности маршрута.

Современные исследования [113] показали, что для описания систем зависимых случайных величин можно использовать обобщенное распределение Пуассона с базовым нормальным распределением.

Дифференциальные методы корректируют погрешности в определении местоположения по системе GPS, как показано в работе [114], но поправки могут оказаться недостаточными с течением времени и с увеличением расстояния пользователя системы от станции нулевого отсчета. Погрешности возрастают при увеличении расстояния навигационного приемника системы DGPS от базовой станции, причем погрешность составляет 1 м на каждые 150 км расстояния от базовой станции. Чтобы оценить реальную ошибку приемника шесть таких приемников были размещены вдоль португальского побережья через 50 миль к северу и югу от станции отсчета Sagres Broadcast Station. Полученные данные показали, что реальная погрешность позици-



онирования составляет 0,22 м на каждые 100 км расстояния от станции отсчета, что меньше теоретического значения. Ошибки в позиционировании могут быть выше в портах при отсутствии прямой видимости спутника.

Вопросы моделирования движения судна в стесненных условиях рассмотрены в публикациях [115-123]. Они посвящены вопросам выполнения судами различных маневров, способствующих более эффективному и безопасному плаванию.

В работе [115] для различных типов морских подвижных объектов, движущихся с постоянной скоростью, предлагается унифицированная математическая модель движения в виде нелинейного матричного дифференциального уравнения, анализ которого определяет требования к системам управления морскими подвижными объектами, формулирующимися как задачи оптимального управления.

Работа [116] содержит математические модели оптимизации параметров водных путей в виде целевых функций и результаты оптимизации имитационным моделированием поворота на фарватере Свиноуйсце - Щецин, а также западного паромного причала Центрум в Свиноуйсце.

Задача синтеза управления движением судна при стабилизации на траектории по точностному и комплексному экономическому критериям с учетом нелинейной модели судна и возмущений формализована в работе [117]. Обосновывается применение линейно-квадратичного метода, причем предлагается идентификация математической модели судна с использованием многоальтернативной фильтрации.

Разработке высокоточного управления судна в стесненных условиях на криволинейных участках движения посвящены работы [118, 119].

Процесс моделирования движения судов в скоплении описывается в работе [120] и по полученным результатам предложены рекомендации для определения оптимальных параметров поведения судов в скоплении, а в работе [121] рассмотрен вопрос о влиянии отстояния рулевого органа от центра масс судна на связь между углом его дрейфа и угловой скоростью.

Публикации [122, 123] посвящены вопросам формирования судовой безопасной зоны, получена математическая модель, содержащая системный учет существенных факторов, которая ориентирована на практическое использование в процессе плавания судна в различных условиях.

В работах [124-128] освещено обеспечение безопасности мореплавания с помощью интегрированных систем ходового мостика, причем рассмотрены принципы построения и состав таких систем, их место в общей комплексной системе управления судном. Приведены требования, предъявляемые к данным системам ходового мостика.

Как отмечается в работе [124], значительную роль в обеспечении безопасности судовождения играют навигационно-информационные системы (НИС) судна. В работе подробно представлены сведения о них и электронных картах, приведены характеристика составных частей, функциональных возможностей и рассмотрены особенности отображения информации НИС. Произведен анализ современных датчиков оперативной навигационной информации, а также указываются ограничения и недостатки рассматриваемых систем.

Основные сведения о бортовых автоматизированных системах для оценки, прогноза и оптимизации мореходности изложены в работе [125]. Освещены методы прогноза мореходности, а также рассмотрены принципы выбора решений для обеспечения безопасности в штормовых условиях. Освещены особенности отображения информации, приведены характеристики функциональных возможностей таких средств.

Проблеме совершенствования методов управления судном в стесненных районах посвящены работы [129-140].

В большинстве современных систем управления сложными динамическими объектами для формирования управляющих воздействий используется модель управляемого объекта, отмечается в работе [129]. Для

получения модели используются нейронные сети. Утверждается, что морские подвижные объекты и, в частности, морские суда относятся к классу т. н. неопределенных объектов.

По данным статистики, как указывается в работе [130], в узкостях, проливах, на рейдах и портовых акваториях происходит не менее 90% общего числа навигационных аварий, и в первую очередь крупнотоннажных судов. Основным источником ошибок приводящих к авариям является субъективная оценка ситуации до начала маневра и после его реализации. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при практическом построении математических моделей судов, а также при построении компьютерных тренажеров швартовок в море в сложных условиях или маневрировании на гибких связях.

Теория управления динамическими объектами с переменными параметрами с позиций синергетики систематически изложена в работе [131]. В работе рассмотрены нейросети и их архитектура, описаны традиционные системы управления и управление на основе нечеткой логики. Приведены примеры нейронного управления и результаты синтеза нейросетевых систем управления.

Способ выполнения анализа данных нестационарных перемещений корпуса морского судна предложен университетом отрасли морского транспорта (Япония), который описан в работе [132]. Задача решена способом авторегрессионного моделирования с варьируемыми во времени значениями коэффициентов.

В работе [132] рассматриваются вопросы интеграции сенсоров автоматической идентификационной системы (АИС) в системы управления движением судов (СУДС). Обсуждаются преимущества, возникающие при интеграции данных судовых АИС транспондеров в СУДС.

В публикации [133] указывается, что широкое внедрение современных методов и средств комплексной автоматизации на судах обеспечивает рост их провозной способности, сокращение эксплуатационных расходов,

снижение уровня аварийности за счёт исключения субъективных факторов из процесса управления судном.

В работе [134] проведена оценка грубости принятой к исследованию математической модели путем исследования влияния дополнительных нелинейных членов на режимы движения судна. Рассмотрена зависимость бифуркационной картины от изменения ветра. Введение интеллектуальной составляющей в алгоритм авторулевого позволило не только существенно повысить его эффективность, но и преодолевать некоторую степень неуправляемости.

Вопросам разработки системы управлений курсом судна авторулевым с использованием принципов нечеткой логики посвящена статья [135], в которой рассматриваются вопросы адаптации системы, учитывающие сложную динамику и нелинейности математической модели судна как объекта управления при случайно изменяющихся условиях работы системы.

В работе [136] введено понятие коэффициентов влияния параметров математической модели судна на его маневренные характеристики. Рассчитаны коэффициенты влияния для радиуса установившейся циркуляции судна, выдвиг, начальной поворотливости судна и всех характеристик одерживания.

Управление судном в экстремальных условиях требует расчета влияния всех внешних сил, имеющих отношение к управлению судном в сложных условиях отмечается в работе [137]. В статье представлены основные принципы оценки внешних сил на управление судном и возможность использовать эти силы в экстремальных условиях с учетом необходимости использования буксиров.

В работе [138] представлены программа и результаты статистического моделирования процесса движения судов по линейному фарватеру. На первом этапе получены основные результаты, которые касаются зависимостей количества ситуаций опасного сближения от различных параметров, характеризующих навигационные условия плавания.

Структура системы управления движением скоростных судов, состоящей из стратегического и исполнительного уровней, предлагается в работе [139]. Приводится структура двухуровневой системы, определяется ее состав на примере двух типов скоростных судов, описаны подходы к проектированию локальных подсистем управления.

В работе [140] рассматривается нелинейная задача управления морским объектом в целях его удержания в заданной точке и с заданным курсом. Синтезируется алгоритм нелинейного фильтра Калмана с локальными итерациями для получения текущих оценок состояния системы, которые используются при формировании требуемого закона управления. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие возможность удержания судна в пределах 4-8 м от заданной точки при стабилизации по курсу не хуже  $2^\circ$ .

Работы [141-145] посвящены вопросам оборудования узкостей системами управления движением судов.

В статье [141] описывается проектирование системы информации и управления судоходством VTMISS (Vessel Traffic Management & Information System) в турецких проливах. В статье указывается, что моделирование движения судов может повысить безопасность судоходства при наличии переменных течений в стесненных водах.

На центры по управлению движением судов СУДС возложена обязанность по обеспечению безопасности судоходства и защиты окружающей среды сообщается в публикации [142]. Роль центров СУДС изменится со вступлением в силу ISPS Кода, смещаясь в сторону контроля безопасности судна. Фирмы Norcontrol IT (Норвегия) и Simrad Mesotech Ltd (Канада) разработали новое оборудование для удовлетворения требованиям Кода, с использованием системы АИС.

В публикации [143] сообщается, что в порту Шанхай ведущая германская фирма в области электроники и системотехники STN ATLAS Electronik разработала и внедрила систему контроля и управления движением судов VTS. Оптимизация беспрепятственного

судоходства и обеспечение безопасности достигнуто целенаправленным контролем и управлением движением судов VTS, что исключительно важно для п. Шанхай, акваторию которого ежедневно посещает не менее 1000 судов. VTS располагает радиолокационной станцией, которая может различать в радиусе 40 миль до 300 целей.

Возможность использования подводного кабеля в качестве эталона траектории движения судна при плавании в стесненных условиях рассматривается в публикации [144]. Отмечается, что использование подводного кабеля наиболее целесообразно на стесненных участках закрытых акваторий с очень малым запасом глубин в ситуации недостаточно эффективного применения створов при высокоточной проводке по криволинейной траектории.

Германская фирма Atlas Elektronik заключила договор о поставке в порт Китая системы проводки судов (VTS) [145], которая предназначена для контроля и проводки в порт сухогрузов, а также других судов дедвейтом до 100 тыс. т. Систему VTS составляют ступенчатая радарная система фирмы Atlas, две установки Close Circuit TV, имеющие связь со специальной лоцманской станцией и AIS для передачи информации на судно.

В работах [146-151, 160-167] обсуждаются вопросы экстренного маневрирования судов для расхождения в ситуации чрезмерного сближения.

## 1.2. Обоснование основного направления диссертационного исследования

Как показал выполненный обзор и анализ литературных источников, основными направлениями обеспечения безопасности судоходства и снижения аварийности судов являются:

- предупреждение столкновений судов, что особенно актуально в стесненных районах плавания;

- обеспечение требуемой точности определения места судна, как использованием новых аппаратных средств, так и совершенствованием методов обработки навигационной информации;
- использование современных информационно-управляющих технологий и средств для обеспечения безопасности судовождения, включая разработку и использование электронных комплексов судовождения;
- совершенствование методов управления судном в стесненных районах плавания, в частности использованием систем управления движением судов.

Наиболее актуальной проблемой обеспечения безопасности судовождения является предупреждение столкновения судов при их опасном сближении. Эта проблема особенно актуальна при плавании судов в стесненных водах, специфическими особенностями которых являются повышенная интенсивность судоходства и большое количество навигационных опасностей, затрудняющих безопасное расхождение судов.

Именно в стесненных водах возникают ситуации чрезмерного сближения судов, когда для предотвращения столкновения каждое из судов должно согласно МППСС-72 предпринять маневр расхождения. Следует отметить, что вопросы экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения исследованы чрезвычайно недостаточно, хотя проблема очень актуальна. Так, при анализе литературы по проблеме предупреждения столкновения судов только четыре работы [11, 12, 34, 47] посвящены проблеме чрезмерного сближения судов, касающиеся некоторых ее частных аспектов.

В целом исследование ситуации чрезмерного сближения и разработка безопасных стратегий экстренного расхождения в стесненных водах является актуальной и перспективной тематикой. Поэтому задача формализации ситуации чрезмерного сближения и разработка алгоритмов стратегии экстренного расхождения с учетом существенных факторов составляет основные направления данной диссертационной работы.

### 1.3. Выводы по первой главе

В главе произведен обзор литературы и анализ основных направлений решения проблемы обеспечения безопасности судовождения и снижение аварийности судов, в результате которого выявлено, что основными направлениями решения данной проблемы являются разработка безопасных методов расхождения, обеспечение точности контроля места судна, совершенствование методов управления судном при плавании в стесненных районах.

Обоснованы основные направления диссертационного исследования, которые посвящены проблеме безопасного расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения.

Объектом исследования является процесс предупреждения столкновений судов, а предметом исследования являются методы выбора безопасной стратегии расхождения судна.



## ГЛАВА 2

### МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### 2.1. Выбор темы научного исследования

В предыдущей главе показано, что основными мерами по обеспечению безопасности судовождения является решение следующих проблем: предупреждения столкновений судов, обеспечения требуемой точности определения места судна, использования современных информационно-управляющих технологий и средств для обеспечения безопасности судовождения, совершенствования методов управления судном в стесненных районах плавания.

Наиболее актуальной является проблема обеспечения безаварийности судоходства путем предупреждения столкновений судов, особенно в стесненных районах плавания.

В предыдущей главе определено основное направление диссертационного исследования, которое заключается в совершенствовании методов предупреждения столкновения судов разработкой метода выбора безопасных маневров расхождения при плавании судов в стесненных водах, что позволяет произвести выбор темы диссертации, которая формулируется следующим образом: «Разработка метода выбора стратегии расхождения в ситуации чрезвычайного сближения судов».

Для решения задачи по указанной проблематике следует рассмотреть следующие основные вопросы:

- Методами системного подхода разделить исходную проблему на несколько составных независимых задач.

- Произвести формализацию ситуации чрезмерного сближения судна с целью, исходя из сложившейся их относительной позиции и параметров движения, а также учитывая требования МППСС-72 в части маневрирования судов при опасном сближении.

- Для ситуации чрезмерного сближения судов разработать метод расчета параметров стратегии экстренного расхождения, обеспечивающей безопасное следование судна на этапах уклонения и возвращения на программную траекторию движения.

- Рассмотреть задачу учета навигационных опасностей и мешающих судов при выборе экстренного маневра расхождения.

- Произвести разработку процедуры по учету динамики судна в расчетах параметров стратегии экстренного расхождения.

- Провести натурные наблюдения поворотливости судна и обеспечить имитационное моделирование основных результатов диссертационного исследования.

Необходимость повышения уровня безопасности судовождения и разработки метода выбора стратегии расхождения в ситуации чрезмерного сближения определяют актуальность тематики диссертационного исследования.

Научную новизну исследования может составить разработка метода выбора маневра расхождения судна с целью при малых дистанциях сближения и в условиях неопределенности ее поведения и способ идентификации ситуации чрезмерного сближения.

Предполагаемая эффективность диссертационного исследования возможна от повышения безопасности мореплавания, ведущая к уменьшению вероятности человеческих жертв и экологических катастроф, возникающих при авариях.

Возможная экономическая эффективность также может быть достигнута за счет сокращения убытков от снижения уровня аварийности

по причине предотвращения столкновений судов.

Реализуемость предлагаемого научного исследования заключается в разработке теоретической части работы, которую требуется проверить с помощью имитационного моделирования и экспериментальных исследований.

В качестве объекта исследования в диссертации выбран процесс предупреждения столкновений судов.

Предметом исследования являются методы выбора безопасной стратегии расхождения судна.

Тематика выбранного диссертационного исследования соответствует направлению научных исследований коллектива, в котором работает соискатель.

## 2.2. Методы исследования диссертационной работы

Технологическая карта методологического обеспечения исследования по теме диссертации, демонстрирующая логику решения главной задачи диссертационной работы с помощью методов системного подхода, представлена на рис. 2.1.

Необходимость повышения уровня безопасности судовождения и разработки метода расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения представляют собой современные запросы практики.

Целью диссертационного исследования является обеспечение надлежащего уровня безопасности судовождения путем разработки метода выбора стратегии расхождения в ситуации чрезвычайного сближения судов.

Принята гипотеза о возможности выбора безопасного маневра уклонения от опасно сближающейся цели в условиях неопределенности ее поведения.

Главная задача исследования заключается в разработке алгоритма определения безопасного маневра расхождения при чрезвычайном сближении судов с угрозой возможного столкновения.

В соответствии с методами теории исследования операций главная задача диссертации была решена с помощью декомпозиции на несколько частных составных задач.

Проведенный анализ показал, что целесообразным является разделение главной задачи диссертационного исследования на следующие три частных составные задачи:

1. Формализация ситуации чрезмерного сближения судна с целью, исходя из их относительной позиции и параметров движения.
2. Разработка метода расчета параметров стратегии экстренного расхождения, обеспечивающей безопасное следование судна на этапах уклонения и возвращения на программную траекторию движения.
3. Учет мешающих факторов и динамики судна при выборе стратегии экстренного расхождения.

Рассмотрение первой частной составной задачи требует разработки математической модели, описывающей ситуацию чрезмерного сближения судов и выявления существенных признаков, определяющих такую ситуацию.

С этой целью необходимо разработать процедуру расчета предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения и способ вычисления максимального значения дистанции кратчайшего сближения с позиций управления ситуацией сближения.

Показать, что возникновение ситуации чрезмерного сближения определяется соотношением указанных двух величин.

При рассмотрении первой составной задачи также необходимо сформулировать принцип формирования маневра экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА  
( страница из файла )

Помимо ситуации чрезмерного сближения на встречных курсах зачастую возникает критическое сближение на попутных курсах, когда догоняющее судно не предпринимает своевременное маневрирование по обгону, что вынуждает догоняемое судно предпринимать экстренное маневрирование для безопасного расхождения. Поэтому при решении первой задачи также надлежит рассмотреть ситуацию чрезмерного сближения на попутных курсах и специфику маневра расхождения в такой ситуации.

Центральной задачей диссертационного исследования является разработка метода расчета параметров стратегии экстренного расхождения, обеспечивающей безопасное следование судна на всех этапах маневра, чему посвящена вторая частная составная задача.

При опасном сближении судов, когда угроза столкновения выявляется заблаговременно, структура маневра расхождения представлена участком уклонения, который характеризуется моментом времени начала уклонения и курсом уклонения, а также участком выхода судна на заданную траекторию движения. Момент времени начала и курс выхода на программную траекторию движения характеризуют второй участок маневра расхождения. И, наконец, стратегию расхождения завершает момент времени достижения программной траектории и поворота на начальный курс следования.

В ситуации чрезмерного сближения судов структура маневра экстренного расхождения зависит от текущей ситуации, что требует формализации определения структуры маневра расхождения при чрезмерном сближении в зависимости от складывающейся ситуации в процессе маневрирования.

После определения или изменения структуры маневра экстренного расхождения необходима его немедленная реализация, для чего требуется численное выражение параметров маневра.

Поэтому следует разработать метод расчета параметров маневра экстренного расхождения, исходя из его структуры и учитывая фактор неопределенности в поведении судов при чрезмерном сближении.

Следует отметить, что должна быть сформирована процедура, которая по начальной относительной позиции и параметрам движения судов позволяет выявить ситуацию чрезмерного сближения и необходимость применения маневра экстренного расхождения.

Вторая составляющая задача предусматривает формализацию возникновения ситуации чрезмерного сближения при следовании судов попутными курсами и создание метода расчета маневра расхождения в такой ситуации.

Решение третьей частной составной задачи предусматривает разработку способа учета мешающих факторов и динамики судна при выборе стратегии экстренного расхождения.

В общем случае способ расчета параметров стратегии экстренного расхождения предполагает выполнение маневра в открытом море без навигационных опасностей при отсутствии других судов в районе маневрирования. При этом инерционность судна при поворотах не учитывается, и параметры маневра расхождения рассчитываются в первом приближении.

В реальных условиях плавания стесненные воды изобилуют навигационными опасностями и характеризуются интенсивными судопотоками. Поэтому метод расчета параметров маневра расхождения должен учитывать в районе маневрирования наличие мешающих судов, которые не препятствуют оперирующему судну следовать программной траекторией движения, однако ограничивают его маневрирование при расхождении с опасной целью.

Наличие навигационных опасностей ограничивает множество допустимых курсов уклонения судна, что также должно учитываться при расчете параметров стратегии расхождения.

Для расчета корректных значений параметров стратегии расхождения при плавании судна в реальных условиях следует разработать процедуру учета инерционности судна при поворотах, позволяющую производить расчет поправок на инерционность судна. Для этого необходимо использовать математические модели поворотливости судна, учитывающие динамику судна.

Решением каждой из составных независимых задач является соответствующий научный результат (НР1, НР2, НР3):

- научным результатом первой составной задачи НР1 является способ идентификации ситуации чрезмерного сближения;
- процедура определения структуры маневра экстренного расхождения в зависимости от текущей ситуации процесса расхождения представляет собой научный результат НР2 второй составной задачи;
- способ расхождения судна с целью на попутных курсах при чрезмерном сближении является научным результатом НР3 третьей составной задачи.

В процессе научного исследования по теме диссертационной работы необходимо произвести натурные наблюдения по поворотливости судна и произвести определение значений параметров поворотливости по экспериментальным данным. В работе также следует произвести имитационное моделирование основных результатов диссертационного исследования в части разработки метода выбора маневра экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения.

Полученные в диссертационной работе теоретические результаты и имитационное моделирование подтвердили принятую научную гипотезу.



Практическая значимость проведенного диссертационного исследования заключается в том, что ее основные результаты могут быть использованы судоводителями в ситуациях чрезмерного сближения, разработчиками в новых поколениях САРП, имеющих функции системы поддержки решений при расхождении, а также алгоритмы исследования могут быть применены при создании современных морских тренажеров.

Результаты диссертационной работы имеют практическую ценность, которая определяется тем, что разработанные в диссертации алгоритмы и программы могут быть использованы при эксплуатации судна, а также в процессе обучения и повышения квалификации судоводителей.

Полученные в диссертационном исследовании научные результаты и результаты проведенного имитационного моделирования определяют научное положение диссертационной работы, которое формулируется следующим образом:

Разработан новый метод выбора стратегии экстренного расхождения в ситуации чрезвычайного сближения судов, который отличается учетом неопределенности в поведении цели, мешающих факторов и динамики судна, что обеспечивает расчет параметров безопасного маневра расхождения.

### 2.3. Описание методики проведения научного исследования

Приведем методику проведения диссертационного исследования с указанием методов, которые для этого необходимы.

Анализ основных подходов решения проблемы обеспечения безопасности судовождения требует применения методов дедукции, чем осуществляется возможность выбора основного направления и темы диссертационного исследования.

Декомпозиция главной задачи диссертации на независимые составные задачи с помощью методов исследования операций является очередным шагом исследования, при этом производится обоснование методологического обеспечения диссертации.

В дальнейшем следует произвести разработку математической модели ситуации чрезмерного сближения судов и способа ее идентификации.

При этом необходимо разработать процедуру расчета предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения и вычисления максимального значения дистанции кратчайшего сближения.

Дальнейшее исследование требует синтеза принципа формирования маневра экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения.

Также надлежит рассмотреть ситуацию чрезмерного сближения судов на попутных курсах и специфику маневра расхождения в такой ситуации.

Основной задачей диссертационного исследования является разработка метода расчета параметров стратегии экстренного расхождения, обеспечивающей безопасное следование судна на всех этапах маневра, что является очередным этапом исследований по теме диссертационной работы.

Для решения этой задачи необходимо формализовать структуру маневра расхождения при чрезмерном сближении в зависимости от складывающейся ситуации расхождения.

Затем следует разработать метод расчета параметров маневра экстренного расхождения, учитывая его структуры и фактор неопределенности в поведении судов при чрезмерном сближении.

Также должна быть сформирована процедура идентификации ситуации чрезмерного сближения и необходимости применения маневра экстренного расхождения.

При этом требуется рассмотреть ситуацию чрезмерного сближения при следовании судов попутными курсами и создать метод расчета маневра расхождения в такой ситуации.

Расчет параметров стратегии экстренного расхождения предполагает выполнение маневра без навигационных опасностей и других судов в районе маневрирования, причем инерционность судна при поворотах не учитывается, а параметры маневра расхождения рассчитываются в первом приближении.

Поэтому метод расчета параметров маневра расхождения должен учитывать в районе маневрирования наличие мешающих судов и навигационных опасностей, которые ограничивает множество допустимых курсов уклонения судна.

Для расчета корректных значений параметров стратегии расхождения следует разработать процедуру учета инерционности судна при поворотах, для чего необходимо использовать математические модели поворотливости судна, учитывающие динамику судна.

## 2.4. Выводы по второй главе

Выбор тематики и основные направления диссертационного исследования рассмотрены во второй главе диссертации.

Методологическая структура диссертационного исследования отражена в технологической карте, с помощью которой произведено методологическое обеспечение диссертационной работы.

Технологическая карта содержит цель диссертационного исследования и его главную задачу, которая разделена на три независимые составные задачи.

Предложена и подтверждена рабочая гипотеза научного исследования, показано, что полученные научные результаты диссертационной работы являются решениями независимых составных задач.

В главе сформулировано основное научное положение исследования, показаны его практическая ценность и значимость и приведено содержание экспериментальной части.

Основная методика решения поставленных в работе задач, в которой определены основные этапы научного исследования по теме диссертации, приведена в данной главе. Она представляет собой обобщенный алгоритм реализации исследования по теме диссертации, включающий теоретические модели и имитационное моделирование.

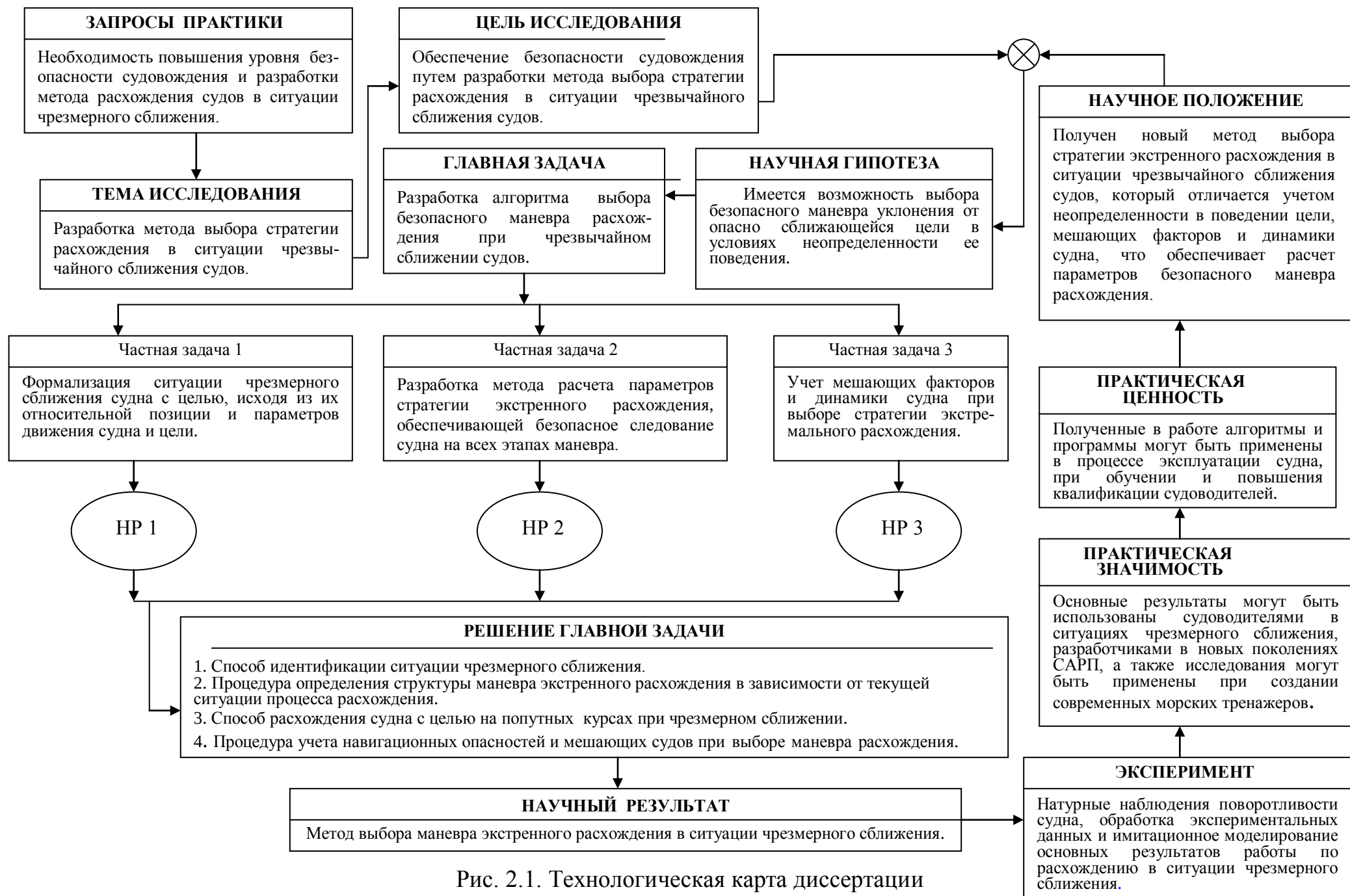


Рис. 2.1. Технологическая карта диссертации

## ГЛАВА 3

### ФОРМАЛИЗАЦИЯ СИТУАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО СБЛИЖЕНИЯ СУДОВ И СТРАТЕГИИ ЭКСТРЕННОГО РАСХОЖДЕНИЯ

#### 3.1. Описание ситуации чрезмерного сближения и определение максимальной дистанции кратчайшего сближения

Ситуация чрезмерного сближения и маневр экстренного расхождения характеризуются Правилom 17, согласно которому:

«(iii) Когда судно, обязанное сохранять курс и скорость, обнаружит, что судно, уступающее дорогу, находится настолько близко, что столкновения нельзя избежать, то оно должно предпринять все меры, чтобы избежать столкновения». При этом обязанность предупреждения столкновения согласно Правилу 16 не снимается с судна, которое должно уступить дорогу.

Следовательно, в ситуациях чрезмерного сближения МППСС-72 предписывает обоим судам предпринимать должные меры, обеспечивающие безопасное расхождение. В таких ситуациях оба судна принимают решения в условиях неопределенности относительно предстоящих действий партнера. Из-за дефицита времени в принципе невозможна взаимная координация действия судов по предупреждению столкновения. Поэтому безопасный исход в таких ситуациях в большей мере определяется везением и интуицией капитана, чем рациональным принятием решения.

Аналитическое описание ситуации расхождения в условиях чрезмерного сближения и ее корректный анализ позволяют получить необходимые рекомендации, которые минимизируют риск столкновения.

При формализации ситуации чрезмерного сближения отсутствуют ограничения возможных начальных относительных позиций, однако, без учета возможных навигационных опасностей и мешающих судов. При расхождении рассматривается маневрирование судов только изменением

курса, причем инерционность судна учитывается в первом приближении с помощью радиуса циркуляции. Последнее допущение не имеет принципиального значения, так как не влияет на выбор типа стратегии расхождения в такой ситуации.

Первым этапом рассматриваемой задачи является определение ситуации чрезмерного сближения судов.

Рассмотрим ситуацию чрезмерного сближения судов, которая определяет третью область взаимных обязанностей, в которой МППСС-72 предписывают обоим сближающимся судам предпринять маневр расхождения. Формально такую ситуацию можно определить, когда максимально возможная дистанция кратчайшего сближения  $\max D_{\min}$ , которая может быть достигнута наиболее эффективным маневром судна, окажется меньшей, чем минимальная предельно допустимая дистанция кратчайшего сближения  $\min D_{\text{dop}}$ . Следовательно, условие принадлежности судна к области чрезмерного сближения аналитически можно записать следующим образом:

$$\max D_{\min} < \min D_{\text{dop}}. \quad (3.1)$$

В дальнейшем необходимо найти аналитические выражения для величин  $\max D_{\min}$  и  $\min D_{\text{dop}}$ .

Для поиска выражения  $\max D_{\min}$  необходимо рассмотреть зависимость, описывающую дистанцию кратчайшего сближения  $D_{\min}$  в зависимости от относительной позиции и параметров движения судна и цели [11]:

$$D_{\min} = D \sin(K_{\text{от}} - \alpha), \quad (3.2)$$

где  $D$  и  $\alpha$  - дистанция и пеленг на цель, которые характеризуют относительную позицию;

$K_{ot}$  - относительный курс.

Если обозначить координаты судна  $X_o$  и  $Y_o$ , а цели  $X_c$  и  $Y_c$ , то относительные координаты  $X$  и  $Y$  (цели относительно судна) определяются выражениями:

$$X = X_o - X_c, \quad Y = Y_o - Y_c,$$

а их изменения  $\dot{X}$  и  $\dot{Y}$  определяются формулами:

$$\dot{X} = V_o \sin K_o - V_c \sin K_c, \quad \dot{Y} = V_o \cos K_o - V_c \cos K_c,$$

где  $V_o$  и  $K_o$  - соответственно скорость и курс судна;

$V_c$  и  $K_c$  - соответственно скорость и курс цели.

Относительный курс судна  $K_{ot}$  определяется известным соотношением:

$$K_{ot} = \begin{cases} \psi, & \text{при } \dot{X} > 0, \dot{Y} > 0; \\ \pi + \psi, & \text{при } \dot{Y} < 0; \\ 2\pi + \psi, & \text{при } \dot{X} < 0, \dot{Y} > 0, \end{cases} \quad (3.3)$$

где  $\psi = \arcsin[\dot{X} / (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2}]$ .

Анализируя выражение (3.2) для  $D_{min}$  отмечаем, что величина дистанции кратчайшего сближения при изменении курса судна  $K_o$  зависит от  $K_{ot}$  и определяется углом  $K_{ot} - \alpha$ . Максимальное значение  $D_{min}$  достигается при наибольшем значении величины  $|\sin(K_{ot} - \alpha)|$ . Поэтому для нахождения выражения  $\max D_{min}$  необходимо исследовать зависимость относительного курса  $K_{ot}$  от курса судна  $K_o$  при неизменных значениях параметров движения  $V_o$ ,  $V_c$  и  $K_c$ .



Найдем выражение первой производной относительного курса по истинному курсу судна, т.е.  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  и произведем его анализ. Учитывая выражение (3.3), получим:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\partial \psi}{\partial K_o}.$$

Учитывая, что  $\psi = \arcsin\left(\frac{\dot{X}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}}\right)$ , первая производная этого выражения принимает следующий вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial K_o} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\dot{X}^2}{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)}}} \frac{\partial}{\partial K_o} \left( \frac{\dot{X}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}} \right).$$

Очевидно:

$$\frac{\partial}{\partial K_o} \left( \frac{\dot{X}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}} \right) = \frac{\frac{\partial \dot{X}}{\partial K_o} (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2} - \dot{Y}^2 \frac{\partial}{\partial K_o} [(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2}]}{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}.$$

Учитывая, что  $\frac{\partial}{\partial K_o} [(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)^{1/2}] = \frac{\frac{\partial \dot{X}}{\partial K_o} \dot{X} + \frac{\partial \dot{Y}}{\partial K_o} \dot{Y}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}}$ , и обозначая  $\frac{\partial \dot{X}}{\partial K_o} = \dot{X}_k$  и  $\frac{\partial \dot{Y}}{\partial K_o} = \dot{Y}_k$ , получим выражение для искомой производной:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\dot{X}_k (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) - \dot{X} (\dot{X}_k \dot{X} + \dot{Y}_k \dot{Y})}{\dot{Y} (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)},$$

или после преобразований:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o} = \frac{\dot{X}_k \dot{Y}_k - \dot{Y}_k \dot{X}_k}{\dot{X}_k^2 + \dot{Y}_k^2}, \quad (3.4)$$

где  $\dot{X}_k = V_o \cos K_o$ ,  $\dot{Y}_k = -V_o \sin K_o$ .

Исследуем поведение  $K_{ot}$  от курса судна  $K_o$ , для чего достаточно исследовать знак числителя выражения (3.4). Учитываем, что:

$$\dot{X} = V_o \sin K_o - V_c \sin K_c \quad \text{и} \quad \dot{Y} = V_o \cos K_o - V_c \cos K_c,$$

откуда следует:

$$\begin{aligned} (\dot{X}_k \dot{Y}_k - \dot{Y}_k \dot{X}_k) &= V_o [V_o - V_c (\cos K_o \cos K_c - \sin K_o \sin K_c)] = \\ &= V_o [V_o - V_c \cos(K_o - K_c)]. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Очевидно, знак  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  соответствует знаку выражения  $V_o - V_c \cos(K_o - K_c)$ .

Анализ полученного выражения (3.5) для первой производной  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$

показывает, что при  $V_o > V_c$  величина  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  положительная для всех

значений  $K_o$ . Если же имеет место неравенство  $V_o < V_c$ , то первая производная может иметь как положительное так и отрицательное значения.

Это означает, что в случае  $(V_o > V_c)$  относительный курс  $K_{ot}$  может принимать любые значения от 0 до  $2\pi$ , а при  $(V_o < V_c)$  область значений  $K_{ot}$

ограничивается экстремальными значениями, которые обозначены  $K_{otmin}$  и  $K_{otmax}$ , как показано на рис. 3.1.

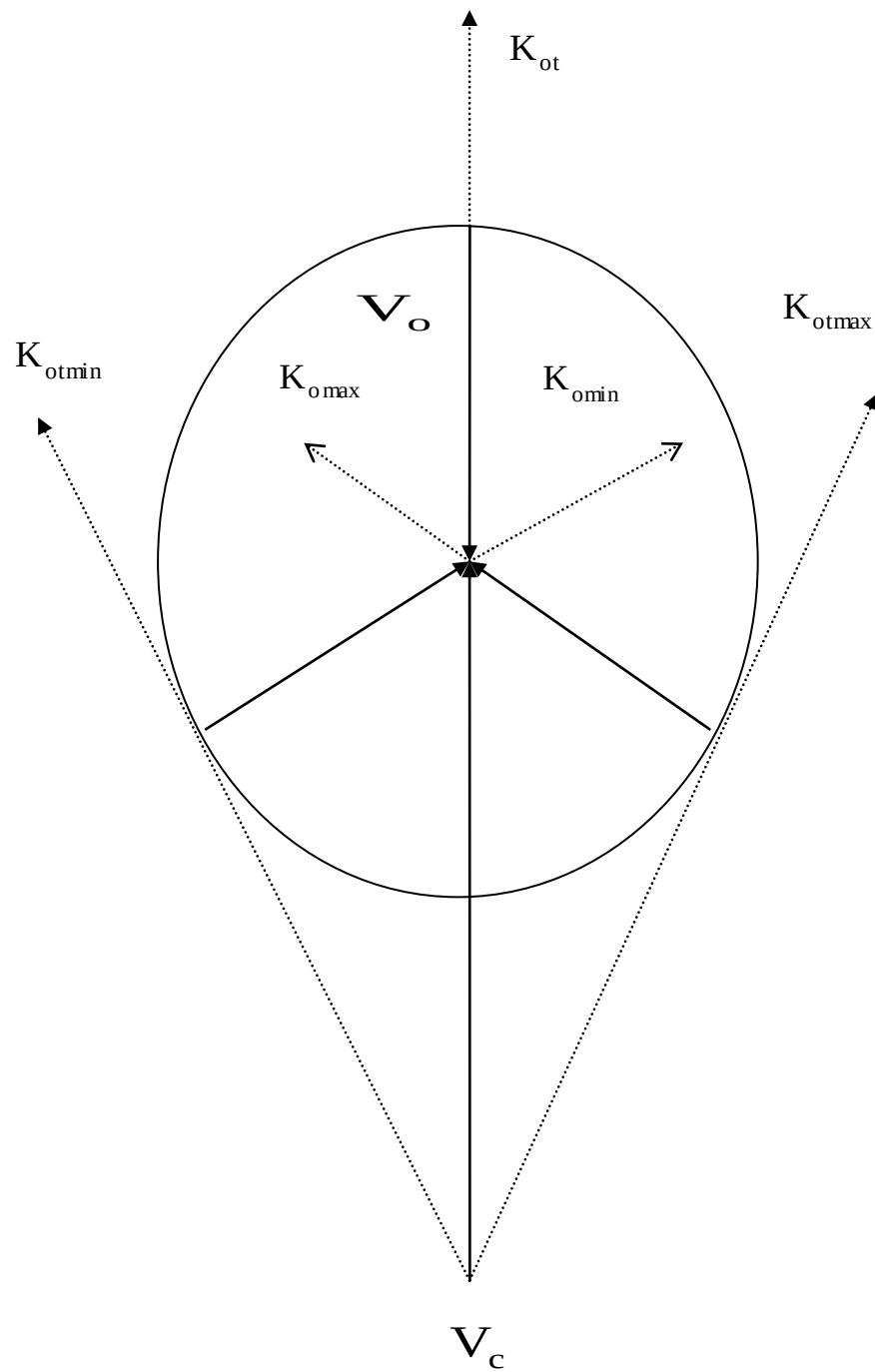


Рис. 3.1. Изменение относительного курса  $K_{ot}$  при  $V_o < V_c$

Этим относительным курсам соответствуют курсы судна  $K_{o min}$  и  $K_{o max}$ ,

которые находим из условия обращения первой производной  $\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_o}$  в нуль,

т. е. с учетом (3.5) из уравнения:

$$V_o - V_c \cos(K_o - K_c) = 0 \quad \text{или} \quad \cos(K_o - K_c) = \frac{V_o}{V_c} = \rho.$$

Данное уравнение имеет два корня:

$$K_{o1} = K_c + \arccos \rho, \quad K_{o2} = K_c + \arccos \rho. \quad (3.6)$$

Необходимо определить соответствие полученных значений курсов судна экстремальным относительным курсам  $K_{omin}$  и  $K_{omax}$ . Эта неопределенность разрешается при проверке экстремумов второй производной.

Используя раньше полученные зависимости, находим выражение для второй производной, которая имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_o^2} = \frac{V_o V_c (V_c^2 - V_o^2)}{V_{ot}^4} \sin(K_o - K_c).$$

Подставляя в последнее выражение формулы для  $K_{o1}$  и  $K_{o2}$  из (3.6), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_o^2} &= \frac{V_o V_c (V_c^2 - V_o^2)}{V_{ot}^4} \sin(K_c + \arccos \rho - K_c) = \\ &= \frac{V_o V_c (V_c^2 - V_o^2)}{V_{ot}^4} \sin(\arccos \rho) > 0, \quad \text{при} \quad K_o = K_{o1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 K_{ot}}{\partial K_o^2} &= \frac{V_o V_c (V_c^2 - V_o^2)}{V_{ot}^4} \sin(K_c - \arccos \rho - K_c) = \\ &= \frac{V_o V_c (V_c^2 - V_o^2)}{V_{ot}^4} \sin(-\arccos \rho) < 0, \text{ при } K_o = K_{o2}.\end{aligned}$$

Как следует из приведенных выражений, минимальное значение относительного курса достигается при  $K_o = K_{o1}$ , так как в этом случае вторая производная положительная, а максимальное значение при  $K_o = K_{o2}$  - вторая производная в этом случае отрицательна. Следовательно, справедливы выражения:

$$K_{omin} = K_c + \arccos \rho \quad \text{и} \quad K_{omax} = K_c - \arccos \rho.$$

Справедливость данных выражений подтверждается рис. 3.1.

Найдем выражения для экстремальных значений относительного курса  $K_{otmin}$  и  $K_{otmax}$ , воспользовавшись зависимостью [11]:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_o \sin K_o - V_c \sin K_c}{V_o \cos K_o - V_c \cos K_c}. \quad (3.7)$$

Подставляя в (3.7) выражение для  $K_{omin}$ , получим выражение для  $K_{otmin}$ :

$$\operatorname{tg} K_{otmin} = \frac{V_o \sin(K_c + \arccos \rho) - V_c \sin K_c}{V_o \cos(K_c + \arccos \rho) - V_c \cos K_c}. \quad (3.8)$$

Учитывая, что  $\rho = \frac{V_o}{V_c}$ , преобразуем числитель последнего выражения:

$$V_o \left[ \frac{V_o}{V_c} \sin K_c + \frac{(V_c^2 - V_o^2)^{1/2}}{V_c} \cos K_c \right] - V_c \sin K_c =$$

$$V_c^{-1} [V_o (V_c^2 - V_o^2)^{1/2} \cos K_c - (V_c^2 - V_o^2) \sin K_c] = (V_c^2 - V_o^2)^{1/2} \sin(\psi - K_c),$$

где  $\psi = \arcsin \rho$  - начальная фаза.

Аналогично преобразуем знаменатель выражения (3.8):

$$V_o \cos(K_c + \arccos \rho) - V_c \cos K_c = V_o \left[ \frac{V_o}{V_c} \cos K_c - \frac{(V_c^2 - V_o^2)^{1/2}}{V_c} \sin K_c \right] - V_c \cos K_c =$$

$$= (V_c^2 - V_o^2)^{1/2} \cos(\psi - K_c).$$

Подставляя полученные выражения для числителя и знаменателя в (3.8), находим:

$$\operatorname{tg} K_{\text{otmin}} = - \frac{(V_c^2 - V_o^2)^{1/2} \sin(\psi - K_c)}{(V_c^2 - V_o^2)^{1/2} \cos(\psi - K_c)},$$

откуда окончательно получим:

$$\operatorname{tg} K_{\text{otmin}} = -\operatorname{tg}(\psi - K_c).$$

Данное уравнение имеет два корня:

$$K_{\text{otmin1}} = K_c - \psi \quad \text{и} \quad K_{\text{otmin2}} = \pi + K_c - \psi.$$

Если учесть, что в относительном перемещении неподвижной выбрана цель, чему отвечает  $K_{\text{otmin2}}$ , то окончательно получим:

$$K_{\text{otmin}} = \pi + K_c - \arcsin \rho.$$

Аналогично находим выражение для  $K_{otmax}$ , которое имеет следующий вид:

$$K_{otmax} = \pi + K_c + \arcsin \rho.$$

Следовательно, значения экстремальных относительных курсов для случая, когда скорость судна меньше скорости цели, т. е.  $\rho < 1$ , определяются следующими выражениями:

$$K_{otmin} = \pi + K_c - \arcsin \rho \text{ и } K_{otmax} = \pi + K_c + \arcsin \rho.$$

Следовательно, при  $\rho < 1$  для всех истинных курсов судна  $K_o$  из диапазона от 0 до  $2\pi$  относительный курс будет принимать значения из диапазона  $[K_{otmin}, K_{otmax}]$ , как показано на рис. 3.2.

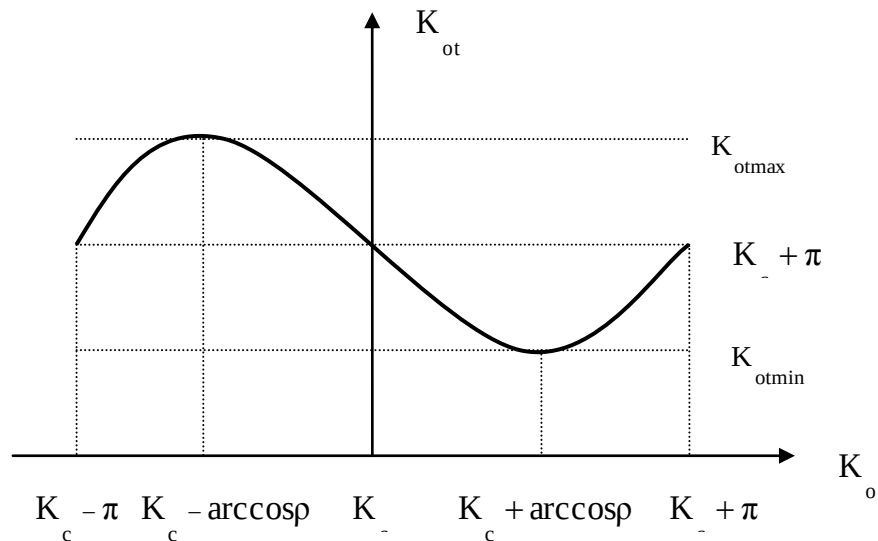


Рис. 3.2. Зависимость относительного курса  $K_{ot}$  от курса судна  $K_o$  при  $\rho < 1$

Если же  $\rho \geq 1$ , то относительный курс изменяется от 0 до  $2\pi$  при изменении истинного курса судна в тех же пределах (рис. 3.3).

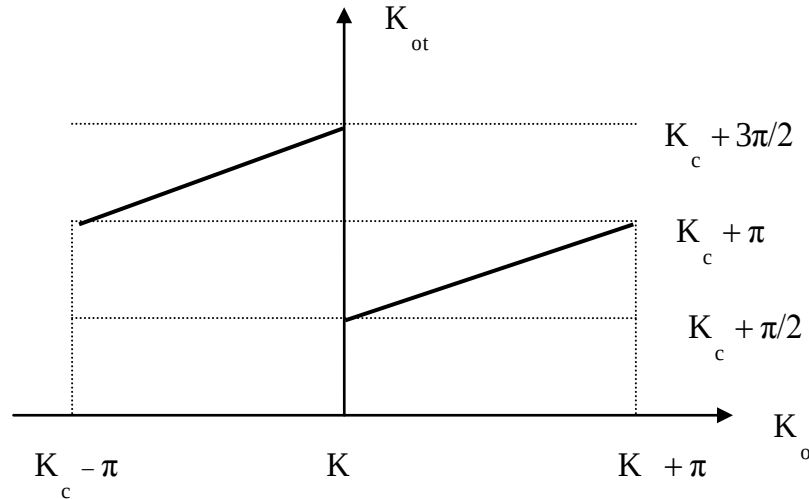


Рис. 3.3. Зависимость относительного курса  $K_{ot}$  от курса судна  $K_o$  при  $p \geq 1$

Учитывая полученные результаты, найдем величину максимальной дистанции кратчайшего сближения  $\max D_{\min}$ , которая может быть достигнута судном при изменении его курса  $K_o$ . Раньше было указано, что максимальное значение  $D_{\min}$  достигается при наибольшем значении величины  $|\sin(K_{ot} - \alpha)|$ . Очевидно, что если скорость судна больше скорости цели, то наибольшее значение выражения  $|\sin(K_{ot} - \alpha)|$  достигается при  $K_{ot} = \alpha + \pi/2$  или  $K_{ot} = \alpha - \pi/2$  и максимальное значение дистанции кратчайшего сближения равно начальной дистанции  $D_n$ , т.е.  $\max D_{\min} = D_n$ .

Если же скорость судна меньше скорости цели ( $p < 1$ ), то  $\max D_{\min}$  достигается при относительных курсах  $K_{ot\min}$  или  $K_{ot\max}$ . Обозначая  $K_{extr}$  экстремальный относительный курс ( $K_{ot\min}$  или  $K_{ot\max}$ ), на котором дистанция кратчайшего сближения  $D_{\min}$  максимальна, в случае уклонения судна в начальный момент времени при условии, что цель не изменяет параметры движения, выражение для  $\max D_{\min}$  имеет следующий вид:

$$\max D_{\min} = D_n \sin(K_{extr} - \alpha_n),$$



где  $\alpha_n$  - пеленг на цель.

Так как в этом случае  $\sin(K_{\text{extr}} - \alpha_n) < 1$ , то  $\max D_{\min} < D_n$ . Учитывая, что существуют два экстремальные относительные курсы, которые не являются симметричными относительно линии пеленга, поэтому максимальная дистанция кратчайшего сближения имеет два значения при максимальном относительном курсе уклонения  $\max D_{\min}^{(\text{mx})} = D_n \sin(K_{\text{otmax}} - \alpha_n)$  и при минимальном  $\max D_{\min}^{(\text{mn})} = D_n \sin(K_{\text{otmin}} - \alpha_n)$ .

3.2. Формализация минимальной предельно-допустимой дистанции сближения  $\min D_{\text{доп}}$  и условие попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения

При обсуждении проблемы предупреждения судов важной характеристикой является область риска столкновения, в которой находится судно, причем в эту область не должны попадать другие объекты во избежание столкновений.

Следует отметить, что вопросу построения области риска столкновения посвящено большое количество работ, причем стандартным описанием такой области является круг, в центре которого находится судно, а радиусом является предельно-допустимая дистанция сближения  $D_{\text{доп}}$ . Очевидно, что в этом случае область риска столкновения характеризуется значением  $D_{\text{доп}}$ .

Однако в ряде работ предлагается другая форма области риска столкновения. Так, процедура расчета большой оси эллипса зоны навигационной безопасности, как «динамической длины судна» и малой оси эллипса, как «динамической ширины судна» для плавания в портовых водах предложена в работе [153], причем оба параметра зависят от длины и ширины судна, его скорости, протяженности тормозного пути.

В работах [5, 154] предлагается в качестве критерия безопасности «область столкновения», под которой имеется в виду некоторая область по направлению движения судна. Показано, что радиус области столкновения является функцией длин и скоростей судна и цели, тормозного пути судна, дистанции кратчайшего сближения, радиуса циркуляции судна, а также задержки времени при обработке информации.

Методам расчета геометрической формы зон столкновения судов посвящены работы [155, 156], причем в публикации [155] автор, ссылаясь на зарубежные исследования, описывает домены Гудвина и Дэвиса, а в работе [156] предлагается метод расчета зоны в ситуациях обгона для случаев как хорошей, так и ограниченной видимости, а также построение зоны безопасности по прогнозируемым значениям времени и дистанции кратчайшего сближения.

В работе [157] авторы Спеймен В. и Кримптон К. описали эллипсом зону навигационной безопасности, которая используется в автоматизированной радиолокационной системе. При этом кривая, которая ограничивает зону, описывается из центра тяжести судна радиусом переменной длины, который зависит от длины судна, его скорости и курсового угла радиуса. Размеры зоны навигационной безопасности также зависят от коэффициента плотности движения, коэффициента, учитывающего гидрометеорологические условия и коэффициента, который характеризует потенциальную опасность груза судна.

Статистическая оценка продольных и поперечных размеров зоны безопасности судов по натурным наблюдениям приведена в работе [158], причем в ней получены ориентировочные параметры зоны безопасности: по носу судна - около 10 его длин, по корме - порядка 3 – 4 , по траверзам – около пяти длин.

Вопросам формирования безопасной судовой зоны посвящены также работы [122, 123].

В работе [159] предложенные подходы к описанию области риска столкновения формализованы в виде эллиптической или прямоугольной формы, которые показаны на рис. 3.4 и рис. 3.5.

Рассмотренные формы области риска столкновения характеризуются тремя параметрами  $l_n$ ,  $l_k$  и  $b$ . Если характеризовать ситуацию чрезмерного сближения, то размеры области риска столкновения должны учитывать габариты судов, явление присасывания и инерционность судна. Причем в случае, когда область риска столкновения имеет форму круга и применяется маневр расхождения изменением курса, то единственная характеристика

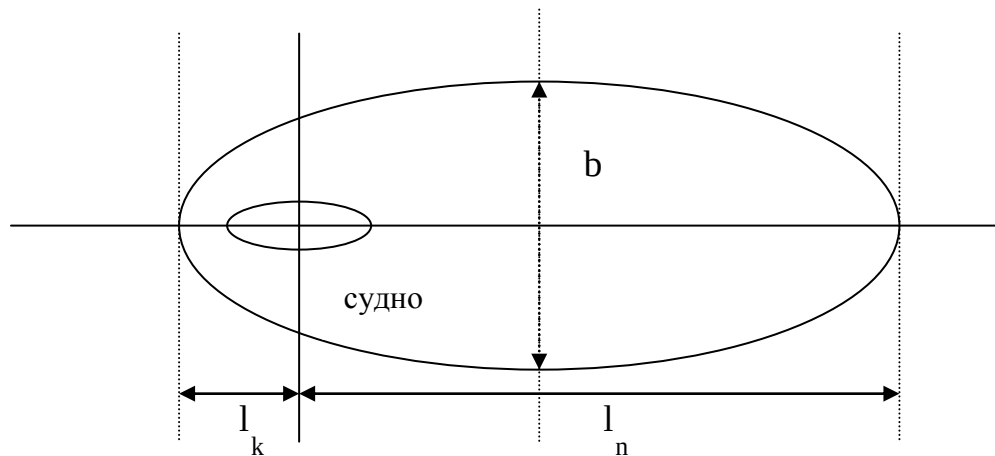


Рис. 3.4. Параметры области риска столкновения в форме эллипса

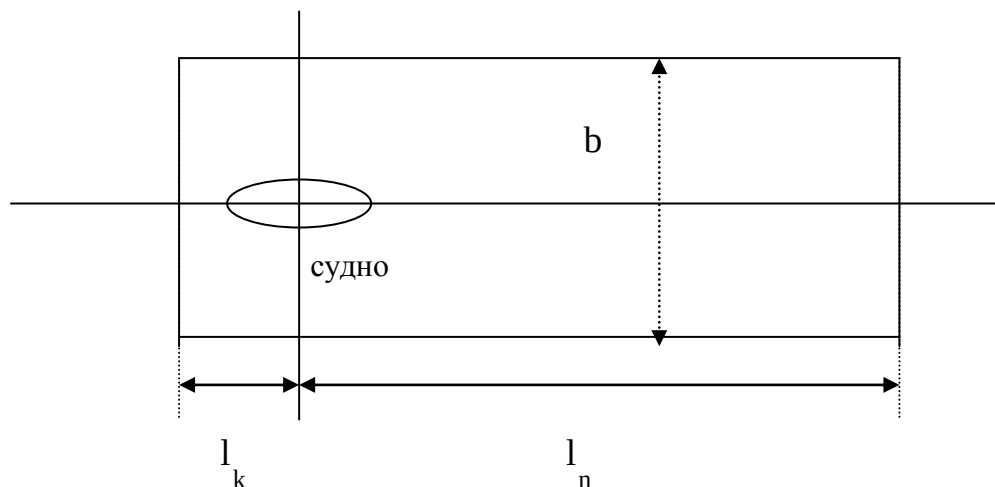


Рис. 3.5. Параметры области риска столкновения в форме прямоугольника

области – радиус круга является минимальной предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения  $\min D_{\text{dop}}$ , величина которой определяется габаритами сближающихся судов и запасом дистанции, предупреждающей явление присасывания. Если обозначить через  $D_{\text{dop1}}$  запас дистанции, учитывающей габариты судна и цели, то его наибольшее значение представляет сумму ширины судна  $B_o$  и длины цели  $L_c$ , что имеет место при следовании судна и цели на перпендикулярных курсах. Поэтому:

$$D_{\text{dop1}} = B_o + L_c.$$

Запас дистанции, предупреждающей явление присасывания,  $D_{\text{dop2}}$  составляет порядка 100 м. Следовательно, минимальной предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения при круглой форме области риска столкновения  $\min D_{\text{dop}} = D_{\text{dop1}} + D_{\text{dop2}}$ .

Однако в случаях, когда область риска столкновения имеет форму эллипса или прямоугольника, определение минимальной предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения оказывается гораздо сложнее, так как дистанция от центра области до ее границы не является постоянным, причем размеры области характеризуется тремя параметрами (рис. 3.4 и рис. 3.5), которые помимо габаритов судов и явления присасывания определяются еще и инерционностью судна. В первом приближении инерционность судна учитывается дополнительным запасом дистанции по носу, корме и бортам судна, причем по носу судна - 10 его длин, по корме – 3 длины и по траверзам – 5 длин, как экспериментально определено в работе [158]. Таким образом, совместный учет трех факторов дает следующие параметры области риска столкновения:

$$l_n = D_{\text{dop1}} + D_{\text{dop2}} + 10L_o, \quad l_k = D_{\text{dop1}} + D_{\text{dop2}} + 3L_o, \quad b = D_{\text{dop1}} + D_{\text{dop2}} + 5L_o.$$

Если область риска столкновения имеет форму круга, то условие принадлежности судна к области чрезмерного сближения определяется неравенством (3.1), т.е.:  $\max D_{\min} < \min D_{\text{dop}}$ , так как в этом случае имеется явное выражение  $\min D_{\text{dop}}$ .

Найдем выражение для минимальной предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения  $\min D_{\text{dop}}$ , если область риска столкновения имеет форму эллипса и  $p < 1$ . В этом случае величина  $\min D_{\text{dop}}$  определяется расстоянием между центром эллипса и произвольной точкой кривой эллипса, как показано на рис. 3.6.

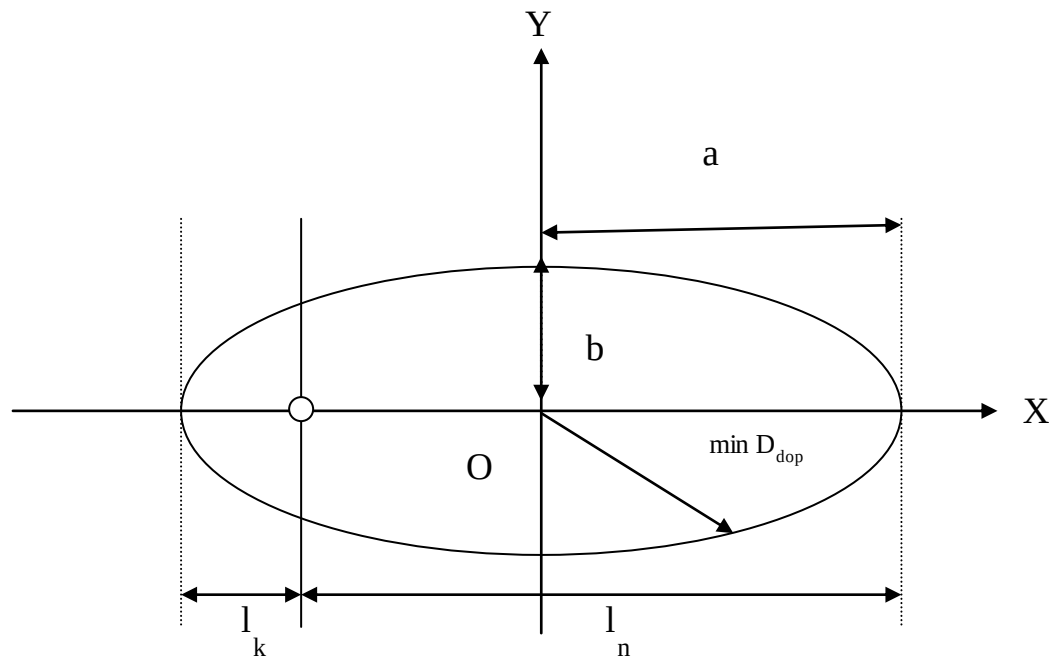


Рис. 3.6. К определению величины  $\min D_{\text{dop}}$

Если начало системы координат  $OXY$  выбрать в центре эллипса, то величина  $\min D_{\text{dop}}$  определяется очевидным выражением:

$$\min D_{\text{dop}} = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (3.9)$$

Уравнение эллипса в этой же системе координат имеет следующий вид:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

откуда получим  $y^2 = b^2(1 - \frac{x^2}{a^2})$ . Подставим данное выражение в (3.9) и получим:

$$\min D_{\text{доп}} = \sqrt{b^2 + x^2(1 - \frac{b^2}{a^2})}. \quad (3.10)$$

Допустим, в начале системы координат  $\overline{XOY}$  находится судно (рис.3.4), оценивающее опасность сближения. Промежуточная система координат  $\tilde{XOY}$  смещена относительно начала опорной системы и ее центр совпадает с центром эллипса, хотя оси обеих систем координат параллельны. Начало системы координат  $XOY$  совмещено с началом  $\tilde{XOY}$ , но оси  $XOY$  повернуты на угол курса судна  $K$  относительно осей системы координат  $\tilde{XOY}$ , как показано на рис. 3.7.

Очевидно, справедливы соотношения:

$$\bar{x} = \bar{X}_o + \tilde{x}, \quad \bar{y} = \bar{Y}_o + \tilde{y}, \quad (3.11)$$

где  $\bar{X}_o$  и  $\bar{Y}_o$  - координаты центра эллипса в системе координат  $\overline{XOY}$ .

Координаты произвольной точки  $M(\tilde{x}, \tilde{y})$  в зависимости от ее координат  $(x, y)$  в системе  $XOY$  выражаются следующим образом:

$$\tilde{x} = y \sin K + x \cos K, \quad \tilde{y} = y \cos K - x \sin K.$$

В этом случае выражение (3.11) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \bar{X}_o + y \sin K + x \cos K, \\ \bar{y} &= \bar{Y}_o + y \cos K - x \sin K. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Используя исходное уравнение эллипса в системе координат  $XOY$ , получим следующее соотношение:

$$y = \pm b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}.$$

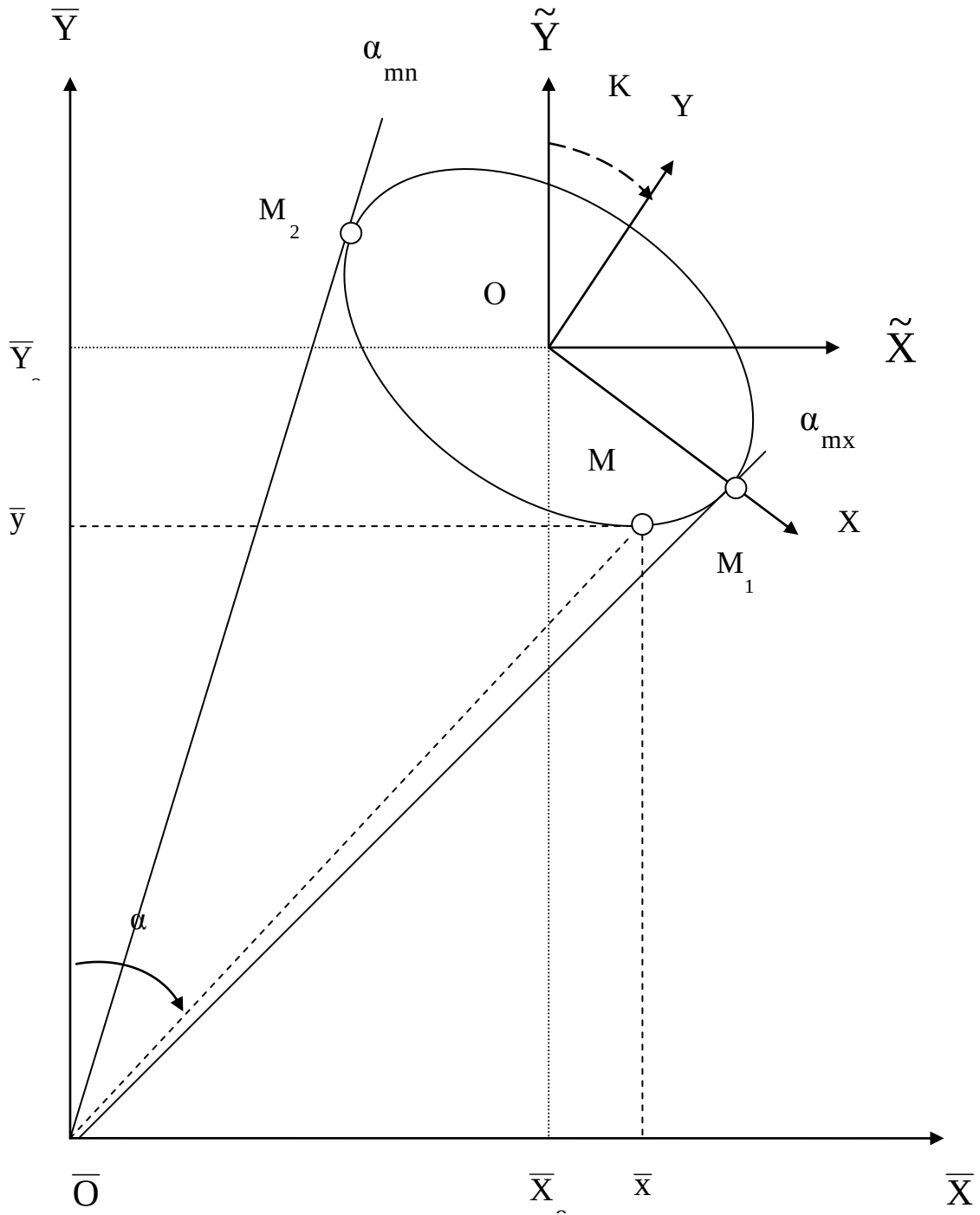


Рис. 3.7. Связь между системами координат

Выбирая значение  $y$  со знаком плюс и подставляя его в выражения (3.12), получим:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \bar{X}_o + b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\sin K + x\cos K, \\ \bar{y} &= \bar{Y}_o + b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\cos K - x\sin K.\end{aligned}\quad (3.13)$$

Значение пеленга  $\alpha$  (рис. 3.7) на точку  $M$ , принадлежащую эллипсу в опорной системе координат  $\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$  можно найти из выражения:

$$\alpha = \arctg \frac{\bar{x}}{\bar{y}} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\sin K + x\cos K}{\bar{Y}_o + b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\cos K - x\sin K}.\quad (3.14)$$

Для нахождения точек  $M_1$  и  $M_2$ , в которых граничные пеленга  $\alpha_{mn}$  и  $\alpha_{mx}$  касаются области риска столкновения и определяют минимальную предельно-допустимую дистанцию кратчайшего сближения, необходимо взять первую производную пеленга  $\alpha$  по переменной  $x$  ( $x \in [-a, a]$ ) и приравнять ее к нулю. Затем из полученного уравнения надлежит найти значения переменной  $x$ , которые соответствуют точкам касания  $M_1$  и  $M_2$ , после чего с помощью формулы (3.10) получаем выражение для величины  $\min D_{\text{доп}}$ .

Продифференцируем по  $x$  выражение (3.14):



$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right)^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right).$$

Очевидно, что искомому уравнению  $\frac{\partial \alpha}{\partial x} = 0$  соответствует уравнение

$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right) = 0$ . Найдем выражение для  $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right)$ . Учитываем, что:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right) = \frac{\frac{\partial \bar{x}}{\partial x} \bar{y} - \frac{\partial \bar{y}}{\partial x} \bar{x}}{\bar{y}^2},$$

поэтому исходное уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial x} \bar{y} - \frac{\partial \bar{y}}{\partial x} \bar{x} = 0. \quad (3.15)$$

Найдем выражения для частных производных  $\frac{\partial \bar{x}}{\partial x}$  и  $\frac{\partial \bar{y}}{\partial x}$ , используя выражения (3.13):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{x}}{\partial x} &= \cos K - \frac{b}{a^2} \sin K \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}}, \\ \frac{\partial \bar{y}}{\partial x} &= \frac{b}{a^2} \cos K \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} + \sin K. \end{aligned}$$

Подставляем полученные выражения в уравнение (3.15) и, производя преобразования, получим:

$$\bar{Y}_o \cos K + \bar{X}_o \sin K + \frac{b}{a^2} \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} (\bar{X}_o \cos K - \bar{Y}_o \sin K) + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + \frac{b}{a^2} \frac{x^2}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = 0.$$

Перепишем полученное уравнение следующим образом:

$$\frac{b}{a^2} \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} (\bar{Y}_o \sin K - \bar{X}_o \cos K) = \bar{Y}_o \cos K + \bar{X}_o \sin K + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + \frac{b}{a^2} \frac{x^2}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}},$$

откуда получим уравнение, содержащее в левой части переменную  $x$ :

$$x = \frac{a^2}{b(\bar{Y}_o \sin K - \bar{X}_o \cos K)} [(\bar{Y}_o \cos K + \bar{X}_o \sin K) \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + b(1 - \frac{x^2}{a^2}) + \frac{b}{a^2} x^2].$$

Для дальнейшего исследования введем обозначения:

$$c = \frac{a^2}{b(\bar{Y}_o \sin K - \bar{X}_o \cos K)} \quad \text{и} \quad r = (\bar{Y}_o \cos K + \bar{X}_o \sin K), \quad \text{тогда последнее уравнение}$$

принимает следующий вид:

$$x = c[r \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + b(1 - \frac{x^2}{a^2}) + \frac{b}{a^2} x^2], \quad \text{или} \quad x + cb = cr \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}.$$

Возведем в квадрат обе части последнего уравнения и после несложных преобразований получим:

$$x^2 + 2 \frac{a^2 cb}{(a^2 + c^2 r^2)} x + \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)} = 0. \quad (3.16)$$

Решение данного квадратного уравнения (3.16) имеет следующий вид:

$$x_1 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} + \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}},$$

$$x_2 = -\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2} - \sqrt{\left(\frac{a^2 cb}{a^2 + c^2 r^2}\right)^2 - \frac{a^2 c^2 (b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2 r^2)}}.$$

Подставляя полученные выражения  $x_1$  и  $x_2$  в выражение (3.10) находим два значения величины  $\min D_{\text{dop1}}$  и  $\min D_{\text{dop2}}$ :

$$\min D_{\text{dop1}} = \sqrt{b^2 + x_1^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)}, \quad \min D_{\text{dop2}} = \sqrt{b^2 + x_2^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)}.$$

Указанные значения минимальных предельно-допустимых дистанций кратчайшего сближения необходимо соотнести с точками касания граничных пленгов и их обозначим  $\min D_d^{(\text{mn})}$  и  $\min D_d^{(\text{mx})}$ , как показано на рис. 3.8.

Для выявления ситуации чрезмерного сближения необходимо сравнить соответствующие значения максимальной дистанции кратчайшего сближения и минимальной предельно-допустимой величиной той же дистанции в одном относительном направлении, т.е.  $\max D_{\text{min}}^{(\text{mn})}$  с  $\min D_d^{(\text{mn})}$  и  $\max D_{\text{min}}^{(\text{mx})}$  с  $\min D_d^{(\text{mx})}$  (рис. 3.8).

Анализируя такие сравнения, можно сделать следующие выводы. Если справедливы неравенства  $\max D_{\text{min}}^{(\text{mn})} < \min D_d^{(\text{mn})}$  и  $\max D_{\text{min}}^{(\text{mx})} < \min D_d^{(\text{mx})}$ , то имеет место ситуация чрезмерного сближения и необходимо выполнение маневра экстренного расхождения. В случае, когда  $\max D_{\text{min}}^{(\text{mn})} < \min D_d^{(\text{mn})}$  и  $\max D_{\text{min}}^{(\text{mx})} > \min D_d^{(\text{mx})}$ , возникновение ситуации чрезмерного сближения можно предупредить только относительным уклонением вправо. Если же имеют место неравенства  $\max D_{\text{min}}^{(\text{mn})} > \min D_d^{(\text{mn})}$  и  $\max D_{\text{min}}^{(\text{mx})} < \min D_d^{(\text{mx})}$ , то ситуацию чрезмерного сближения можно избежать только относительным

уклонением влево. Ситуация чрезмерного сближения отсутствует при справедливости неравенств  $\max D_{\min}^{(mn)} > \min D_d^{(mn)}$  и  $\max D_{\min}^{(mx)} > \min D_d^{(mx)}$ .

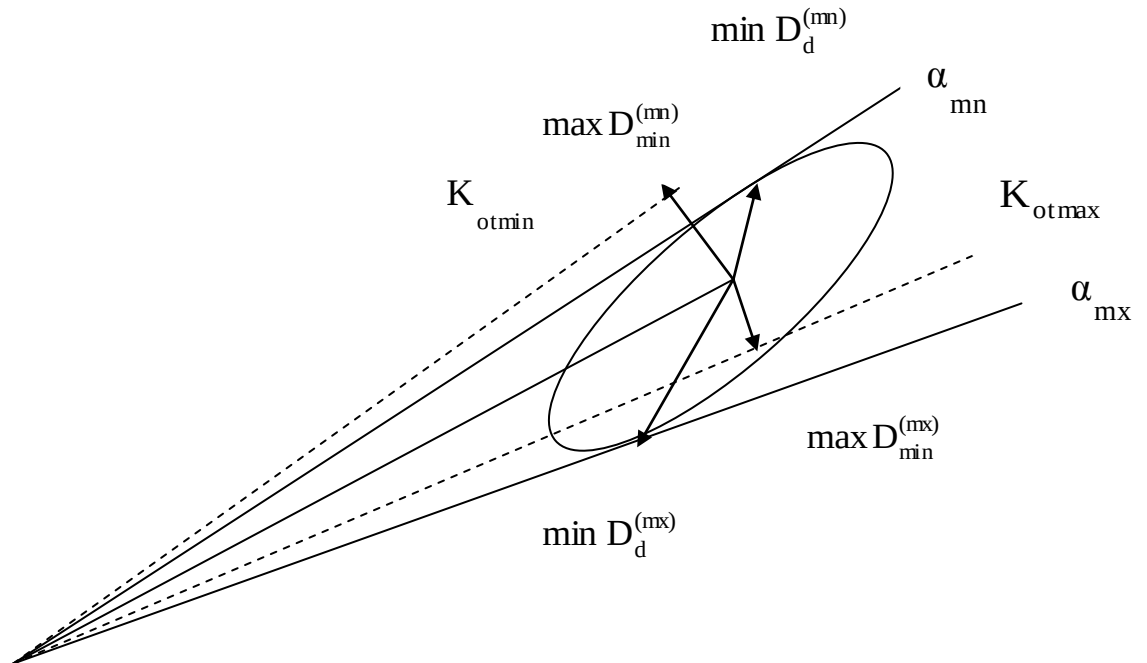


Рис. 3.8. Выявление ситуации чрезмерного сближения

Обращаем внимание на следующее обстоятельство: расчеты значений минимальных предельно-допустимых дистанций кратчайшего сближения производились относительно центра эллипса области риска столкновения  $(\bar{X}_o, \bar{Y}_o)$ , а при измерениях выявляем позицию цели, которая не совпадает с центром эллипса. Поэтому необходимо выразить координаты центра эллипса  $(\bar{X}_o, \bar{Y}_o)$  через параметры относительной позиции цели, т. е. дистанцию  $D_v$  и пеленг на нее  $\alpha_v$ . Если обозначить  $\bar{X}_v$  и  $\bar{Y}_v$  координаты цели в опорной системе координат, то очевидно имеют место соотношения:

$$\bar{X}_v = D_v \sin \alpha_v; \quad \bar{Y}_v = D_v \cos \alpha_v.$$

Так как расстояние  $dL_e$  между центрами эллипса и судна можно найти из соотношения  $dL_e = a - l_k$ , то дистанция  $D_o$  и пеленг  $\alpha_o$  на центр эллипса определяются из выражений:

$$D_o = \sqrt{(\bar{X}_V + dL_e \sin K)^2 + (\bar{Y}_V + dL_e \cos K)^2},$$

$$\alpha_o = 360 + \bar{\alpha}_n, \quad \text{при } \bar{Y}_V + dL_e \cos K > 0;$$

$$\alpha_o = 180 + \bar{\alpha}_n, \quad \text{при } \bar{Y}_V + dL_e \cos K < 0,$$

где  $\bar{\alpha}_n = \arctg \frac{\bar{X}_V + dL_e \sin K}{\bar{Y}_V + dL_e \cos K}.$

Следовательно, выражения для  $\bar{X}_o$  и  $\bar{Y}_o$  имеют следующий вид:

$$\bar{X}_o = D_o \sin \alpha_o, \quad \bar{Y}_o = D_o \cos \alpha_o.$$

Аналогично определяется ситуация чрезмерного сближения, когда область риска столкновения имеет форму прямоугольника. Как следует из рис. 3.9, минимальная предельно-допустимая дистанция кратчайшего

сближения может принимать только два значения большее  $D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}$  и

меньшее  $D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}$ . Так как граничные пеленга  $\alpha_{mx}$  и  $\alpha_{mn}$  проходят

через две точки, которые находятся в вершинах прямоугольника, то значения

$\min D_d^{(mn)}$  и  $\min D_d^{(mx)}$  могут принимать одно из двух значений  $D_n$  или  $D_k$ .

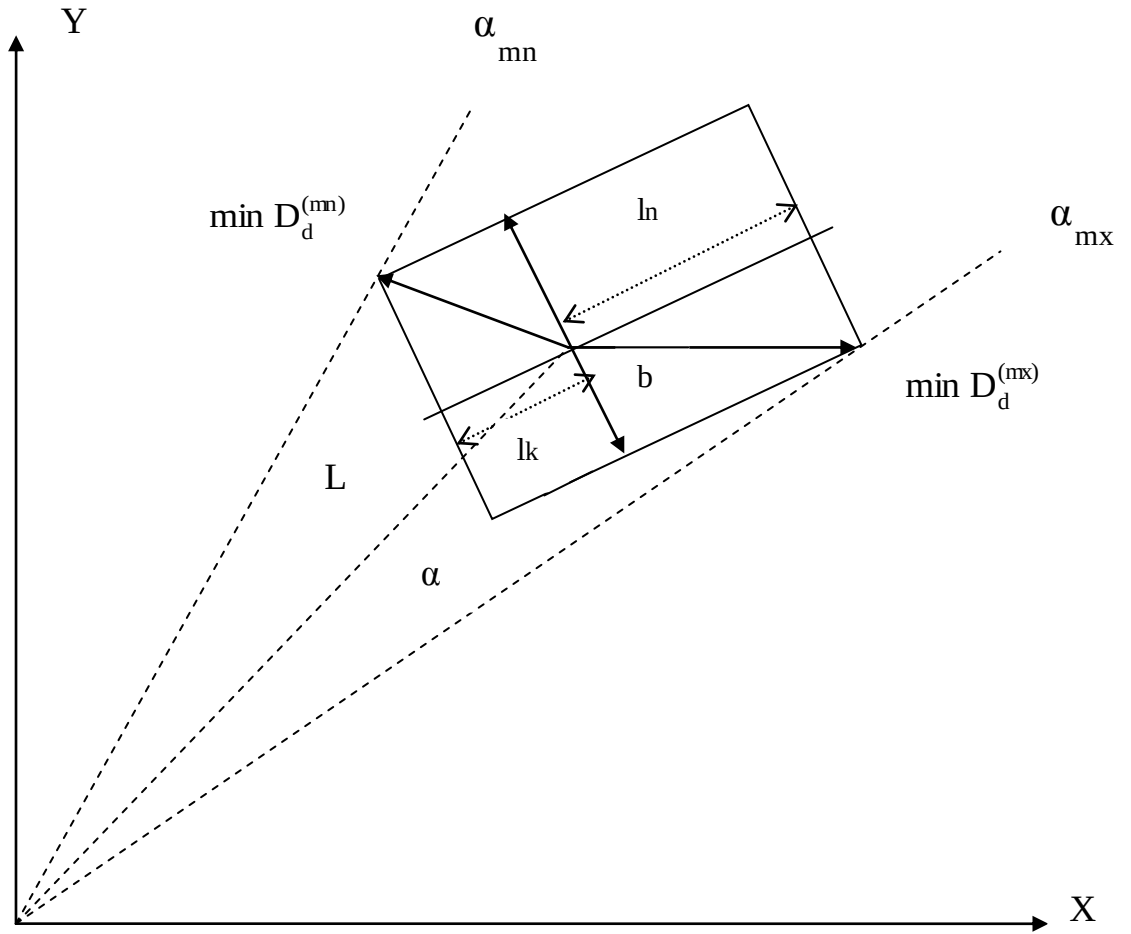


Рис. 3.9. Минимальные дистанции  $\min D_d^{(mn)}$  и  $\min D_d^{(mx)}$  при прямоугольной области риска столкновения

Как следует из рис. 3.10, значения минимальных дистанций  $\min D_d^{(mn)}$  и  $\min D_d^{(mx)}$  определяется соотношением курса цели  $K_c$  и пеленга на нее  $\alpha$ .

Анализ показал, что при  $K_c \in (\alpha - \arctg \frac{b}{L}, \alpha + \arctg \frac{b}{L})$ , где  $L$  – расстояние между судном и целью, то  $\min D_d^{(mn)} = \min D_d^{(mx)} = D_k$ . Если же  $K_c \in (\alpha + \pi - \arctg \frac{b}{L}, \alpha + \pi + \arctg \frac{b}{L})$ , то  $\min D_d^{(mn)} = \min D_d^{(mx)} = D_n$ . В случае, если имеет место соотношение  $K_c \in (\alpha + \arctg \frac{b}{L}, \alpha + \pi - \arctg \frac{b}{L})$ , то

$\min D_d^{(mx)} = D_n$  и  $\min D_d^{(mn)} = D_k$ . И, наконец, когда имеет место выражение  $K_c \in (\alpha + \arctg \frac{b}{L}, \alpha + \pi - \arctg \frac{b}{L})$ , то  $\min D_d^{(mx)} = D_k$  и  $\min D_d^{(mn)} = D_n$ .

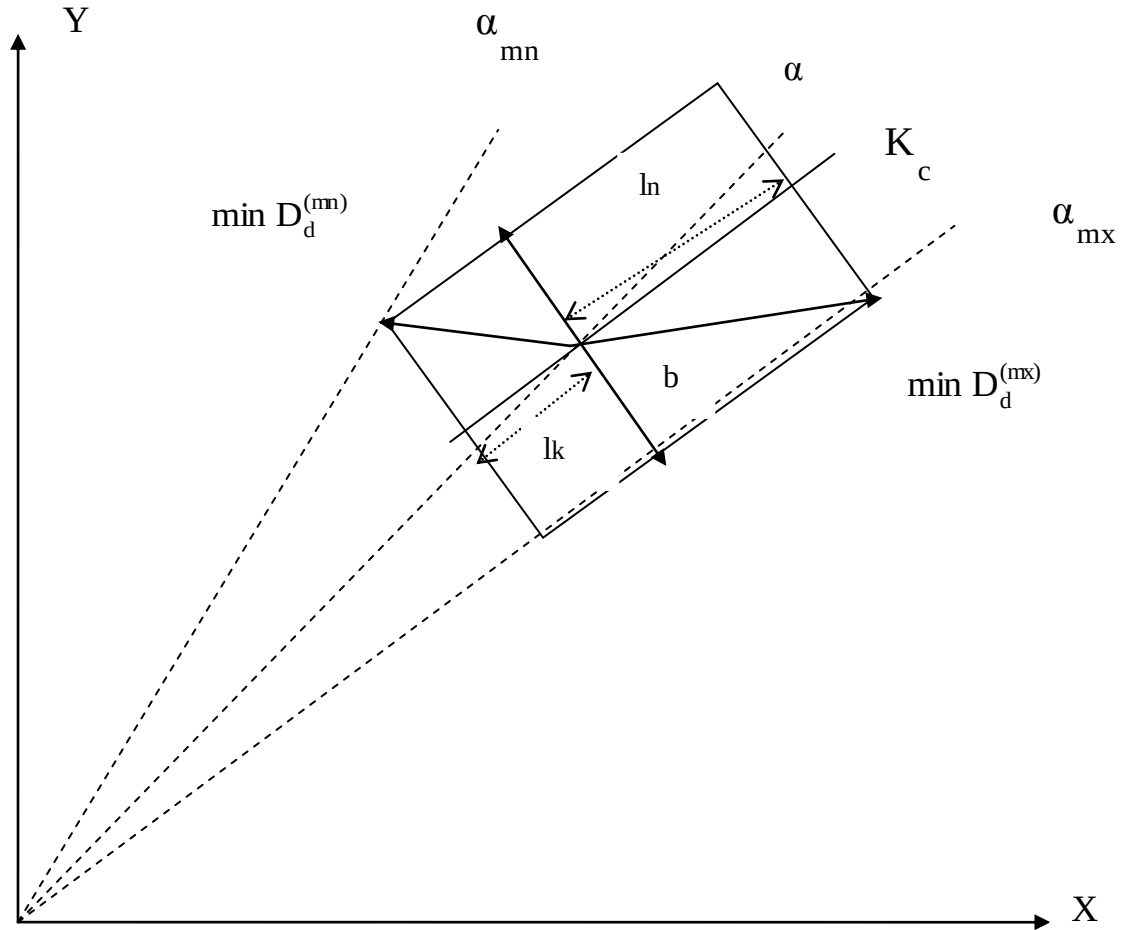


Рис. 3.10. Определение значений  $\min D_d^{(mn)}$  и  $\min D_d^{(mx)}$

Алгоритм определения ситуации чрезмерного сближения в этом случае точно такой же, как и в случае области риска столкновения эллиптической формы.

В случае, когда область риска столкновения имеет форму круга и минимальная предельно-допустимая дистанция кратчайшего сближения имеет постоянное значение, равное  $D_{dop1} + D_{dop2}$ , ситуация чрезмерного сближения существует, если справедливы неравенства:

$$D_o \sin(K_{otmin} - \alpha_o) < D_{dop1} + D_{dop2}; \quad D_o \sin(K_{otmax} - \alpha_o) < D_{dop1} + D_{dop2}.$$

### 3.3. Формирование стратегии экстренного расхождения и зависимость ее структуры от характеристики процесса расхождения

При решении рассматриваемой задачи необходимо учитывать отсутствие информации о намерениях цели по выбору маневра расхождения, т.е. дальнейшие значения параметров движения цели не могут быть прогнозируемыми. Доступной является информация о начальной и текущей позиции цели и ее начальном курсе и скорости.

Данная задача относится к типу задач управления с неполной информацией, когда при управлении отсутствует намеренное противоборство между партнерами. В таких задачах часто полагают, что неопределенные факторы могут повлиять самым неблагоприятным образом, т.е. удобно принимать, что формирование этих факторов определяется неким противником, замыслы которого, может быть, направлены во вред делу.

Решение таких задач производится методами дифференциальных позиционных игр [152], поэтому первым этапом процесса расхождения являются действия судна, находящегося в начальной позиции ситуации чрезмерного сближения, по предупреждению возможного столкновения с помощью экстренного маневра.

При рассмотрении маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения обычно рассматривается только уклонение судна от опасной цели при ее непредсказуемом поведении, однако в данном исследовании стратегия расхождения предусматривает маневрирование судна изменением курса с момента обнаружения ситуации чрезмерного сближения до момента выхода на программную траекторию движения.

На первом этапе стратегии экстренного расхождения требуется незамедлительно предпринять маневр, который бы обеспечил если не увеличение дистанции между судами при произвольном маневрировании цели, то хотя бы минимальную скорость их сближения. Так как поведение



цели в сложившейся ситуации является неизвестным, то маневр расхождения необходимо выбирать, исходя из ее наиболее неблагоприятного маневра.

Рассматривая ситуацию в первом приближении, можно сделать вывод, что таким маневром является поворот цели на курс равный пеленгу на судно. В этом случае скорость сокращения дистанции между судами будем максимальной, и угроза столкновения будет возрастать (рис. 3.11).

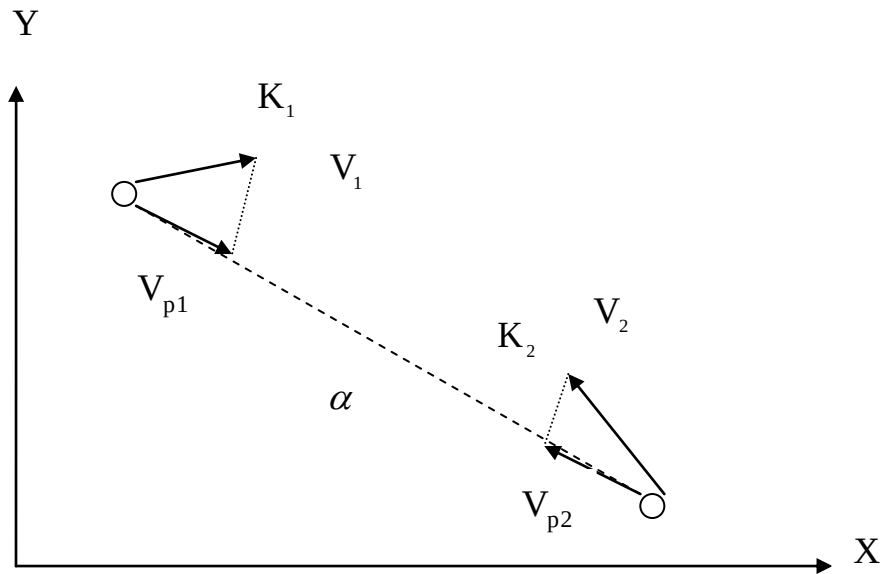


Рис. 3.11. Ситуация опасного сближения судов

Как следует из рис. 3.11, скорость сближения судна и цели  $V_p$  является суммой проекций скорости судна  $V_{p1}$  и цели  $V_{p2}$  на направление линии пеленга, соединяющую судно и цель, т. е.  $V_p = V_{p1} + V_{p2}$  или:

$$V_p = V_1 \cos(\alpha - K_1) + V_2 \cos[K_2 - (\alpha + \pi)]. \quad (3.17)$$

Из приведенного выражения следует, что наиболее неблагоприятным маневром цели является следование курсом  $K_2$  равным пеленгу с цели на судно  $\alpha + \pi$ , при котором при прочих равных условиях максимально быстро сокращается расстояние между судном и целью. Судно может минимизировать скорость сближения, как следует из формулы (3.17),

изменением курса  $K_1$  равного направлению противоположному пеленгу на цель, т. е. равного  $\alpha + \pi$  (рис. 3.12).

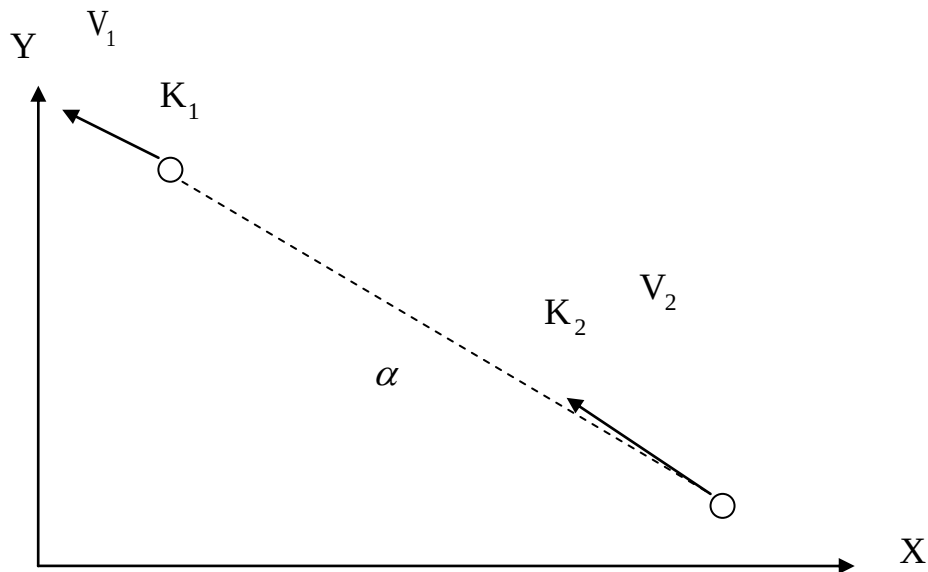


Рис.3. 12. Минимизация судном скорости сближения с целью

Очевидно, при следовании судна указанным курсом скорость изменения дистанции определяется выражением:

$$V_p = V_1 - V_2 \cos[K_2 - (\alpha + \pi)].$$

В случае, если скорость судна превосходит скорость цели, т. е.  $V_1 > V_2$ , то дистанция между судном и целью увеличивается и угроза столкновения исчезает. В противном случае ( $V_1 \leq V_2$ ) дистанция сокращается с минимальной скоростью и максимально увеличивается время кратчайшего сближения, что дает возможность цели предпринять маневр безопасного расхождения.

В любом случае, если цель не будет намеренно стремиться к столкновению, а судно предпримет предлагаемый маневр, дистанция между судном и целью начнет увеличиваться. Когда она достигнет предельно-допустимого значения, судно может лечь на курс, при котором дистанция кратчайшего сближения не уменьшается и происходит сближение с программной траекторией движения.

Таким образом, в нулевой момент времени (момент обнаружения ситуации чрезмерного сближения) судно, следуя минимаксной стратегии, которая предполагает наиболее неблагоприятный маневр уклонения цели, должно лечь на курс  $K_0$ , равный обратному пеленгу на цель, т.е.  $K_0 = \alpha + 180$ , где  $\alpha$  - пеленг на цель. При этом поворот на указанный курс производится в сторону от направления на цель. Данный этап стратегии расхождения можно назвать минимизацией скорости сближения с целью. В данной работе будем считать, что скорость цели  $V_2$  превосходит скорость судна  $V_1$ , т. е.  $V_2 > V_1$ .

На данном этапе необходимо компенсировать ситуацию чрезмерного сближения, изменяя относительную позицию судна относительно цели так, чтобы судно оказалось в ситуации, обеспечивающей безопасное сближение и движение судна к программной траектории движения.

Таким образом, после поворота на курс  $K_0$ , когда максимально возможная дистанция кратчайшего сближения  $\max L_{\min}$  не превосходит предельно-допустимую дистанцию  $L_d$ , т. е.  $\max L_{\min} \leq L_d$ , судно следует курсом  $K_0 = \alpha + 180$ , причем этот курс изменяется с изменением пеленга  $\alpha$ , так как происходит перемещение цели относительно судна. Очевидно, что в этом случае курс судна стремится к начальному программному курсу, а дистанция между судном и целью в общем случае увеличивается. Если скорость судна меньше скорости цели  $V_2 > V_1$ , то при изменении курса судна на  $360^\circ$  относительный курс изменяется лишь в некотором секторе, достигая максимального и минимального значений, величина которых определяется выражениями [11]:

$$K_{\text{otmin}} = \pi + K_2 - \arcsin \rho \quad \text{и} \quad K_{\text{otmax}} = \pi + K_2 + \arcsin \rho, \quad (3.18)$$

где  $K_{\text{otmin}}$  и  $K_{\text{otmax}}$  - соответственно минимальное и максимальное значения относительного курса;

$K_2$  - курс цели;  $\rho = V_1/V_2$ , причем в рассматриваемом случае  $\rho < 1$ .

Следовательно, при  $\rho < 1$  для всех истинных курсов судна из диапазона от 0 до  $2\pi$  относительный курс будет принимать значения из диапазона  $[K_{otmin}, K_{otmax}]$ . Если же  $\rho \geq 1$ , то относительный курс изменяется от 0 до  $2\pi$  при изменении истинного курса судна в тех же пределах.

Очевидно, если скорость судна меньше скорости цели, то максимально возможная дистанция кратчайшего сближения  $\max L_{min}$  достигается при относительных курсах  $K_{otmin}$  или  $K_{otmax}$ . Если через  $K_{extr}$  обозначить экстремальный относительный курс ( $K_{otmin}$  или  $K_{otmax}$ ), на котором достигается дистанция кратчайшего сближения  $\max L_{min}$ , то при условии, что цель не изменяет параметры движения, выражение для  $\max L_{min}$  имеет следующий вид [11]:

$$\max L_{min} = D \sin(K_{extr} - \alpha), \quad (3.19)$$

где  $\alpha$ ,  $D$  - соответственно пеленг на цель и дистанция между судном и целью.

Так как с момента времени начала отворота судна от начального программного курса пеленг  $\alpha$  и дистанция  $D$  изменяются, то в момент времени  $t_{on}$  достижения курса судна значения курса «убегания»  $K_0$  необходимо оценить текущую относительную позицию. Для этого следует с помощью формулы (3.18) рассчитать экстремальные относительные курсы и вычислить максимально возможную дистанцию кратчайшего сближения  $\max L_{min}$  по формуле (3.19). Затем надлежит проверить справедливость неравенства  $\max L_{min} \leq L_d$ . Если равенство справедливо, то надлежит следовать курсом «убегания»  $K_0$ , удерживая курс судна противоположным пеленгу на цель, стараясь увеличить дистанцию до цели. При этом надлежит контролировать соотношение  $\max L_{min} \leq L_d$ . При справедливости данного неравенства судно продолжает следовать курсом  $K_0$  до тех пор, пока

максимально возможная дистанция кратчайшего сближения  $\max L_{\min}$  не станет равной дистанции кратчайшего сближения  $L_d$ , т. е.  $\max L_{\min} = L_d$ . Момент времени этого события обозначим  $t_{ok}$ . В данный момент времени необходимо изменить курс судна на величину, при которой достигается экстремальное значение относительного курса и максимальное значение дистанции кратчайшего сближения. Как показано в работе [11], экстремальные относительные курсы  $K_{otmin}$  и  $K_{otmax}$  достигаются соответственно при курсах судна:

$$K_{o min} = K_2 + \arccos(\rho) \quad \text{и} \quad K_{o max} = K_2 - \arccos(\rho).$$

Следуя одним из указанных курсов, судно перемещается в сторону цели, причем дистанция  $D$  между судном и целью сокращается, причем контролируется справедливость неравенства  $L_{\min} \leq L_d$ . Если неравенство справедливо, то продолжаем следовать экстремальным курсом. В момент времени, когда неравенство обратится в равенство, проверяем, не достигла ли дистанция между судном и целью значения  $L_d$ , т.е. справедливость равенства  $D = L_d$ . Если равенство соблюдается, то реализовался момент времени  $t_b$ , и имеется возможность лечь на курс выхода на программную траекторию  $K_b$ , причем участок выхода на программную траекторию движения судна расположен под углом  $\gamma = 30^\circ - 40^\circ$  к программной траектории, т. е.  $K_b = K_n \pm \gamma$ , где  $K_n$  - начальный курс судна.

Судно следует курсом выхода  $K_b$  до тех пор, пока не достигает программной траектории, после чего ложится на начальный курс  $K_n$ , перемещаясь по программной траектории.

Если же равенство  $D = L_d$  не выполняется, т. е. судно не достигло момента поворота к программной траектории  $t_b$ , то ему следует лечь на курс уклонения  $K_y$ , который согласно [11] рассчитывается по формуле:

$$K_y = K_{oty} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_2 - K_{oty})], \quad (3.20)$$

где  $K_{oty}$  - относительный курс уклонения, который определяется из выражения:

$$K_{oty} = \alpha_y + \arcsin\left(\frac{L_d}{D_y}\right),$$

где  $\alpha_y$  и  $D_y$  - соответственно пеленг и дистанция в момент времени  $t_{ok}$ .

В момент времени  $t_{on}$  достижения курса судна значения курса «убегания»  $K_o$  имеет место неравенство  $\max L_{min} \geq L_d$ , то необходимо проверить возможность выхода судна на программную траекторию курсом  $K_b$ , для чего надлежит произвести контроль изменения дистанции при следовании этим курсом. Если дистанция увеличивается, то судно может выходить на заданную траекторию. В противном случае при уменьшении дистанции необходимо рассчитать дистанцию кратчайшего сближения  $L_{minb}$  при следовании курсом  $K_b$  с позиции в момент времени  $t_{on}$ . Если справедливо неравенство  $L_{minb} \geq L_d$ , то судно реализует участок выхода судна на программную траекторию. Если же неравенство не выполняется, то следует рассчитать курс уклонения  $K_y$ , при котором дистанция кратчайшего сближения  $L_{min}$  равна предельно-допустимой дистанции  $L_d$ , т. е.  $L_{min} = L_d$ .

Расчет курса уклонения  $K_y$  рассчитывается по формуле (3.20), при условии, что пеленг и дистанция определяются на момент времени  $t_{on}$ .

Подводя итоги, определим структуру стратегии экстренного расхождения с учетом поведения цели в процессе расхождения в случае, когда скорость судна меньше скорости цели.

Первым этапом стратегии экстренного расхождения является выход в позицию минимизации скорости сближения. Этот этап длится с начального момента обнаружения ситуации чрезмерного сближения до выхода судна на курс минимизации скорости сближения, равный обратному пеленгу на цель. Параметрами первого этапа являются сторона поворота судна, конечный

курс переходного процесса, линейная скорость судна и угловая скорость поворота, расчет которых рассматривается в следующей четвертой главе.

Вторым этапом является движение судна курсом минимизации скорости сближения до выхода в позицию начала целесообразного движения по выполнению функционального назначения в сторону программной траектории.

Причем с этой позиции в зависимости от маневрирования цели движение судна возможно различными курсами, либо экстремальным курсом  $K_{extr} = (K_{o\max}, K_{o\min})$ , либо курсом уклонения  $K_y$ , либо курсом выхода  $K_b$ . Поэтому будем различать следующие этапы движения судна к программной траектории движения: третий этап движения экстремальным курсом, четвертый этап движения курсом уклонения и пятый этап выхода на программную траекторию движения.

Структура стратегии экстренного расхождения представляет собой последовательность этапов движения с момента идентификации ситуации чрезмерного сближения до момента возвращения судна на программную траекторию движения. Анализ вышеизложенного показывает, что первый и пятый этапы обязательно содержатся во всех типах структуры стратегии экстренного расхождения. В общем случае возможны четыре типа структуры  $S_i$  стратегии экстренного расхождения с различным набором этапов  $G_j$ , которые приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1.

Состав структуры стратегии экстренного расхождения

| Типы структуры экстренной стратегии S | Последовательность этапов G   |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| $S_1$                                 | $\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$ |
| $S_2$                                 | $\{G_1, G_3, G_4, G_5\}$      |
| $S_3$                                 | $\{G_1, G_4, G_5\}$           |
| $S_4$                                 | $\{G_1, G_5\}$                |

Первый этап  $G_1$  соответствует переходному процессу с начального курса до выхода судна на курс равный  $K_\alpha = \alpha + 180$ . Второй этап экстренного уклонения  $G_2$  предусматривает следование судна курсом  $K_\alpha$  до окончания этапа. Очередной третий этап экстремального уклонения  $G_3$  обеспечивает следование судна экстремальными курсами при сближении с целью на встречных курсах. Этап стандартного уклонения  $G_4$  (четвертый) предусматривает сближение с целью на кратчайшую дистанцию, равную предельно-допустимой  $L_d$ . И, наконец, пятый этап  $G_5$ , этап выхода на заданную траекторию завершает стратегию расхождения.

#### 3.4. Учет навигационных опасностей и мешающих судов при расчете маневра экстренного расхождения

При наличии навигационных опасностей и мешающих судов в районе маневрирования оперирующего судна для предупреждения столкновения с опасной целью оптимальный курс уклонения должен выбираться с учетом указанных обстоятельств.

Допустим, оперирующее судно  $Vs_{op}$  уклоняется от опасной цели  $Trg_{den}$  оптимальным курсом равным пеленгу с цели на оперирующее судно, т.е.  $K_{yop} = \alpha(t)$ . Однако имеется мешающее судно  $Vs_m$ , с которым при следовании курсом  $K_{yop}$ , может опасно сблизится оперирующее судно  $Vs_{op}$ , как показано на рис. 3.13, причем сближение происходит с начальным относительным курсом  $K_{otyop}$ .

Как следует из указанного рисунка, дистанция кратчайшего сближения оперирующего судна с мешающим судном меньше предельно-допустимого значения  $R$ . Граничными относительными курсами по отношению к мешающему судну являются  $K_{yotpr}$  и  $K_{otyst}$ .



Как следует из рис. 3.13, значения граничных относительных курсов  $K_{yotpr}$  и  $K_{otyst}$  определяются из следующих соотношений:

$$K_{otyst} = \alpha_o(t) + \arcsin \frac{R}{D_o(t)},$$

$$K_{yotpr} = \alpha_o(t) - \arcsin \frac{R}{D_o(t)},$$

где  $\alpha_o(t)$  и  $D_o(t)$  - соответственно пеленг и дистанция до мешающего судна.

Подмножество  $M_n$  истинных курсов оперирующего судна, которые являются недопустимыми из-за опасного сближения с мешающим судном, определяется соотношением:

$$M_n = \{K_{ym}^*, K_{ym*}\},$$

где  $K_{ym}^*$  и  $K_{ym*}$  - верхняя и нижняя границы допустимых истинных курсов.

Если учесть соотношения между относительными и истинными курсами, то можно получить равенства:

$$K_{ym}^* = K_{otyst} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - K_{otyst})],$$

$$K_{ym*} = K_{yotpr} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - K_{yotpr})].$$

Таким образом, допустимыми относительно мешающего судна курсами уклонения оперативного судна  $K_y$  являются те, которые удовлетворяют условию:

$$K_y \notin \{K_{ym}^*, K_{ym*}\}.$$

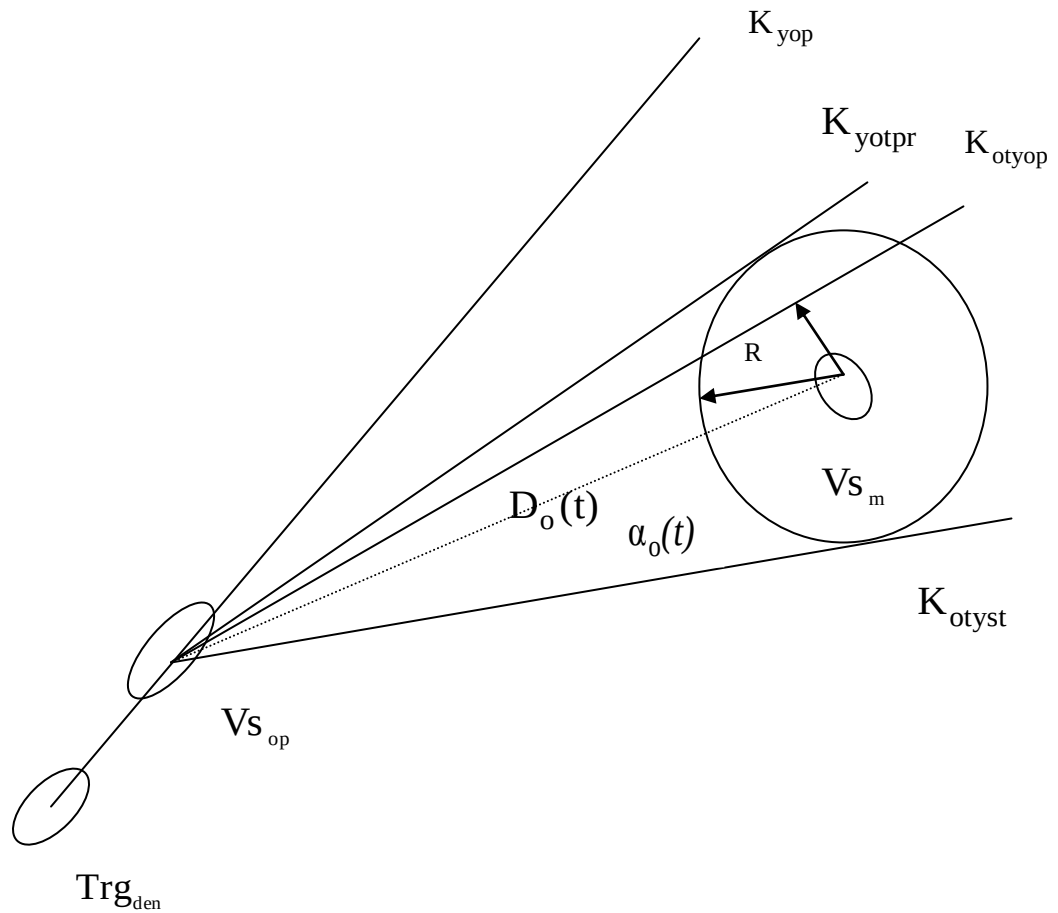


Рис. 3.13. Выбор курса расхождения при наличии мешающего судна

Очевидно, ближе всего к оптимальному курсу уклонения  $K_{yop}$  будут граничные допустимые курсы  $K_{ym}^*$  и  $K_{ym*}$ . В качестве курса уклонения  $K_y$  оперирующего судна при наличии мешающего судна следует выбрать гранично-допустимый курс, минимально отличный от значения  $K_{yop}$ .

Аналитически это выражается следующим образом:

$$K_y = K_{ym}^*, \quad \text{при} \quad |K_{ym}^* - K_{yop}| < |K_{ym*} - K_{yop}|,$$

$$K_y = K_{ym*}, \quad \text{при} \quad |K_{ym}^* - K_{yop}| \geq |K_{ym*} - K_{yop}|.$$

В ситуациях, которые характеризуются одновременно наличием навигационных опасностей и мешающих судов, выбор курса уклонения, минимально отличающегося от оптимального, производится аналогично.

Допустим, имеется линейная распределенная опасность и мешающее судно (рис. 1.14). Для предупреждения посадки оперирующего судна на мель получены граничные предельные истинные курсы  $\tilde{K}_{ypr}$  и  $\tilde{K}_{yst}$ , которые рассчитываются при известных координатах точек излома А и В (рис. 1.14). Для того чтобы не столкнуться с мешающим судном, необходимо по ранее полученным формулам рассчитать граничные допустимые курсы  $K_{ym}^*$  и  $K_{ym*}$ . А для того, чтобы безопасно разойтись с мешающим судном и не попасть на мель необходимо, чтобы курс уклонения оперирующего судна  $K_y$  удовлетворял следующим требованиям:

$$K_y \notin \{K_{ym*}, K_{ym}^*\},$$

$$K_y \notin \{\tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst}\}.$$

При этом оптимальным курсом уклонения  $\tilde{K}_{yop}$  является курс, который, во-первых, не принадлежит объединению подмножеств  $\{K_{ym*}, K_{ym}^*\}$  и  $\{\tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst}\}$ , а также, во-вторых, имеет минимальное отклонение от курса  $K_{yop}$  равного пеленгу с цели на судно, т.е.:



На рис. 1.14 если подмножества курсов  $\{K_{ym*}, K_{ym}^*\}$  и  $\{\tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst}\}$  не пересекаются, т.е.  $\{\tilde{K}_{ypr}, \tilde{K}_{yst}\} \cap \{K_{ym*}, K_{ym}^*\} = \emptyset$ , то оптимальным курсом  $\tilde{K}_{yop}$  является граничный курс  $\tilde{K}_{yst}$ .

Аналогично учитываются навигационные опасности и мешающие суда на последующих этапах стратегии расхождения.

### 3.5. Выводы по третьей главе

В главе приведено формализованное описание ситуации чрезмерного сближения судна с целью и определение максимальной дистанции кратчайшего сближения.

Показано, что максимальная дистанция кратчайшего сближения определяется начальной относительной позицией, параметрами движения судна и цели, а также зависит от соотношения скоростей судна и цели.

Установлено, что ситуация чрезмерного сближения реализуется в случае, когда максимальная дистанция кратчайшего сближения не превосходит по величине минимальную предельно-допустимую дистанцию сближения. Получено аналитическое выражение указанного условия реализации ситуации чрезмерного сближения.

Произведена формализация минимальной предельно-допустимой дистанции сближения, которая состоит из нескольких слагаемых. Так, как безопасная область судна может описываться фигурами разной формы, то получены аналитические выражения для минимальной предельно-допустимой дистанции сближения трех наиболее часто встречающихся форм: круга, эллипса и прямоугольника.

Получена процедура формирования стратегии экстренного расхождения, состоящей из этапа уклонения на курс, равный обратному пеленгу на цель, и нескольких возможных этапов возвращения судна на программную траекторию движения.

Выявлена зависимость структуры экстренного расхождения от характеристики процесса расхождения и показано, что структура стратегии в общем случае может содержать до пяти этапов.

Разработана процедура учета навигационных опасностей и мешающих судов в районе маневрирования судна при расчете маневра экстренного расхождения.

## ГЛАВА 4

### ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СТРАТЕГИИ ЭКСТРЕННОГО РАСХОЖДЕНИЯ СУДНА

#### 4.1. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения.

Учитывая, что параметрами стратегии экстренного расхождения являются курсы, на которые судно ложится в определенной последовательности, и моменты времени начала поворотов судна на каждый из курсов, целесообразно выразить идентификацию ситуации чрезмерного сближения временной оценкой.

Из рис. 4.1 видно, что судно, перемещаясь по линии относительного движения  $K_{oto}$ , достигает точки  $M_{mn}$ , в которой относительным отклонением влево не может избежать ситуации чрезмерного сближения, а в точке  $M_{mx}$  и позже реализуется ситуация чрезмерного сближения.

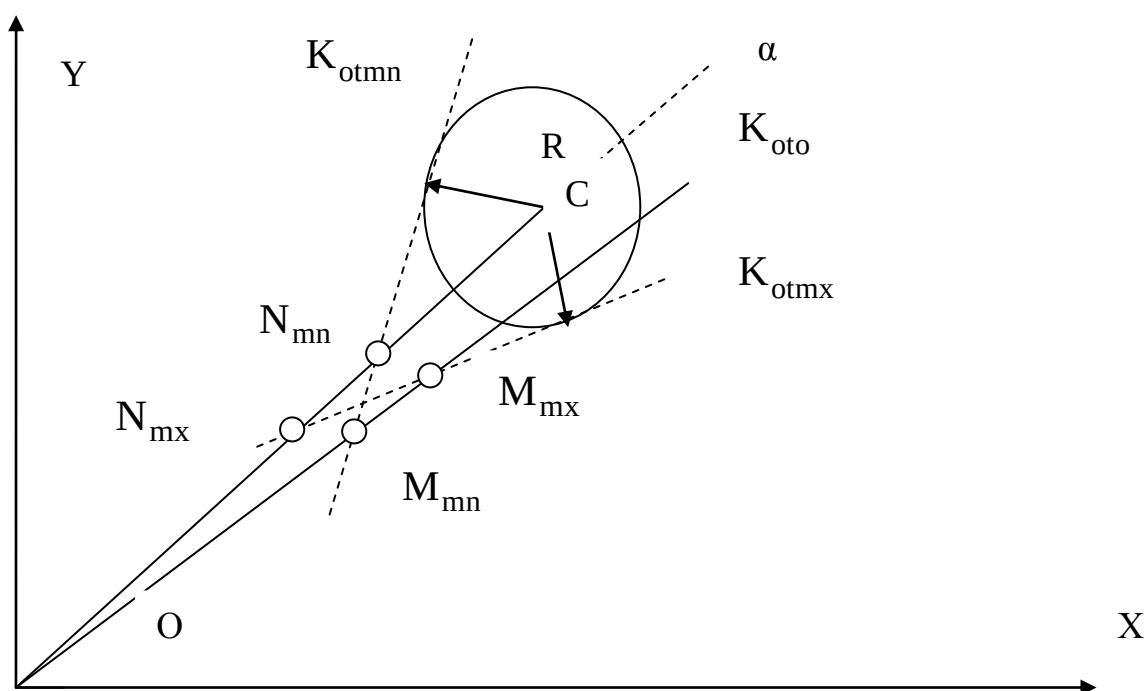


Рис. 4.1. Определение временного параметра чрезмерного сближения

Рассмотрим процедуру определения момента времени  $t_{np}$ , когда судно достигает позиции возникновения ситуации чрезмерного сближения (на рис. 4.1 такой позицией является точка  $M_{mx}$ ), в случае области риска столкновения круглой формы. Для этого найдем моменты времени  $t_{mn}$  и  $t_{mx}$ , в которые судно достигает точек  $M_{mn}$  и  $M_{mx}$ .

Меньшее из значений  $t_{mn}$  и  $t_{mx}$  равно моменту времени  $t_{np}$ . Из рис. 4.1 следует, что точка  $M_{mn}$  является точкой пересечения линии относительного движения  $K_{oto}$  и касательной к окружности, причем касательная ориентирована под углом минимального относительного курса  $K_{otmn}$ . Радиусом области риска столкновения является минимальная предельно-допустимая дистанция кратчайшего сближения, т.е.  $R = \min D_{dop}$ .

Для получения координат точки  $M_{mn}$  необходимо аналитически выразить обе прямые и найти их точку пересечения.

Найдем аналитическое выражение для касательной  $K_{otmn}$ . Обращаем внимание, что касательная проходит через точку  $N_{mn}$ , координаты которой можно определить. Действительно, величина отрезка  $С N_{mn}$  определяется из формулы  $С N_{mn} = \frac{R}{\sin(\alpha - K_{otmn})}$ . Поэтому расстояние от начала координат  $O$

до точки  $N_{mn}$  находится как разность между дистанцией до цели  $D$  и отрезком  $С N_{mn}$ , т.е.  $ON_{mn} = D - С N_{mn}$ , или  $ON_{mn} = D - \frac{R}{\sin(\alpha - K_{otmn})}$ .

Следовательно, координаты точки  $N_{mn}$ , принадлежащей касательной  $K_{otmn}$ , которые обозначим  $X_{Nmn}$  и  $Y_{Nmn}$ , выражаются следующим образом:



$$X_{Nmn} = ON_{mn} \sin \alpha; \quad Y_{Nmn} = ON_{mn} \cos \alpha.$$

Подставляя значение  $ON_{mn}$ , получим:

$$X_{Nmn} = \frac{R \sin \alpha}{\sin(\alpha - K_{otmn})}; \quad Y_{Nmn} = \frac{R \cos \alpha}{\sin(\alpha - K_{otmn})}. \quad (4.1)$$

Уравнение прямой линии, проходящей через точку  $N_{mn}$  под углом  $K_{otmn}$ , которая является рассматриваемой касательной, имеет следующий вид:

$$y = Y_{Nmn} + (x - X_{Nmn}) \operatorname{ctg} K_{otmn}. \quad (4.2)$$

Уравнение линии относительного движения, проходящей через начало координат под углом  $K_{oto}$ , записывается следующим образом:

$$y = x \operatorname{ctg} K_{ot}. \quad (4.3)$$

Искомая точка  $M_{mn}$  принадлежит обеим линиям, поэтому подставляя ее неизвестные координаты  $X_{Mmn}$  и  $Y_{Mmn}$  в оба уравнения (4.2) и (4.3), получим систему уравнений относительно неизвестных координат:

$$\begin{cases} Y_{Mmn} = Y_{Nmn} + (X_{Mmn} - X_{Nmn}) \operatorname{ctg} K_{otmn}; \\ Y_{Mmn} = X_{Mmn} \operatorname{ctg} K_{ot}. \end{cases} \quad (4.4)$$

Решая данную систему уравнений, получим координаты  $X_{Mmn}$  и  $Y_{Mmn}$  точки пересечения  $M_{mn}$ . Приравняв правые части уравнений (4.4), находим выражение для координаты  $X_{Mmn}$ :

$$X_{Mmn} = \frac{Y_{Nmn} - X_{Nmn} \operatorname{ctg} K_{otmn}}{\operatorname{ctg} K_{oto} - \operatorname{ctg} K_{otmn}}.$$

Вторую координату  $Y_{Mmn}$  находим из второго уравнения системы (4.4):

$$Y_{Mmn} = X_{Mmn} \operatorname{ctg} K_{oto}, \text{ или } Y_{Mmn} = \frac{Y_{Nmn} - X_{Nmn} \operatorname{ctg} K_{otmn}}{\operatorname{ctg} K_{oto} - \operatorname{ctg} K_{otmn}} \operatorname{ctg} K_{oto}.$$

Таким образом, точка  $M_{mn}$  имеет координаты:

$$X_{Mmn} = \frac{Y_{Nmn} - X_{Nmn} \operatorname{ctg} K_{otmn}}{\operatorname{ctg} K_{oto} - \operatorname{ctg} K_{otmn}}, \quad Y_{Mmn} = \frac{Y_{Nmn} - X_{Nmn} \operatorname{ctg} K_{otmn}}{\operatorname{ctg} K_{oto} - \operatorname{ctg} K_{otmn}} \operatorname{ctg} K_{oto},$$

где известные координаты точки  $N_{mn}$  имеют вид (4.1):

$$X_{Nmn} = \frac{\min D_{dop} \sin \alpha}{\sin(\alpha - K_{otmn})}; \quad Y_{Nmn} = \frac{\min D_{dop} \cos \alpha}{\sin(\alpha - K_{otmn})}.$$

Для расчета момента времени  $t_{mn}$  необходимо найти расстояние с начала координат  $O$  до точки  $M_{mn}$ , которое обозначим  $D_{mn}$ . Очевидно:

$$D_{mn} = \pm \sqrt{X_{Mmn}^2 + Y_{Mmn}^2}. \quad (4.5)$$

Очевидно, величина  $D_{mn}$  может принимать положительные или отрицательные значения, как показано на рис. 4.2. Из рисунка видно, что если судно находится в позиции  $M_{mn}$ , то дистанция  $D_{mn} = 0$ . Этой ситуации соответствует условие  $D \sin(\alpha - K_{otmn}) = \min D_{dop}$ . Если относительная позиция судна расположена до точки  $M_{mn}$  (например, в точке  $M_1$ ), то  $D_{mn} > 0$ , при этом справедливо неравенство  $D \sin(\alpha - K_{otmn}) > \min D_{dop}$ . Если позиция судна (точка  $M_1$ ) расположена после точки  $M_{mn}$ , то дистанция  $D_{mn} < 0$  и имеет место условие  $D \sin(\alpha - K_{otmn}) < \min D_{dop}$ . Поэтому:

$$\begin{cases} D_{mn} > 0, \text{ при } D \sin(\alpha - K_{otmn}) > \min D_{dop} \\ D_{mn} = 0, \text{ при } D \sin(\alpha - K_{otmn}) = \min D_{dop} \\ D_{mn} < 0, \text{ при } D \sin(\alpha - K_{otmn}) < \min D_{dop} \end{cases} \quad (4.6)$$

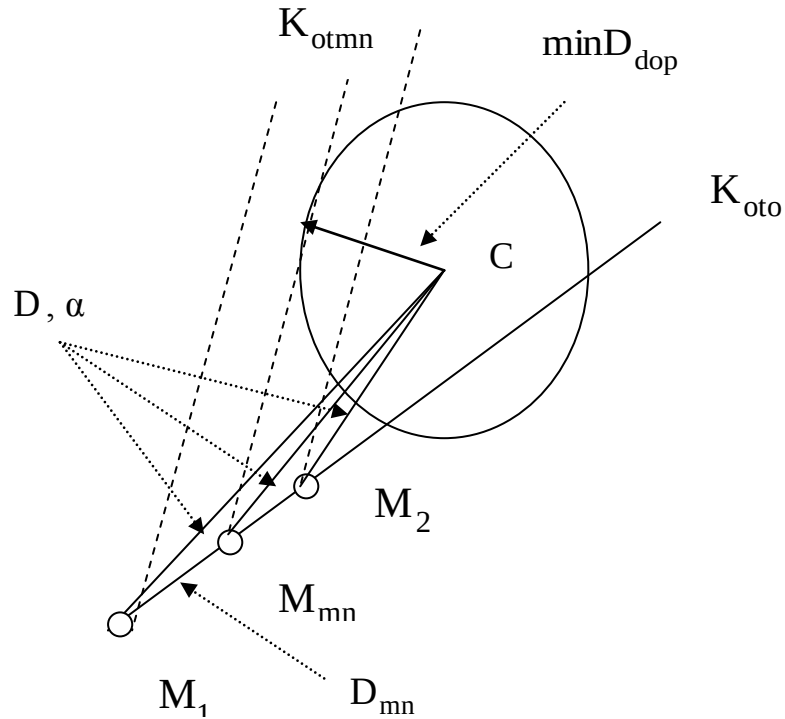


Рис. 4.2. Определение знака величины  $D_{mn}$

В случае, когда величина расстояния  $D_{mn}$  отличается от нуля, ее величина после преобразования выражения (4.5) рассчитывается по формуле:

$$D_{mn} = \frac{Y_{Nmn} - X_{Nmn} \operatorname{ctg} K_{otmn}}{\operatorname{ctg} K_{oto} - \operatorname{ctg} K_{otmn}} \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 K_{oto}}.$$

Учитывая, что

$$\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 K_{oto}} = \frac{1}{\sin K_{oto}},$$

$$Y_{Nm} - X_{Nm} \operatorname{ctg} K_{otmn} = \frac{\min D_{dop} \sin(K_{otmn} - \alpha)}{\sin(\alpha - K_{otmn}) \sin K_{otmn}} = - \frac{\min D_{dop}}{\sin K_{otmn}},$$

$$\operatorname{ctg} K_{oto} - \operatorname{ctg} K_{otmn} = \frac{\sin(K_{otmn} - K_{oto})}{\sin K_{oto} \sin K_{otmn}},$$

выражение для  $D_{mn}$  принимает следующий вид:

$$D_{mn} = \frac{\min D_{dop}}{\sin(K_{oto} - K_{otmn})}.$$

Граничный момент времени  $t_{mn}$  рассчитывается с помощью следующей формулы:

$$t_{mn} = \frac{D_{mn}}{V_{ot}} \quad \text{или} \quad t_{mn} = \frac{\min D_{dop}}{V_{ot} \sin(K_{oto} - K_{otmn})},$$

а его знак определяется знаком величины  $D_{mn}$ .

Аналогично производится расчет момента времени  $t_{mx}$ :

$$t_{mx} = \frac{\min D_{dop}}{V_{ot} \sin(K_{oto} - K_{otmx})}.$$

Поэтому момент времени  $t_{np} = \min(t_{mx}, t_{mn})$ .

Рассмотрим случай, когда область риска столкновения имеет форму эллипса. В этом случае критическими точками  $A_{mn}$  и  $A_{mx}$  являются те, в которых прямые с углами наклона равными относительным курсам  $K_{otmx}$  и  $K_{otmn}$  касаются эллипса, как показано на рис. 4.3. Дальнейшее определение граничных моментов времени  $t_{mn}$  и  $t_{mx}$  производится аналогично

предыдущему случаю. Поэтому найдем процедуру определения координат касательных точек  $A_{mn}$  и  $A_{mx}$ .

Рассмотрим определение координат касательной точки  $A_{mn}$  в системе координат  $XOY$ , после чего преобразуем их для системы координат  $\bar{X}O\bar{Y}$ . Стандартное уравнение эллипса в системе координат  $XOY$  имеет следующий аналитический вид:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

из которого выражаем функцию  $y$  через аргумент  $x$ :

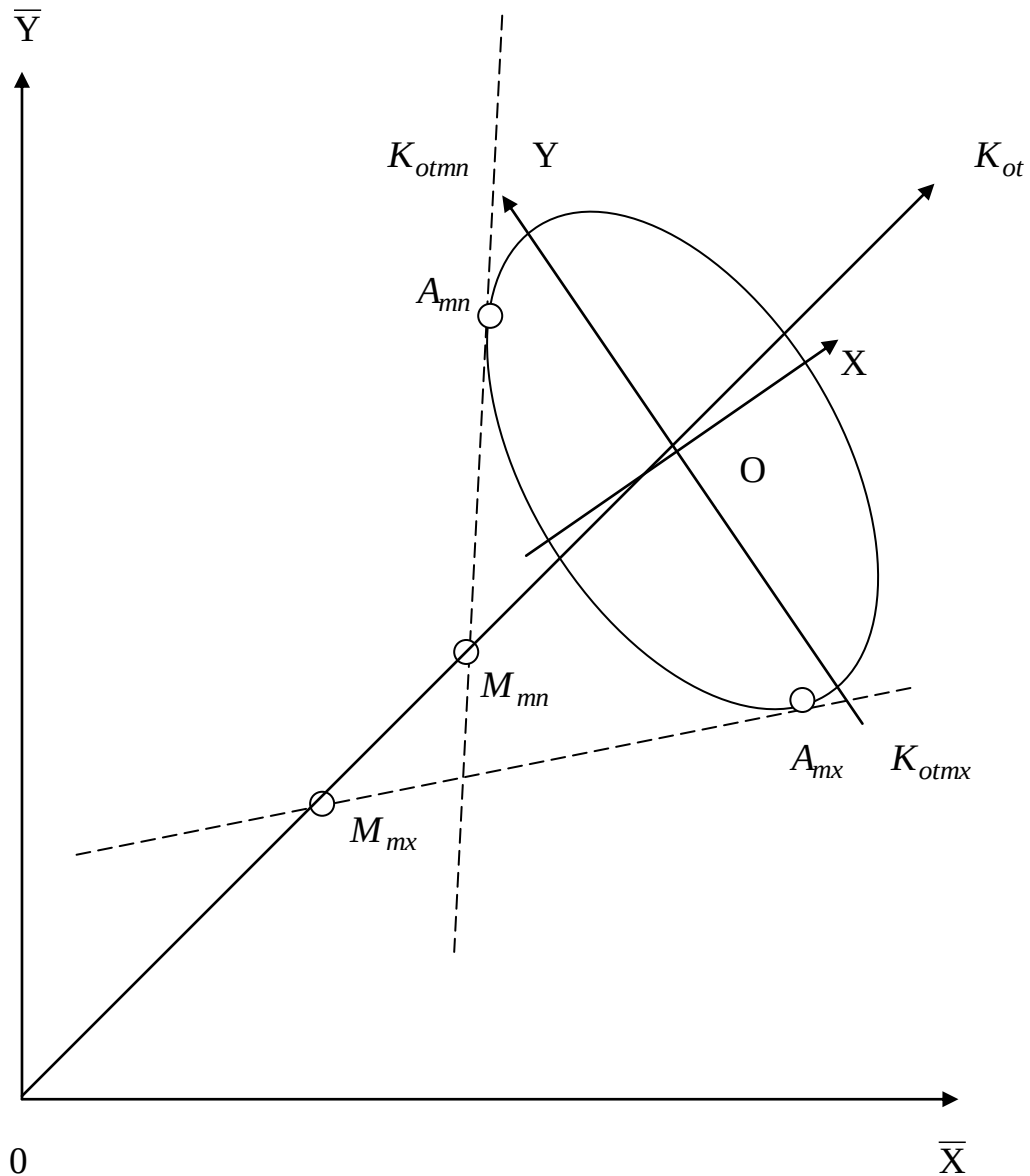


Рис. 4.3. Точки пересечения для зоны безопасности в виде эллипса

$$y = \pm b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}.$$

Из полученного выражения найдем первую производную  $\frac{dy}{dx}$ , причем раньше было получено:

$$\frac{dy}{dx} = \mp \frac{b}{a^2} \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}}.$$

Если в качестве углового коэффициента для первой производной выбрать  $\text{ctg}(K_{\text{отн}} - K)$ , то можно найти координаты  $X_{A_{mn}}$  и  $Y_{A_{mn}}$  точки касания  $A_{mn}$  (рис. 4.4).

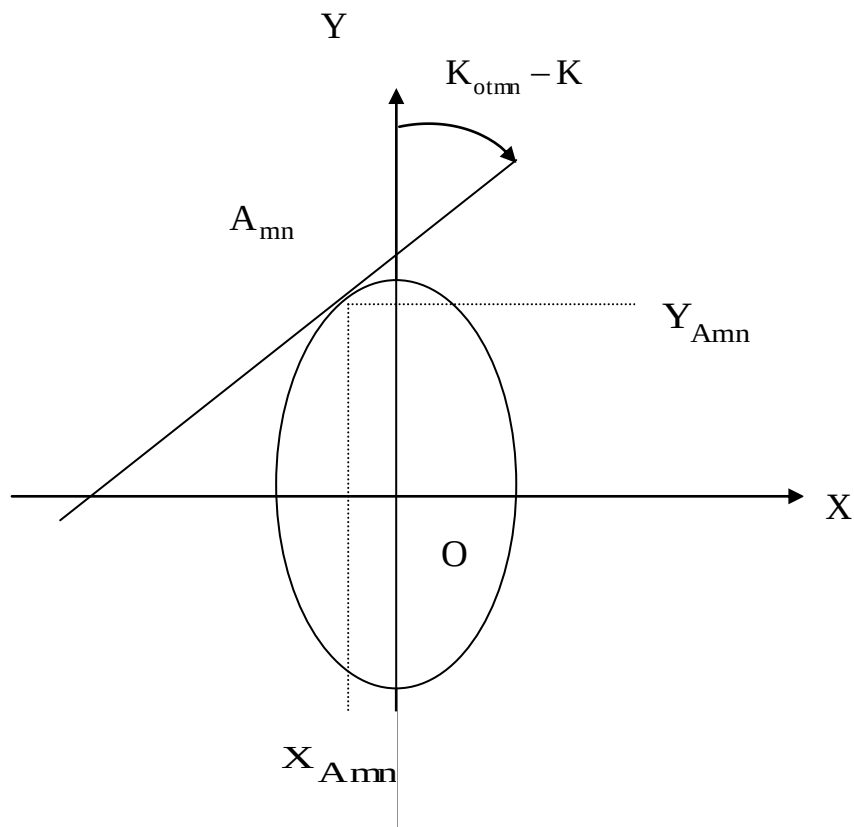


Рис. 4.4. К определению касательной точки к эллипсу

Геометрический смысл производной заключается в ее равенстве угловому коэффициенту, что позволяет записать следующее уравнение для касательной с известным угловым коэффициентом, но неизвестной координатой  $X_{Amn}$ :

$$\mp \frac{b}{a^2} \frac{X_{Amn}}{\sqrt{1 - \frac{X_{Amn}^2}{a^2}}} = \text{ctg}(K_{otm} - K),$$

откуда, обозначая  $k = \text{ctg}(K_{otm} - K)$ , получим:

$$\frac{X_{Amn}}{\sqrt{1 - \frac{X_{Amn}^2}{a^2}}} = \mp \frac{a^2 k}{b},$$

или возводя обе части равенства в квадрат и производя преобразования:

$$X_{Amn}^2 = \frac{M^2}{1 + \frac{M^2}{a^2}},$$

где  $M = \frac{a^2 k}{b}$ .

Откуда окончательное выражение для координаты  $X_{Amn}$  принимает следующий вид:

$$X_{Amn} = \pm Ma \sqrt{\frac{1}{a^2 + M^2}}.$$

Используя уравнение эллипса, находим вторую координату  $Y_{Amn}$ :

$$Y_{Amn} = \pm b \sqrt{1 - \frac{X_{Amn}^2}{a^2}}.$$

Затем точка пересечения касательной прямой под углом минимального относительного курса с начальной линией относительного движения является точкой  $M_{mn}$ , координаты которой вычисляются по формулам:

$$X_{Mmn} = \frac{\bar{Y}_{Amn} - \bar{X}_{Amn} \operatorname{ctg} K_{otmn}}{\operatorname{ctg} K_{ot} - \operatorname{ctg} K_{otmn}}, \quad Y_{Mmn} = \operatorname{ctg} K_{ot} \frac{\bar{Y}_{Amn} - \bar{X}_{Amn} \operatorname{ctg} K_{otmn}}{\operatorname{ctg} K_{ot} - \operatorname{ctg} K_{otmn}}. \quad (4.7)$$

Дистанция  $D_{mn}$  между судном и точкой  $M_{mn}$  определяется очевидным выражением:

$$D_{mn} = \sqrt{X_{Mmn}^2 + Y_{Mmn}^2},$$

причем знак  $D_{mn}$  определяется, как и раньше с помощью выражения (4.6).

Граничный момент времени, как и в предыдущем случае, рассчитывается с помощью следующей формулы:

$$t_{mn} = \frac{D_{mn}}{V_{ot}}.$$

Аналогично рассчитывается второй граничный момент времени  $t_{mx}$  и момент времени  $t_{np}$ , который определяет ситуацию чрезмерного сближения.

Рассмотрим случай, когда области риска столкновения имеет форму прямоугольника. Граничный момент времени реализации ситуации чрезмерного сближения может быть рассчитан по формулам, полученными в предыдущем случае, следует только определить координаты точек касания  $A_{mn}$  и  $A_{mx}$ . Используя обозначения, приведенные на рис. 3.9 предыдущей главы, координаты точек касания  $A_{mn}$  и  $A_{mx}$  можно найти следующим образом.

Как следует из рис. 4.5, координаты точки  $A_{mn}$  определяется координатами точки  $C$ , величиной расстояния  $D_k$  и курсом цели  $K$ , причем:



$$X_{Amn} = X_c + D_k \sin(K + \pi - \psi_k);$$

$$Y_{Amn} = Y_c + D_k \cos(K + \pi - \psi_k),$$

где  $X_c$  и  $Y_c$  - координаты цели  $C$ .

Очевидно,  $X_c = D \sin \alpha$ ,  $Y_c = D \cos \alpha$ , поэтому:

$$X_{Amn} = D \sin \alpha + D_k \sin(K + \pi - \psi_k);$$

$$Y_{Amn} = D \cos \alpha + D_k \cos(K + \pi - \psi_k).$$

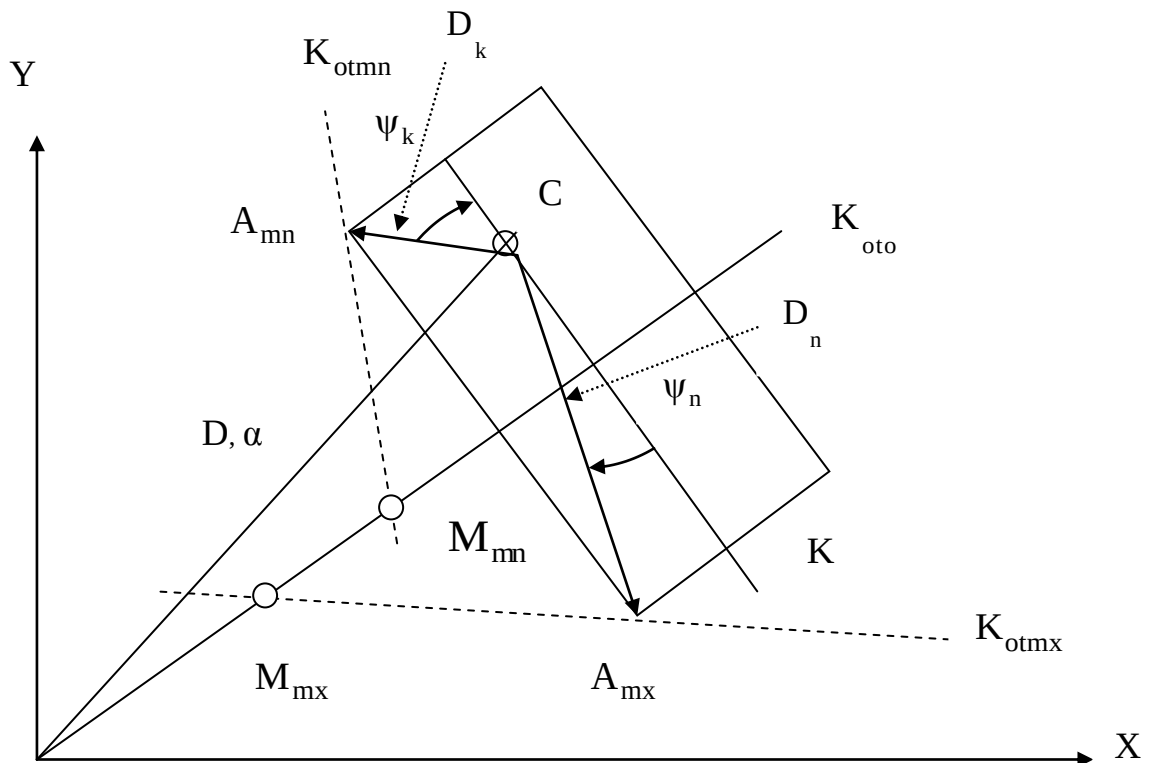


Рис. 4.5. Определение касательных точек к прямоугольнику

Аналогично определяются координаты точки  $A_{mx}$ , причем:

$$X_{Amx} = D \sin \alpha + D_n \sin(K + \psi_n);$$

$$Y_{Amx} = D \cos \alpha + D_n \cos(K + \psi_n).$$

Полученные координаты точек касания  $A_{mn}$  и  $A_{mx}$  с помощью выражений (4.7) позволяют рассчитать координаты точек  $M_{mn}$  и  $M_{mx}$ , а затем моменты времени  $t_{mn}$ ,  $t_{mx}$  и  $t_{np}$ , что позволит выявить ситуацию чрезмерного сближения.

#### 4.2. Расчет параметров первого этапа стратегии экстренного расхождения.

На первом этапе необходимо вычислить курс выхода в ситуацию минимизации скорости сближения, сторону поворота и определить величину угловой скорости поворота.

Будем полагать, что суда находятся в ситуации экстренного расхождения. В рассматриваемой модели считаем, что изменение курса происходит с постоянной угловой скоростью, зависящей от угла кладки пера руля  $\beta$ . Величина линейной скорости судна и цели выбирается в начале маневра и затем остается неизменной.

Ситуацию будем рассматривать с позиций судна, которое выбирает стратегию уклонения, в результате которой старается выйти в позицию минимизации скорости сближения. При этом судно не должно попадать в множество позиций характеризующих столкновение. Последнее условие можно записать:

$$L(t) \geq R_d, \text{ для } t_o \leq t \leq \tau,$$

где  $L(t)$  - текущее расстояние между судами;

$R_d$  - предельно – допустимая дистанция между ними.

Вектор управляющих воздействий цели  $u$  содержит угловую скорость  $\omega_u$  и линейную скорость  $V_1$ , т.е.  $u = (\omega_u, V_1)$ . Судно для управления использует вектор  $v$ , компонентами которого являются соответственно угловая  $\omega_v$  и линейная скорости  $V_2$ , т.е.  $v = (\omega_v, V_2)$ . Причем, как уже

упоминалось, вектор линейной скорости целью и судном выбирается единожды в начале маневра, а угловая скорость может изменяться в течение маневра.

Для записи дифференциального уравнения изменения фазового вектора  $\dot{K}$  вначале необходимо рассмотреть простейшую модель вращательного движения судна (цели), которая имеет следующий вид:

$$\dot{K} = k_p \beta,$$

где  $K$  - курс судна;

$k_p$  - коэффициент эффективности руля;

$\beta$  - угол кладки пера руля.

С учетом того, что  $\dot{K} = \omega$ , исходное уравнение записывается:

$$\omega = k_p \beta.$$

Очевидно, при интегрировании последнего уравнения, получим:

$$K = K_o + \int_0^t \omega d\tau = K_o + \omega t.$$

Скорости изменения координат цели  $\dot{\xi}_1$  и  $\dot{\eta}_1$ , очевидно имеют следующий вид:

$$\dot{\xi}_1 = V_1 \sin(K_{10} + \omega_u t), \quad \dot{\eta}_1 = V_1 \cos(K_{10} + \omega_u t).$$

Аналогично для судна  $\dot{\xi}_2$  и  $\dot{\eta}_2$ , определяются выражениями:

$$\dot{\xi}_2 = V_2 \sin(K_{20} + \omega_v t), \quad \dot{\eta}_2 = V_2 \cos(K_{20} + \omega_v t).$$

Так как, фазовый вектор характеризуется составляющими  $x_1 = \xi_1 - \xi_2$  и  $x_2 = \eta_1 - \eta_2$ , то дифференциальное уравнения фазового вектора  $\dot{x}$  принимает следующий вид:

$$\dot{x} = \begin{vmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} V_1 \sin(K_{10} + \omega_u t) - V_2 \sin(K_{20} + \omega_v t) \\ V_1 \cos(K_{10} + \omega_u t) - V_2 \cos(K_{20} + \omega_v t) \end{vmatrix},$$

а движения с изменением позиции описываются выражениями:

$$x_1(t) = x_{10} + \Delta\xi_1 - \Delta\xi_2; \quad x_2(t) = x_{20} + \Delta\eta_1 - \Delta\eta_2,$$

где  $\Delta\xi_1$ ,  $\Delta\eta_1$ ,  $\Delta\xi_2$  и  $\Delta\eta_2$  - приращения координат цели и судна за время  $t$ ,

$x_{10}$  и  $x_{20}$  - начальная позиция.

Найдем выражения для текущих значений приращения координат  $\Delta\xi$  и  $\Delta\eta$  в общем случае, полагая, что судно маневрирует время  $\tau$ . Очевидно, что:

$$\Delta\xi = \int_0^\tau V_o \sin[K_o + K(t)] dt, \quad \Delta\eta = \int_0^\tau V_o \cos[K_o + K(t)] dt.$$

Подставляя выражение для  $K(t)$ , можно записать:

$$\Delta\xi = \int_0^\tau V_o \sin(K_o + \omega t) dt, \quad \Delta\eta = \int_0^\tau V_o \cos(K_o + \omega t) dt.$$

Найдем выражение  $\Delta\xi$ , для чего произведем замену переменной  $K_o + \omega t = s$ ,  $\omega dt = ds$  и  $dt = ds/\omega$ . Следовательно:

$$\Delta \xi = \int_0^{\tau} V_0 \sin(K_0 + \omega t) dt = \frac{V_0}{\omega} \int_0^{\tau} \sin(s) ds = -\frac{V_0}{\omega} \cos(s) \Big|_0^{\tau}.$$

Подставляем значение переменной  $s$  и получим:

$$\Delta \xi = -\frac{V_0}{\omega} \cos(K_0 + \omega t) \Big|_0^{\tau} = -\frac{V_0}{\omega} [\cos(K_0 + \omega \tau) - \cos K_0],$$

или окончательно выражение для  $\Delta \xi$  принимает вид:

$$\Delta \xi = \frac{V_0}{\omega} [\cos K_0 - \cos(K_0 + \omega \tau)]. \quad (4.8)$$

Аналогично находим выражение для  $\Delta \eta$ , воспользовавшись той же заменой переменной:

$$\Delta \eta = \int_0^{\tau} V_0 \cos(K_0 + \omega t) dt = \frac{V_0}{\omega} [\sin(K_0 + \omega \tau) - \sin K_0]. \quad (4.9)$$

Используя полученные выражения для  $\Delta \xi$  и  $\Delta \eta$ , найдем  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ :

$$x_1(t) = x_{10} + \frac{V_0}{\omega_u} [\cos K_{10} - \cos(K_{10} + \omega_u t)] - \frac{V_0}{\omega_v} [\cos K_{20} - \cos(K_{20} + \omega_v t)];$$

$$x_2(t) = x_{20} + \frac{V_0}{\omega_u} [\sin(K_{10} + \omega_u t) - \sin K_{10}] - \frac{V_0}{\omega_v} [\sin(K_{20} + \omega_v t) - \sin K_{20}].$$

Так изменяются составляющие фазового вектора, которые характеризуют взаимное положение судов и расстояние между ними. Текущее расстояние между судами выражается следующим образом:

$$L(t) = [x_1^2(t) + x_2^2(t)]^{1/2}. \quad (4.10)$$

В начальный момент времени  $t = t_0 = 0$  расстояние между судами превосходит предельно-допустимую дистанцию т.е.  $L(t_0) = L_0 > R_d$ . Данное неравенство должно оставаться справедливым до конечной позиции  $[\tau, x(\tau)]$ , когда курс судна равен обратному пеленгу на цель  $K_2 = \alpha(\tau)$ , т.е.:

$$[L_0 - \int_0^\tau \dot{L}(t) dt] > R_d, \quad 0 \leq t \leq \tau$$

где  $\dot{L}(t)$  - скорость сближения судов.

Очевидно, стабильность неравенства зависит от величины  $\dot{L}(t)$  на интервале времени  $0 \leq t \leq \tau$ . Если скорость  $\dot{L}(t)$  усилиями судна будет минимизирована, то будут созданы наилучшие условия для сохранения безопасной ситуации. Рассмотрим этот вопрос подробно.

Найдем с помощью формулы (4.10) выражение для скорости  $\dot{L}(t)$  и затем условия для ее минимизации.

$$\dot{L}(t) = \frac{1}{2} \frac{2(x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2)}{L(t)}, \quad \text{или}$$

$$\dot{L}(t) = \frac{x_1 \dot{x}_1 + x_2 \dot{x}_2}{L(t)} = \frac{x_1}{L(t)} \dot{x}_1 + \frac{x_2}{L(t)} \dot{x}_2.$$

Очевидно, справедливы соотношения:

$$\frac{x_1}{L(t)} = \sin \alpha(t), \quad \frac{x_2}{L(t)} = \cos \alpha(t),$$

где  $\alpha(t)$  - пеленг с цели на судно.

Следовательно, можно записать:

$$\dot{L}(t) = \sin \alpha(t) \dot{x}_1 + \cos \alpha(t) \dot{x}_2,$$

подставляя выражения для  $\dot{x}_1$  и  $\dot{x}_2$ , получим:

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) = & \sin \alpha(t) [V_1 \sin(K_{10} + \omega_u t) - V_2 \sin(K_{20} + \omega_v t)] + \\ & + \cos \alpha(t) [V_1 \cos(K_{10} + \omega_u t) - V_2 \cos(K_{20} + \omega_v t)]. \end{aligned}$$

После преобразований находим выражение для  $\dot{L}(t)$ :

$$\dot{L}(t) = V_1 \cos[K_{10} + \omega_u t - \alpha(t)] - V_2 \cos[K_{20} + \omega_v t - \alpha(t)]. \quad (4.11)$$

Как следует из полученного выражения, величина скорости  $\dot{L}(t)$  является суммой двух составляющих, причем первая составляющая зависит только от управляющих воздействий цели  $u = (\omega_u, V_1)$ , а вторая составляющая – только от вектора управляющих воздействий судна  $v = (\omega_v, V_2)$ . Найдем стратегию судна, при которой минимизируется значение  $\dot{L}(t)$  при самой неблагоприятной стратегии цели. Такая стратегия цели будет достигнута, когда цель будет максимизировать составляющую  $V_1 \cos[K_{10} + \omega_u t - \alpha(t)]$  в процессе маневрирования. Найдем, по какому закону должна цель формировать свои управляющие воздействия с тем, чтобы максимизировать

скорость сближения  $\dot{L}(t)$ . Для этого найдем первую производную скорости сближения  $\dot{L}(t)$  по угловой скорости  $\omega_u$ :

$$\frac{\partial \dot{L}(t)}{\partial \omega_u} = \frac{\partial}{\partial \omega_u} \{V_1 \cos[K_{10} + \omega_u t - \alpha(t)]\} = -V_1 \sin[K_{10} + \omega_u t - \alpha(t)]t.$$

Приравняем полученную первую производную к нулю, исключая тривиальный случай  $t = 0$ . Получим:

$$\sin[K_{10} + \omega_u t - \alpha(t)] = 0, \text{ или } K_{10} + \omega_u t - \alpha(t) = 0,$$

откуда следует  $\omega_u = \frac{\alpha(t) - K_{10}}{t}$ , т. е. оптимальной стратегией цели, которая максимизирует скорость сближения  $\dot{L}(t)$ , является удержание текущего значения курса равного пеленгу на судно. Однако начальное значение курса цели  $K_{10}$  в общем случае не равно пеленгу на судно, поэтому в начальные моменты времени  $\omega_u$  не может достигать больших расчетных значений, поэтому в худшем случае с начала маневра цель на максимальной угловой скорости  $\omega_{\text{umx}}$  поворачивается в сторону судна по кратчайшему угловому расстоянию, приводя свой курс, равным пеленгу на судно. Затем цели следует поддерживать равенство текущего курса  $K_1(t)$  пеленгу на судно, т.е.  $K_1(t) = \alpha(t)$ .

Первый этап маневра цели можно назвать прицеливанием, а второй – преследованием. Если обозначить через  $\tau_1$  момент времени, когда наступает равенство  $K_1(\tau_1) = \alpha(\tau_1)$ , то до момента  $\tau_1$  криволинейный участок движения цели является прицеливанием, а после момента  $\tau_1$  начинается этап преследования. С учетом возможной наихудшей стратегии цели скорость сближения  $\dot{L}(t)$  принимает вид:



$$\dot{L}(t) = V_1 \cos[K_{10} + \omega_{\text{umx}} t - \alpha(t)] - V_2 \cos[K_{20} + \omega_v t - \alpha(t)],$$

которая по завершению поворота будет минимальна, если к этому моменту курс судна будет равен обратному пеленгу на цель, т.е.  $K_2(t) = \alpha(t) + \pi$ .

Причем  $\dot{L}(\tau_1) = V_1 - V_2$ , так как  $K_{10} + \omega_{\text{umx}} \tau_1 = \alpha(\tau_1)$  и  $K_{20} + \omega_v \tau_1 = \alpha(\tau_1) + \pi$ .

После того, как выявлена ситуация чрезмерного сближения, необходимо незамедлительно приступить к реализации маневра экстренного расхождения. Как было показано в предыдущей главе, наиболее ответственным является первый этап, которым является отворот судна на курс равный пеленгу с цели на судно. Для выхода на требуемый курс судну необходимо выполнить поворот, поэтому необходимо выбрать его параметры. Существенным является то обстоятельство, что на малых дистанциях между судном и целью при маневрировании происходит значительное изменение пеленга. Поэтому при выборе маневра поворота следует помимо относительной позиции учитывать соотношение между скоростью изменения пеленга  $\dot{\alpha}$  и угловой скоростью поворота судна  $\omega_2$ .

В зависимости от относительной позиции и параметров движения судна и цели получено следующее выражение для скорости изменения пеленга  $\dot{\alpha}$ :

$$\dot{\alpha} = \frac{V_1(t) \sin[K_1(t) - \alpha(t)] - V_2(t) \sin[K_2(t) - \alpha(t)]}{L_t},$$

где  $V_1(t)$  и  $K_1(t)$  - параметры движения цели;

$V_2(t)$  и  $K_2(t)$  - параметры движения судна;

$\alpha(t)$  и  $L_t$  - текущие значения пеленга и дистанции.

Если параметры движения цели  $V_1(t)$  и  $K_1(t)$  неизвестны, т.е. реализуется только позиционная стратегия, то нет возможности произвести оценку скорости изменения пеленга  $\dot{\alpha}$ , и обсуждение соотношений  $\dot{\alpha}$  и  $\omega_2$  теряет смысл.

При известных  $V_1(t)$  и  $K_1(t)$  можно вычислить  $\dot{\alpha}$  и произвести анализ различных ситуаций, порождаемых возможными соотношениями  $\dot{\alpha}$  и  $\omega_2$ .

Рассмотрим возможные начальные варианты, учитывая, что исходными являются знак начального курсового угла судна  $\varphi_0$  и изменение пеленга  $\dot{\alpha}$ . Выбор заключается в определении необходимого знака угловой скорости поворота судна  $\omega_2$ .

Допустим начальное значение угла  $\varphi_0$  отрицательное, т.е. курсовой угол левого борта, как показано на рис.4.5.

В случае, если  $\dot{\alpha} < 0$ , очевидно, необходимо выбирать  $\omega_{2\max} > 0$ .

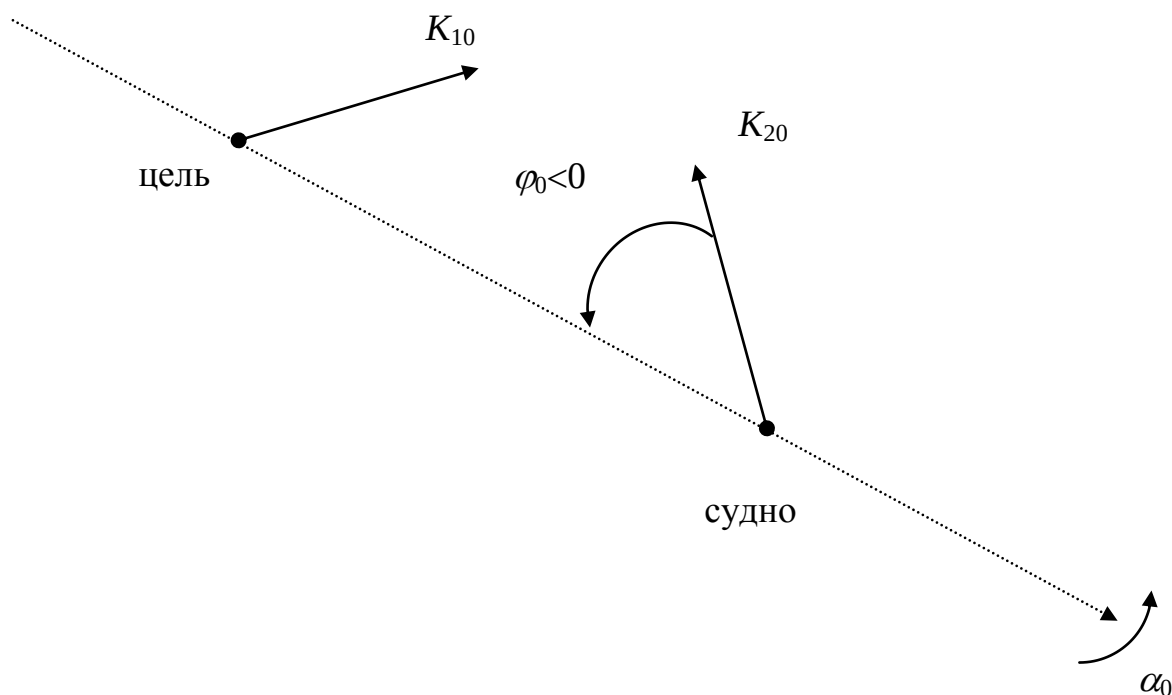


Рис. 4.5. Ситуация при курсовом угле левого борта  $\varphi_0 < 0$

При этом будет достигнута максимальная скорость изменения курсового угла  $\dot{\varphi}$ , что минимизирует время выхода судна в позицию «убегания» от цели. Поэтому при начальных значениях  $\varphi_0 < 0$  и  $\dot{\alpha} < 0$  необходимо производить перекадку руля право на борт, изменяя курс, пока  $K_2 = \alpha(t)$ .

При  $\varphi_0 < 0$ , но  $\dot{\alpha} > 0$ , если не изменять  $K_2(t)$ , текущее значение курсового угла  $\varphi$  будет увеличиваться, поэтому независимо от соотношения между  $\omega_2$  и  $\dot{\alpha}$  необходимо производить кладку пера руля на правый борт, т.е.  $\omega_{2\max} > 0$ . В этом случае будет достигнута максимально возможная проекция  $V_2(t)$  на линию пеленга, минимизирующая  $\dot{L}_t$ . Если  $\omega_2 > \dot{\alpha}$ , то имеются предпосылки для выхода судна в позицию «убегания», в противном случае судно не сумеет совместить диаметрально плоскость с текущим направлением линии пеленга, однако это будет лучшей стратегией судна.

Поэтому, при  $\varphi_0 < 0$  необходимо максимально переложить перо руля на правый борт.

Аналогично рассуждая, приходим к выводу, что при курсовом угле правого борта, т. е.  $\varphi_0 > 0$  (рис. 4.6), необходима перекладка пера руля судна на левый борт, независимо от знака угловой скорости  $\dot{\alpha}$ .

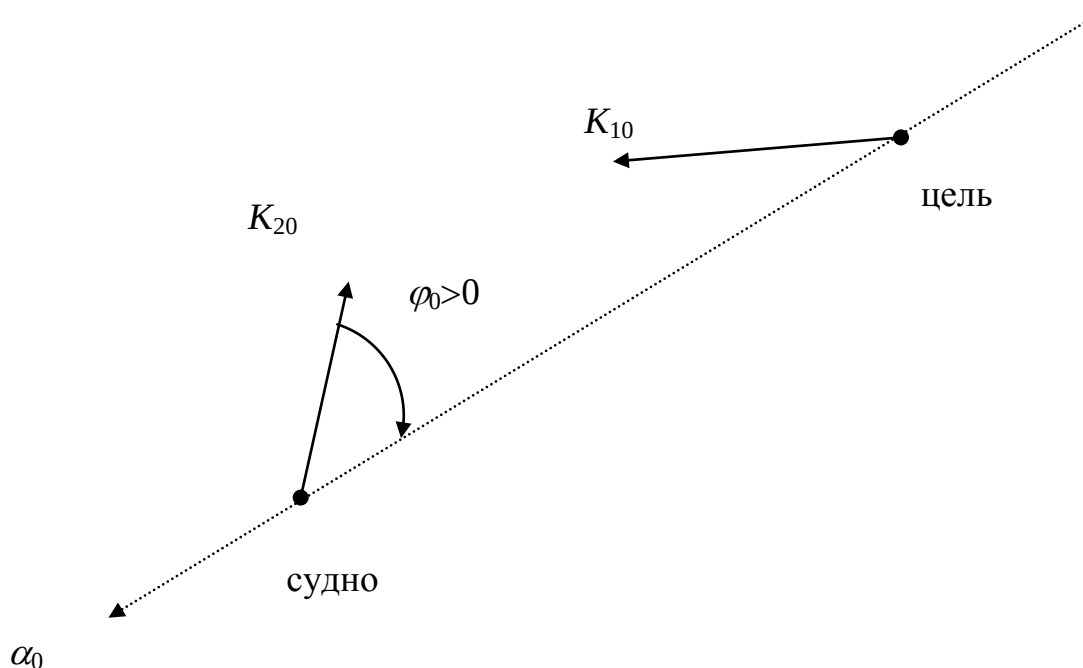


Рис. 4.6. Ситуация при курсовом угле правого борта  $\varphi_0 > 0$

При этом наличие дополнительной информации о курсе и скорости цели не влияет на стратегию расхождения судна с целью.

Указанная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судна с целью гарантирует судну максимальный интервал времени  $\tau_c$  безопасного плавания при следовании цели оптимальной стратегией. Если цель реализует свою оптимальную стратегию, то любое отклонение судна от оптимальной стратегии ведет к сокращению времени преследования  $\tau_c$ .

Таким образом, следуя полученным результатам, судно определяет сторону поворота и выполняет его с максимальной угловой скоростью.

Первый этап завершается в момент времени, когда судно выходит на курс, равный обратному пеленгу на цель, - курс экстренного расхождения  $K_\alpha$ , причем  $K_\alpha = \alpha(t) + \pi$ . Удерживая цель на обратном пеленге, судно стремится попасть в ситуацию, позволяющую предпринять поворот к выходу на программную траекторию и обеспечить безопасное сближение с целью.

#### 4.3. Расчет параметров последующих этапов стратегии экстренного расхождения судна.

Рассмотрим условие достижения судном такой ситуации и оценку момента времени начала поворота с траектории экстренного уклонения и определения курса следования к программной траектории движения.

Отметим, что относительная ситуация  $Q$  характеризуется относительным положением и относительным перемещением и может относиться к различным типам множеств. В данной работе исследуется ситуация чрезмерного сближения, поэтому первым типом являются такие ситуации, их множество обозначим  $MQ_1$ . Условием принадлежности к этому множеству, как раньше было установлено, является справедливость неравенства  $\max L_{\min} \leq L_d$ .

Ко второму типу относятся ситуации, когда для безопасного расхождения судну необходимо ложиться на экстремальный курс  $K_{ex} = K_2 \pm \arccos(\rho)$ , при котором достигаются максимальный или минимальный относительные курсы. Множество таких ситуаций обозначим  $MQ_2$ , а условием возникновения такой ситуации является истинность равенства  $\max L_{min} = L_d$ , причем момент времени наступления этого события обозначен  $t_{ok}$ .

Очередной тип относительной ситуации характеризуется неравенствами  $\max L_{min} > L_d$  и  $L_{minb} < L_d$ , где  $L_{minb}$  - дистанция кратчайшего сближения при следовании судна курсом выхода на заданную траекторию  $K_b$ . Истинность указанных неравенств определяет тип относительных ситуаций, составляющих множество  $MQ_3$ , которые требуют для выхода судна на программную траекторию сначала лечь на курс уклонения  $K_y$  (ситуации предварительного уклонения), позволяющий разойтись судну с целью на дистанции  $L_d$ .

Четвертый тип относительных ситуаций, из которых возможен выход на заданную траекторию курсом  $K_b$ , составляет множество  $MQ_4$  ситуаций выхода на заданную траекторию. Условием реализации ситуаций этого множества является истинность неравенства  $L_{minb} \geq L_d$ .

Все ситуации можно разделить на два множества по признаку взаимного перемещения: множество ситуаций сближения  $MQ_-$ , когда первая производная дистанции по времени отрицательная, т.е.  $\dot{D} < 0$ , и множество ситуаций удаления  $MQ_+$ , когда имеет место неравенство  $\dot{D} > 0$ .

В то время, пока судно выполняло первый этап, - экстренного расхождения, цель могла перемещаться с прежними параметрами движения или выполнять собственный маневр уклонения. Поэтому в момент времени  $t_{on}$  выхода на курс экстремального уклонения  $K_\alpha$  относительная ситуация  $Q$  может принадлежать к любому из множеств  $MQ_i$  ( $i=1..4$ ) и множеств  $MQ_\pm$ .

Любую ситуацию  $Q$  можно характеризовать упомянутыми двумя признаками принадлежности к множествам, поэтому возможны восемь подмножеств пересечения множеств  $MQ_i$  и  $MQ_{\pm}$ , которые обозначим  $Mn_i$ , и они определены в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

**Подмножества  $Mn_i$ , как пересечение множеств  $MQ_i$  и  $MQ_{\pm}$**

| Подмножества<br>$Mn_i$             | $Mn_1$           | $Mn_2$           | $Mn_3$           | $Mn_4$           |
|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Пересечения<br>$MQ_i$ и $MQ_{\pm}$ | $MQ_1 \cap MQ_-$ | $MQ_1 \cap MQ_+$ | $MQ_2 \cap MQ_-$ | $MQ_2 \cap MQ_+$ |
| Подмножества<br>$Mn_i$             | $Mn_5$           | $Mn_6$           | $Mn_7$           | $Mn_8$           |
| Пересечения<br>$MQ_i$ и $MQ_{\pm}$ | $MQ_3 \cap MQ_-$ | $MQ_3 \cap MQ_+$ | $MQ_4 \cap MQ_-$ | $MQ_4 \cap MQ_+$ |

В табл. 4.2 приводится определение подмножеств  $Mn_i$

Таблица 4.2.

**Определение подмножеств  $Mn_i$**

| Подмножества | Характеристика                                                 |
|--------------|----------------------------------------------------------------|
| $Mn_1$       | Ситуация чрезмерного сближения, дистанция сокращается.         |
| $Mn_2$       | Ситуация чрезмерного сближения, дистанция увеличивается.       |
| $Mn_3$       | Ситуация выбора экстремального курса, дистанция сокращается.   |
| $Mn_4$       | Ситуация выбора экстремального курса, дистанция увеличивается. |

|        |                                                                  |
|--------|------------------------------------------------------------------|
| $Mn_5$ | Ситуации предварительного уклонения, дистанция сокращается.      |
| $Mn_6$ | Ситуации предварительного уклонения, дистанция увеличивается.    |
| $Mn_7$ | Ситуаций выхода на заданную траекторию, дистанция сокращается.   |
| $Mn_8$ | Ситуаций выхода на заданную траекторию, дистанция увеличивается. |

Обращаем внимание, что все ситуации, когда судно и цель удаляются, относятся к безопасным в отношении столкновения, так как дистанция кратчайшего сближения  $L_{\min}$  равна дистанции между судами  $D$  и возрастает. Учитывая, что скорость судна меньше скорости цели, то при неизменных параметрах движения цели независимо от курса судна соблюдается условие  $L_{\min} = D > L_d$ , судно оказывается в ситуации  $Mn_8$  и может следовать на программную траекторию движения.

Следовательно, все множество ситуаций удаления  $MQ+$  при превосходстве скорости цели является подмножеством  $Mn_8$  ( $MQ+=Mn_8$ ), и судно может начать процесс выхода на заданную траекторию.

Рассмотрим возможные типы структуры стратегии  $S$  экстренного расхождения, начиная с момента времени  $t_{\text{он}}$  окончания первого этапа. В этот момент времени судно достигло курса  $K_\alpha$  и в зависимости от поведения цели на первом этапе и может оказаться в любой из ситуаций  $Mn_1$ ,  $Mn_3$ ,  $Mn_5$ ,  $Mn_7$  и  $Mn_8$ .

Обозначим  $Mn_0$  начальную ситуацию в момент времени  $t_{\text{он}}$  окончания первого этапа, а  $Mn_k$  - конечная ситуация, когда судно достигает программной траектории движения.

Если с момента  $t_{on}$  цель не изменяет свои параметры движения, то последовательность ситуаций в процессе расхождения показана на рис. 4.7.

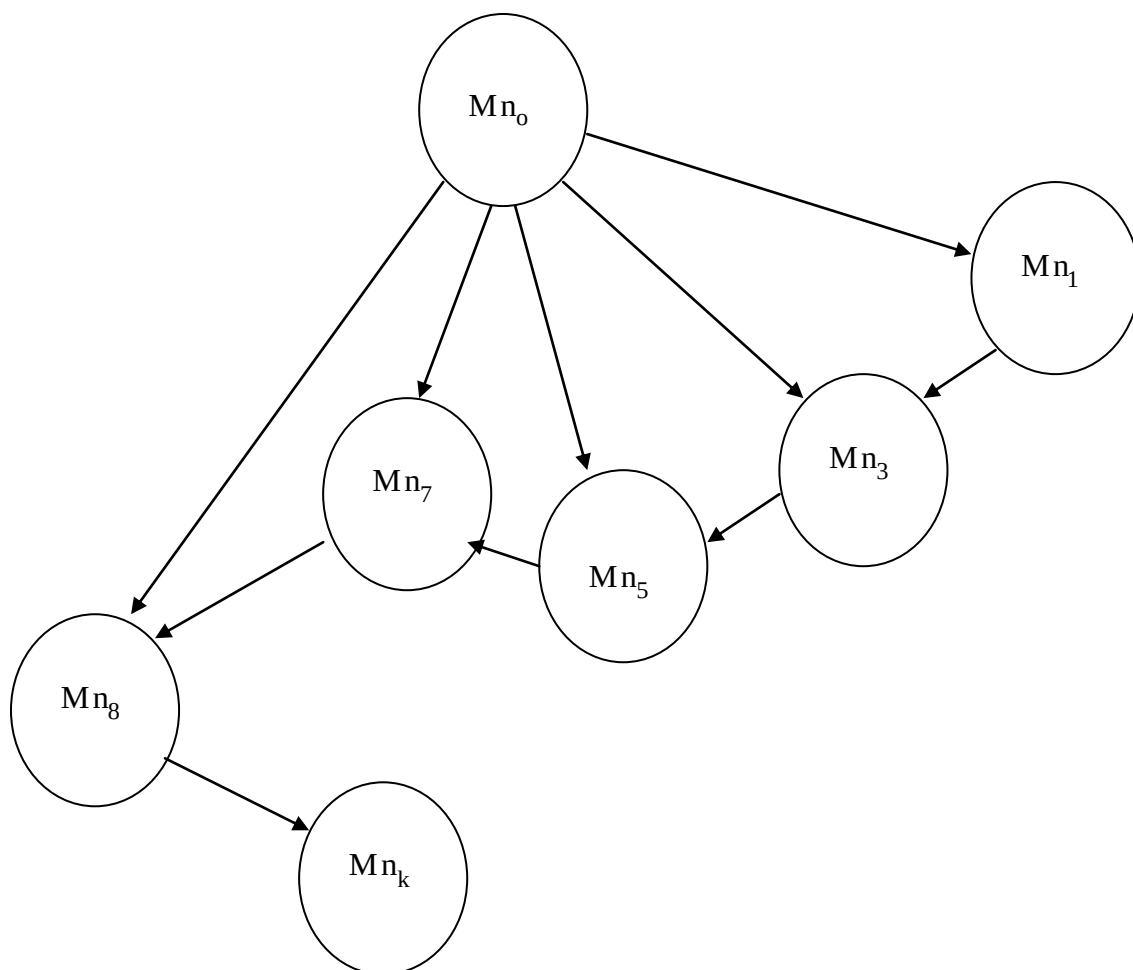


Рис. 4.7. Возможная смена ситуаций в процессе расхождения судна

Условия смены ситуаций приведены в табл. 4.3, при этом указывается момент времени и курс следования на реализовавшемся этапе стратегии экстренного расхождения.

Совместный анализ рис. 4.7 и табл. 4.3 показал, что структура  $S$  экстренной стратегии, которая характеризуется последовательностью этапов  $G$ , определяется ситуацией, реализовавшейся в момент времени  $t_{on}$  завершения первого этапа. Так как завершение первого этапа не может быть прогнозируемым, а зависит только от факта достижения судном курса,



равного  $K_\alpha$  то прогнозировать дальнейшую стратегию возвращения судна на программную траекторию можно в предположении неизменных параметров движения цели, начиная только с момента времени  $t_{on}$ .

Таблица 4.3.

**Возможные смены ситуаций при экстренном маневрировании**

| Переходы ситуаций       | Условия переходов        | Моменты времени | Курсы следования | Этапы расхождения |
|-------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|-------------------|
| $Mn_0 \rightarrow Mn_1$ | $\max L_{\min} \leq L_d$ | $t_{on}$        | $K_\alpha$       | $G_2$             |
| $Mn_0 \rightarrow Mn_3$ | $\max L_{\min} = L_d$    | $t_{on}$        | $K_{ex}$         | $G_3$             |
| $Mn_0 \rightarrow Mn_5$ | $L_{\min} \leq L_d$      | $t_{on}$        | $K_y$            | $G_4$             |
| $Mn_0 \rightarrow Mn_7$ | $L_{\min b} \geq L_d$    | $t_{on}$        | $K_b$            | $G_5$             |
| $Mn_0 \rightarrow Mn_8$ | $\dot{D} > 0$            | $t_{on}$        | $K_b$            | $G_5$             |
| $Mn_1 \rightarrow Mn_3$ | $\max L_{\min} = L_d$    | $t_{ok}$        | $K_{ex}$         | $G_3$             |
| $Mn_3 \rightarrow Mn_5$ | $L_{\min} \leq L_d$      | $t_y$           | $K_y$            | $G_4$             |
| $Mn_5 \rightarrow Mn_7$ | $L_{\min b} \geq L_d$    | $t_b$           | $K_b$            | $G_5$             |
| $Mn_7 \rightarrow Mn_8$ | $\dot{D} > 0$            |                 | $K_b$            | $G_5$             |
| $Mn_8 \rightarrow Mn_k$ |                          | $t_k$           | $K_{2o}$         |                   |

Поэтому рассмотрим начальную позицию судна в момент времени  $t_{on}$  для расчета параметров стратегии возвращения на программную траекторию движения  $S_b$ . Очевидно, максимальное число этапов  $S_b$  равняется четырем, а минимальное одному. Определяющим является то, в какой ситуации окажется судно в момент окончания первого этапа  $t_{on}$ , причем эта ситуация определяется условиями, приведенными в предыдущей таблице. Если ситуацию, которая реализуется в момент времени  $t_{on}$ , обозначим  $Mn(t_{on})$ , то ее можно идентифицировать с помощью алгоритма, приведенного на рис. 4.8. При этом оценку ситуации производим для курса судна равного  $K_\alpha$ .

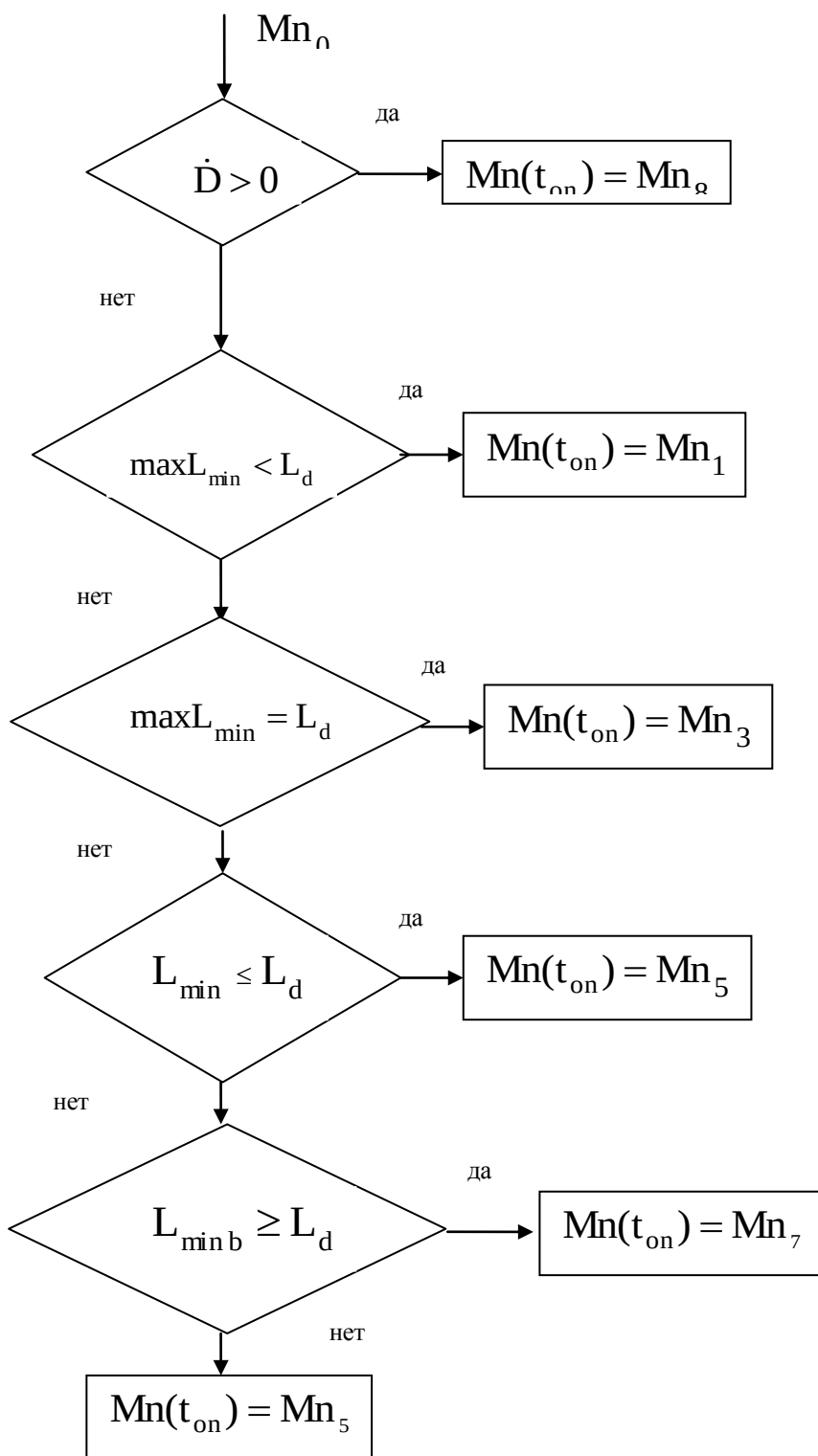


Рис. 4.8. Алгоритм идентификации ситуации  $Mn(t_{on})$

Из рис. 4.7 следует, что стратегия возвращения на программную траекторию движения  $S_b$  определяется упорядоченной последовательностью

этапов  $G_i$ , предусматривающую реализацию этапов в строгой последовательности. Еще раз подчеркиваем, что скорость цели превосходит скорость судна, т.е.  $V_1 < V_2$ .

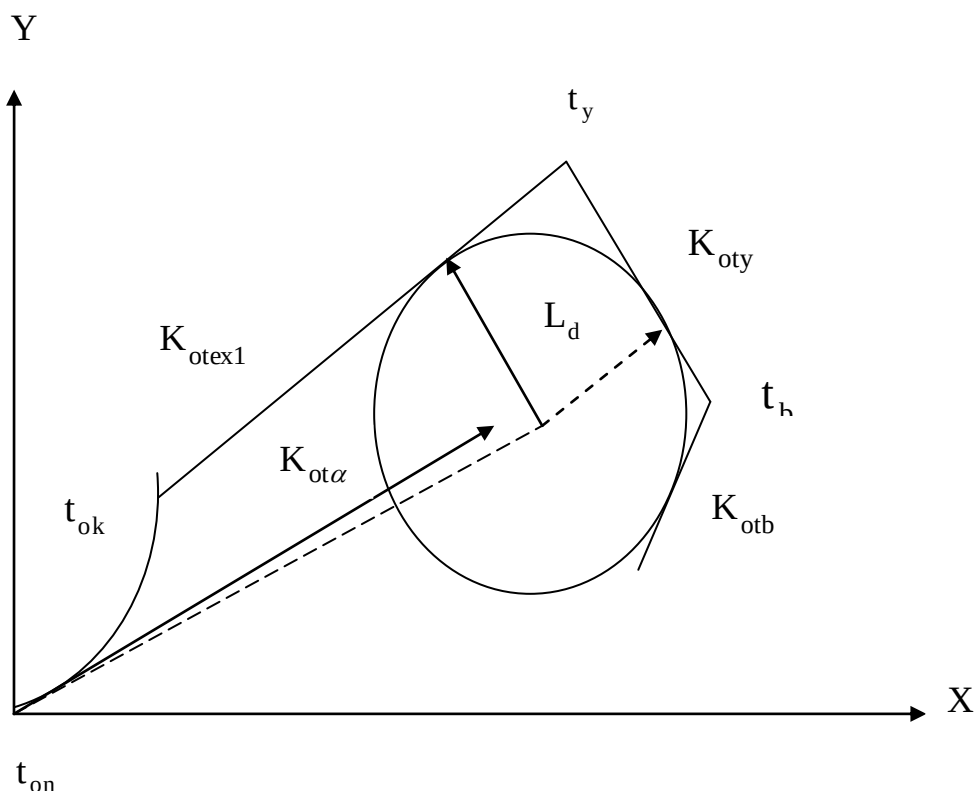
Зависимость структуры стратегии  $S_b$  от реализовавшейся ситуации  $Mn(t_{on})$  приведена в табл. 4.4. Учитывая, что каждый этап стратегии расхождения характеризуется курсом следования судна и временем начала этапа, параметрами стратегии расхождения являются курсы и время начала этапов, составляющих стратегию  $S_b$ , что также отражено в табл. 4.4.

Таблица 4.4.

**Структура и параметры стратегии  $S_b$**

| $Mn(t_{on})$ | Структура стратегии $S_b$         | Параметры стратегии $S_b$                                      |
|--------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $Mn_1$       | $S_{b1} = \{G_2, G_3, G_4, G_5\}$ | $(t_{on}, K_\alpha), (t_{ok}, K_{ex}), (t_y, K_y), (t_b, K_b)$ |
| $Mn_3$       | $S_{b2} = \{G_3, G_4, G_5\}$      | $(t_{on}, K_{ex}), (t_y, K_y), (t_b, K_b)$                     |
| $Mn_5$       | $S_{b3} = \{G_4, G_5\}$           | $(t_{on}, K_y), (t_b, K_b)$                                    |
| $Mn_7, Mn_8$ | $S_{b4} = G_5$                    | $(t_{on}, K_b)$                                                |

Рассмотрим стратегию  $S_{b1}$ , для чего обратимся к рис. 4.9. В момент времени  $t_{on}$  судно следует курсом  $K_\alpha$ , которому соответствует относительный курс  $K_{ot\alpha}$ . В относительном движении судно перемещается относительно неподвижной цели. Так как сохраняется ситуация чрезмерного сближения, то цель может сохранять параметры движения или выполнить уклонение, поэтому прогноз момента времени  $t_{ok}$  невозможен, следует только периодически рассчитывать значение  $\max L_{\min}$  для текущей относительной позиции судна и проверять истинность условия  $\max L_{\min} = L_d$ . Когда условие выполнится, можно ложиться на курс  $K_{ex}$ , зафиксировав момент времени  $t_{ok}$ .

Рис. 4.9. Реализация стратегии  $S_{b1}$ 

Отметим, что траектория относительного перемещения судна на втором этапе между моментами времени  $t_{on}$  и  $t_{ok}$  представляет собой кривую линию, так как курс судна изменяется из-за изменения пеленга на цель.

С момента начала третьего этапа  $t_{ok}$  судно перемещается с относительным курсом  $K_{otex1}$  до момента времени  $t_y$ , в который изменяет свой курс на  $K_y$ . Причем курс  $K_y$  выбирается таким образом, чтобы соответствующий относительный курс  $K_{oty}$  отличался на  $90^\circ$  относительно предыдущего, т.е.  $K_{oty} = K_{otex1} + 90^\circ$ . Если из-за ограничений скорости судна такой относительный курс недостижим, то в качестве  $K_{oty}$  выбирается второй экстремальный курс, т.е.  $K_{oty} = K_{otex2}$ .

Покажем, каким образом производится расчет параметров  $t_y$  и  $K_y$  третьего этапа расхождения.

С помощью АИС могут быть получены параметры движения цели  $K_2$ ,  $V_2$  и рассчитана относительная скорость  $V_{otex1}$  на третьем этапе между моментами времени  $t_{ok}$  и  $t_y$ . Расстояние  $D_3$ , которое будет пройдено в относительном движении на третьем этапе, определяется очевидным соотношением:

$$D_3 = L(t_{ok}) \cos[\alpha(t_{ok}) - K_{otex1}] + L_d,$$

где  $L(t_{ok})$  и  $\alpha(t_{ok})$  - дистанция до цели и пеленг на нее в момент времени  $t_{ok}$ .

Поэтому момент времени  $t_y$  может быть рассчитан с помощью формулы:

$$t_y = t_{ok} + \frac{L(t_{ok}) \cos[\alpha(t_{ok}) - K_{otex1}] + L_d}{V_{otex1}}, \quad (4.12)$$

где  $V_{otex1} = [V_1^2 + V_2^2 - 2 V_1 V_2 \cos(K_{ex} - K_2)]^{1/2}$ .

Для расчета курса стандартного уклонения  $K_y$  воспользуемся соотношением между истинным и относительным курсами [11], которое для судна с меньшей скоростью имеет следующий вид для встречных курсов:

$$K_1 = K_{ot} + \arcsin[p^{-1} \sin(K_2 - K_{ot})],$$

и для попутных курсов:

$$K_1 = K_{ot} + \pi - \arcsin[p^{-1} \sin(K_2 - K_{ot})].$$

В нашем случае относительный курс имеет значение  $K_{oty} = K_{otex1} + 90^\circ$ , в котором экстремальный курс  $K_{otex1} = \pi + K_2 \pm \arcsin \rho$ . Поэтому:

$$K_{oty} = \pi + K_2 \pm \arcsin \rho + \pi/2 = 3\pi/2 + K_2 \pm \arcsin \rho,$$

а соответствующий курс уклонения для встречных курсов и цели:

$$\begin{aligned} K_y &= 3\pi/2 + K_2 \pm \arcsin \rho + \arcsin[p^{-1} \sin(K_2 - 3\pi/2 - K_2 \mp \arcsin \rho)] = \\ &= 3\pi/2 + K_2 \pm \arcsin \rho - \arcsin[p^{-1} \sin(3\pi/2 \pm \arcsin \rho)]. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Выражение  $\beta = \arcsin[p^{-1} \sin(3\pi/2 \pm \arcsin \rho)]$ , учитывая, что:

$$\sin(3\pi/2 \pm \arcsin \rho) = \cos(\pm \arcsin \rho) = \sqrt{1 - \rho^2},$$

принимает вид  $\beta = \arcsin\left(\frac{\sqrt{1-\rho^2}}{\rho}\right)$  и курс уклонения с учетом (4.13):

$$K_y = 3\pi/2 + K_2 \pm \arcsin \rho - \arcsin\left(\frac{\sqrt{1-\rho^2}}{\rho}\right).$$

Если относительным курсом уклонения выбирается второй экстремальный курс, т.е.  $K_{oty} = K_{otex2}$ , то курс уклонения, как показано в предыдущей главе, определяется выражением  $K_{yex} = K_2 \pm \arccos \rho$ .

Заключительные параметры  $t_b$  и  $K_b$  четвертого этапа стратегии  $S_{b1}$  определяются следующим образом. Как раньше указывалось, величина курса  $K_b$  определяется формулой  $K_b = K_{1n} + a\gamma$ , где  $a$  принимает значение  $+1$ , если в момент времени  $t_y$  судно находится слева от программной траектории, и значение  $-1$ , если оно находится справа от него;  $K_{1n}$  - программный курс судна до маневра расхождения;  $\gamma$  - угол равный  $30^\circ$ - $40^\circ$ .

Значение времени  $t_b$  поворота к программной траектории движения, определяется по формуле из [11]:

$$t_b = t_y + \frac{\frac{\Delta L_d}{2} + V_{otex} t_y \sin(K_{otb} - K_{otex}) + L(t_{ok}) \sin[\alpha(t_{ok}) - K_{otb}]}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}.$$

Рассмотрим расчет параметров стратегии  $S_{b2}$  (рис. 4.10). Как видим, моменты времени окончания первого и второго этапов совпадают, т.е.  $t_{on} = t_{ok}$  и стратегия  $S_{b2}$  начинается с третьего этапа. Очевидно, что расчет ее параметров производится аналогично предыдущей  $S_{b1}$ , только вместо момента времени начала третьего этапа  $t_{ok}$  принимаем  $t_{on}$ .

В этой и последующих стратегиях будем полагать, что в процессе маневрирования цель не изменяет свои параметры движения.



В данной стратегии  $S_{b3}$  параметры  $t_y$  и  $K_b$  известны, причем  $t_y = t_{on}$ , а значение курса выхода  $K_b$  выбирается аналогично предыдущим стратегиям.

Курс уклонения  $K_y$  определяется следующим образом. Вначале из соотношения:

$$L(t_{on}) \sin[K_{oty} - \alpha(t_{on})] = L_d$$

находим относительный курс  $K_{oty}$ , который подчиняется зависимости:

$$K_{oty} = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right].$$

Затем находим курс уклонения  $K_y$  для встречных курсов:

$$K_y = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right] + \arcsin\{[p^{-1} \sin(K_2 - \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right])]\},$$

и для попутных курсов:

$$K_y = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right] + \pi - \arcsin\{[p^{-1} \sin(K_2 - \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right])]\}.$$

В заключение обращаемся к стратегии  $S_{b4}$ , при реализации которой в момент времени  $t_{on} = t_b$  судно ложится на курс выхода  $K_b$ , расчет которого показан раньше. Для рассмотренных стратегий необходимо рассчитать момент времени  $t_k$ , когда судно, следуя курсом  $K_b$ , достигнет программной траектории. С этой целью рассмотрим рис. 4.12. В момент времени начала уклонения с программного курса  $K_n$  с координатами  $X_n, Y_n$  судно смещало с программной траектории и в момент времени  $t_b$  с координатами  $X_b, Y_b$  легло на курс  $K_b$ . В этот момент времени судно сместилось на расстояние  $AB$ , величина которого определяется из очевидного соотношения:

$$AB = OA \sin(\alpha - K_n),$$

причем  $OA = \sqrt{(X_b - X_n)^2 + (Y_b - Y_n)^2}$  и  $\alpha = \arcsin\left(\frac{X_b - X_n}{OA}\right)$ .



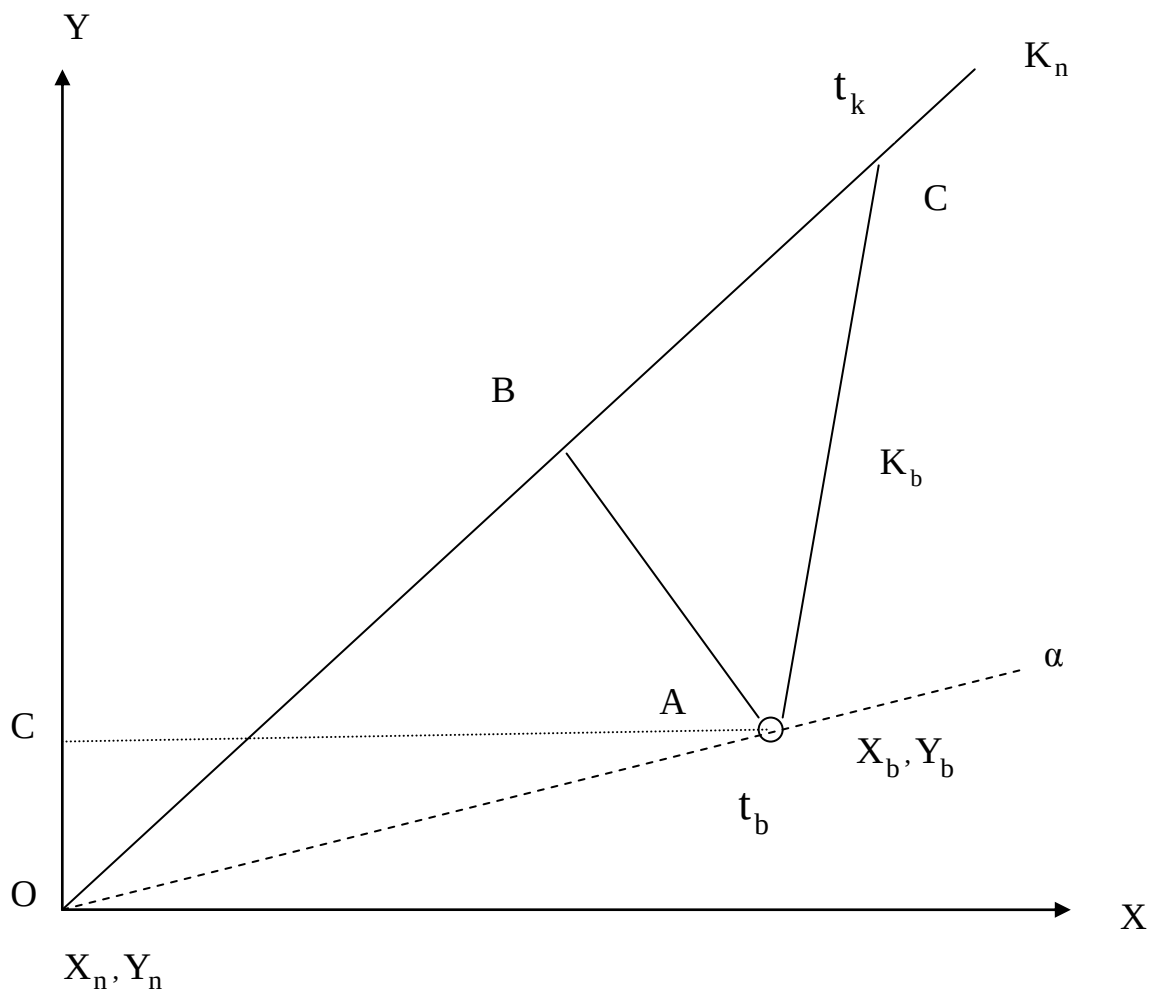


Рис. 4.12. Этап выхода судна на заданную траекторию

Очевидно, что искомый момент времени  $t_k$  можно определить из

выражения:

$$t_k = \frac{AC}{V_1},$$

где  $AC = \frac{AB}{\sin(K_n - K_b)}$ .

Если скорость судна больше скорости цели ( $V_1 > V_2$ ), то структура стратегии возвращения судна на программный курс  $S_b$  изменится. В этом случае отсутствуют экстремальные курсы и, следовательно, ситуация  $Mn_3$  и

этап  $G_3$  стратегии. Поэтому в момент времени  $t_{он}$  судно может оказаться в ситуациях  $Mn_1$ ,  $Mn_5$  и  $Mn_8$ , как показано на рис. 4.13.

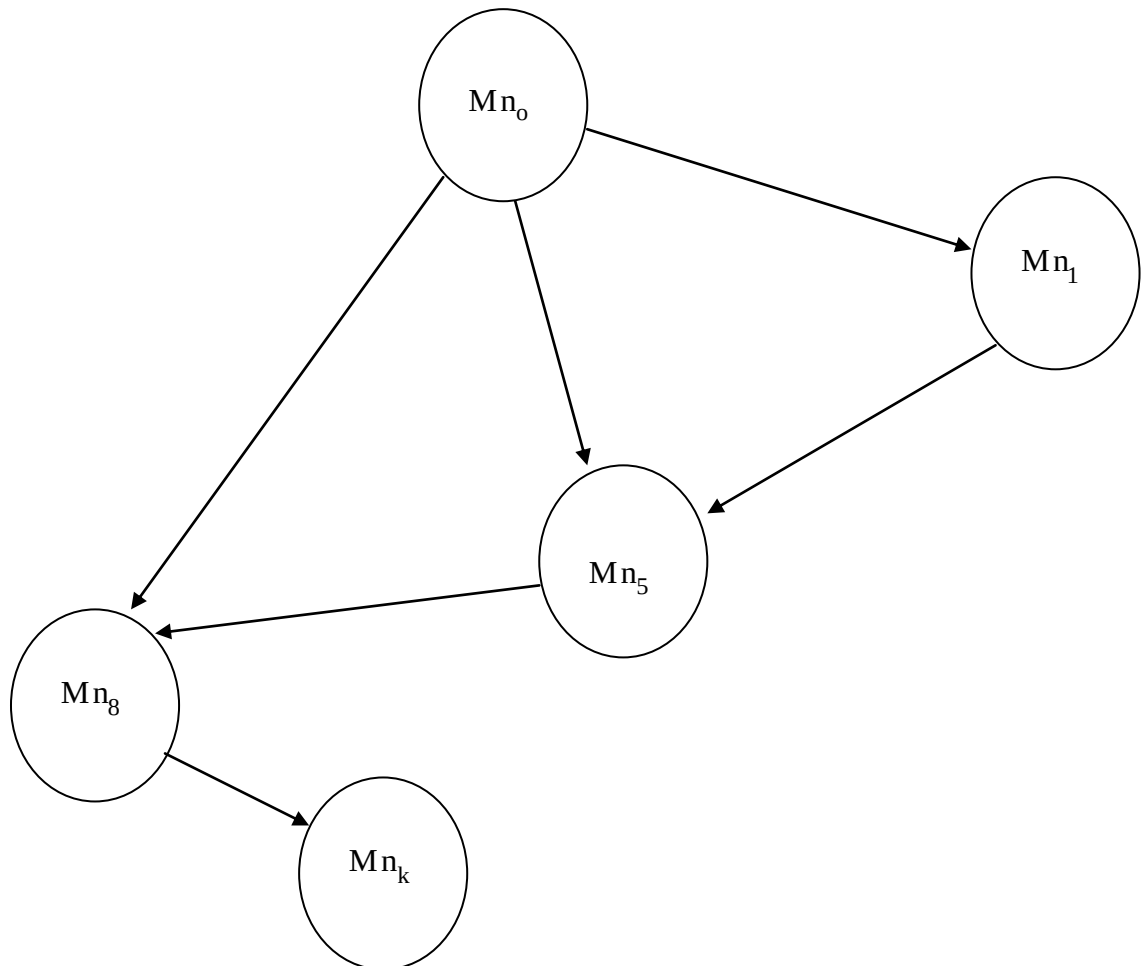
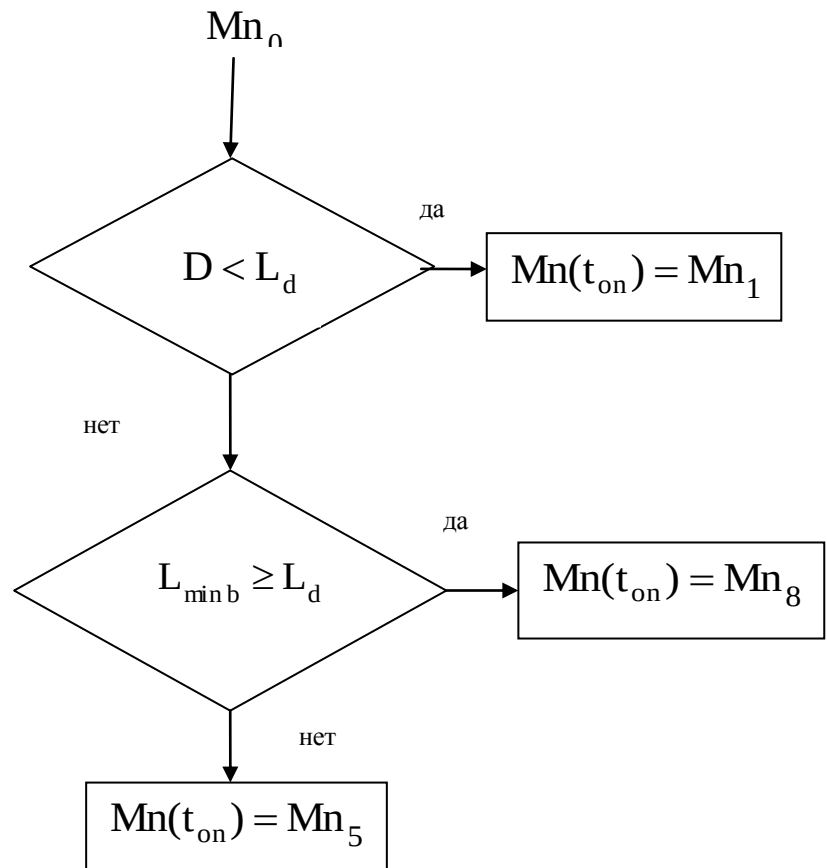


Рис. 4.12. Возможные структуры стратегии  $S_b$  при  $V_1 > V_2$

Алгоритм определения реализовавшейся ситуации в момент времени  $t_{он}$  показан на рис. 4.13. В этот момент времени судно удаляется от цели из-за своего превосходства в скорости, поэтому ему надлежит проверить, превосходит ли дистанция до цели предельно-допустимую. Если нет то необходимо продолжать следовать курсом экстренного уклонения, а в противном случае судно может оказаться в ситуациях  $Mn_5$  или  $Mn_8$ .



#### 4. 13. Алгоритм определения реализовавшейся ситуации при $V_1 > V_2$

Зависимость структуры стратегии  $S_b$  от реализовавшейся ситуации  $Mn(t_{on})$  приведена в табл. 4.5.

Таблица 4.5

**Структура и параметры стратегии  $S_b$**

| $Mn(t_{on})$ | Структура стратегии $S_b$    | Параметры стратегии $S_b$                    |
|--------------|------------------------------|----------------------------------------------|
| $Mn_1$       | $S_{b1} = \{G_2, G_4, G_5\}$ | $(t_{on}, K_\alpha), (t_y, K_y), (t_b, K_b)$ |
| $Mn_5$       | $S_{b3} = \{G_4, G_5\}$      | $(t_{on}, K_y), (t_b, K_b)$                  |
| $Mn_8$       | $S_{b4} = G_5$               | $(t_{on}, K_b)$                              |

Расчет параметров стратегии  $S_b$  производится аналогично предыдущему случаю, когда  $V_1 < V_2$ .

#### 4.4. Экстренное расхождение судна с целью при чрезмерном сближении на попутных курсах.

Чрезмерное сближение на попутных курсах возможно только в ситуации превосходства скорости цели над скоростью судна, т.е.  $V_1 < V_2$ . Определение ситуации чрезмерного сближения на попутных курсах производится аналогично ситуации сближения на встречных курсах, и условием принадлежности к этой ситуации, как раньше показали, является справедливость неравенства  $\max L_{\min} \leq L_d$ .

Как только установлен факт чрезмерного сближения, судно определяет сторону поворота и выполняет его с максимальной угловой скоростью, реализуя первый этап экстренной стратегии расхождения. Особенностью экстренного расхождения на попутных курсах является быстрое достижение нулевого значения скорости изменения дистанции  $\dot{D}$ .

Поэтому при циркуляции перед моментом завершения первого этапа стратегии  $t_{on}$  производится контроль значения первой производной дистанции между судном и целью. Если  $\dot{D} > 0$ , то судно продолжает циркуляцию до выхода на начальную траекторию программного движения. В противном случае в момент времени  $t_{on}$  судно выходит на курс  $K_\alpha$  и выполняет второй этап маневра стратегии экстренного расхождения, непрерывно контролируя скорость изменения дистанции до цели  $\dot{D}$ .

Если на интервале времени до момента окончания второго этапа  $t_{ok}$  дистанция перестанет сокращаться  $\dot{D} = 0$ , а цель продолжает следовать с неизменными параметрами движения, то реализуется ситуация  $Mn_8$ , и судну следует лечь на курс выхода на программную траекторию движения. Если же дистанция продолжает сокращаться  $\dot{D} < 0$ , то в момент времени  $t_{ok}$  второй этап завершается и далее судно реализует стратегию выхода на программную траекторию  $S_b$ , аналогично случаю движения судна и цели на

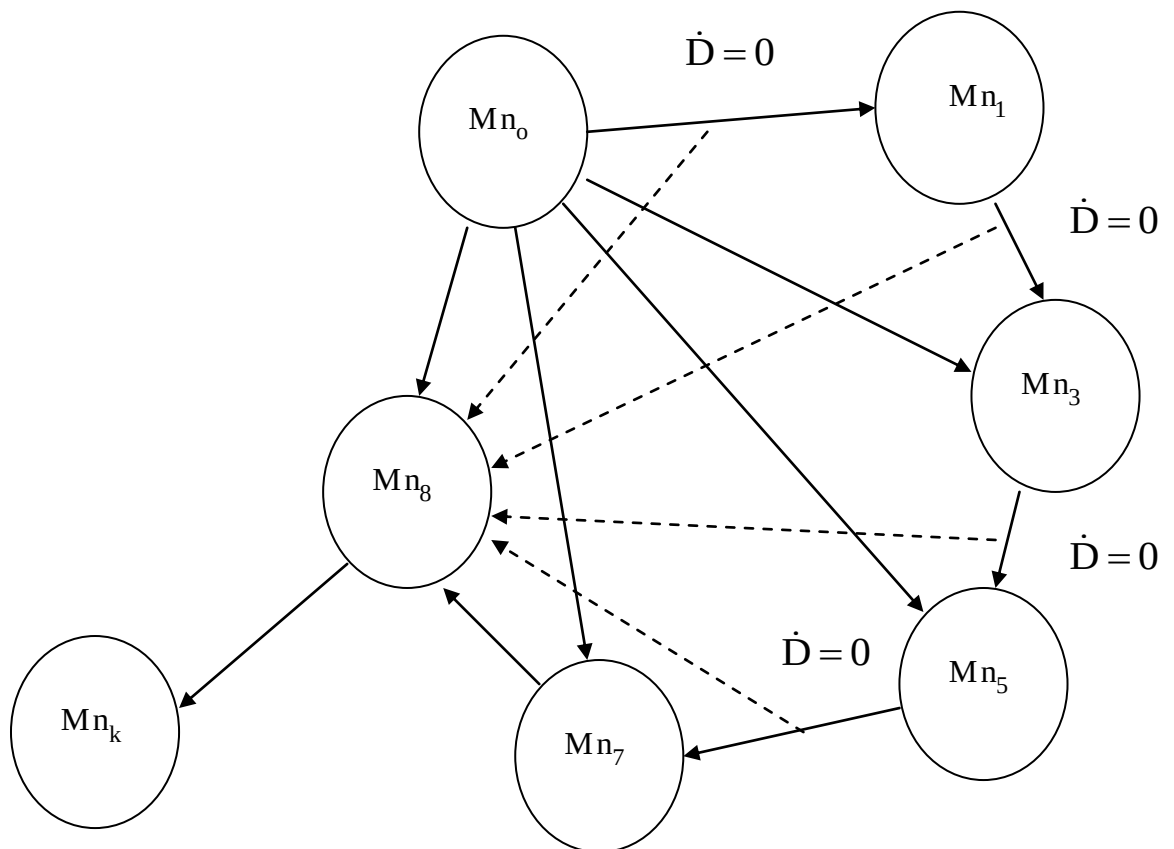
встречных курсах, за исключением того, что при попутных курсах осуществляется постоянный контроль знака первой производной дистанции до цели по времени. В момент времени, когда первая производная  $\dot{D}=0$ , дистанция достигает своего минимального значения, и при неизменных значениях скорости и курса цели начинает увеличиваться, что дает возможность судну ложиться на курс выхода на заданную траекторию.

Контроль текущего значения скорости изменения дистанции  $\dot{D}$  производится с помощью формулы (3.17):

$$\dot{D} = V_1 \cos(\alpha - K_1) + V_2 \cos[K_2 - (\alpha + \pi)],$$

в которой текущие параметры движения цели  $K_2$  и  $V_2$  могут быть получены с помощью АИС.

На рис. 4.14 показаны возможные структуры стратегии  $S_b$  возвращения на программную траекторию движения в рассматриваемом случае.

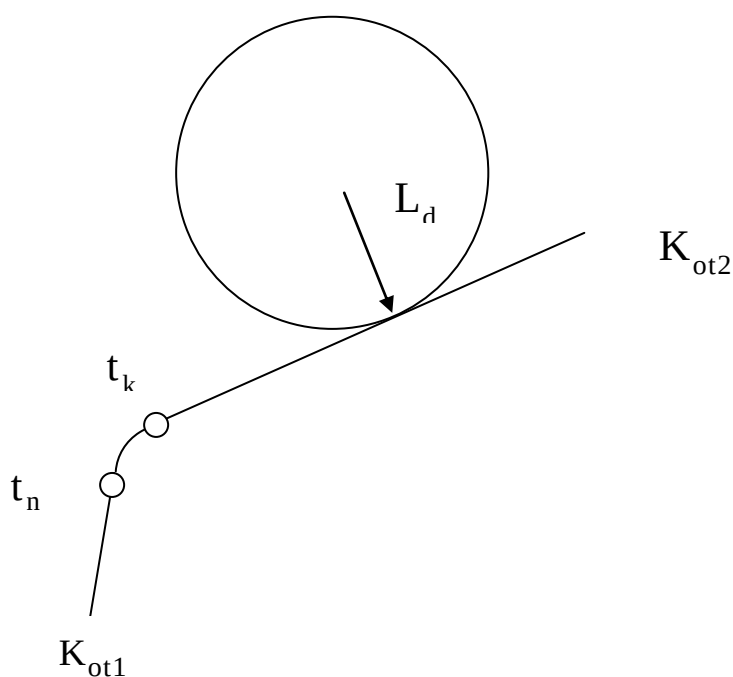


4.14. Возможные структуры стратегии  $S_b$  при  $V_1 < V_2$  на попутных курсах

Таким образом, ситуация чрезмерного сближения на попутных курсах возможна, если обгоняемое судно чрезмерно сближается с обгоняющим, провоцируя его на выполнение маневра экстренного расхождения. Особенностью стратегии экстренного расхождения является непрерывный контроль за изменением дистанции между судном и целью.

#### 4.6. Учет инерционности судна при оценке ситуации чрезмерного сближения и расчете параметров маневра экстренного расхождения

Для того, чтобы лечь на необходимый курс, рассчитанный с условием прохождения на заданной дистанции кратчайшего сближения относительно цели  $L_d$ , следует учитывать инерционность судна и начинать поворот заранее, как показано на рис. 4.15.



4.15. Учет инерционности судна при повороте

Если судно, следуя относительным курсом  $K_{ot1}$ , намеревается разойтись с целью на расстоянии  $L_d$  относительным курсом  $K_{ot2}$ , то поворот необходимо начинать заранее до момента выхода на линию относительного курса  $K_{ot2}$  в момент времени  $t_n$ . В предыдущих подразделах получены моменты времени поворота судна на рассчитанные курсы без учета инерционности судна.

В работе [11] показано, что учет инерционности судна производится путем расчета поправок времени  $\Delta t_d$  к моментам времени поворота  $\hat{t}_n$ , полученными без учета инерционности судна, т.е.:

$$t_n = \hat{t}_n + \Delta t_d,$$

причем поправка времени  $\Delta t_d$  выражается следующей формулой:

$$\Delta t_d = \frac{\Delta \xi_o \cos K_{ot2} - \Delta \eta_o \sin K_{ot2} + V_c \tau \sin(K_{ot2} - K_c)}{V_{ot1} \sin(K_{ot1} - K_{ot2})},$$

где  $\Delta \eta_o$ ,  $\Delta \xi_o$  - приращения координат судна за интервал времени  $\tau$  поворота;

$V_c$ ,  $K_c$  - скорость и курс цели.

Значения величин  $\Delta \eta_o$ ,  $\Delta \xi_o$  и  $\tau$  в выражении для  $\Delta t_d$  определяются динамической моделью, описывающей поворотливость судна.

Как правило, поворот судна содержит две фазы кладки пера руля. Сначала, на первой фазе, в начальный момент времени производится перекладка руля на угол  $\beta_k$  и руль удерживается в таком положении в течение интервала времени  $\Delta t_k$ . Затем производится перекладка руля на противоположный борт на ту же величину и гасится инерция поворота судна в течение интервала времени  $\Delta t$ , по истечению которого судно выходит на

заданный курс, угловая скорость поворота обращается в нуль, а перо руля приводится в диаметрально плоскость судна.

Таким образом, для расчета величины  $t_n$  необходимо вычислить интервалы времени  $\Delta t_k$  и  $\Delta t$ , которые в сумме дают величину времени поворота судна  $\tau$ , а также приращение координат судна  $\Delta \eta_0$ ,  $\Delta \xi_0$  за это время.

Очевидно, что текущее значение курса судна на первой и второй фазах поворота имеет различное аналитическое выражение, поэтому текущее значение курса судна на первой фазе поворота обозначим через  $K$ , а на второй – через  $\tilde{K}$ .

Если учесть, что в результате поворота суммарное изменение курса судна задано  $\Delta K = K_2 - K_1$  (так как задан курс  $K_2$ ), то можно записать первое уравнение для вычисления интервалов времени  $\Delta t_k$  и  $\Delta t$ , имеющее вид:

$$\Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t).$$

Вторым уравнением для вычисления  $\Delta t_k$  и  $\Delta t$  является условие обращения в ноль к концу поворота угловой скорости судна, т. е.  $\omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0$ .

Поэтому получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t) \\ \omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0 \end{cases},$$

Решение системы полученных уравнений позволяет найти величины  $\Delta t_k$  и  $\Delta t$ , которые необходимы для расчета приращения координат судна  $\Delta \eta_0$ ,  $\Delta \xi_0$  и длительности времени поворота судна  $\tau$ .



Если учитывается только постоянная угловая скорость поворота судна, зависящая от угла кладки руля, то приращения координат судна  $\Delta\xi_o$  и  $\Delta\eta_o$ , как следует из формул (4.8) и (4.9), при повороте с курса  $K_1$  на курс  $K_2$  выражается следующим образом:

$$\Delta\xi_o = \frac{V}{\omega}(\cos K_1 - \cos K_2),$$

$$\Delta\eta_o = \frac{V}{\omega}(\sin K_2 - \sin K_1),$$

где  $V_o$  - скорость оперирующего судна.

Очевидно, в рассматриваемом случае  $\Delta t_k = \text{Abs}(\frac{K_2 - K_1}{\omega})$ ,  $\Delta t=0$  и  $\tau = \Delta t_k$ .

Полученные выражения служат для начальной оценки величины поправки за инерционность судна, а также в качестве начального приближения при решении более сложных выражений способом простых итераций.

В работе [11] показано, что для динамической модели вращательного движения судна, которая характеризуется двумя постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$ , а значение курса судна описывается дифференциальным уравнением третьего порядка:

$$T_1 T_2 \ddot{K} + (T_1 + T_2) \dot{K} + K = k_\omega \beta_k,$$

где  $\beta_k$  и  $k_\omega$  - угол кладки руля и коэффициент эффективности руля, расчет величин длительности поворота судна  $\tau_y$ ,  $\tau_b$  и  $\tau_k$ , а также приращения координат судна в течение времени поворота  $\Delta\xi_o$  и  $\Delta\eta_o$  производится следующим образом.

Расчет интервала длительности поворота  $\tau$  для данной динамической модели производится по формуле:

$$\tau = \Delta t_k + \Delta t, \quad \text{в которой}$$

$$\begin{aligned} \Delta t_k = \Delta t + \{ T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_2)] \} / (T_1 - T_2) - \\ - \{ 2 - [ T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2) ] / (T_1 - T_2) \} \times \\ \{ T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t / T_2)] \} / (T_1 - T_2) + \Delta K / a_\omega, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta t = -T_1 \ln \{ (T_2 / T_1) \exp(-\Delta t / T_2) + [(T_1 - T_2) / T_1] \times \\ \times \{ 2 - [ T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2) ] / (T_1 - T_2) \}^{-1} \}. \end{aligned}$$

Очевидно, что система уравнений не имеет явного решения, поэтому для ее решения применяется метод простых итераций.

В качестве начального приближения принимаем  $\Delta t_k = \text{Abs}(\frac{K_2 - K_1}{\omega})$ , а затем вычисляется значение  $\Delta t$ , которое затем подставляется в выражение для расчета последующего уточненного значения  $\Delta t_k$ . Итерационный процесс продолжается до тех пор пока величины  $\Delta t_k$  и  $\Delta t$  не будут вычислены с заданной точностью.

Для рассматриваемой динамической модели вращательного движения судна приращения координат  $\Delta \xi_0$  и  $\Delta \eta_0$  за время поворота судна  $\tau$  рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta \xi_0 = V_0 \sin K_0 \int_0^{\Delta t_k} \cos \{ a_\omega \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t / T_1)] - \\ - T_2^2 [1 - \exp(-t / T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt + V_0 \cos K_0 \int_0^{\Delta t_k} \sin \{ a_\omega \{ t - \\ - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t / T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt + \\ + V_0 \sin [K_0 + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos \{ -a_\omega t + \\ + a_\omega \{ 2 - [ T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2) ] / (T_1 - T_2) \} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} dt + \\ & + V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin \{ -a_\omega t + \\ & a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ & \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} dt. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \eta_o = & V_o \cos K_o \int_0^{\Delta t k} \cos \{ a_\omega \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - \\ & - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt - V_o \sin K_o \int_0^{\Delta t k} \sin \{ a_\omega \{ t - \\ & - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} \} dt + \\ & + V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos \{ -a_\omega t + \\ & a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ & \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} \} dt - \\ & - V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin \{ -a_\omega t + \\ & a_\omega \{2 - [T_1 \exp(-\Delta t_k/T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k/T_2)] / (T_1 - T_2)\} \times \\ & \{T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)]\} / (T_1 - T_2) \} \} dt, \end{aligned}$$

где  $K(\Delta t_k) = a_\omega \{ \Delta t_k - \{ T_1^2 [1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-\Delta t_k/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \}$ .

Определенные интегралы, в приведенных выражениях для  $\Delta \xi_o$  и  $\Delta \eta_o$ , не выражаются в элементарных функциях и их значения необходимо находить численными методами, например, методом Симпсона.

#### 4.5. Выводы по четвертой главе

Глава посвящена формированию метода расчета параметров стратегии экстренного расхождения судна с целью.

Получена процедура оценки момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения в зависимости от начальной относительной позиции и параметров относительного сближения с учетом формы судовой безопасной зоны. Представлены формулы расчета момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения для случаев, когда форма области имеет форму круга, эллипса и прямоугольника.

Разработана процедура расчета параметров первого этапа стратегии экстренного расхождения, предусматривающая отворот судна с программной траектории на курс экстренного уклонения.

Получен способ расчета параметров последующих этапов стратегии экстренного расхождения судна, каждый из которых содержит момент времени начала и соответствующего курса возвращения на программную траекторию движения.

Предложен метод экстренного расхождения судна с целью при чрезмерном сближении на попутных курсах.

## ГЛАВА 5

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫБОРА ЭКСТРЕННОЙ СТРАТЕГИИ РАСХОЖДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для имитационного моделирования полученных теоретических результатов проведенного диссертационного исследования необходимо решить три следующих задачи:

1. Формирование алгоритма выбора маневра экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения.
2. В условиях реальной эксплуатации провести натурные наблюдения поворотливости судна по формированию статистической выборки для параметризации математических моделей вращательного движения судна.
3. Произвести разработку имитационной программы для проверки корректности полученного способа выбора маневра экстренного расхождения.

5.1. Алгоритм расчета параметров стратегии экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения.

В данном подразделе рассмотрим первую задачу, которая заключается в разработке алгоритма выбора маневра экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения.

Ситуация чрезмерного сближения реализуется в случае, когда при сближении судов максимальная дистанция кратчайшего сближения  $\max D_{\min}$  меньше предельно-допустимой дистанции  $\min D_{\text{доп}}$ , т.е. при выполнении условий:

$$\dot{D} = \{V_2 \cos(K_2 - \alpha) - V_1 \cos(K_1 - \alpha)\} < 0, \quad (\text{условие сближения}) \text{ и}$$

$$\max D_{\min} < \min D_{\text{доп}} \text{ (признак чрезмерного сближения).}$$

Для оценки возникновения ситуации чрезмерного сближения в качестве безопасной области судна принимался круг с радиусом, равным предельно-допустимой дистанции  $\min D_{\text{доп}}$ , выбор значения которой рассмотрен в третьей главе работы.

В свою очередь максимальная дистанция кратчайшего сближения  $\max D_{\min}$  не зависит от формы безопасной области судна, а от начальной относительной позиции сближающихся судов и их параметров движения, как показано в третьей главе.

Алгоритм определения реализации чрезмерного сближения представлен на рис. 5.1.

Стратегия экстремального расхождения в значительной мере определяется соотношением скоростей судна  $V_1$  и цели  $V_2$ . В случае, когда  $V_1 < V_2$ , значение  $\max(\min D)$  рассчитывается следующим образом.

Вначале вычисляются экстремальные относительные курсы  $K_{\text{отmin}}$  и  $K_{\text{отmax}}$ :

$$K_{\text{отmin}} = \pi + K_2 - \arcsin \rho, \quad K_{\text{отmax}} = \pi + K_2 + \arcsin \rho.$$

Полученные значения  $K_{\text{отmin}}$  и  $K_{\text{отmax}}$  используются для расчета максимальных значений дистанции кратчайшего сближения  $\max D_{\min}^{(\text{mx})}$ ,  $\max D_{\min}^{(\text{mn})}$  при относительных уклонениях судна вправо и влево:

$$\max D_{\min}^{(\text{mn})} = D_n \sin(K_{\text{отmin}} - \alpha_n), \quad \max D_{\min}^{(\text{mx})} = D_n \sin(K_{\text{отmax}} - \alpha_n),$$

после чего используется большее полученное значение:

$$\max(\min D) = \max(\max D_{\min}^{(\text{mx})}, \max D_{\min}^{(\text{mn})}).$$

Если  $V_1 > V_2$ , то значение максимального значения дистанции кратчайшего сближения определяется соотношением:

$$\max(\min D) = D_n.$$

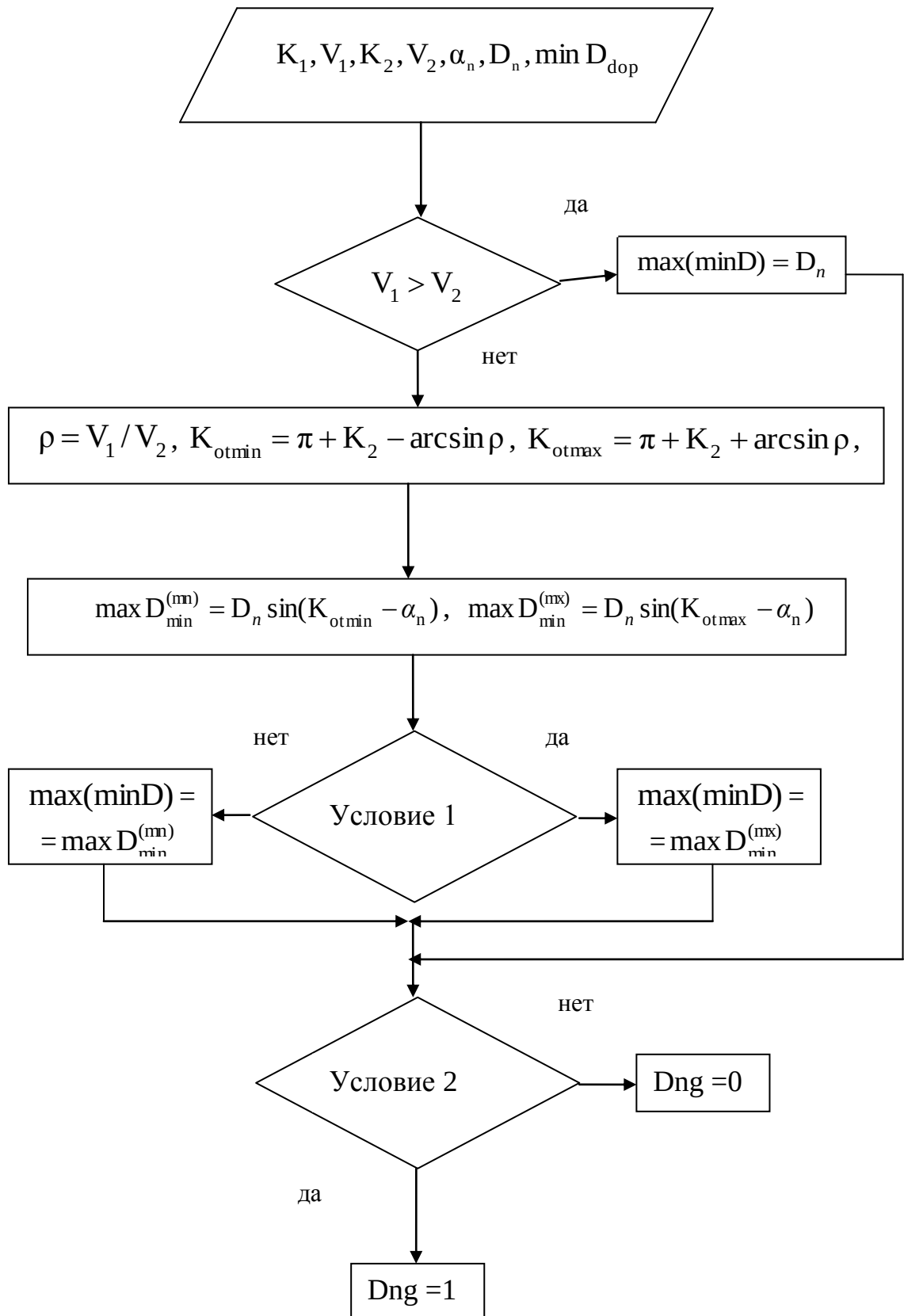


Рис. 5.1. Алгоритм оценки ситуации чрезмерного сближения

В алгоритме на рис. 5.1 использованы два условия, которые имеют следующий вид:

- условие 1 определяется неравенством

$$(\max D_{\min}^{(mx)} > \max D_{\min}^{(mn)});$$

- условие 2 выражается признаком чрезмерного сближения, т. е.

$$\max D_{\min} < \min D_{\text{dop}}.$$

Выходной переменной алгоритма является переменная Dng, которая при реализации чрезмерного сближения принимает значение 1, а в противном случае она равна 0.

Если ситуация чрезмерного сближения реализовалась и  $Dng = 1$ , то необходимо произвести выбор стратегии экстренного расхождения, которая состоит из двух этапов, причем на первом этапе необходимо минимизировать скорость сближения судна и цели. В начальный момент времени судно определяет сторону поворота и выполняет его с максимальной угловой скоростью.

Первый этап завершается в момент времени, когда судно выходит на курс, равный обратному пеленгу на цель, - курс экстренного расхождения  $K_\alpha$ , причем  $K_\alpha = \alpha(t) + \pi$ . Удерживая цель на обратном пеленге, судно стремиться попасть в ситуацию, позволяющую предпринять поворот к выходу на программную траекторию и обеспечить безопасное сближение с целью.

В момент времени выхода на курс экстренного расхождения судно определяет текущую ситуацию, которая может принадлежать одному из подмножеств, перечень которых, как показано в четвертой главе, зависит от соотношения скоростей судна  $V_1$  и цели  $V_2$ .

В случае  $V_1 < V_2$  может реализоваться одно из подмножеств ситуаций  $Mn_1$ ,  $Mn_3$ ,  $Mn_5$ ,  $Mn_7$  и  $Mn_8$ , и принадлежность произвольной начальной ситуации  $Mn_0$  к одному из перечисленных подмножеств производится с помощью алгоритма, приведенного на рис. 5.2.



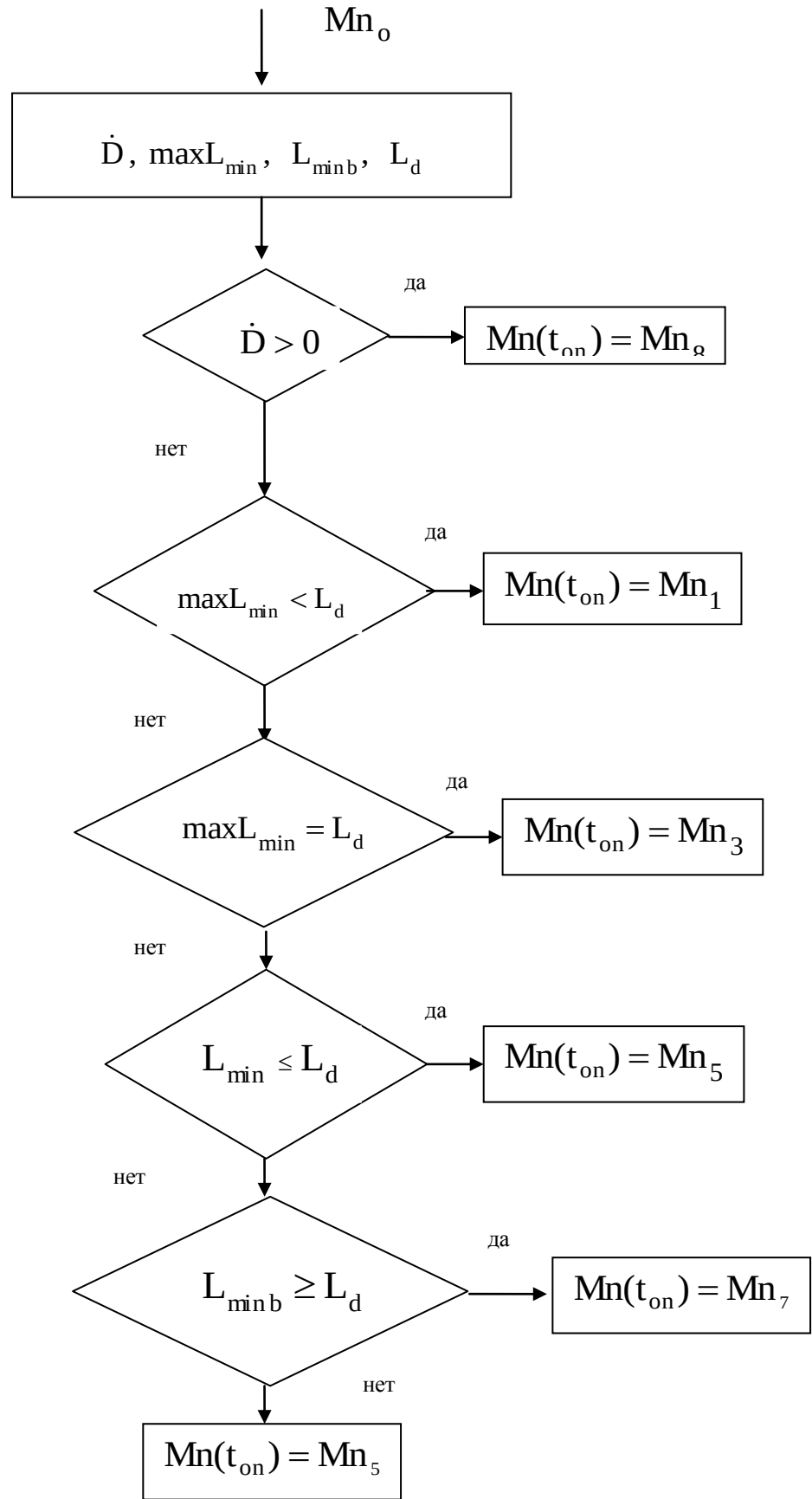


Рис. 5.2. Алгоритм идентификации ситуации чрезмерного сближения  
при  $V_1 < V_2$

В приведенном алгоритме дистанция  $L_{\min b}$  характеризует дистанцию кратчайшего сближения судна с целью при следовании относительным курсом выхода на программную траекторию  $K_{otb}$  и рассчитывается с помощью формулы:

$$L_{\min b} = D_t \sin(\alpha_t - K_{otb}),$$

где  $D_t$  и  $\alpha_t$  - дистанция между судном и целью, а также пеленг с судна на цель в момент завершения первого этапа.

Для случая  $V_1 > V_2$  возможна реализация только подмножеств ситуаций  $Mn_1$ ,  $Mn_5$ , и  $Mn_8$ , а алгоритм определения начальной ситуации показан на рис. 5.3.

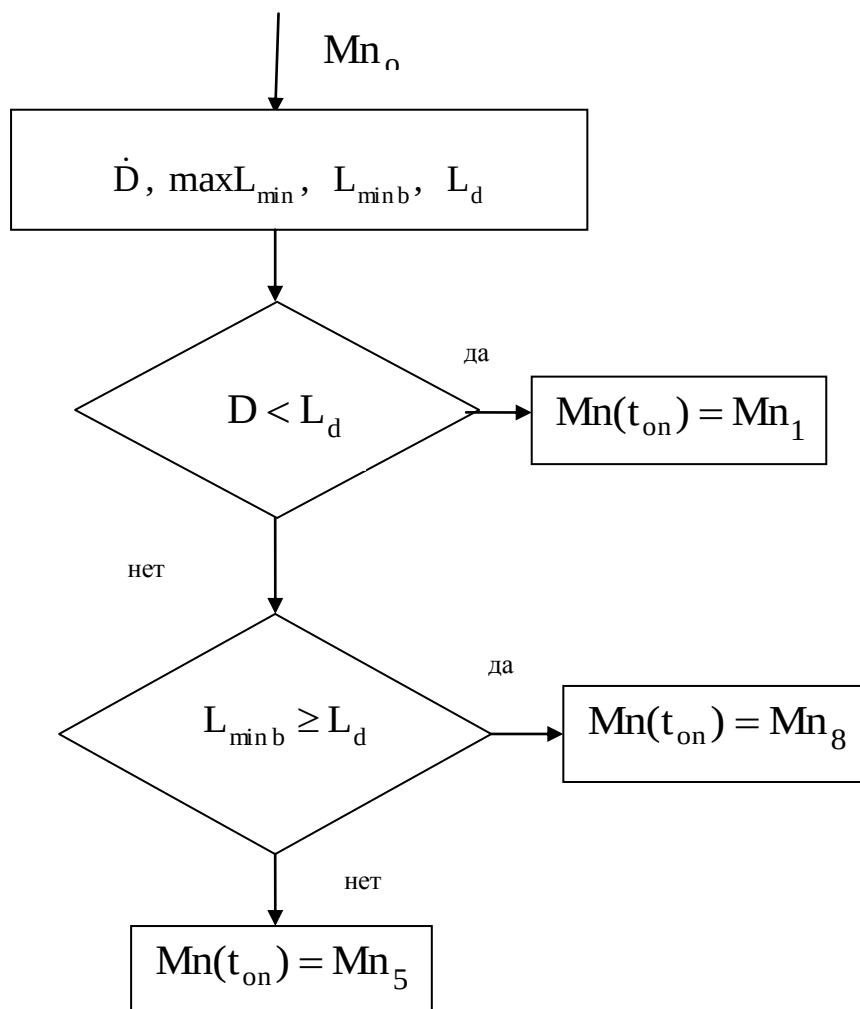


Рис. 5.3. Алгоритм идентификации начальной ситуации при  $V_1 > V_2$

После идентификации начальной ситуации чрезмерного сближения следует определить параметры стратегии экстренного расхождения, причем их перечень и значения определяются типом подмножества ситуаций чрезмерного сближения, к которому принадлежит реализовавшаяся начальная ситуация, как показано на рис. 5.4.

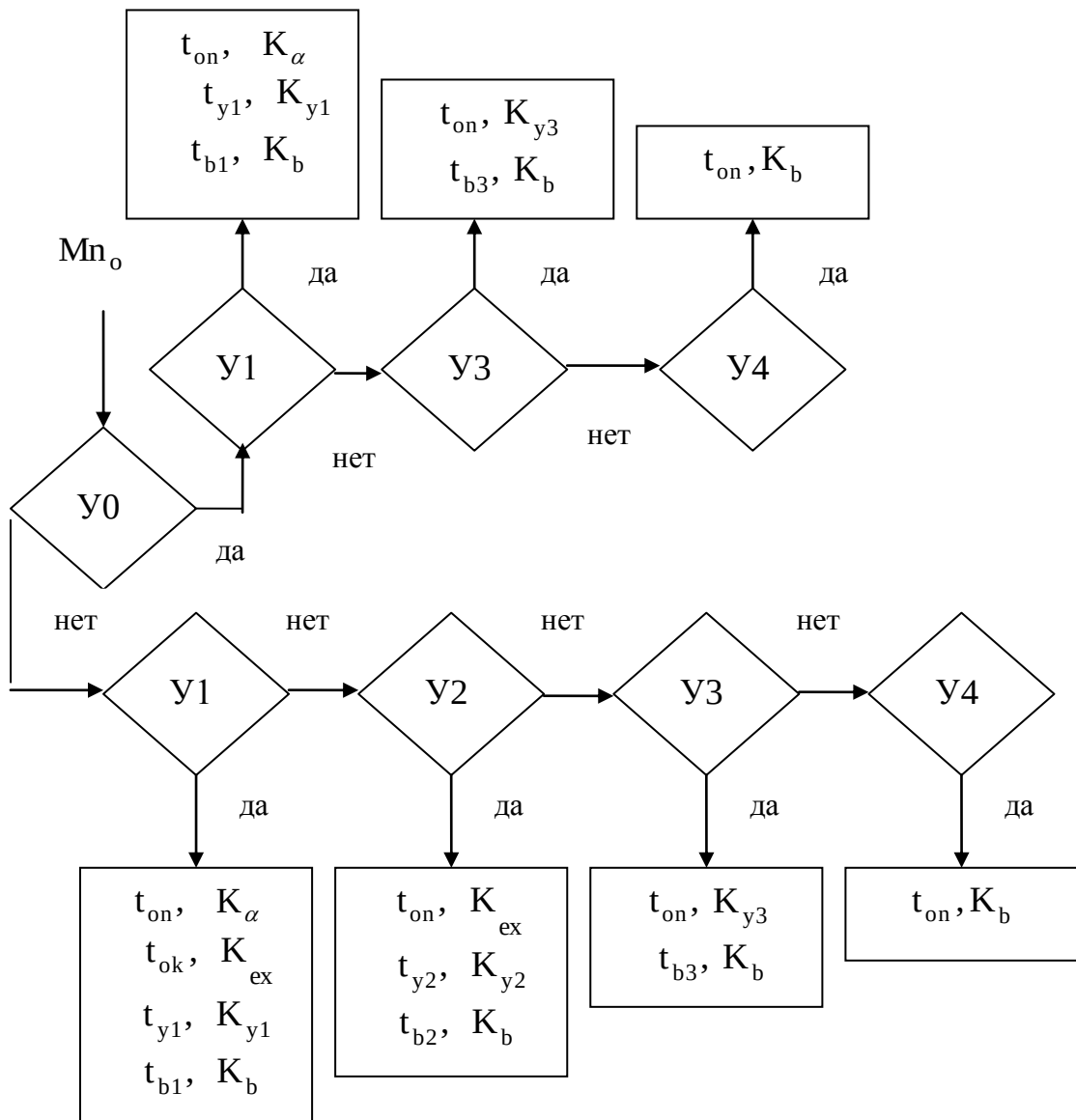


Рис. 5.4. Алгоритм расчета параметров стратегии экстренного расхождения

В приведенном алгоритме через  $Y_0 \dots Y_4$  обозначены следующие условия:

$$Y_0 \rightarrow V_1 > V_2; \quad Y_1 \rightarrow Mn(t_{on}) \in Mn_1; \quad Y_2 \rightarrow Mn(t_{on}) \in Mn_3;$$

$$Y_3 \rightarrow Mn(t_{on}) \in Mn_5; \quad Y_4 \rightarrow Mn(t_{on}) \in (Mn_7, Mn_8).$$

Расчет параметров стратегии экстренного расхождения производится следующим образом:

$$K_\alpha = \alpha(t) + \pi; \quad K_{ex} = K_2 \pm \arccos(\rho);$$

$$t_{y1} = t_{ok} + \frac{L(t_{ok})\cos[\alpha(t_{ok}) - K_{otex}] + L_d}{V_{otex}},$$

$$\text{где } V_{otex1} = [V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2\cos(K_{ex} - K_2)]^{1/2}.$$

$$K_{y1} = 3\pi/2 + K_2 \pm \arcsin \rho - \arcsin\left(\frac{\sqrt{1-\rho^2}}{\rho}\right);$$

$$K_b = K_{1n} + a\gamma,$$

$$t_{b1} = t_{y1} + \frac{\frac{\Delta}{2} \frac{L_d}{V_{otex}} + V_{oty} t_{y1} \sin(K_{otb} - K_{otex}) + L(t_{ok}) \sin[\alpha(t_{ok}) - K_{otb}]}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}.$$

$$t_{y2} = t_{on} + \frac{L(t_{on})\cos[\alpha(t_{on}) - K_{otex}] + L_d}{V_{otex}};$$

$$K_{y2} = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right] + \arcsin\{[p^{-1} \sin(K_2 - \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right])]\},$$

для встречных курсов;

$$K_{y2} = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right] + \pi - \arcsin\{[p^{-1} \sin(K_2 - \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right])]\},$$

для попутных курсов;

$$t_{b2} = t_{y2} + \frac{\frac{\Delta}{2} \frac{L_d}{V_{otex}} + V_{oty} t_{y2} \sin(K_{otb} - K_{otex}) + L(t_{on}) \sin[\alpha(t_{on}) - K_{otb}]}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}$$

$$t_{y3} = t_{on} + \frac{L(t_{on})\cos[\alpha(t_{on}) - K_{ot\alpha}] + L_d}{V_{ot\alpha}};$$

$$K_{y3} = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right] + \arcsin\{[p^{-1} \sin(K_2 - \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right])]\},$$

для встречных курсов;

$$K_{y3} = \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right] + \pi - \arcsin\{[p^{-1} \sin(K_2 - \alpha(t_{on}) \pm \arcsin\left[\frac{L_d}{L(t_{on})}\right])]\},$$

для попутных курсов;

$$t_{b3} = t_{y3} + \frac{\frac{\Delta L_d}{2} + V_{ot\alpha} t_{y3} \sin(K_{otb} - K_{otex}) + L(t_{on}) \sin[\alpha(t_{on}) - K_{otb}]}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})}.$$

5.2. Экспериментальные исследования поворотливости судна и расчет параметров динамических моделей.

Для проведения корректного имитационного моделирования в имитационной модели необходимо использовать реальные параметры поворотливости судна. Поэтому в реальных условиях эксплуатации производились натурные наблюдения поворота судна, которые позволили накопить статистические данные для определения параметров поворотливости судна.

В процессе эксплуатации контейнеровоза «Oxford» были получены экспериментальные материалы в результате натурных наблюдений поворотливости судна, которые были использованы для определения динамической модели и вычисления численных значений ее параметров.

Судно длиной 216 метров, его ширина 26,8 метра, а высота борта 21,8 метра. Водоизмещение в полном грузу составляет 23660 тонн со средней осадкой 9,40 метра.

Силовая установка состоит из двух дизелей типа MAN|B&W 9L 58|64 мощностью 12510 к. вт каждый. Винт диаметром 7000 мм и весом 45000 кг.

Эффективная площадь руля 25,6 кв. м. Максимальная скорость в грузу при работе обоих двигателей 27 узлов.

Экспериментальный материал был получен следующим образом. При следовании судна неизменными курсом и скоростью производилась перекладка руля на заданный угол и выбранный борт. С момента начала кладки руля через интервалы времени равные примерно 5 секундам производилась регистрация моментов времени  $t_i$  и соответствующих им значений приращения курса судна  $\Delta K_i$ .

В условиях эксплуатации удалось получить экспериментальные данные для поворота судна вправо и влево при углах кладки руля 15 градусов (соответственно первый и второй маневры). При этом каждый из маневров производился со скоростью 24 узла по четыре раза в максимально похожих условиях: при состоянии моря 2-4 балла, ветра 2-3 балла и при отсутствии течения.

Осредненные результаты по каждому из маневров приведены в табл. 5.1.

*Таблица 5.1.*

**Осредненные данные по маневрам**

|        |              |   |    |     |     |      |      |      |      |      |
|--------|--------------|---|----|-----|-----|------|------|------|------|------|
| Первый | $t_i$        | 5 | 14 | 18  | 21  | 26   | 31   | 36   | 40   | 45   |
| маневр | $\Delta K_i$ | 0 | 0  | 1,5 | 5,1 | 12,0 | 22,1 | 35,2 | 44,8 | 58,0 |
| Второй | $t_i$        | 5 | 11 | 15  | 19  | 27   | 33   | 39   | 43   | -    |
| маневр | $\Delta K_i$ | 0 | 0  | 2,0 | 6,1 | 21,9 | 35,1 | 50,2 | 60,1 | -    |

Особенность поворота судна заключается в том, что при максимальной скорости судна в грузу при кладках руля 15 градусов как вправо, так и влево угловая скорость поворота остается равной нулю на протяжении достаточно длительного периода, - 14 и 11 секунд после перекладки руля соответственно вправо и влево. Поэтому для маневров в динамическую модель судна необходимо ввести время задержки  $t_z$ .

Для модели вращательного движения судна первого порядка единственным неизвестным параметром является значение установившейся угловой скорости поворота судна  $a_{\omega}$ , которое можно определить, используя несколько последних интервалов зависимости  $\Delta K_i$  от  $t_i$ .

Для аппроксимации исходного экспериментального материала динамической моделью третьего порядка и вычисления соответствующих значений параметров  $T_1$  и  $T_2$  использовался метод наименьших квадратов в предположении нормального закона распределения погрешностей измерений.

Мерой расхождения теоретических и экспериментальных точек в методе наименьших квадратов является выражение:

$$\xi_i = \Delta K(t_i) - \Delta K_i = a_{\omega} \{ t_i - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t_i / T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t_i / T_2)] \} / (T_1 - T_2) \} - \Delta K_i,$$

где  $\Delta K_i$  и  $t_i$  -  $i$ -е значение приращение курса и соответствующий ему момент времени.

Нормальные уравнения для вычисления коэффициентов  $T_1$  и  $T_2$  имеют вид:

$$\sum_{i=1}^n (\xi_i \frac{\partial \xi_i}{\partial T_1}) = 0; \quad \sum_{i=1}^n (\xi_i \frac{\partial \xi_i}{\partial T_2}) = 0,$$

и являются нелинейными. Проведенный анализ показал, что для решения данной системы нелинейных уравнений целесообразно применить метод Ньютона. В результате обработки экспериментального материала для первого маневра получили  $T_1=9,62$ ,  $T_2=1,23$  и для второго маневра  $T_1=7,45$ ,  $T_2=0,80$ . С помощью полученных параметров был произведен расчет зависимости  $\Delta K$  от времени  $t$  и полученные зависимости сравнивались с экспериментальными точками.

На рис. 5.5 показан график зависимости приращения курса от времени и экспериментальные точки для первого маневра.

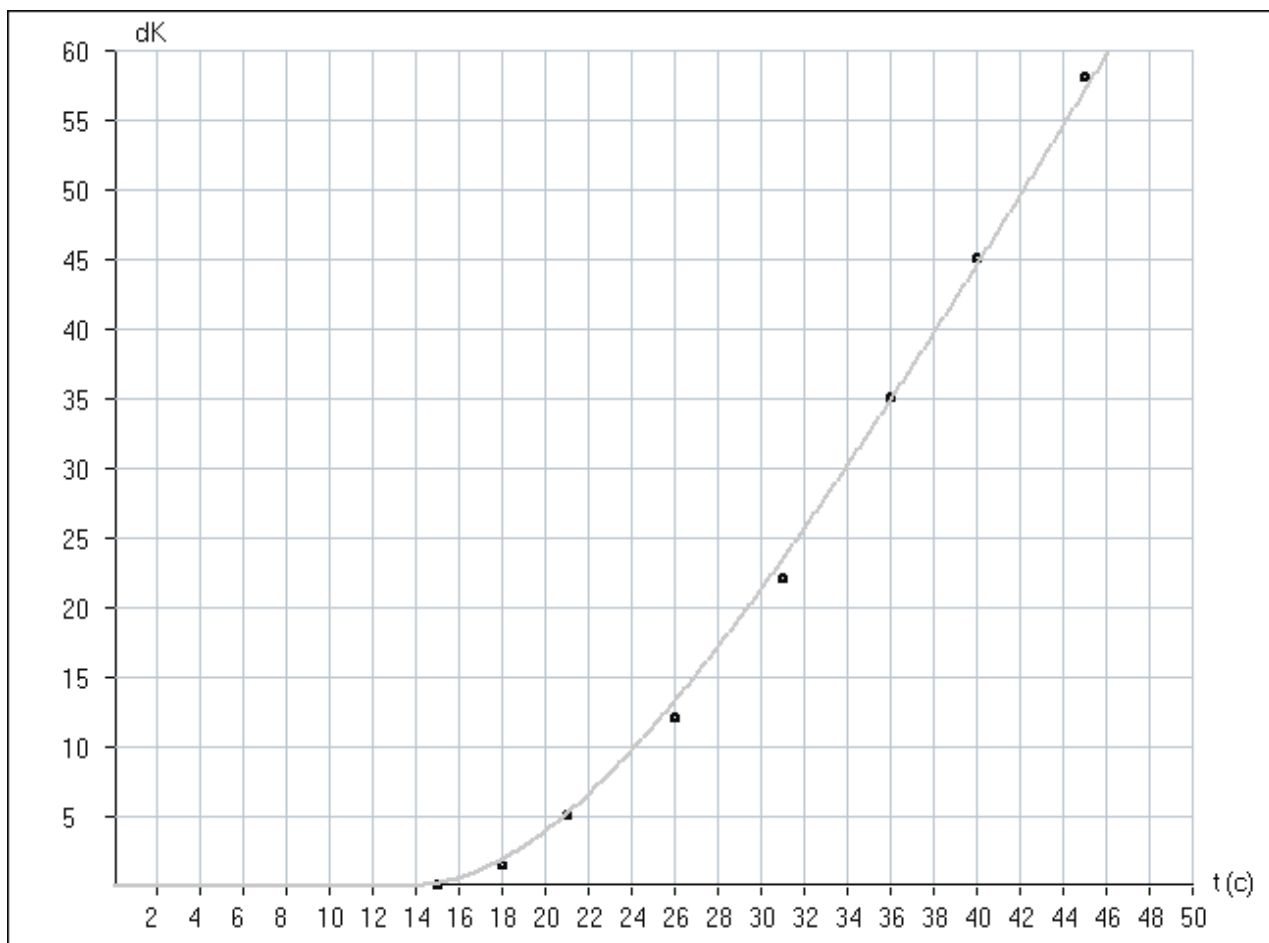


Рис. 5.5. Расчетная зависимость  $\Delta K$  от  $t$  для первого маневра, полученная с помощью динамической модели поворотливости третьего порядка

Экспериментальные точки и график зависимости приращения курса  $\Delta K$  от времени  $t$  для второго маневра приведены на рис. 5.6.

Для рассматриваемой динамической модели вращательного движения судна третьего порядка расчет момента времени начала маневра расхождения с помощью формулы (4.14) требует вычисления приращения координат  $\Delta \xi_0$  и  $\Delta \eta_0$  за время поворота судна  $\tau$ , что предусматривает вычисление определенных интегралов, для чего применялся метод Симпсона. Вычисления  $\Delta \xi_0$  и  $\Delta \eta_0$  для третьей динамической модели производилось следующим образом. Постоянные величины перед определенными интегралами в формуле (4.15) обозначались:



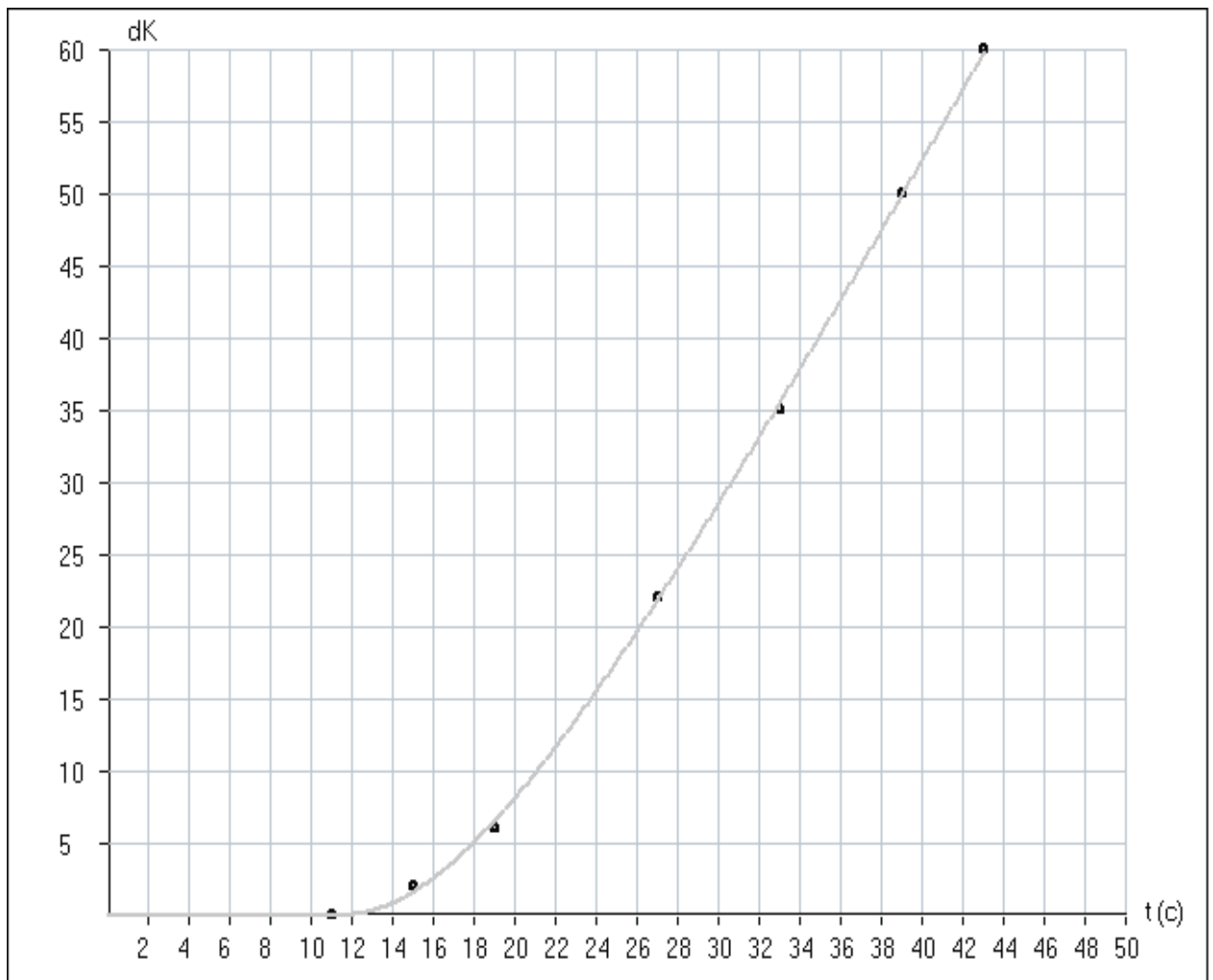


Рис. 5.6. Расчетная зависимость  $\Delta K$  от  $t$  для второго маневра

$$A_1 = V_0 \cos K_0, \quad A_2 = V_0 \sin K_0, \quad A_3 = V_0 \cos[K_0 + K(\Delta t_k)],$$

$$A_4 = V_0 \sin[K_0 + K(\Delta t_k)].$$

Аргумент под тригонометрическими функциями подынтегральных функций первых двух интегралов обозначим  $\varphi_1$ , а третьего и четвертого интегралов -  $\varphi_2$ , причем:

$$\varphi_1 = a_\omega \{ t - \{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2) \};$$

$$\varphi_2 = -a_\omega t + a_\omega \{ 2 - [ T_1 \exp(-\Delta t_k / T_1) - T_2 \exp(-\Delta t_k / T_2) ] / (T_1 - T_2) \} \times$$

$$\{ T_1^2 [1 - \exp(-t/T_1)] - T_2^2 [1 - \exp(-t/T_2)] \} / (T_1 - T_2).$$

Если обозначить подынтегральные функции четырех определенных интегралов, входящих в выражения  $\Delta\xi_0$  и  $\Delta\eta_0$ , через:

$$y_c = \cos\varphi_1, \quad y_s = \sin\varphi_1, \quad z_c = \cos\varphi_2, \quad z_s = \sin\varphi_2,$$

а сами определенные интегралы:

$$\mathfrak{I}_1 = \int_0^{\Delta t_k} y_c dt, \quad \mathfrak{I}_2 = \int_0^{\Delta t_k} y_s dt, \quad \mathfrak{I}_3 = \int_0^{\Delta t} z_c dt, \quad \mathfrak{I}_4 = \int_0^{\Delta t} z_s dt,$$

то выражения для  $\Delta\xi_0$  и  $\Delta\eta_0$  принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta\xi_0 &= A_2 \mathfrak{I}_1 + A_1 \mathfrak{I}_2 + A_4 \mathfrak{I}_3 + A_3 \mathfrak{I}_4, \\ \Delta\eta_0 &= A_1 \mathfrak{I}_1 - A_2 \mathfrak{I}_2 + A_3 \mathfrak{I}_3 - A_4 \mathfrak{I}_4. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Каждый из определенных интегралов  $\mathfrak{I}_i$  вычисляли методом Симпсона следующим образом. В качестве примера рассмотрим интеграл:

$$\mathfrak{I}_1 = \int_0^{\Delta t_k} y_c dt.$$

Интервал времени  $\Delta t_k$ , на котором производится интегрирование, необходимо разбить на четное число  $n$  элементарных интервалов  $h_i$ , длительность каждого из которых целесообразно выбрать равной  $h = 1-2$  с.

При этом  $n = 2(\Delta t_k / 2\text{div}h)$  и  $h_i = t_i - t_{i-1}$ . В способе Симпсона подынтегральная функция  $y_c$  на каждом отрезке  $2h_i$ , равном двум элементарным отрезкам, аппроксимируется интерполяционным многочленом Лагранжа второй степени и в этом случае справедливо соотношение:

$$\int_{t_{i-1}}^{t_{i+1}} y_c dt \approx \frac{h}{3} [y_c(t_{i-1}) + 4y_c(t_i) + y_c(t_{i+1})].$$

Если обозначить  $y_{ci} = y_c(t_i)$ , то искомый определенный интеграл вычисляется по следующей формуле:

$$\mathfrak{I}_1 = \int_0^{\Delta tk} y_c dt = \frac{h}{3} [y_{c0} + 4(y_{c1} + y_{c3} + \dots + y_{c(n-1)}) + 2(y_{c2} + y_{c4} + \dots + y_{c(n-2)}) + y_{cn}].$$

Аналогично вычисляются определенные интегралы  $\mathfrak{I}_2$ ,  $\mathfrak{I}_3$  и  $\mathfrak{I}_4$ , причем при  $h=1-2$  с. обеспечивается требуемая точность вычислений поправок на инерционность судна.

### 5.3. Имитационное моделирование полученного метода экстренного расхождения при чрезмерном сближении судна с целью.

Для проведения имитационного моделирования была разработана компьютерная программа на языке высокого уровня «Delphi», которая содержит модуль выбора исходной ситуации чрезмерного сближения, модуль анализа текущей ситуации и выбора безопасного маневра экстренного расхождения.

В основу написания компьютерной программы положены алгоритмы, полученные в данной главе в подразделе 5.1, которые представлены на рис. 5.1 ... 5.4.

На рис. 5.1 показан интерфейс имитационной программы перед началом

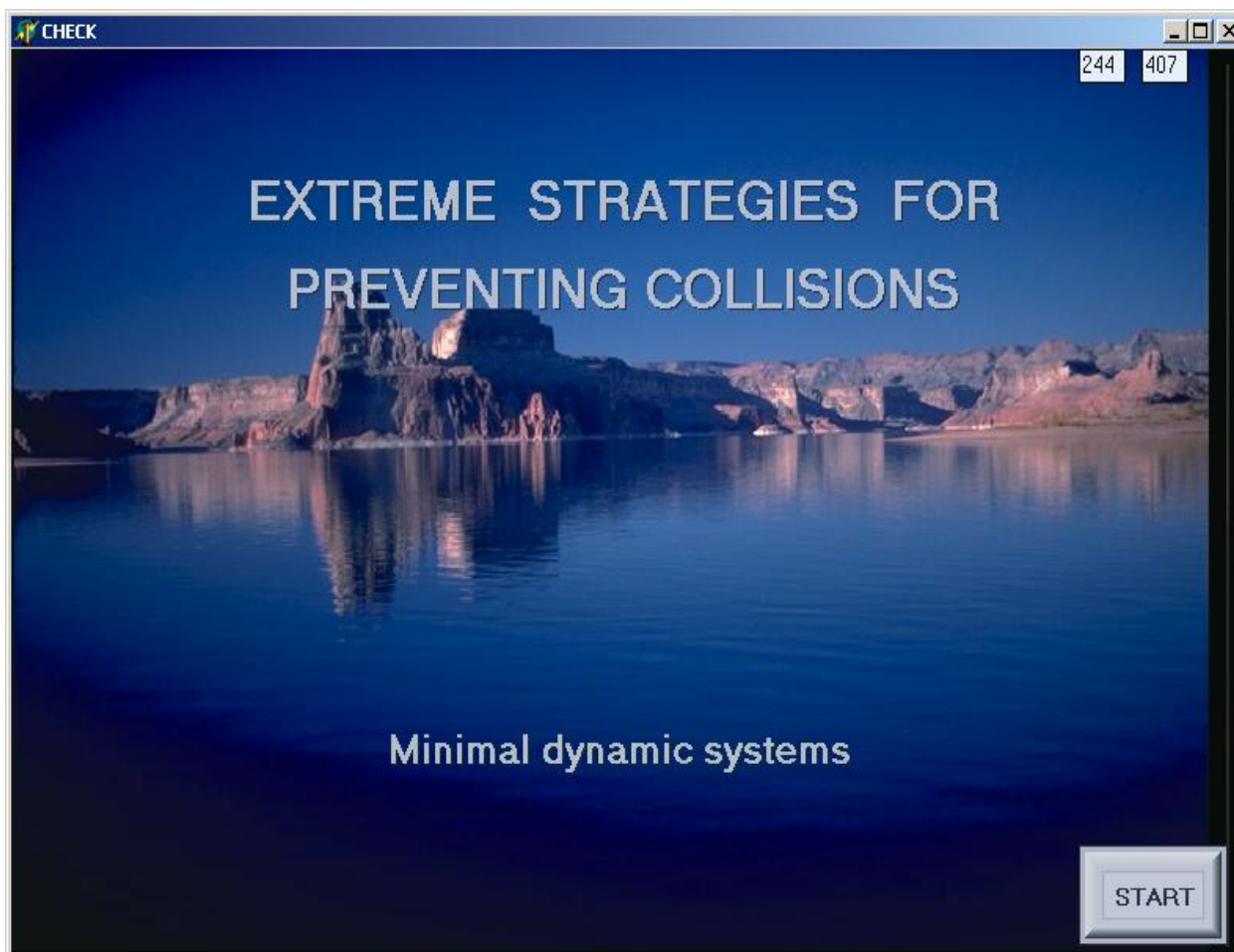


Рис. 5.1. Начальный интерфейс имитационной программы

работы, для начала имитационного моделирования необходимо воспользоваться клавишей «START».

После этого в нижней части экрана появляются три клавиши «Позиция», «Управление» и «ОК», причем активизирована только одна клавиша «Позиция», как показано на рис. 5.2, которая предназначена для выбора начальной позиции чрезмерного сближения и дальнейшего маневрирования по предупреждению столкновения с использованием стратегии экстренного расхождения.

После «кликания» клавиши «Позиция» на экран выводятся 28 клавишей для выбора одной из начальных позиций чрезмерного сближения, причем на каждой клавише содержится минимальная информация, характеризующая соответствующую начальную позицию.

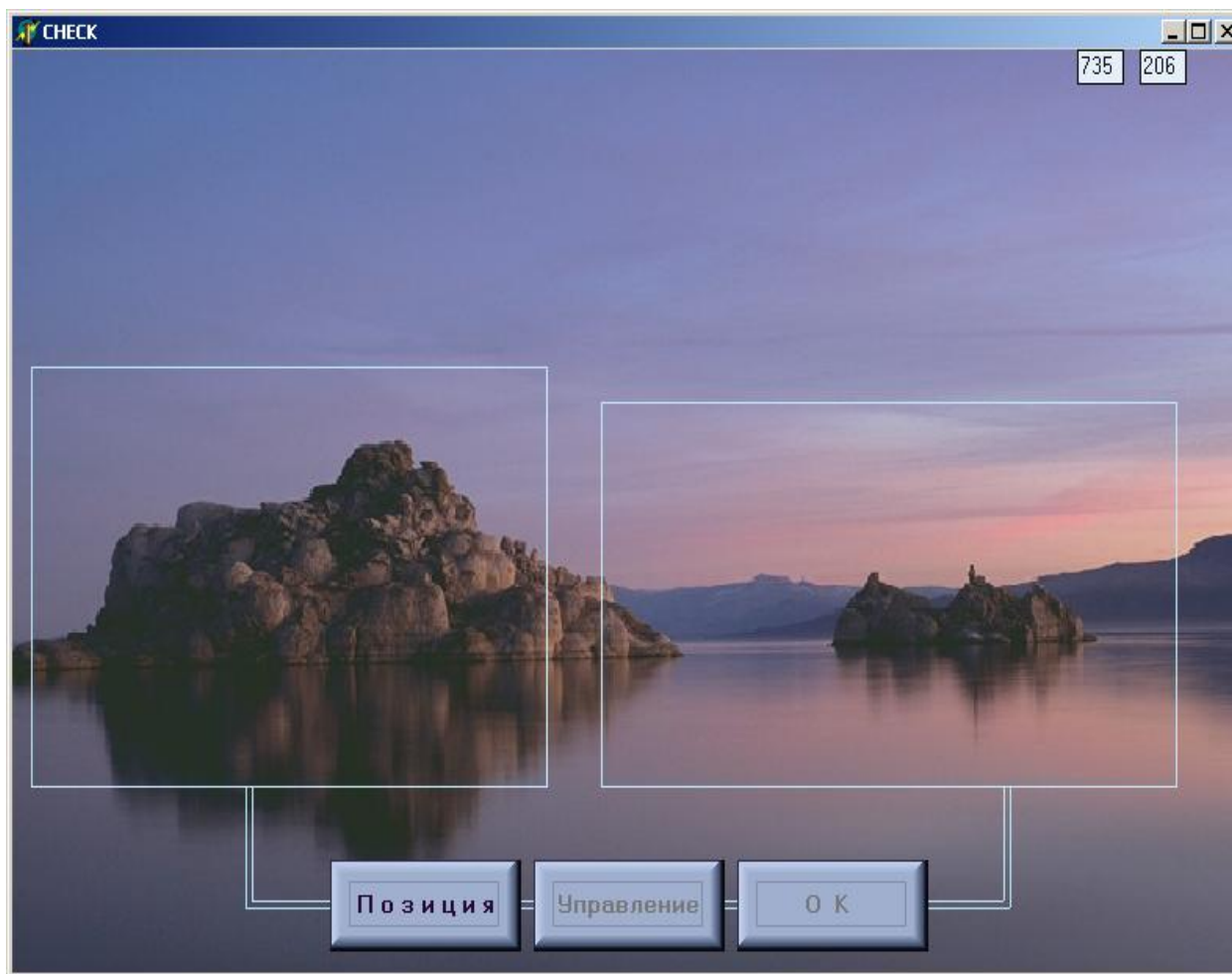


Рис. 5.2. Режим выбора начальной позиции чрезмерного сближения

Как показано на рис. 5.3, на клавише показано взаимное положение судна и цели и их векторы скорости, показывающие соотношение между их курсами и скоростями.

В правом нижнем углу также появляется клавиша режимов выбора начальной ситуации. По умолчанию используется режим «Стандарт», в котором пользователю предлагается 28 стандартных вариантов начальной ситуации. Для выбора желаемого варианта необходимо «кликнуть» соответствующую клавишу. При повторном использовании указанной клавиши появляется возможность сгенерировать начальную ситуацию чрезмерного сближения для дальнейшего выбора маневра экстренного расхождения и его имитационного моделирования, показывающего корректность выбранного маневра.

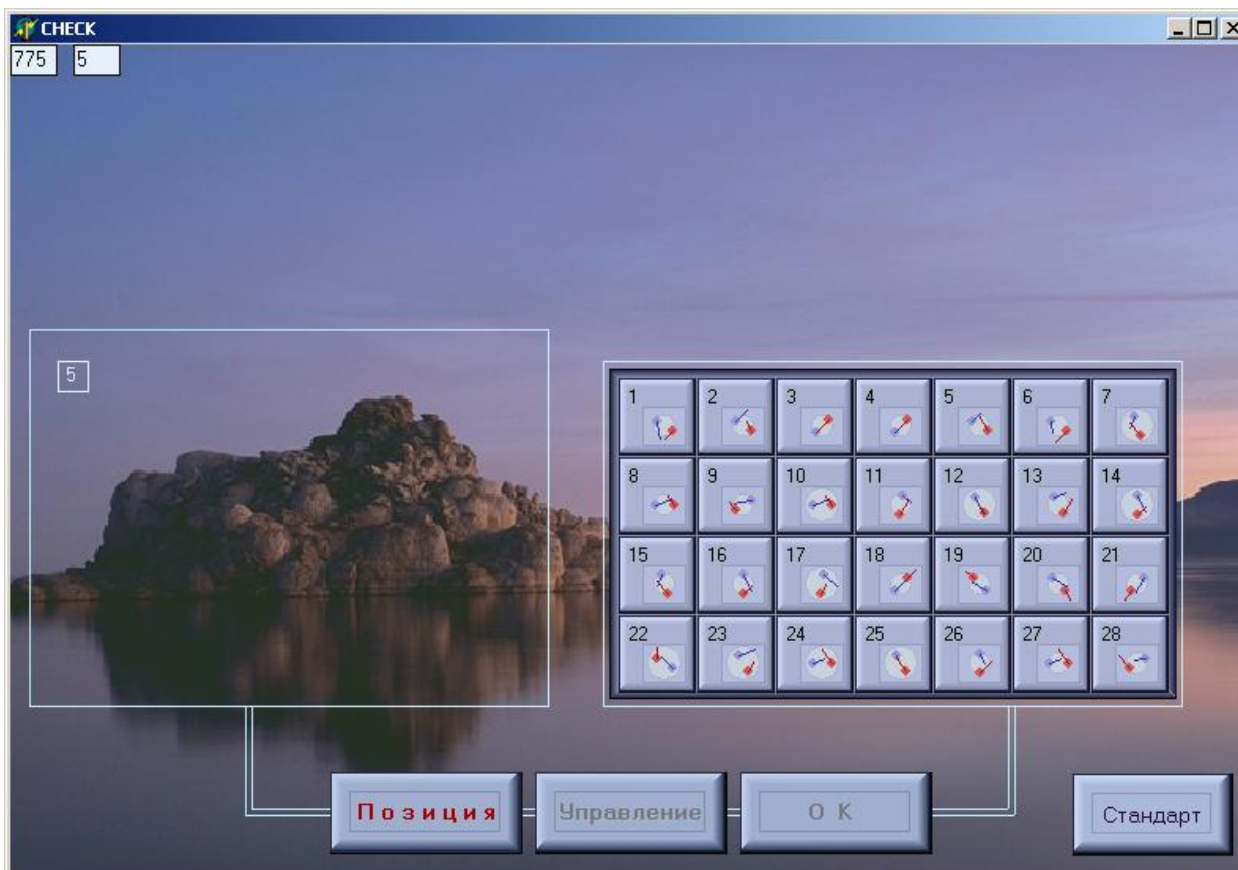


Рис. 5.3. Режим выбора стандартной начальной позиции

После этого на левом ситуационном табло выводится изображение судна и цели, относительное положение которых соответствует выбранной начальной позиции. Над изображением судна и цели, как показано на рис. 5.4, приводятся параметры начальной позиции чрезмерного сближения: начальная дистанция  $D_0$ , начальный пеленг  $B_0$ , предельно-допустимая дистанция кратчайшего сближения  $D_d$ , курс  $K_1$  и скорость  $V_1$  судна, а также курс  $K_2$  и скорость  $V_2$  цели.

Для выбора режима формирования начальной позиции следует использовать клавишу «Стандарт», наименование которой, как показано на рис. 5.5, изменяется на «Формиров» и появляется семь клавиш ввода параметров начальной ситуации, к которым относятся начальные дистанция и пеленг, предельно-допустимая дистанция кратчайшего сближения, а также параметры движения судна и цели.

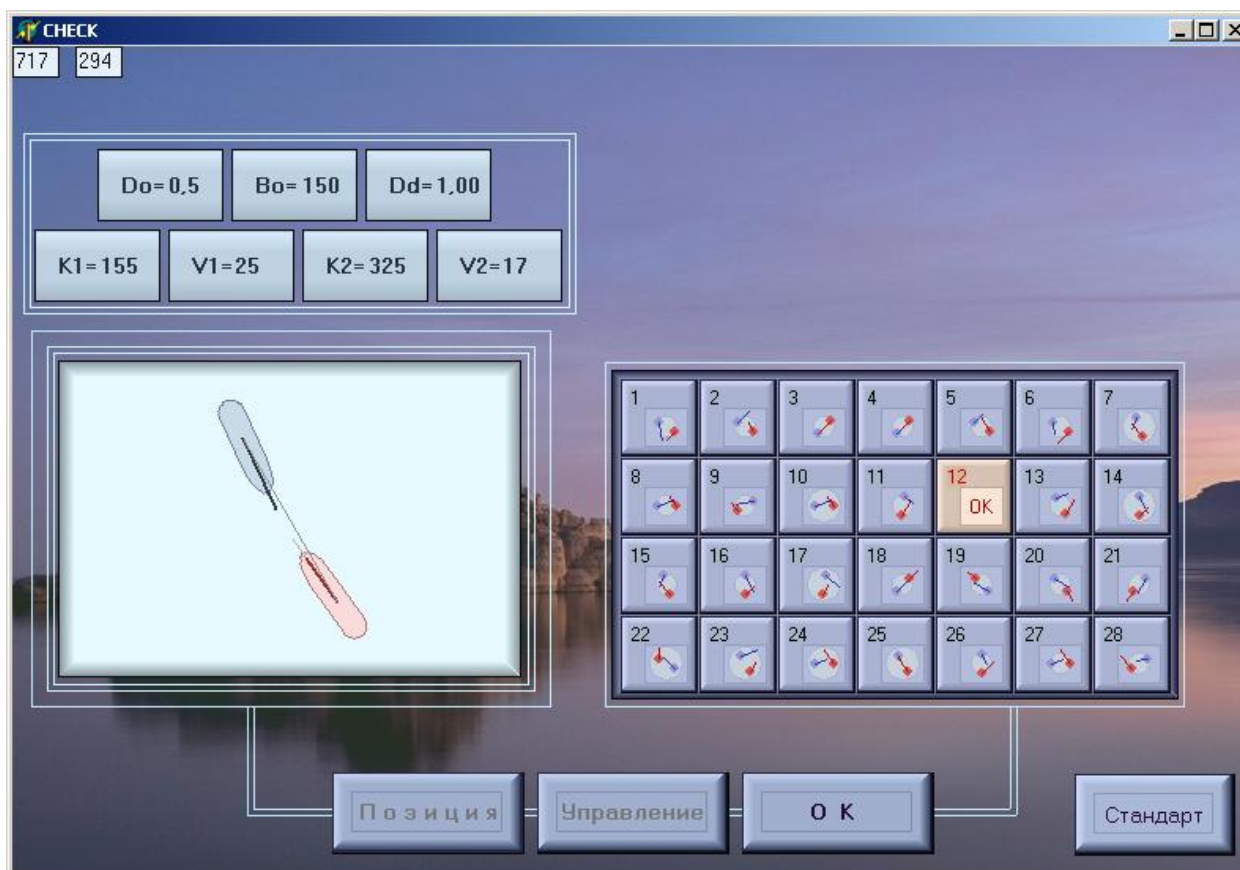


Рис. 5.4. Вывод информации о начальной позиции

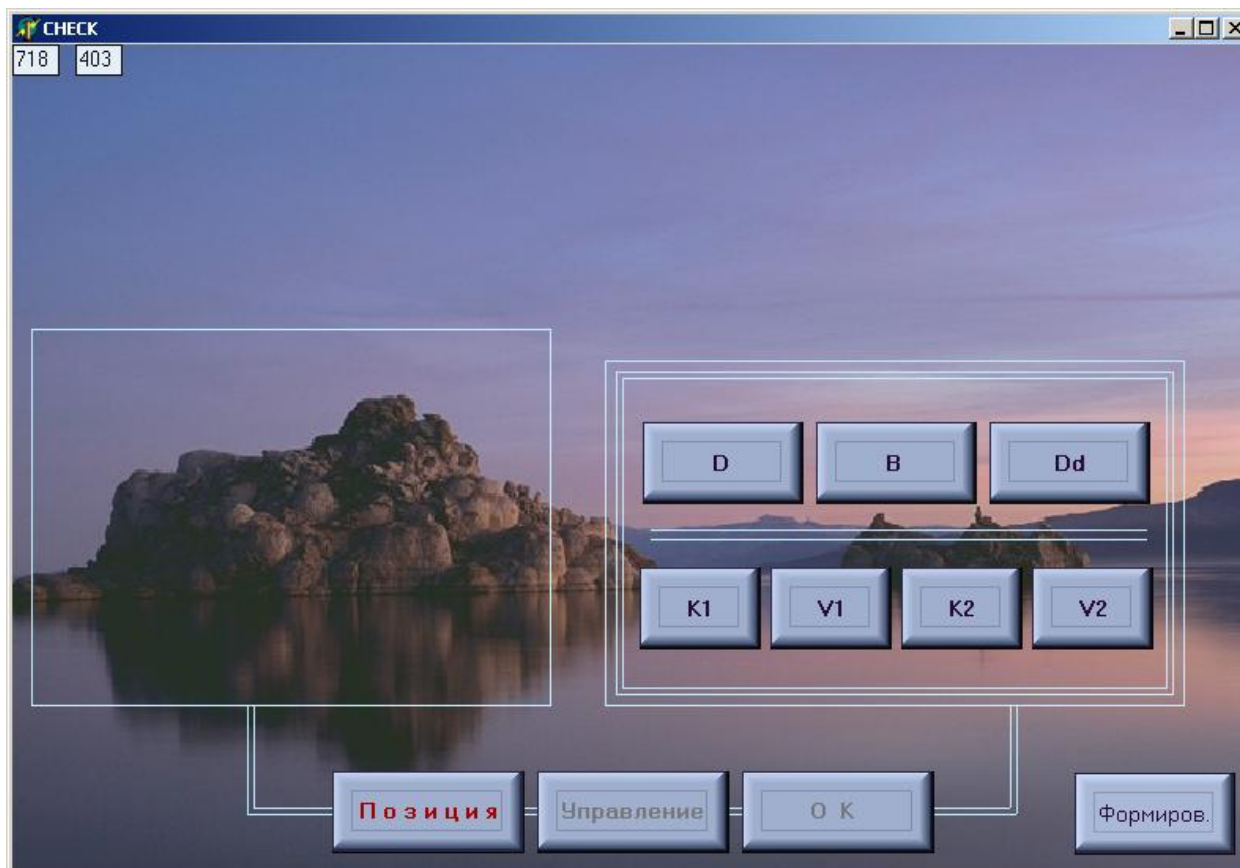


Рис. 5.5. Режим формирования начальной позиции



При выборе любого из параметров, например, пеленга (рис. 5.6) активизируется линейка прокрутки, с помощью которой вводится значение

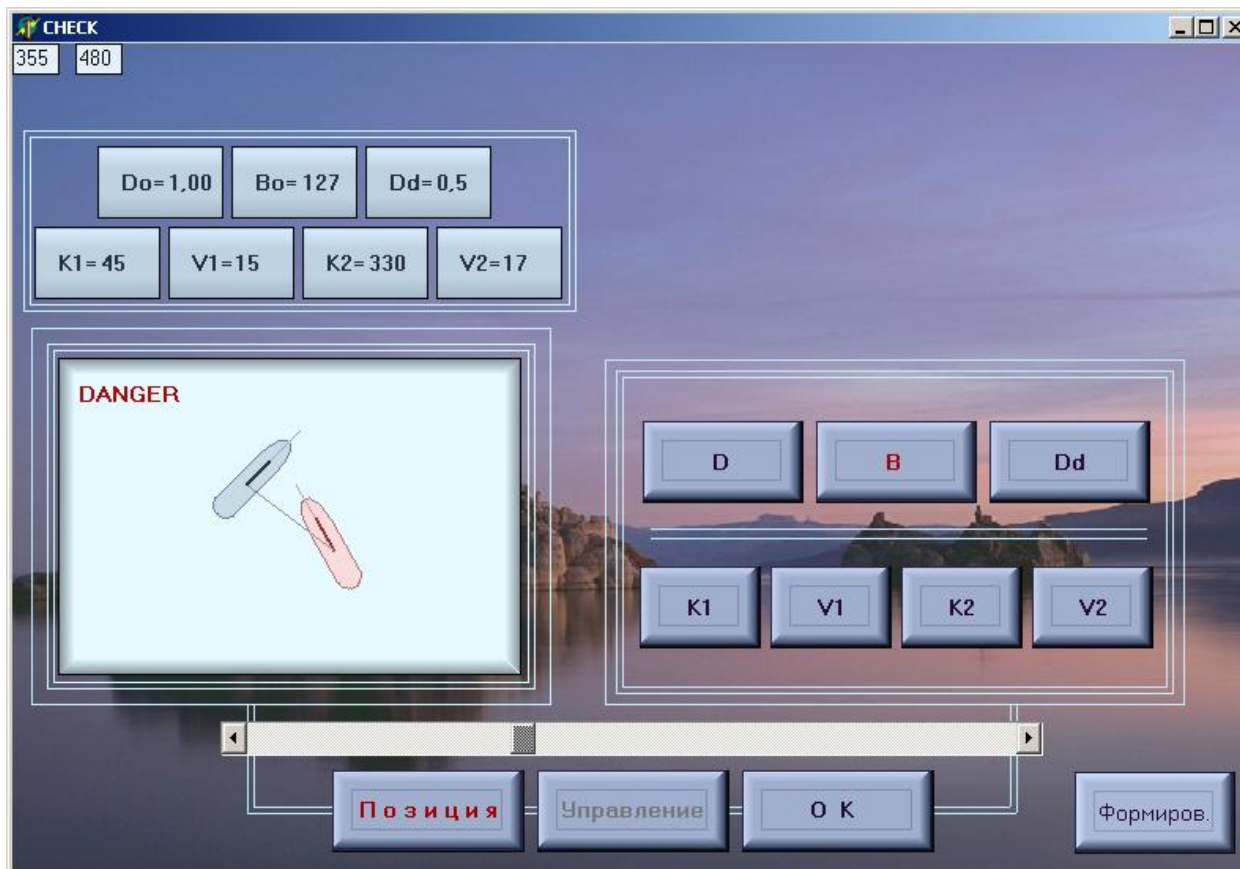


Рис. 5.6. Ввод параметров при формировании начальной позиции

выбранного параметра. При этом на ситуационном табло отображаются вводимые изменения параметров начальной ситуации.

Программа контролирует принадлежность вводимой ситуации к множеству ситуаций чрезмерного сближения. Если для ситуации характерно чрезмерное сближение, то на ситуационном табло появляется сообщение «DANGER» и возможен ввод такой ситуации с помощью клавиши «ОК». В противном случае, если ситуацию ввести в программу, то проигрывание экстренного маневра не состоится.

После использования клавиши «ОК» активизируется клавиша «Управление» и правая нижняя клавиша «View/Choice» обеспечивает режимы просмотра электронной карты и выбор района плавания судна и цели



для проигрывания маневра экстренного расхождения, как показано на рис. 5.7.

Для использования режима просмотра электронной карты необходимо «кликнуть» клавишу «View/Choice», на которой выделяется режим «View», а

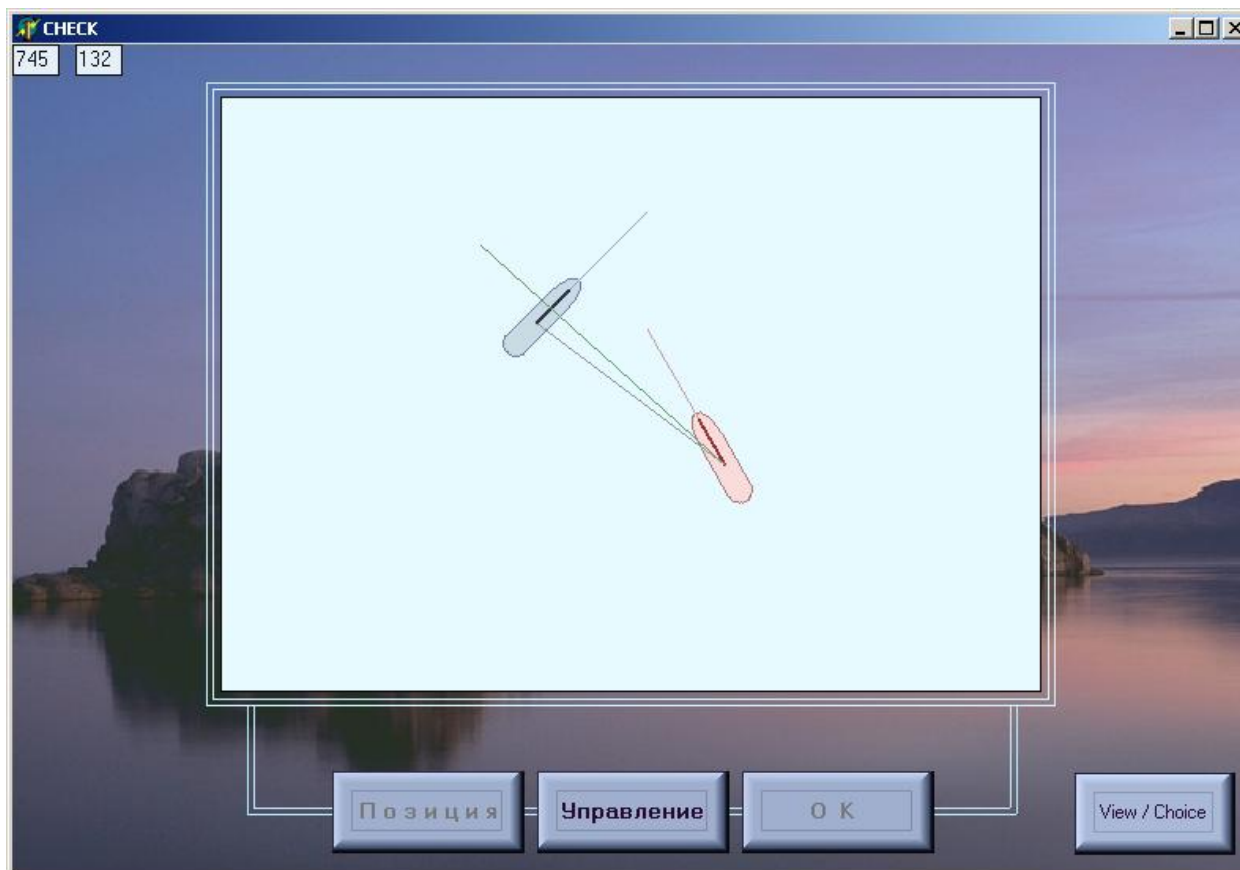


Рис. 5.7. Ввод параметров при формировании начальной позиции

также активизируются горизонтальная и вертикальная линейки прокрутки, что представлено на рис. 5.8. На экран также выводится сообщение о готовности имитационной модели реализовать режим просмотра электронной карты.

Просмотр электронной карты обеспечивается горизонтальной и вертикальной линейками прокрутки. При использовании линеек в окне просмотра отображается участок электронной карты (рис.5.9), который смещается при использовании линеек прокрутки.

На рис. 5.9 отображается электронная карта побережья Крыма в районе подходов к порту Севастополь.

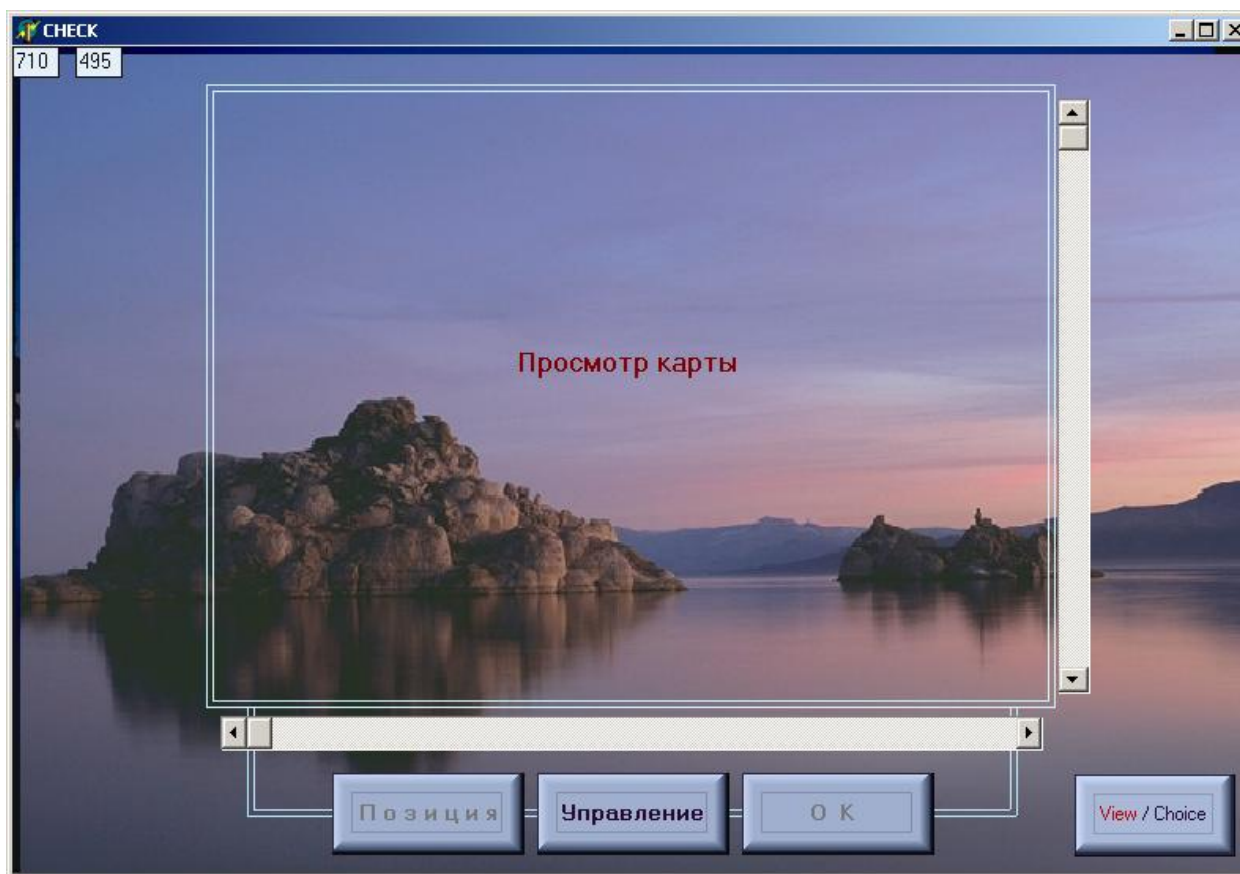


Рис. 5.8. Окно просмотра электронной карты

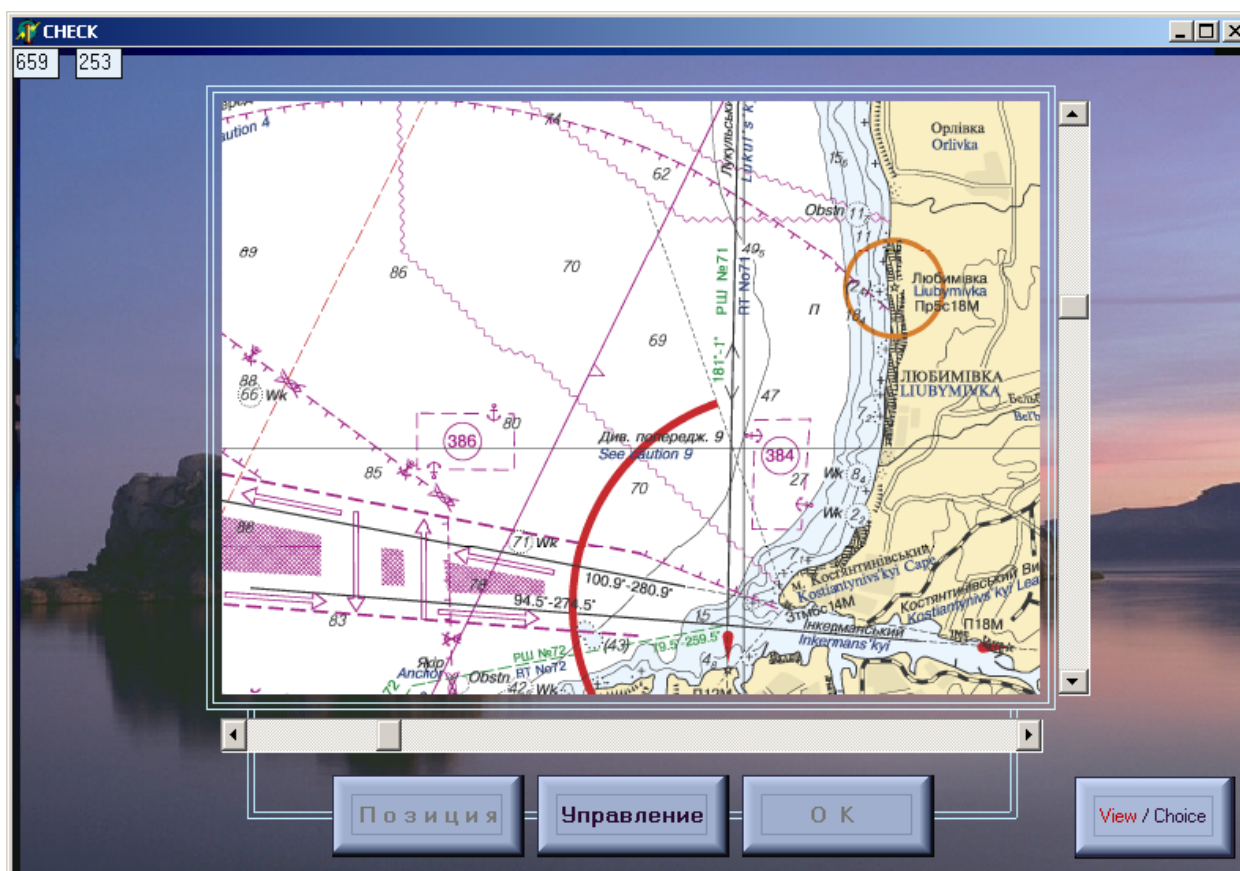


Рис. 5.9. Отображение участка электронной карты

Для выбора района плавания необходимо повторно «кликнуть» клавишу «View/Choice», при этом на ней индицируется режим «Choice», как показано на рис. 5.10.

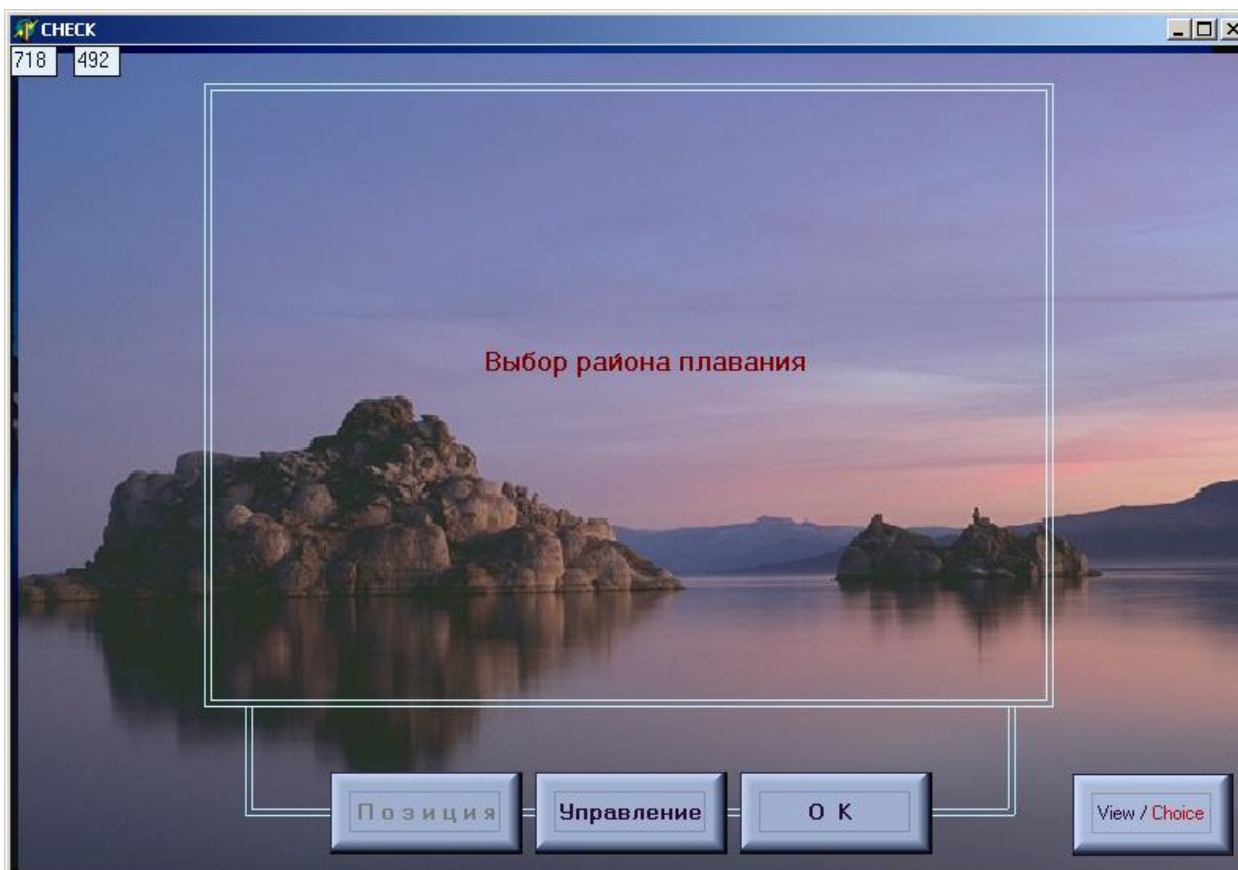


Рис. 5.10. Окно выбора района плавания

Одновременно активизируется клавиша «ОК», и на экран выводится сообщение о готовности имитационной модели работать в режиме выбора района маневрирования судна и цели. Использование этого режима не обязательно – по умолчанию выбирается произвольный участок судоходной части карты.

После использования клавиша «ОК» активизируются горизонтальная и вертикальная линейки прокрутки, как показано на рис. 5.11, а в окне просмотра выводится стилизованная карта с показанными районами маневрирования (красная граница) и текущего просмотра (зеленая граница).

На рис. 5.12 представлено изображение, выводимое в окно просмотра при использовании линеек прокрутки. Данное изображение является прозрачным наложением стилизованной карты и соответствующего района электронной

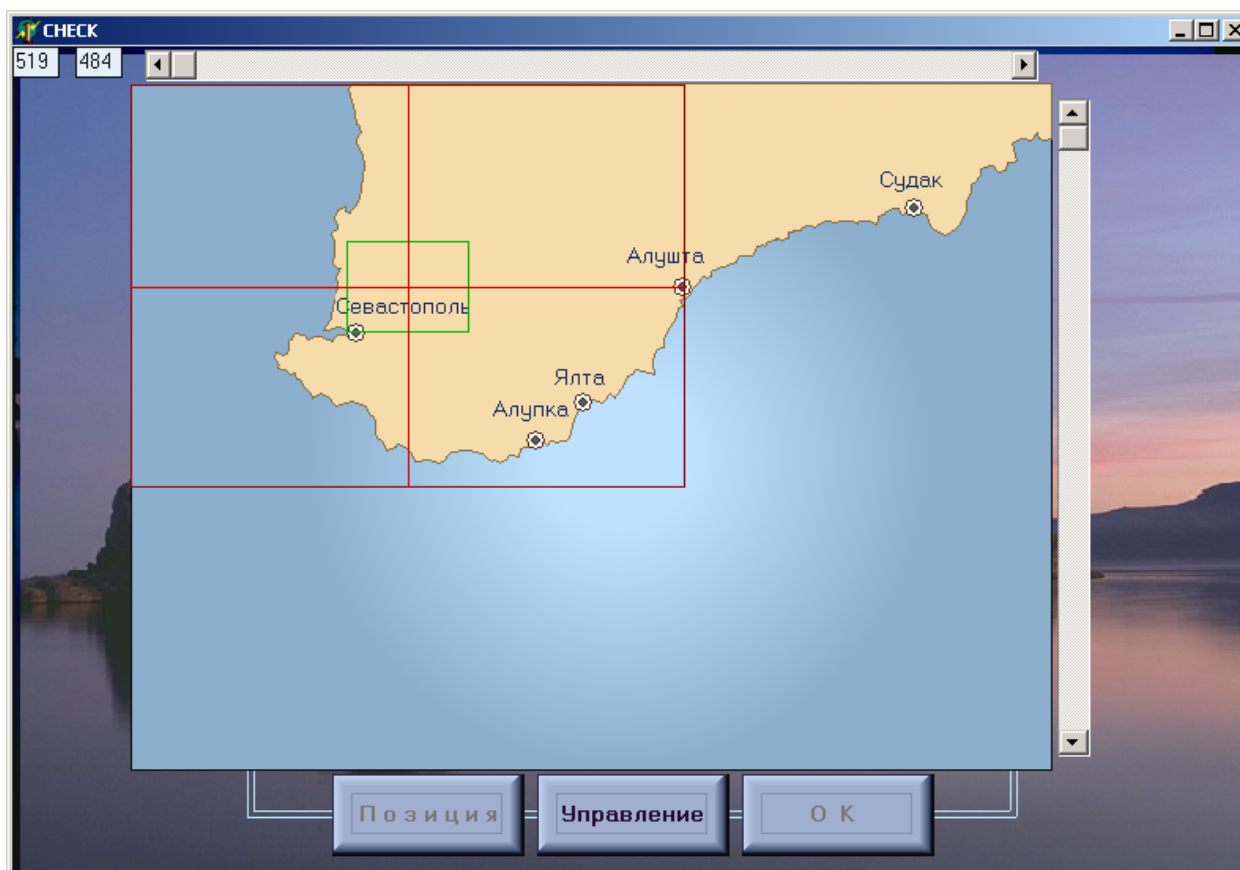


Рис. 5.11. Стилизованная форма электронной карты

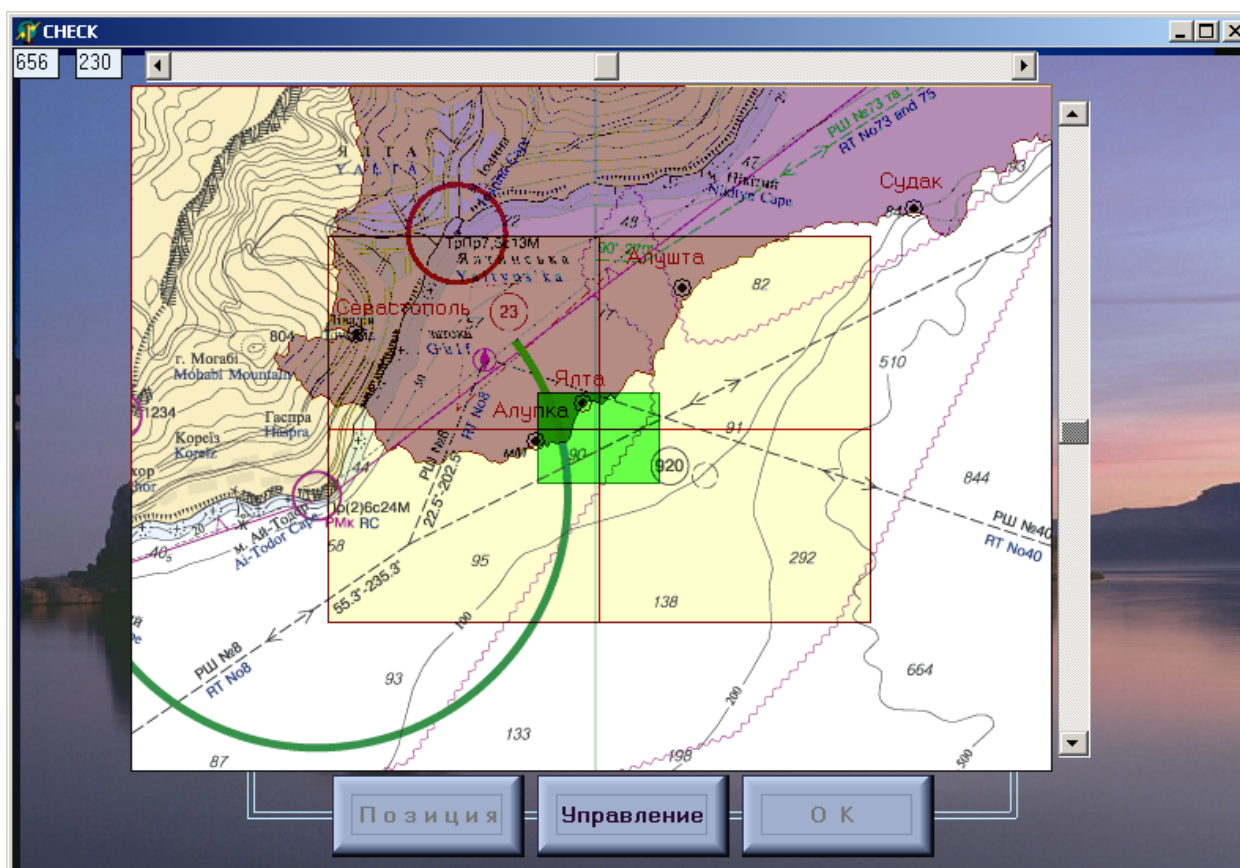


Рис. 5.12. Окно выбора района плавания



карты.

При смещении бегунков линеек прокрутки смещаются границы района просмотра на стилизованной карте и изображение соответствующего района электронной карты. Таким образом, неподвижной остается только стилизованная карта, а участок просмотра стилизованной карты и соответствующий ему район электронной карты перемещаются в окне просмотра в зависимости от направления смещения бегунков линеек прокрутки.

Для дальнейшей работы имитационной программы следует «кликнуть» клавишу «Управление», при этом появляются клавиши «Timer» и «Tr/RV/RT» (рис. 5.13).



Рис. 5.13. Переход в режим управления процессом расхождения

С помощью клавиши «Tr/RV/RT» можно выбрать способ отображения процесса расхождения. По умолчанию выбирается способ «Tr» истинного движения судна и цели на электронной карте. При повторном нажатии

клавиши «Tr/RV/RT» реализуется способ относительного движения «RV», когда неподвижным является судно. Если клавишу «Tr/RV/RT» «кликнуть» еще раз, то будет использоваться способ относительного движения «RT», при котором неподвижной является цель.

При нажатии клавиши «Timer» стартует проигрывание процесса расхождения и, как показано на рис. 5.14, появляются клавиши «Track», «Repeat T», «Repeat V», «Tp1/ Tp2» и «Scl».

При использовании клавиши «Track» в режиме истинного движения отображаются траектории движения судна и цели, клавиша «Tp1/ Tp2» служит для выбора одного из типов отображения судна и цели. По умолчанию реализуется первый тип отображения, который показан на приводимых рисунках. С помощью клавиши «Scl» изменяется масштаб времени проигрывания маневра расхождения.

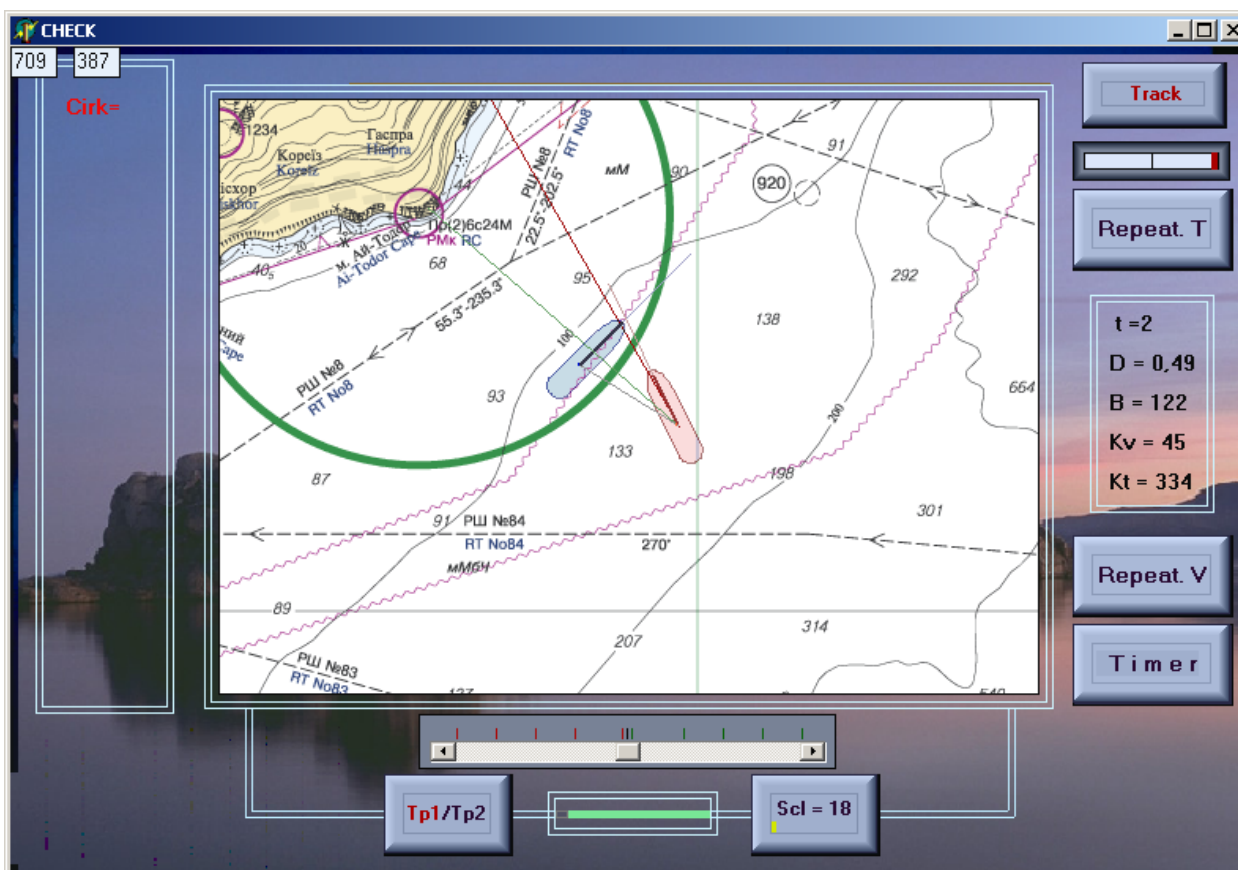


Рис. 5.14. Проигрывание процесса расхождения

Имитационная программа анализирует ситуацию чрезмерного сближения с позиций цели, определяет экстренную стратегию расхождения и управляет движением цели.

Пользователь может управлять движением судна с помощью линейки прокрутки, вызывая перекладку пера руля судна в течение 20 с, начиная с момента включения таймера. Имитационная программа анализирует маневр судна и в случае необходимости корректирует стратегию экстренного расхождения. После этапа выхода цели на курс, равный обратному пеленгу на судно, определяются параметры экстренной стратегии расхождения и из значения выводятся на левой информационной панели (рис. 5.15). На этом же

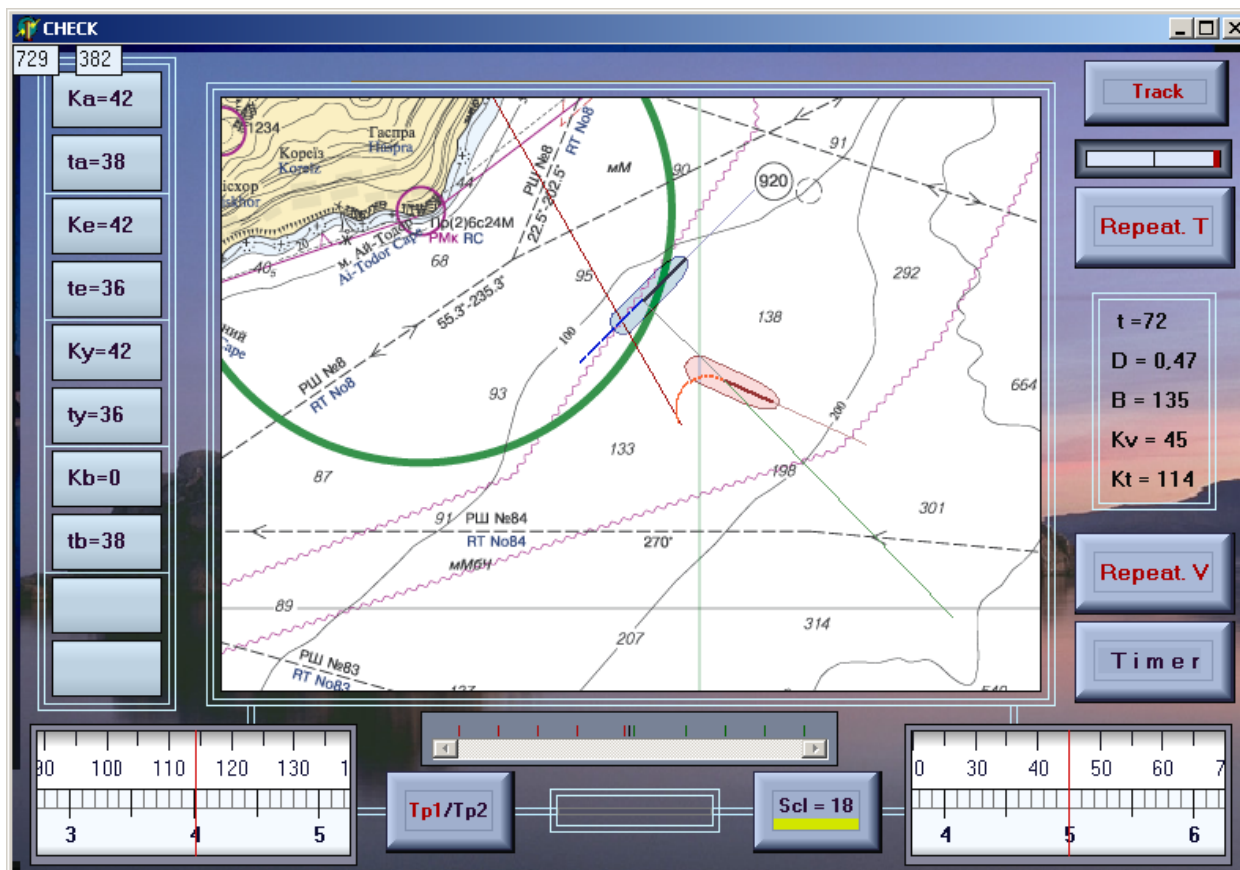


Рис. 5.15. Отображение репетиров судна и цели

рисунке отображаются репитера судна и цели.

Второй тип отображения судна и цели показан на рис. 5.16, а на рис. 5.17 показано отображение маневра расхождения после его окончания с помощью клавиши «History». Причем более темным цветом выделена начальная пози-

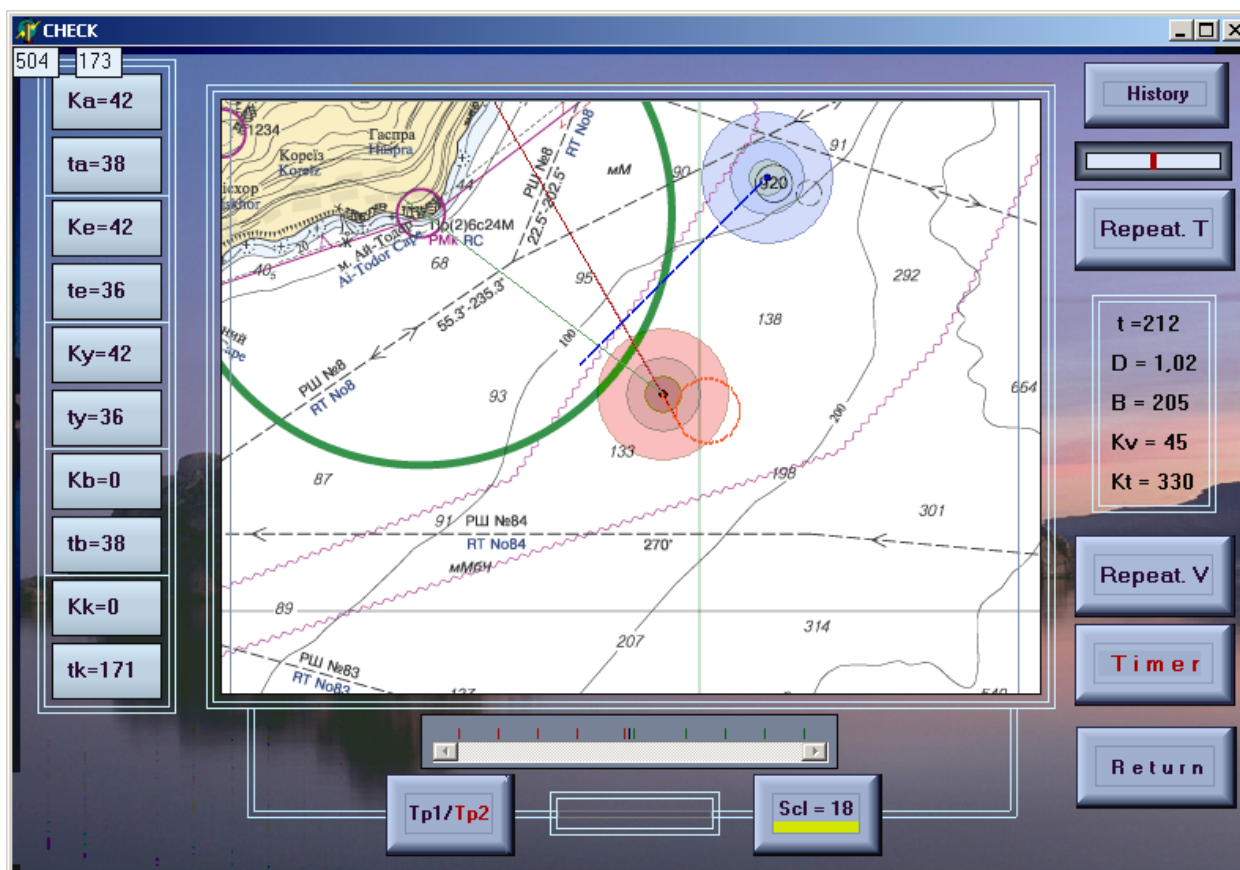


Рис. 5.16. Второй тип отображения судна и цели



Рис. 5.17. Отображение маневра расхождения после его окончания



ция судна и цели. Под клавишей «History» находится указатель положения руля цели.

Имитационное моделирование заключалось в следующем. Для 28 стандартных ситуаций и 22 сформированных имитировался процесс расхождения с помощью экстренной стратегии, выбранной целью при различных типах поведения судна.

Для каждой из 50 ситуаций рассматривалось три варианта поведения судна: следования с неизменными параметрами движения, судно уклоняется вправо и судно уклоняется влево. Причем начало уклонения производилось в любой момент времени на интервале от 0 до 20 с. После 20 с имитационной программой руль судна автоматически приводился в диаметрально противоположную плоскость и курс судна становился неизменным. Этот момент времени воспринимался целью, как конец маневра судна и по параметрам ситуации в момент окончания уклонения судна производилась оценка опасности сближения и в случае необходимости рассчитывались новые параметры экстренной стратегии расхождения, которая незамедлительно реализовывалась целью.

Из 150 вариантов экстренной стратегии расхождения, предпринимаемой целью, все оказались корректными. Здесь приведены результаты имитационного моделирования трех вариантов стандартной ситуации 27.

На рис. 5.18 приведены траектория и последовательные положения судна и цели в течение маневра в случае, когда судно следует неизменными параметрами движения. Из рисунка видно, что вначале цель ложится на циркуляцию от судна, однако после пересечения его линии курса цель производит перекидку руля на противоположный борт в сторону программного курса. Если бы цель продолжала выполнять циркуляцию, то могла бы столкнуться с приближающимся судном.

Следующий вариант (рис. 5.19) рассматривал ту же начальную стандартную ситуацию 27, но в первые секунды после включения таймера судно начало уклоняться вправо. На 20 секунде поворот судна завершился, и при

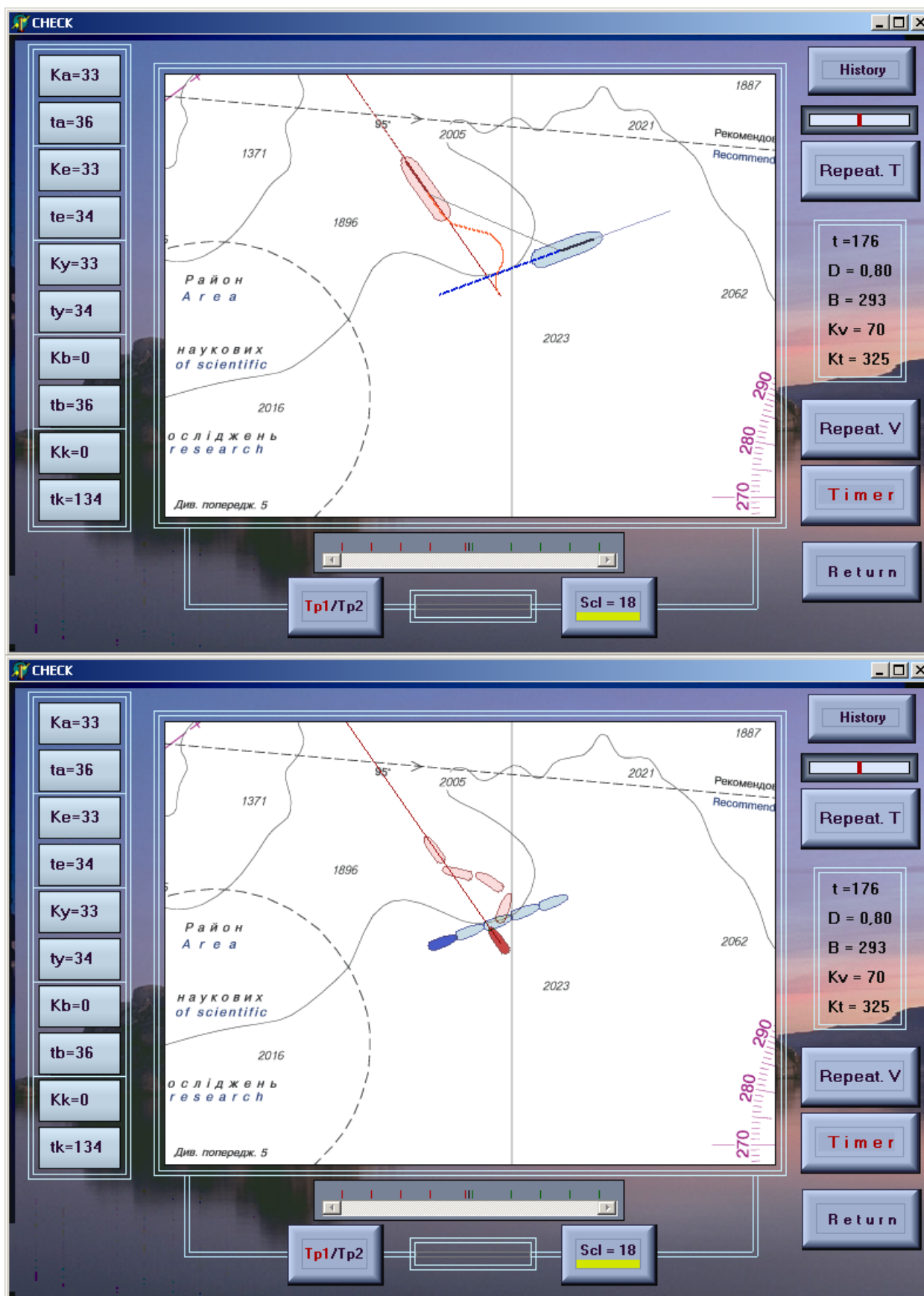


Рис. 5.18. Экстренная стратегия цели при отсутствии маневра судна

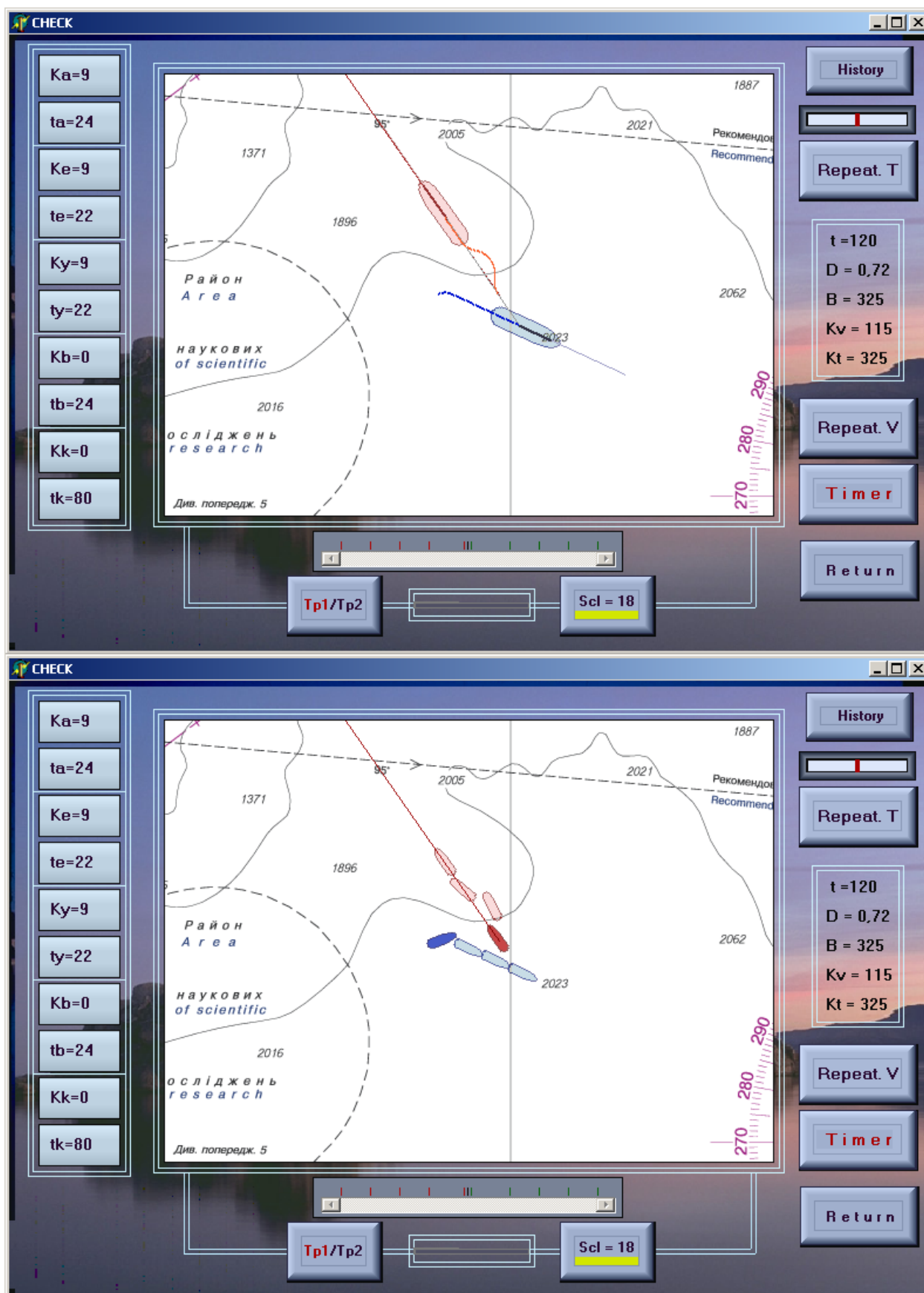


Рис. 5.19. Экстренная стратегия цели при уклонении судна вправо

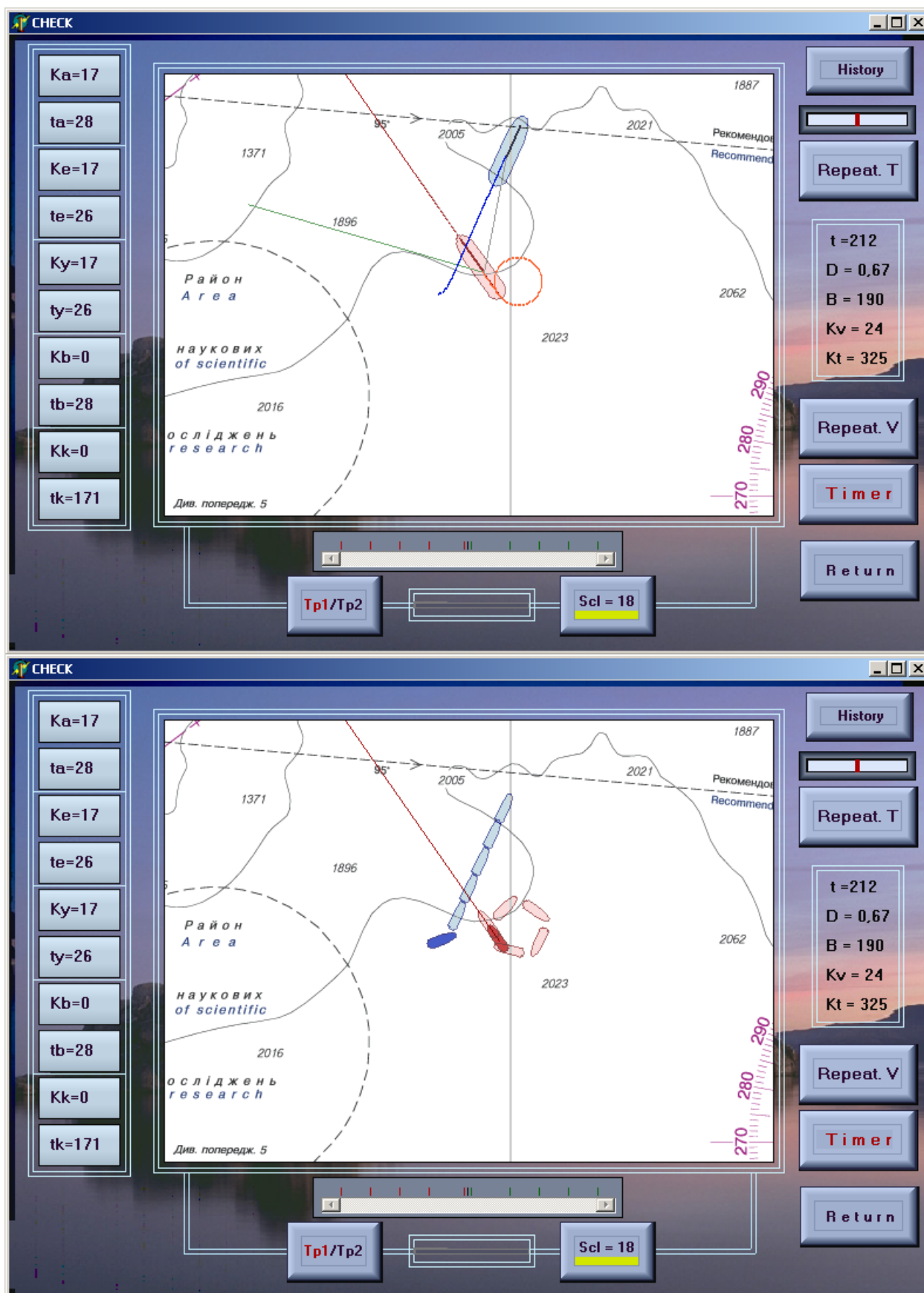


Рис. 5.20. Экстренная стратегия цели при уклонении судна влево

оценке ситуации целью было принято решение беспрепятственного возвращения на программную траекторию движения.

При третьем варианте в той же начальной стандартной ситуации 27, как показано на рис. 5.20, судно в начале разрешенного для маневрирования интервала времени начинает перекладку руля на левый борт и выполняет уклонение влево. После завершения уклонения судна на 20 секунде цель анализирует ситуацию и принимает решение продолжать циркуляцию до выхода на программную траекторию.

В Приложении А приведен фрагмент кода имитационной программы на программном языке «Delphi», касающийся идентификации начальной ситуации кратчайшего сближения и оценки параметров экстренной стратегии расхождения.

#### 5.4. Выводы по пятой главе

В главе получен алгоритм идентификации начальной ситуации чрезмерного сближения, исходя из начальной относительной позиции и параметров движения судна и цели.

При заданных параметрах начальной ситуации определяется ее принадлежность к множеству ситуаций чрезмерного сближения.

При реализации ситуации чрезмерного сближения в зависимости от соотношения скоростей судна и цели определяется структура стратегии экстренного расхождения, в зависимости от которой рассчитываются параметры стратегии экстренного расхождения. Параметрами стратегии расхождения являются моменты начала и курсы ее каждого этапа. В главе получены аналитические выражения для расчета параметров каждого из этапов.

Показано, что при чрезвычайном сближении первым этапом экстренной стратегии расхождения является уклонение судна с программной траектории

движения на курс, равный обратному пеленгу на цель, который минимизирует скорость сближения судна с целью.

Последующие этапы экстренной стратегии предусматривают возвращение судна на программную траекторию.

Для корректного имитационного моделирования произведено определение параметров поворотливости реального судна. С этой целью выполнены натурные наблюдения ряда поворотов судна и зафиксирована экспериментальная зависимость изменения курса судна от времени при заданном положении пера руля. Наблюдались две серии поворотов судна вправо и влево при кладке пера руля на  $15^\circ$ .

С помощью метода наименьших квадратов составлялись нормальные уравнения относительно постоянных времени судна, решение которых из-за нелинейности производились методом Ньютона.

Используя алгоритм выбора экстренной стратегии расхождения при чрезмерном сближении и экспериментальные данные поворотливости судна, произведено имитационное моделирование корректности метода выбора экстренного маневра, причем в имитационной модели использована компьютерная графика для отображения маневра расхождения и вывода текущих значений для контроля корректности процесса расхождения.

Имитационная модель предусматривает два режима ввода исходной ситуации чрезмерного сближения: стандартного, при котором предлагается для выбора ряд вариантов ситуации, и режима формирования начальной ситуации, предусматривающего ввод произвольных значений параметров ситуации.

В главе подробно описана методика проведения имитационного моделирования с учетом различных вариантов вывода и отображения результатов имитационного моделирования. Предусмотрена возможность изменения параметров движения цели в процессе расхождения и реакция на корректуру маневра расхождения судном.

Произведено моделирование 150 ситуаций чрезмерного сближения судна и цели, выбор экстренной стратегии расхождения которых производился и проигрывался компьютером. Оказалось, что для всех 150 заданных ситуаций были выбраны корректные стратегии расхождения с учетом минимальных потерь пройденного расстояния, возникающего из-за отклонения судна от программной траектории движения.

Больше половины моделируемых ситуаций выбора маневра экстренного расхождения содержали изменение параметров движения цели в процессе расхождения, причем производилась корректное изменение параметров стратегии расхождения.

## ВЫВОДЫ

**1. Оценка состояния вопроса.** Судовождение в стесненных водах в значительной мере осложняется интенсивным судоходством и навигационными препятствиями, что создает повышенные риски возникновения аварийных ситуаций. В стесненных водах возникают ситуации чрезмерного сближения судов, когда для предотвращения столкновения каждое из судов должно согласно МППСС-72 предпринять маневр расхождения. В такой ситуации маневры судов не согласованы, что затрудняет безопасное расхождение.

Вопросы экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения исследованы недостаточно, а формализация взаимодействия судов при чрезмерном сближении затруднена неопределенностью их поведения в такой ситуации.

Существующие в настоящее время методы формирования стратегий расхождения судов не учитывают ситуации чрезмерного сближения, что обуславливает актуальность и перспективность данного диссертационного исследования.

**2. Формулировка решенной научной задачи, ее значение для науки и практики.** В результате решения главной научной задачи получен новый метод выбора стратегии экстренного расхождения в ситуации чрезвычайного сближения судов, который отличается учетом неопределенности в поведении цели, мешающих факторов и динамики судна, что обеспечивает расчет параметров безопасного маневра расхождения.

Наряду с решением главной задачи, в работе также получены решения четырех частных задач в виде научных результатов, содержащих научную новизну:



- впервые предложен метод выбора маневра расхождения судна с целью при малых дистанциях сближения и в условиях неопределенности ее поведения, исходя из начальной относительной позиции и параметров движения судна и цели;
- впервые разработан способ идентификации ситуации чрезмерного сближения, требующей применения маневра экстренного расхождения;
- впервые предложена процедура определения структуры маневра экстренного расхождения в зависимости от текущей ситуации процесса расхождения;
- впервые разработан способ расхождения судна с целью, которая имеет преимущество в скорости, на попутных курсах при чрезмерном сближении;
- впервые предложен одновременный учет наличия навигационных опасностей и мешающих судов при расчете параметров маневра экстренного расхождения;
- получил дальнейшее развитие метод расхождения судов с учетом поворотливости судна в ситуации чрезмерного сближения.

Практическая значимость работы определяется тем, что ее основные результаты могут быть использованы судоводителями в ситуациях чрезмерного сближения, разработчиками в новых поколениях САРП, имеющих функции системы поддержки решений при расхождении, а также алгоритмы исследования могут быть применены при создании современных морских тренажеров.

**3. Выводы и рекомендации относительно научного и практического использования полученных результатов.** Основные теоретические и практические результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы при эксплуатации судов, а также в процессе обучения и повышения квалификации судоводителей.

**4. Качественные и количественные показатели полученных результатов.** Качественным показателем результатов диссертационной работы является появившаяся возможность предупреждения столкновений судов в стесненных условиях при их чрезмерном сближении путем использования экстренной стратегии расхождения. Как показало имитационное моделирование, предложенный метод имеет высокую эффективность.

**5. Обоснование достоверности полученных результатов.**

Корректное применение математических моделей и имитационное моделирование, выполненное с помощью разработанных компьютерных программ подтверждают достоверность результатов работы.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном / Першиц Р.Я. - Л.: Судостроение, 1983.- 272 с.
2. Демин С.И. Торможение судна / Демин С.И.– М.: Транспорт, 1975.– 81с.
3. Демин С.И. Аналитический метод определения элементов торможения судов / Демин С.И. // Экспресс-информация ЦБНТИ ММФ, серия «Судовождение и связь».– 1980. – № 3 (128). – С. 21-33.
4. Демин С.И. Приближенное аналитическое определение элементов циркуляции судов / Демин С.И. // Экспресс-информация ЦБНТИ ММФ, серия «Судовождение и связь».– 1983. – № 7 (628). – С. 14-19.
5. Демин С. И. Вопросы управления морскими судами / Демин С. И. – М.: Рекламинформбюро ММФ, 1975. – 75 с.
6. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере/ Воробьев Ю.Л. – С.Петербург: Судостроение, 1992. – 224 с.
7. Воробьев Ю.Л. Экспериментальное определение безопасных расстояний при расхождении судов / Воробьев Ю.Л., Кириллов В.Н. // Теория корабля и гидромеханика: Сб. научн. тр./ НКИ Николаев. – 1973. - № 74. - С. 61-65.
8. Сизов В.Г. Теория корабля / Сизов В.Г. – Одесса: Феникс, 2003. – 282 с.
9. Кондрашихин В.Т. Справочник судоводителя по навигационной безопасности мореплавания / Кондрашихин В.Т., Бердинских Б.В., Мальцев А.С., Козырь Л.А. – Одесса: Маяк, 1990. – 168 с.
10. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна/ Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. - Одесса: Латстар, 2002. - 310 с.
11. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
12. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
13. Мальцев А. С. Управление движением судна / Мальцев А. С. – Одесса: Весть, 1995.- 230 с.

14. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/. Liu Yu-hong //Navig. China. - 2004, № 4, p. 32-37.
15. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ Lisowski J. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. - 2005. – Gdańsk. – P. 71-78.
16. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ Lisowski J. // The Archives of Transport. - 2005. - No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.
17. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation/ Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. – 2005. - Vol. 2. - London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285-1292.
18. Цымбал Н.Н. Основные направления обеспечения безаварийного плавания судов / Цымбал Н.Н. // Материалы международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и прикладные аспекты информационных технологий (ISDMIT' 2006)». – Том 3. – Евпатория. –2006. - С. 49-52.
19. Северин В.В. Постановка задачи расхождения судна с несколькими целями / Северин В.В. // Судовождение. – 2003. – № 6. – С. 130-135.
20. Северин В.В. Выбор маневра расхождения с двумя целями / Северин В.В. // Автоматизация судовых технических средств.- 2005. - № 9. – С. 91 – 95.
21. Цымбал Н.Н. Перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания / Цымбал Н.Н.// V Международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация и управление движением». – Сборник докладов. – Киев. – 2005. – С. 301-304.
22. Kimura Masafumi. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Kimura Masafumi, Suzuki Saburo // J. Jap. Inst. Navig. 2005. 112, p. 43-48.
23. Степаненко В. В. Эффективность оценки параметров ситуации опасного сближения судов / Степаненко В. В. // Судовождение. - 2000. - № 2. - С. 201 – 209.

24. Степаненко В. В. Формализация контроля текущей ситуации и принятия решений по управлению ею / Степаненко В. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 177– 185.
25. Степаненко В.В. К вопросу отображения ситуации расхождения судов / Степаненко В.В. // Судовождение. - № 4. - 2002. – С. 101 – 106.
26. Степаненко В.В. Усовершенствование методов оценки ситуации расхождения судов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение»/ Степаненко В.В. – Одесса, 2004. – 24 с.
27. Сафин И.В. Анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судов / Сафин И.В. // Судовождение. - №6 - 2003. – С. 122-129.
28. Сафин И. В. Условия существования безопасных маневров расхождения / Сафин И. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 158 – 163.
29. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / Сафин И.В. // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
30. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. - №4. - 2002. – С. 95 – 100.
31. Сафин И.В. Оптимизация маневров для безопасного расхождения судов: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение»/ Сафин И.В. – Одесса, 2004.–23 с.
32. Фрейдзон И. Р. Моделирование корабельных систем управления / Фрейдзон И. Р. – Л.: Судостроение, 1975. - 232 с.
33. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / Кудряшов В. Е. // Судостроение. – 1978. - № 5. – С. 35-40.
34. Урбанский И.А. Учет навигационных опасностей при экстренном расхождении / Урбанский И.А. // Судовождение. – 2007. - № 14. – С. 136 – 140.

35. Урбанский И.А. Обеспечение безопасного выхода судов на программные траектории движения / Урбанский И.А., Цымбал Н.Н. // Автоматизация судовых технических средств. – 2008. – № 14. – С. 97-100.
36. Урбанский И.А. Исследование зависимости изменения относительного курса от значений истинных курсов судов / Урбанский И.А. // Судовождение. – 2008. - № 15. – С. 213 - 216.
37. Lisowski J. Comparative analysis of safe ship control methods/ Lisowski J. // Proc. of the 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje. – 2005. – P. 149-154.
38. Lisowski J. Intelligent safe ship control methods in collision avoidance/ Lisowski J. // Proc. of European Control Conference. - 2007. – P. 1-6.
39. Цымбал Н.Н. Оценка риска аварии при расхождении судов в стесненных водах / Цымбал Н.Н., Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 93 – 96.
40. Заичко С.И. Возможности синтеза системы формирования стратегий расхождения группы судов / Заичко С.И., Пятаков Э.Н. // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 63 – 66.
41. Заичко С.И. Управление взаимодействием судов в ситуации опасного сближения / Заичко С.И., Пятаков Э.Н. // Судовождение.– 2006. - № 11. – С. 56– 60.
42. Тюпиков Е.Е. Анализ возможности расхождения судна с целью изменением скорости / Тюпиков Е.Е. // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 122 – 126.
43. Сафин И.В. Использование маневра изменения скорости для предотвращения столкновения судов / Сафин И.В., Тюпиков Е.Е. // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 143-147.
44. Тюпиков Е.Е. Особенности расхождения с целью изменением скорости судна / Тюпиков Е.Е. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 122 – 126.
45. Цымбал Н.Н. Применение методов теории динамических и управляемых систем для формализации процесса расхождения судов /

Цымбал Н.Н., Урбанский И.А. // Судовождение. – 2007. - № 13. – С. 178 – 187.

46. Цымбал Н.Н. Метод формирования множества безопасных маневров расхождения судов / Цымбал Н.Н. // Тезисы докладов на III международной научно-технической конференции «Живучесть корабля и безопасность на море». – Севастополь. – 2005. - С. 91-94.

47. Цымбал Н.Н. Метод расхождения судов при чрезмерном сближении / Цымбал Н.Н. // Автоматизация судовых технических средств.- 2006. - № 11 – С. 88 – 93.

48. Tsymbal M. Method of synthesis of flexible strategies for preventing collisions / Tsymbal M. // Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2007. - P. 429 - 433.

49. Цымбал Н.Н. Перспективные системы предупреждения столкновений судов и принципы их разработки / Цымбал Н.Н. // Материалы I международной научно-практической конференции «Науковий потенціал світу 2004». – том 60. – Днепропетровск. – Наука і освіта, 2004. - С. 44-45.

50. Tsymbal M. Development of simulator systems for preventing collision of ships / Tsymbal M., Urbansky I. // The International Marine Simulator Forum - IMSF 8<sup>th</sup> to 12<sup>th</sup> September 2008. – 35<sup>th</sup> Annual General Meeting (AGM) and International Workshop Conference at Department of Maritime Studies of Hochschule Wismar and Maritime Simulation Centre Wamemünde (MSCW), Rostock- Wamemünde / Germany. – 10 P.

51. Урбанский И.А. Оптимизация параметров возвращения судна на заданную траекторию после расхождения с целью / Урбанский И.А., Цымбал Н.Н. // Автоматизация судовых технических средств.- 2007. -№ 12 – С. 120 – 124.

52. Тюпиков Е.Е. Зависимость момента начала маневра расхождения изменением скорости от инерционных характеристик судна / Тюпиков Е.Е., Цымбал Н.Н. // Судовождение. – 2007. - № 14. – С. 130 –135.

53. L. Yongqing. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu gongcheng ban/ L. Yongqing // J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng. 2004. 28, №5, p. 752-754.
54. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.
55. Kao Sheng-Long. A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service / Kao Sheng-Long, Lee Kuo-Tien, Chang Ki-Yin, Ko Min-Der// J. Navig. 2007. 60, № 1, p. 17-31.
56. Inaishi Masaaki. Nihon kokai gakkai ronbunslm / Inaishi Masaaki, Kondo Hayato, Kondo Masaki, Kawaguchi Akira //. Jap. Inst. Navig. 2005. 113, с 17-23.
57. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103-107.
58. Петриченко Е.А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Петриченко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2003. – №8. – С. 72-76.
59. Петриченко Е.А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Петриченко Е.А. // Судовождение. - 2002. - №5. – С. 89-95.
60. Букатый В. М. Критерии нетрадиционного подхода к выяснению ситуации сближения судов /Букатый В. М., Морозова С. Ю. // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ 2007, с. 33-43.
61. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
62. Цымбал Н.Н.. Значение прогноза развития ситуации в задаче безопасного расхождения судов / Н.Н. Цымбал. // Судовождение. - 2001. –№ 3.- С. 193 – 197.



63. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.
64. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. - № 5. - 2002. – С. 13 – 21.
65. Бурмака И.А. Применение численных методов для расчета времени начала уклонения судна при расхождении / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2003. - № 6. – С. 27-31.
66. Бурмака И.А. Расчет длительности поворота судна при расхождении / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. - 2002. - №7. - С. 3- 6.
67. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2005. - № 9. - С. 7-13.
68. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
69. Бурмака И.А. Безопасное расхождение судов с учетом их инерционности: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.16 «Судовождение» / Бурмака И.А.– Одесса, 2004. – 22 с.
70. Цаллагов Х.-Б. Н. Безопасное расхождение судов при централизованном автоматизированном управлении / Цаллагов Х.-Б. Н. // Задачи автоматизации управления движением судов в районах интенсивного судоходства. - М.: Ин-т Проблем Управления, 1983. - С. 29-39.
71. Цымбал Н.Н. Метод формирования множества безопасных маневров расхождения судов / Цымбал Н.Н. // Тезисы докладов на III международной научно-технической конференции «Живучесть корабля и безопасность на море». – Севастополь. – 2005. - С. 91-94.
72. Цымбал Н.Н. Перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания / Цымбал

Н.Н.// V Международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация и управление движением». – Сборник докладов. – Киев. – 2005. – С. 301-304

73. Цымбал Н.Н. Основные направления обеспечения безаварийного плавания судов / Цымбал Н.Н. // Материалы международной научной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и прикладные аспекты информационных технологий (ISDMIT' 2006)». – том 3. – Евпатория. –2006. - С. 49-52.

74. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С.134 – 138.

75. Hung Iran Viet. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Hung Iran Viet, Hagiwara Hideki, Tamaru Hitoi. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, с 35—42.

76. Takahashi Hiroko. Nihon коках gakkai ronbunshu/ Takahashi Hiroko, Inoue Kinzo, Sera Wataru. //J. Jap. Inst. Navig. 2008. 118, p. 23-29.

77. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/ Liu Yu-hong, Hu Shen-ping // Navig. China. 2005, №4, p. 40-45.

78. Букатый В. М. Минимальная дистанция начала маневра на расхождение при применении правила 14 МППСС/ Букатый В. М. // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ. 2007, с. 27-32.

79. Ершов А. А. Способы снижения опасности столкновений судов / Ершов А. А. // Эксплуатация морского транспорта: Сборник. Гос. мор. акад. СПб: Наука. 2005, с 64-75. (Тр. ГМА им. адм. С О. Макарова. Вып. 44).

80. Георгизон Е. Б. Сравнительный анализ алгоритмов расхождения судов / Георгизон Е. Б., Цаллагов Х.-Б. Н. // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. - М.: Наука, 1978. - С. 93-101.

81. Tsuji Keisuke. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Tsuji Keisuke, Ito Takayuki. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, p. 67-73.
82. Ma Li-xin. Dalian haishi daxue xuebao/ Ma Li-xin, Sun Wen-qiang //I. Dalian Marit. Univ. 2006. 32, № 3, p. 123-125.
83. Бинай Кумар Синх. Выбор предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 38 – 42.
84. Бинай Кумар Синх. Системная модель процесса судовождения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2000. - №1. - С. 105 – 118.
85. Бинай Кумар Синх. Области взаимных обязанностей судов / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2000. - № 2. - С. 121 – 125.
86. Цымбал Н.Н. Перспективные системы предупреждения столкновений судов и принципы их разработки /Цымбал Н.Н.// Материалы I международной научно-практической конференции «Науковий потенціал світу 2004». – том 60. – Днепропетровск. – Наука і освіта, 2004. - С. 44-45.
87. Букатый В. М. Определение ситуации сближения судов, подпадающей под правило 14 МППСС-72 / Букатый В. М., Морозова С. Ю. // Управление безопасностью мореплавания и подготовка морских специалистов SSN/2007: Материалы 6 Международной конференции, Калининград, 9-11 окт., 2007. Калининград: БГАРФ. 2007, с. 43-52.
88. Yang Shen-hua. Zhongguo hanghai / Yang Shen-hua, Li Li-па, Suo Yong-feng // Navig. China. 2007, № 3, p. 29-32.
89. Wang Dangli. Wuhan ligong daxue xuebao. Jiaotong kexue yu qongcheng ban/ Wang Dangli, Huang Liwen //J. Wuhan Univ. Technol. Transp. Sci. and Eng. 2006 30, № 1, p. 136-139.
90. Lisowski J. Mathematical modeling of a safe ship optimal control process/ Lisowski J. // Polish Journal of Environmental Studies. – 2005. - Vol. 14. – P. 68-75.
91. Мальцев А.С. Выбор оптимального курса для расхождения судов при

- криволинейном движении / Мальцев А.С., Май Ба Линь // Судовождение. – №7. – 2004. – С. 47-57.
92. Сазонов А. Е. Автоматизация судовождения / Сазонов А. Е., Родионов А. А. - М.: Транспорт, 1977. 208 с.
93. Lisowski J. Safety of navigation based – mathematical models of game ship control/ Lisowski J. // Journal of Shanghai Maritime University. - 2004. - No 104, Vol. 25. – P. 65 - 74.
94. Павлов В.В. Проблемы построения многоцелевой эргатической системы предупреждения столкновений морских судов / Павлов В.В., Баранов В. Л., Положенцев И. А. // Автоматика. – 1980. - № 2. - С. 73-76.
95. Павлов В. В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления / Павлов В. В. - Киев: Наукова думка, 1971. - 272 с.
96. Павлов В. В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов / Павлов В. В., Сеньшин Н. И. // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. - № 68. - С. 43-45.
97. Zhao Yuan-jin. Dalian haishi daxue xuebao /Zhao Yuan-jin, Sun Wen-qiang // J. Dalian Marit. Univ. 2006. 32, № 2, p. 27— 30.
98. Lisowski J. The dynamic game models of safe navigation/ Lisowski J. // Advances in Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. - 2007. - P. 23 – 30.
99. Цаллагов Х.- Б.Н. Аналитические методы определения безопасных курсов и скоростей судов / Цаллагов Х.- Б.Н. // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. - М.: Наука, 1978. - С. 83-93.
100. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения безопасности плавания / Мальцев А. С. // Судостроение и ремонт. - 1989. - №5. – С. 29-31.
101. Мальцев А. С. Инверсный метод планирования траектории движения объектов управления /Мальцев А. С. //Судовождение: Сб. научн. трудов /ОНМА, вып. 13 – Одесса: «ИздатИнформ», 2007.- с. 124-130.

102. Смагин В. И. Локально-оптимальное управление при расхождении встречных судов / Смагин В. И. // Вестн. Томск, гос. ун-та. 2006, № 293, с. 71-74.
103. Кондрашихин В.Т. Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения / Кондрашихин В.Т. – М.: Транспорт, 1969. – 256 с.
104. Кондрашихин В.Т. Зависимость между точностью и надежностью навигации / Кондрашихин В.Т. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1973. – Вып. 173. – С. 41-49.
105. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1981. - 206 с.
106. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. - 230с.
107. Кондрашихин В.Т. Определение наиболее вероятного значения повторяющейся ошибки / Кондрашихин В.Т., Якшевич Е.В. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1972. – Вып. 157. – С. 42-49.
108. Кондрашихин В.Т. О погрешностях измерений/ Кондрашихин В.Т. // Геодезия и картография.– 1977. – № 5. – С. 11-16.
109. Bober R. The DGPS system improve safety of navigation within the port of Szczecin / Bober R., Grodzicki P., Kozlowski Z., Wolski A. // 12 Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, 23-25 May, 2005. St. Petersburg: Elektropribor. 2005, с. 192-194.
110. Иванов Б. Е. О влиянии неопределенности положения кромок фарватера на вероятность навигационной безопасности плавания / Иванов Б. Е., Батуев А. Н. // Навигация и гидрогр. 2004, № 19, с. 35-40.
111. Комаровский Ю. А. Проблемы оценки точности определения места судна приёмниками СРНС Навстар GPS / Комаровский Ю. А. // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. 2006, № 2, с. 100-107.
112. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения / Мельник Е.Ф. // Судовождение. - 2002. – № 5. – С. 65 – 73.

113. Ткаченко А.С. Применение обобщенных пуассоновских распределений для описания навигационных погрешностей / Ткаченко А.С., Алексишин В.Г. // Судовождение. – 2008. - № 15. – С. 93 – 99.
114. Monteiro Luis. What is the accuracy of DGPS? / Sardinia Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris. // J. Navig. 2005. 58, № 2, p. 207-225.
115. Лукомский Ю. А. Общие закономерности и специфические особенности в математических моделях морских подвижных объектов/ Лукомский Ю. А., Стариченков А. Л. // Гироскопия и навигация. - 1997. - № 2. - С. 44-52.
116. Гуцма С.Ф. Моделирование движения судов в узкостях и при швартовках/ Гуцма С.Ф. // Сб. науч. тр. Балт. гос. акад. рыбопромысл. флота.- 1997.- № 16. - С. 85-91.
117. Дмитриев С.П. Обоснование возможности использования линейно-квадратичного подхода при стабилизации судна на траектории/Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. // Гироскопия и навигация. - 1997. - № 4. - С. 65-82.
118. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 139 – 142.
119. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна/ Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 110 – 113.
120. Inaishi Masaaki. Nihon kokai gakkai ronbunshu/ Inaishi Masaaki, Kawaguchi Akira //J. Jap. Inst. Navig. - 2003. – 109. – P. 89-96.
121. Саленек В. В. К определению связи между углом дрейфа и безразмерной угловой скоростью на установившейся циркуляции/ Саленек В. В.// Новосиб. гос. акад. вод. трансп. Судовожд.: управляемость, упр., навигация. обуч. - Новосибирск. - 1999, с. 17-18.
122. Алексишин В.Г. Формирование судовой безопасной зоны с учетом поворотливости судна / Алексишин В.Г., Алексишин А.В. // Судовождение. – 2007. - № 14. – С. 3- 8.

123. Алексихин А.В. Плавание в стесненных водах с учетом судовой безопасной зоны / Алексихин А.В. // Судовождение. – 2007. - № 13.– С. 3 – 8.
124. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Вагущенко Л.Л. - Одесса: Феникс, 2004. - 302 с.
125. Вагущенко Л.Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности/ Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И - Одесса: Феникс, 2005. -274 с.
126. Вагущенко Л.Л. Автоматизация судовождения/ Вагущенко Л.Л. - Одесса: ОГМА, 1994. - 354 с.
127. Вагущенко Л. Л. Судовые автоматизированные системы навигации/ Вагущенко Л. Л., Стафеев А. М. - М.: Транспорт, 1989, 156 с.
128. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна/ Вагущенко Л.Л.- Одесса: Система-сервис, 1998, 64 с.
129. Оськин Д. А. Система управления морским судном с использованием нейросетевой идентификационной модели / Оськин Д. А. // Вестн. Мор. гос. ун-та. 2008, № 27, с. 3-12.
130. Степахно Р. Г. Разработка способов идентификации математической модели судна с целью решения прикладных задач судовождения: автореф. дис. на со-иск. уч. степ. канд. техн. наук/ Степахно Р. Г. - Мурманск, 2005, 22 с.
131. Богданов В. П. Синергетика и нейросетевые системы управления курсом судна / Богданов В. П., Виткалов Я. Л., Глушков С. В., Потапов А. С. и др. - Питер. - 2006, 205 с.
132. Laeki Toshio. Ninon kokai dakkar ronbunshu// Jap. Inst. Navig. 2005. 112, p. 301-306.
132. Ростопшин Д. Я. О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов / Ростопшин Д. Я., Антонова Д. А. // Мехатрон.- 2007, № 9, прил., с. 9-14.
133. Козлов А. В. Интегрированные системы управления движением судна/ Козлов А. В., Туркин И. И.// Мор. биржа. 2006, № 3, с. 46-49.

134. Попов А. В. О повышении управляемости судна при ветре посредством ввода интеллектуальной составляющей в алгоритм авторулевого/ Попов А. В. // Вести. ВГАВТ. 2005, № 14, с. 27-35.
135. Глушков С. В. Использование нечеткой логики в системе автоматического управления курсом судна / Глушков С. В. // Приборы и системы: Упр., контроль, диагност. 2007, № 8, с. 28-32.
136. Юдин Ю. И Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Юдин Ю. И., Позняков С. И.// Вестн. МГТУ (Мурманск). 2006. 9, № 2, с. 234-240.
137. Paulauskas V. External forces influence on ships steering in extreme conditions /Paulauskas V., Paulauskas D., Steenberg C. M. Transport Means 2006: Proceedings of the 10 International Conference, Kaunas, Oct. 19-20, 2006. Kaunas: Technologija. 2006, p. 158-160.
138. Лентарёв А. А. Статистическое моделирование движения судов по фарватеру /Лентарёв А. А., У Льюков А. Ю. //Вестн. Мор. гос. ун-та. 2005, № 9, с. 78-83.
139. Шпекторов А. Г. Организация двухуровневой системы управления движением скоростного судна./ Шпекторов А. Г., Тхань ,Тунг Ле.: Навигация и управление движением: Материалы 8 Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, Ц-16 марта, 2006; 2 этап, Санкт-Петербург (в Интернете), 1 июня-31 окт., 2006; 3 этап, Санкт-Петербург, 25-29 сент., 2006 СПб: ЦНИИ "Электроприбор". 2007, с. 125-130.
140. Грауэр Л. В. Синтез закона управления морским подвижным объектом для решения задачи динамического позиционирования / Грауэр Л. В., Лопарев А. В. Навигация и управление движением: Материалы 8-й Конференции молодых ученых: 1 этап, Санкт-Петербург, 11-16 марта, 2006; 2 этап, Санкт-Петербург (в Интернете), 1 июня-31 окт., 2006; 3 этап, Санкт-Петербург, 25-29 сент., 2006. СПб: ЦНИИ "Электроприбор". 2007, с. 137-143.



141. Ince A.N. Modelling and simulation for safe and efficient navigation in narrow waterways / Ince A.N., Topuz E.J. // Navig.- 2004.- 57, № 1. – P. 53-71.
142. Foxwell David. VTS takes on new roles in ports of world / Foxwell David. // Ports-strategy. – 2004. - Apr. – P. 40-42.
143. Vessel Traffic System erhdht Schiffssicherheit // Schiff und Hafen: Seewirt., Komman-dobrucke.- 1995.-47, №11. - P. 99-100.
144. Шахнов С. Ф. Высокоточная проводка судов с использованием подводного кабеля / Шахнов С. Ф. // Управление и информационные технологии на транспорте: Тезисы докладов международной научно-технической конференции "Транском - 99", Санкт-Петербург. 1999. - СПб: Изд-во СПбГУВК. – 1999.- С. 111-113.
145. VTS-Lieferung nach China. //Schiff und Hafen: Seewirt., Kommandobrucke. - 2000. – 52.- № 9. – P. 6.
146. Бурмака И.А. Расчёт параметров динамической модели поворотливости судна по натурным наблюдениям / Бурмака И.А., Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 19. – Одесса: «ИздатИнформ», 2010 — С. 24-27.
147. Бурмака А.И. Разработка стратегии расхождения судов в ситуации опасного сближения / Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2011 – С. 32-35.
148. Бурмака А.И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения/ Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 — С. 38-41.
149. Бурмака А.И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения/ Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 21. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 — С. 38-41.

150. Бурмака А.И. Ситуационно-технические проблемы при выборе маневра расхождения в условиях чрезмерного сближения судов // Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал./ ОНМУ, № 1 – Одеса: «Фірма «Інтерпрінт»», 2013 - С. 124 – 128.
151. Бурмака А.И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / Бурмака А. И. // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Санкт-Петербург.– 2014. – выпуск 1 (23). – С. 20 – 22.
152. Айзекс Р. Дифференциальные игры / Айзекс Р. - М.: Мир, 1967. - 480 с.
153. Погосов С.Г., Москвин Г.И. Береговые системы управления движением судов. – М.: Судовождение и связь, 1976. – 54 с.
154. Taha M.Y., Hafez M.A. Vessel Traffic Services in Egypt. – Egypt, 2002.- 78 p.
155. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения безопасности плавания// Судостроение и ремонт. – 1989. - №9. – с. 29 – 31.
156. Lamb W. G. P. Calculation of the geometry of ship collision zones // The Journal of Navigation. – 1989. – 42, № 2. – P. 298 - 305.
157. Das risiko in begegnungssituationen // Hansa. – 1988. – 125, № 19. - P. 1219 - 1222.
158. Goodwin E. M. A Statistical Study of Ship Domains // The Journal of Navigation. – 1975. - 28, № 3. - P. 328 – 341.
159. Май Ба Линь. Повышение точности процесса безопасного расхождения судов с стесненных условиях. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16/ ОНМА. – Одесса, 2004. – 21 с.
160. Бурмака И.А. Оценка момента времени попадания судна в ситуацию чрезмерного сближения / Бурмака И.А., Сафин И.В., Бурмака А.И // Проблемы техніки: Науково-виробничий журнал. ОНМУ, № 4 – Одеса: «Фірма «Інтер-прінт»», 2014 – С 108 - 118.
161. Бурмака А.И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения на попутных курсах / Бурмака А. И. //Эксплуатация, безопасность

и экономика водного транспорта. Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. Новороссийск.– 2014. – выпуск 2 (7). – С. 14 - 17.

162. Бурмака А.И. Идентификация ситуации чрезмерного сближения. / Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 23. – Одесса, 2013 – С. 13-20.

163. Бурмака А.И. Оптимальное уклонение при чрезмерном сближении / А.И. Бурмака // Мат. VI Всеукраїнської науково-технічної конф. "Ефективна та без-печна експлуатація морських суден та споруд". - Севастополь.- 2013 .- С.130-132.

164. Бурмака А.И. Определение ситуации чрезмерного сближения судов / А.И. Бурмака // Мат. наук. - метод. конф. "Забезпечення безаварійного плавання суден". – Одеса, ОНМА, 2011. – С. 56 - 57.

165. Бурмака А.И. Расчет параметров маневра расхождения в ситуации экстремального сближения с учетом угловой скорости судна / А.И. Бурмака // Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., – Одеса, ОНМА, 2012. – С. 102 - 103.

166. Бурмака А.И. Стратегия экстренного расхождения при плавании судов на попутных курсах / А.И. Бурмака// Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., – Одеса, ОНМА, 2013. – С. 82–85.

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

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. ФРАГМЕНТЫ ПРОГРАММНОГО КОДА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### А1. Программный код процедуры идентификации начальной ситуации чрезмерного сближения

```
unit Unit_Check;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,  
jpeg, ExtCtrls, StdCtrls;
```

```
type
```

```
TCheckForm = class(TForm)
```

```
CheckImage: TImage;
```

```
ScrollBar1: TScrollBar;
```

```
Timer1: TTimer;
```

```
ScrollBar2: TScrollBar;
```

```
ScrollBar3: TScrollBar;
```

```
procedure FormCreate(Sender: TObject);
```

```
procedure CheckImageMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,  
Y: Integer);
```

```
procedure CheckImageMouseDown(Sender: TObject; Button: TMouseButton;  
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
```

```
procedure FormDestroy(Sender: TObject);
```

```
procedure CheckImageMouseUp(Sender: TObject; Button: TMouseButton;  
Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
```

```
procedure ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;  
var ScrollPos: Integer);
```

```
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
```

```
procedure ScrollBar3Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;  
var ScrollPos: Integer);
```

```
procedure ScrollBar2Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;  
var ScrollPos: Integer);
```

```
private
```

```
{ Private declarations }
```

```
public
```

```
{ Public declarations }
```

```
end;
```

```
type
```

```
PortN = array[1..40] of string[15];
```

```
PortP = array[1..40] of TPoint;
```

```
APt = array[0..30] of TPoint;
```

```
Pt = array[0..120] of TPoint;
```

```

type
CargoParty = record
  Por, Fig, Typ, Color, Metka : byte;
  Size1, Size2, Size3 : word;
  Wight : LongInt;
  Name, Lab1, Lab2, Lab3 : string[20];
end;

```

```

TheCargo = array [1..200] of CargoParty;

```

```

type
PartyCargo = record
  Por{, Cargo} : word;
  Cargo : CargoParty;
  Wight, Nmb : LongInt;
  FromPort, ToPort : string[20];
end;

```

```

TheParty = array [1..300] of PartyCargo;

```

```

type
PartyPort = record
  Por{, Cargo} : word;
  Cargo : CargoParty;
  Wight, Nmb : LongInt;
  FromToPort : string[20];
end;

```

```

ThePortParty = array [1..60] of PartyPort;

```

```

var
  CheckForm: TCheckForm;
  CheckBmp, CopyCrgBkBmp, ChartBmp, PeasBmp, CopyChartBmp, PortCrgBmp, BtnBmp :
  TBitMap;
  Back2Bmp, ShowBmp, TwoVslBmp, BigBmp, ShipBmp, ScrBmp, SkrollBmp : TBitMap;
  ChoiseBmp, ChoiseABmp, InfBmp, ReturnBmp : TBitMap;
  {!!!!!!!!!!!!}

```

```

IndPort, IndCarg, IndPart, OkPort, OkCarg, OkPart, IndCom, Nbtn : byte;

```

```

NmbCargo, IndPressCrg, OkPressCrg, Nkx, Nky, NpressCrg, ClassCargoTyp : byte;
Ypr : Integer;
Ind10Btn, Ok10Btn, Nmb10Btn, N1party : byte;
IndUp3, OkUp3, IndDown3, OkDown3, IndCom3, Maxparty : byte;

```

```

Cargo : TheCargo;
Party : TheParty;
PartyLd, PartyUnLd : ThePortParty;

```

```

PortName : PortN;
PortPos, NamePos : PortP;
NmbPt : array[1..4] of byte;

```

IndPessPort,OkPessPort,IndLd,IndUnLd,Nld,Nunld : byte;  
 Nprtld,Nprtunld,IndWrt1,IndWrt2,IndPrsCargPort,OkPrsCargPort1,  
 OkPrsCargPort2,CrgTp,CrgClr : byte;  
 CrgWht : LongInt;  
 CrgSz1,CrgSz2,CrgSz3 : word;  
  
 Yld,Yunld : Integer;  
 NcBt,NprsCargPort,Ncx,Ncy,IndCancl,OkCancl,IndComCrg,IndCrgLd,Npt1 : byte;  
 PrtNmbLd,PrtNmbUnLd : array[1..60] of byte;

File2 : TextFile;  
 QuantCargo,QuantParty,TaskNmbr,IndTaskUser,Level : byte;  
 ComonWight : LongInt;  
 Str1 : string[8];  
 {!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!}

D,V1,K1,K1o,V2,K2,Ddop,t,aw,K11,K21,Ds,Dm : real;  
 Pel,Xv,Yv,Xc,Yc,{Xc2,Yc2,}Xn,Xn1,K1t,K2t,dt,bet,sigo,Xvo1,Yvo1,Xco1,Yco1 : Integer;  
 Xv1,Yv1,Xc1,Yc1,Br,Bro : real;  
 Dms,V1m,K1m,V2m,K2m,Ddopm : array[1..28] of real;  
 Pelm : array[1..28] of Integer;  
 Count,Bv,L1,L2,Lv,IndTimer,OKTimer,TimerOk,IndRepT,OKRepT,IndRepV,OKRepV : byte;  
 Count1,RepitC,RepitV,Rig,IndContr,OkContr,ShowTyp,RepitShow,IndScale,OKScale : byte;  
 IndTV,OKTV,IndWork,Nwork,IndWiew,OKWiew,WiewReg,IndScroll,WiewN,Nscl : byte;  
 WChMark,TVMark,MarkPos,IndStand,IndBoot1,OkBoot1,IndBoot2,OkBoot2 : byte;  
 IndBoot3,OkBoot3,IndBoot4,OkBoot4,IndBoot5,OkBoot5,IndBoot6,OkBoot6 : byte;  
 IndBoot7,OkBoot7,Nmbtn,Pos2,Pos3,IndScroll3,BtnPic,IndStart,OkStart : byte;

Kot,Vot,Dmb,Vd,Dk2,Dm0,K2o,Xg,Yg,Xgs,Ygs : real;  
 K2b,Kotb,Votb,Kot2,Koty1,Koty2,Voty1,Voty2,Koty,Voty: real;  
 ton,maxDm,Kotmx,Kotmn,maxDm1,maxDm2 : real;  
 Xvm1,Yvm1,Xcm1,Ycm1,Ms,Ky21,Ky22,Kyot21,Kyot22,Ky,Kye,Kb,ty,tb,tk,tn,tex :real;  
 tok,Dok,Pelok,Kyex,Kotex,Votex,tauk,dtk,Kalf,Dp,Dk,Brb,Dsb,Bron :real;  
 texn,tyn,tbn,tkn,tek,tyk,tbk,tkk,tauk,dtex,tauy,dtu,taub,dtb,Scl : real;  
 {Kk,Xc2o,Yc2o : real;}  
 Kk,Xc2,Yc2,Xc2o,Yc2o : real;  
 Xvm,Yvm,Xcm,Ycm,Delt1,Delt2,Delt3 : Integer;  
 IndSP,sig,Xco,Yco,Xcb,Ycb,Xcon,Ycon : Integer;  
 IndPos,IndMst,IndK2,IndT,IndVs,Mn,IndOpen : byte;  
 IndTab,IndC,IndKk,IndDang,IndStr,IndCir,Cirbeg,Indb,HistOk : byte;  
 MarkOK,ChoiseWork,CountTr,MarkTr,IndTrack,OkTrack,IndRet,OkRet,IndMan : byte;  
 Xsto,Ysto,psi,psiex,sigv : Integer;

XB,YB,DXm,DYm,Xch1,Ych1,Xch2,Ych2,Xe,Ye,Xm1,Ym1,Xm2,Ym2 : word;  
 Xmo,Ymo,Xck,Yck,Xcn,Ycn,Xmap,Ymap,Ntr : word;  
 DXv,DYv,DXc,DYc,Xm,Ym,Xvs,Yvs,Xcs,Ycs : Integer;  
 Xmt,Ymt : real;  
 Pnt,Pnt1 : array[1..400] of TPoint;  
 kp,Mst,Scl1 : real;

```
VesM,Manuv,Nekl,OkEkl,MarkManuv,IndCiro : byte;
Xtv,Ytv,Ktv,Xtc,Ytc,Ktc : array[1..250] of word;
```

```
Re1 : APt;
Re,ReV: Pt;
File1{,File2} : TextFile;
```

implementation

```
{ $R *.DFM }
uses Unit_2D;
```

```
procedure AButtn1(Bmp : TBitMap; Image : TImage; Xn,Yn,dX,dY : word;
  R,G,B,R1,G1,B1,R2,G2,B2 : byte);
```

```
var i: byte;
    dColR1,dColG1,dColB1,dColR2,dColG2,dColB2 : real;
```

```
begin
  {ColorRect(Bmp,Image,Xn,Yn,Xn+dX+3,Yn+dY+3,RGB(40,40,70),0);}
  ColorRectBor(Bmp,Image,Xn,Yn,Xn+dX,Yn+dY,RGB(R-20,G-20,B-20),RGB(40,40,70),0);
  ColorRectBor(Bmp,Image,Xn+4,Yn+4,Xn+dX-4,Yn+dY-4,RGB(R-5,G-5,B-
5),RGB(R,G,B),0);
```

```
  ColorRectBor(Bmp,Image,Xn+15,Yn+15,Xn+dX-15,Yn+dY-15,RGB(R,G,B),RGB(R-30,G-
30,B-30),0);
```

```
dColR1:=(R1-R)/7; dColG1:=(G1-G)/7; dColB1:=(B1-B)/7;
dColR2:=(R-R2)/7; dColG2:=(G-G2)/7; dColB2:=(B-B2)/7;
```

```
for i:=4 to 10 do
```

```
begin
```

```
  ColorLine(Bmp,Image,Xn+i,Yn+i,Xn+i,Yn+dY-i,
  RGB(R1-Round(dColR1*(i-3)),G1-Round(dColG1*(i-3)),B1-Round(dColB1*(i-3))),1,0);
  ColorLine(Bmp,Image,Xn+i,Yn+i,Xn+dX-1-i,Yn+i,
  RGB(R1-Round(dColR1*(i-3)),G1-Round(dColG1*(i-3)),B1-Round(dColB1*(i-3))),1,0);
```

```
  ColorLine(Bmp,Image,Xn+dX-1-i,Yn+i,Xn+dX-1-i,Yn+dY-i,
  RGB(R2+Round(dColR2*(i-3)),G2+Round(dColG2*(i-3)),B2+Round(dColB2*(i-3))),1,0);
  ColorLine(Bmp,Image,Xn+i,Yn+dY-1-i,Xn+dX-1-i,Yn+dY-1-i,
  RGB(R2+Round(dColR2*(i-3)),G2+Round(dColG2*(i-3)),B2+Round(dColB2*(i-3))),1,0);
end;
end;
```

{ CREATE }

```

procedure TCheckForm.FormCreate(Sender: TObject);
var
  i : word;
  Xrn,Yrn,Xrk,Yrk,Xpt,Ypt,Ysc,Npt : word;
  j,Rd,Gr,Bl : byte;
  Crd : TRect;
  Stc : string[5];

begin
  CheckBmp := TBitMap.Create;
  CheckBmp.Width:=790;
  CheckBmp.Height:=540;

  CopyCrgBkBmp := TBitMap.Create;
  CopyCrgBkBmp.Width:=360;
  CopyCrgBkBmp.Height:=360;

  ChartBmp := TBitMap.Create;
  ChartBmp.Width:=370;
  ChartBmp.Height:=400;

  PeasBmp := TBitMap.Create;
  PeasBmp.Width:=790;
  PeasBmp.Height:=100;

  CopyChartBmp := TBitMap.Create;
  CopyChartBmp.Width:=750;
  CopyChartBmp.Height:=420;

  PortCrgBmp := TBitMap.Create;
  PortCrgBmp.Width:=350;
  PortCrgBmp.Height:=320;

  BtnBmp := TBitMap.Create;
  BtnBmp.Width:=720;
  BtnBmp.Height:=250;

  ShowBmp := TBitMap.Create;
  ShowBmp.Width:=1900;
  ShowBmp.Height:=200;

  TwoVslBmp := TBitMap.Create;
  TwoVslBmp.Width:=800;
  TwoVslBmp.Height:=540;

  CheckBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,786,524),
  CheckImage.Canvas,Rect(20,14,766,511));

  Back2Bmp := TBitMap.Create;
  Back2Bmp.LoadFromFile('380053.BMP');

```



```
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,777,529),
Back2Bmp.Canvas,Rect(14,14,771,514));
```

```
BigBmp := TBitMap.Create;
BigBmp.Width:=2700;
BigBmp.Height:=1900;
```

```
Back2Bmp := TBitMap.Create;
Back2Bmp.LoadFromFile('3205.BMP');
```

```
ShipBmp:=TBitMap.Create;
ShipBmp.Width:=800;
ShipBmp.Height:=600;
```

```
ScrBmp:=TBitMap.Create;
ScrBmp.Width:=550;
ScrBmp.Height:=400;
```

```
SkrollBmp:=TBitMap.Create;
SkrollBmp.Width:=530;
SkrollBmp.Height:=415;
```

```
ChoiseBmp:=TBitMap.Create;
ChoiseBmp.Width:=620;
ChoiseBmp.Height:=500;
```

```
ChoiseABmp:=TBitMap.Create;
ChoiseABmp.Width:=620;
ChoiseABmp.Height:=500;
```

```
InfBmp:=TBitMap.Create;
InfBmp.Width:=100;
InfBmp.Height:=220;
```

```
ReturnBmp:=TBitMap.Create;
ReturnBmp.Width:=800;
ReturnBmp.Height:=600;
```

```
CheckForm.Top:=0;
CheckForm.Left:=0;
CheckForm.Width:=799;
CheckForm.Height:=578;
CheckForm.Color:=TColor(RGB(20,35,50));
```

```
{IndPort:=1;} IndCarg:=0; IndPart:=0; OkPort:=0; OkCarg:=0; OkPart:=0;
IndCom:=0; IndPressCrg:=0; OkPressCrg:=0; Ind10Btn:=0; Ok10Btn:=0;
N1party:=1; IndUp3:=0; OkUp3:=0; IndDown3:=0; OkDown3:=0; IndCom3:=0;
```

```

IndPessPort:=0; OkPessPort:=0;
OkPrsCargPort1:=0; OkPrsCargPort2:=0; IndCancl:=0; OkCancl:=0; IndCrgLd:=0;

Count:=0; IndTimer:=0; OKTimer:=0; TimerOk:=0; IndRepT:=0; OKRepT:=0;
IndRepV:=0; OKRepV:=0; Count1:=0; RepitC:=0; RepitV:=0; Rig:=1; IndContr:=0;
t:=0; dt:=2; bet:=0; RepitShow:=1; IndScale:=0; OKScale:=0; IndTV:=0; OKTV:=0;
IndWork:=0; Nwork:=0; IndWiew:=0; OKWiew:=0; WiewReg:=0; IndScroll:=0; WiewN:=1;
Nscl:=1{18}; WChMark:=0; ShowTyp:=1; MarkPos:=0; IndStand:=1; IndBoot1:=0;
OkBoot1:=0;
IndBoot2:=0; OkBoot2:=0; IndBoot3:=0; OkBoot3:=0; IndBoot4:=0; OkBoot4:=0;
IndBoot5:=0; OkBoot5:=0; IndBoot6:=0; OkBoot6:=0; IndBoot7:=0; OkBoot7:=0;
Nmbtn:=0; BtnPic:=1; IndStart:=1; OkStart:=0; OkContr:=0; IndDang:=1;
Xmap:=0; Ymap:=0; MarkOK:=1; ChoiseWork:=0;

IndMst:=0; IndK2:=1; IndT:=1;
IndVs:=1; Ms:=1; IndTab:=0; IndC:=1; IndKk:=0; IndStr:=0;
Scl:=0.5; IndCir:=0; Indb:=0; Ntr:=0; CountTr:=1; MarkTr:=1;
IndTrack:=1; OkTrack:=0; {IndRet:=1;} OkRet:=0; HistOk:=0; IndOpen:=1;
IndMan:=1; VesM:=1; Nekl:=0; OkEkl:=1; MarkManuv:=0; IndCiro:=0;

XB:=2901; YB:=2349; DXm:=Round(2605/2); DYm:=Round(1885/2); Xch1:=XB-DXm;
Ych1:=YB-DYm;
Xch2:=XB+DXm; Ych2:=YB+DYm;
Xmap:=1034; Ymap:=733;

Cirbeg:=0; IndTab:=0; IndK2:=1; IndT:=1;

BigBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,2*DXm,2*DYm),
Back2Bmp.Canvas,Rect(Xch1,Ych1,Xch2,Ych2));

AButtn1(CheckBmp,CheckImage,680,460,95,58,195,200,215,210,220,225,30,40,50);

with CheckImage.Canvas do
begin
Brush.Style:=bsClear;
Font.Color:=TColor(RGB(40,50,70));
Font.Size:=10;
Font.Style:=[fsBold];

TextOut(703,482,'START');

Font.Size:=25;
TextOut(151,71,'EXTREME STRATEGIES FOR');
Font.Size:=23;
TextOut(176,122,'PREVENTING COLLISIONS');

Font.Size:=25;
Font.Color:=TColor(RGB(180,190,210));
TextOut(150,70,'EXTREME STRATEGIES FOR');
Font.Size:=23;
TextOut(175,121,'PREVENTING COLLISIONS');

```

```
Font.Size:=19;
```

```
Font.Color:=TColor(RGB(20,40,60));
TextOut(241,391,'Minimal dynamic systems');
```

```
Font.Color:=TColor(RGB(180,190,200));
TextOut(240,390,'Minimal dynamic systems');
```

```
Font.Style:=[];
end;
```

```
ColorRect>ShowBmp,CheckImage,0,117,1441+360,155,RGB(255,255,255),1);
```

```
for i:=1 to 10 do
ColorLine>ShowBmp,CheckImage,1,117+i,1441+360,117+i,RGB(155+10*i,155+10*i,155+10*i),1,1);
```

```
for i:=0 to 45 do
ColorLine>ShowBmp,CheckImage,40*i,117,40*i,130,RGB(20,20,30),1,1);
for i:=0 to 44 do
ColorLine>ShowBmp,CheckImage,20+40*i,117,20+40*i,127,RGB(20,20,30),1,1);
```

```
ColorRect>ShowBmp,CheckImage,0,154,1120,197,RGB(245,250,255),1);
for i:=1 to 6 do
ColorLine>ShowBmp,CheckImage,1,196-i,1120,196-i,RGB(185+10*i,190+10*i,195+10*i),1,1);
```

```
ColorLine>ShowBmp,CheckImage,1,166,1120,166,RGB(120,120,120),1,1);
for i:=0 to 140 do
ColorLine>ShowBmp,CheckImage,0+8*i,155,0+8*i,166,RGB(120,120,120),1,1);
```

```
for i:=0 to 14 do
ColorLine>ShowBmp,CheckImage,80*i,155,80*i,173,RGB(10,10,10),1,1);
for i:=0 to 14 do
ColorLine>ShowBmp,CheckImage,40+80*i,155,40+80*i,172,RGB(10,10,10),1,1);
```

```
with ShowBmp.Canvas do
begin
Font.Size:=10;
Font.Style:=[];
Font.Color:=TColor(RGB(10,10,50));
Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));
```

```
for i:=1 to 35 do
begin
Str(10*i,Stc);
if 10*i<100 then
TextOut(33+40*(i-1),133,Stc)
else TextOut(30+40*(i-1),133,Stc);
end;
```

```

TextOut(1437,133,'0');

for i:=1 to 9 do
begin
  Str(10*i,Stc);
  TextOut(1474+40*(i-1),133,Stc);
end;

Brush.Color:=TColor(RGB(245,250,255));
Font.Style:=[fsBold];
for i:=1 to 9 do
begin
  Str(i,Stc);
  TextOut(77+80*(i-1),175,Stc)
end;

TextOut(797,175,'0');

for i:=1 to 4 do
begin
  Str(i,Stc);
  TextOut(797+80*(i),175,Stc)
end;
end;

ReturnBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,785,523),
CheckImage.Canvas,Rect(0,0,785,523));

{!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!}

AssignFile(File1,'Chrt2.txt');

Npt:=10;
for i:=1 to Npt do
begin
  Pnt[i].x:=i*10; Pnt[i].y:=i*10+100;
end;

ReWrite(File1);

WriteLn(File1,Npt);

for i:=1 to Npt do
begin
  WriteLn(File1,Pnt[i].x,Pnt[i].y);
end;

CloseFile(File1);

end;

```

```

procedure TCheckForm.FormDestroy(Sender: TObject);
begin
  CheckBmp.Free;
  CopyCrgBkBmp.Free;
  ChartBmp.Free;
  PeasBmp.Free;
  CopyChartBmp.Free;
  PortCrgBmp.Free;
  BtnBmp.Free;
  ScrBmp.Free;
  ShipBmp.Free;
  Back2Bmp.Free;
  BigBmp.Free;
  TwoVslBmp.Free;
  ShowBmp.Free;
  SkrollBmp.Free;
  ChoiseBmp.Free;
  ChoiseABmp.Free;
  InfBmp.Free;
  ReturnBmp.Free;
end;

```

```

procedure TCheckForm.CheckImageMouseMove(Sender: TObject;
  Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
var
  Str1 : string[5];

begin
  ColorRect(CheckBmp,CheckImage,0,0,30,20,
    RGB(230,240,250),0);
  ColorRect(CheckBmp,CheckImage,40,0,70,20,
    RGB(230,240,250),0);

  with CheckImage.Canvas do
    begin
      Font.Size:=10;
      Font.Style=[];
      Font.Color:=TColor(RGB(10,10,10));

      Str(X,Str1);
      TextOut(2,1,Str1);

      Str(Y,Str1);
      TextOut(42,1,Str1);
    end;
  end;
end;

```

```

procedure TCheckForm.CheckImageMouseDown(Sender: TObject;
  Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
var
  Crd : TRect;

begin

  { Start Btn}

  if (IndStart=1) and (X>680) and (X<775) and (Y>460) and (Y<518) then
    begin
      OkStart:=1;
      CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(681,461,776,519),
        CheckImage.Canvas,Rect(680,460,775,518));
    end;

  { Port Btn}

  if (IndPort=1) and (X>203) and (X<323) and (Y>460) and (Y<510) then
    begin
      OkPort:=1;
      CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(204,461,324,511),
        CheckImage.Canvas,Rect(203,460,323,510));
    end;

  { Cargo Btn}

  if (IndCarg=1) and (X>333) and (X<453) and (Y>460) and (Y<510) then
    begin
      OkCarg:=1;
      CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(334,461,454,511),
        CheckImage.Canvas,Rect(333,460,453,510));
    end;

  { Party Btn}

  if (IndPart=1) and (X>463) and (X<583) and (Y>460) and (Y<510) then
    begin
      OkPart:=1;
      CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(464,461,584,511),
        CheckImage.Canvas,Rect(463,460,583,510));
    end;

  {674,90,100,50,)      {REPITER TRG}
  if (IndRepT=1) and (X>674) and (X<774) and (Y>90) and (Y<140) then
    begin
      OkRepT:=1;
      CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(675,91,775,141),
        CheckImage.Canvas,Rect(674,90,774,140));
    end;

```

```

{674,309,100,50}      {REPITER VSL}
if (IndRepV=1) and (X>674) and (X<774) and (Y>309) and (Y<359) then
begin
  OkRepV:=1;
  CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(675,310,775,360),
  CheckImage.Canvas,Rect(674,309,774,359));
end;

{674,365,100,50}    { TIMER }
if (IndTimer=1) and (X>674) and (X<774) and (Y>365) and (Y<415) then
begin
  OkTimer:=1; OkCarg:=0;
  CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(675,366,775,416),
  CheckImage.Canvas,Rect(674,365,774,415));
end;

      { SCALE }
{470,460,80,50}
if (IndScale=1) and (X>470) and (X<550) and (Y>460) and (Y<510) then
begin
  OkScale:=1;  OkCarg:=0;
  CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(471,461,551,511),
  CheckImage.Canvas,Rect(470,460,550,510));
end;

      { ðåæèì òîíáðàæáíèÿ äåóð ñóâîâ }
{237,460,80,50}
if (IndTV=1) and (X>237) and (X<313) and (Y>460) and (Y<510) then
begin
  OkTV:=1;  OkCarg:=0;
  CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(238,461,314,511),
  CheckImage.Canvas,Rect(237,460,313,510));
end;

      { ðåæèì Work }
{30,200,50,220}
if (IndWork=0) and (X>30) and (X<50) and (Y>200) and (Y<220) then
begin
  Nwork:=Nwork+1;
  if Nwork=5 then
  begin
    IndWork:=1;

    with CheckImage.Canvas do
    begin
      Brush.Color:=TColor(RGB(220,240,250));
      Crd.Left:=30; Crd.Top:=200; Crd.Right:=50;
      Crd.Bottom:=220;
      FrameRect(Crd);

      Brush.Style:=bsClear;
      Font.Size:=11;

```

```

    Font.Style:=[fsBold];
    Font.Color:=TColor(RGB(255,0,0));
    TextOut(115,300,'Option "WORK"');
    end;
end;
end;
                                {BTN Ĭđîñîðð/Âûáîð }
{674,461,100,50}

if (IndWiew=1) and (X>674) and (X<774) and (Y>461) and (Y<511) then
begin
    OkWiew:=1;
    CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(675,462,775,512),
    CheckImage.Canvas,Rect(674,461,774,511));
    end;

{ Press Cargo Butn}    {!!!! êëââèèè ñèòóàöèé !!!!}

if (IndPressCrg=1) and (X>386) and (X<735) and (Y>Ypr+6) and (Y<410) then
begin
    OkPressCrg:=1;
    Nkx:=Trunc((X-386)/50)+1;
    Nky:=Trunc((Y-Ypr-6)/50)+1;
    NpressCrg:=Nkx+(Nky-1)*7;

    CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(387+50*(Nkx-1),Ypr+7+50*(Nky-1),435+50*(Nkx-
1),Ypr+55+50*(Nky-1)),
    CheckImage.Canvas,Rect(386+50*(Nkx-1),Ypr+6+50*(Nky-1),434+50*(Nkx-
1),Ypr+54+50*(Nky-1)));
    end;

    {400,239,100,50}
if (IndBoot1=1) and (X>400) and (X<500) and (Y>239) and (Y<289) then
begin
    OkBoot1:=1;
    CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(401,240,501,290),
    CheckImage.Canvas,Rect(400,239,500,289));
    end;

    {510,239,100,50}
if (IndBoot2=1) and (X>510) and (X<610) and (Y>239) and (Y<289) then
begin
    OkBoot2:=1;
    CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(511,240,611,290),
    CheckImage.Canvas,Rect(510,239,610,289));
    end;

    {620,239,100,50}

if (IndBoot3=1) and (X>620) and (X<720) and (Y>239) and (Y<289) then
begin
    OkBoot3:=1;

```



```

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(621,240,721,290),
CheckImage.Canvas,Rect(620,239,720,289));
end;

```

```

{398,331,75,50}
if (IndBoot4=1) and (X>398) and (X<473) and (Y>331) and (Y<381) then
begin
OkBoot4:=1;
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(399,332,474,382),
CheckImage.Canvas,Rect(398,331,473,381));
end;

```

```

{481,331,75,50}
if (IndBoot5=1) and (X>481) and (X<556) and (Y>331) and (Y<381) then
begin
OkBoot5:=1;
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(482,332,557,382),
CheckImage.Canvas,Rect(481,331,556,381));
end;

```

```

{564,331,75,50}
if (IndBoot6=1) and (X>564) and (X<639) and (Y>331) and (Y<381) then
begin
OkBoot6:=1;
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(565,332,640,382),
CheckImage.Canvas,Rect(564,331,639,381));
end;

```

```

{647,331,75,50}
if (IndBoot7=1) and (X>647) and (X<722) and (Y>331) and (Y<381) then
begin
OkBoot7:=1;
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(648,332,723,382),
CheckImage.Canvas,Rect(647,331,722,381));
end;

```

```

{Btn TR-RV-RT}
if (IndContr=1) and (X>20) and (X<140) and (Y>430) and (Y<480) then
begin
OkContr:=1;
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(21,431,141,481),
CheckImage.Canvas,Rect(20,430,140,480));
end;

```

```

{Cancel Btn}

```

```

if (IndCancl=1) and (X>714) and (X<772) and (Y>141) and (Y<171) then
begin
OkCancl:=1;
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(715,142,773,172),
CheckImage.Canvas,Rect(714,141,772,171));
end;

```

```
{Track Btn}
```

```
if (IndTrack=1) and (X>680) and (X<770) and (Y>10) and (Y<50) then
begin
  OkTrack:=1;
  CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(681,11,771,51),
  CheckImage.Canvas,Rect(680,10,770,50));
end;
```

```
{Return Btn}
```

```
if (IndRet=1) and (X>670) and (X<780) and (Y>430) and (Y<480) then
begin
  OkRet:=1;
  CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(671,431,781,481),
  CheckImage.Canvas,Rect(670,430,780,480));
end;
```

```
end;
```

```
{ HOME !!!}
```

```
procedure TCheckForm.CheckImageMouseUp(Sender: TObject;    {BUTTONS}
  Button: TMouseButton; Shift: TShiftState; X, Y: Integer);
label 1,2;
```

```
var
i,Npt : word;
j,Rd,Gr,BI,Ns,D1,D2,D3 : byte;
Str1,Str2,Str3 : string[5];
StrNm : array[1..10] of string[4];
StD : array[1..10] of string[4];
Xcl,Ycl,Xpr{Ypr},Xo,Yo : Integer;
Crd : TRect;
StC : string[4];
StF : string[3];
Xpt,Ypt,Xrn,Yrn,Xso,Yso : Integer;
```

```
DK1,DelK : real;
sigm : Integer;
```

```
begin
```

```
{Start Btn}
```

```
if (OkStart=1) then
begin
```

```

OkStart:=0; IndStart:=0; IndPort:=1;
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(680,460,775,518),
CheckImage.Canvas,Rect(681,461,776,519));

if IndOpen=1 then
begin
{IndOpen:=0;}

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,786,524),
CheckBmp.Canvas,Rect(0,0,786,524));
end
else
begin
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(5,5,785,523),
CheckBmp.Canvas,Rect(0,0,780,518));
end;

ScrBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,525,381),
CheckImage.Canvas,Rect(130,31,655,412));

if IndOpen=1 then
begin
IndOpen:=0;

ColorLine(CheckBmp,CheckImage,153,483,633,483,RGB(190,235,255),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,149,487,637,487,RGB(190,235,255),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,149,419,149,487,RGB(190,235,255),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,153,419,153,483,RGB(190,235,255),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,633,419,633,483,RGB(190,235,255),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,637,419,637,487,RGB(190,235,255),1,0);

PeasBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,783,58),
CheckImage.Canvas,Rect(0,459,783,517));

CButtn(CheckBmp,CheckImage,203,460,120,50,160,175,205,200,215,245,50,65,95);
CButtn(CheckBmp,CheckImage,333,460,120,50,160,175,205,200,215,245,50,65,95);
CButtn(CheckBmp,CheckImage,463,460,120,50,160,175,205,200,215,245,50,65,95);

with CheckImage.Canvas do
begin
Brush.Color:=TColor(RGB(160,175,205));
Font.Style:=[fsBold];
Font.Size:=11;

Font.Color:=TColor(RGB(40,10,50));
TextOut(220,477,'İ î ç è ö è ÿ');
Font.Color:=TColor(RGB(120,120,120));
TextOut(348,477,'Óïðàâëäíèà');

TextOut(506,477,'Î Ê');

```

```

end;

end;

{if IndOpen=1 then
begin
IndOpen:=0;}
CheckBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,780,518),
CheckImage.Canvas,Rect(5,5,785,523));
{end;}

{BtnBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,330,239),
CheckImage.Canvas,Rect(12,180,342,419));}

with CheckImage.Canvas do
begin
Brush.Color:=TColor(RGB(190,235,255));
Crd.Left:=376; Crd.Top:=200; Crd.Right:=744;
Crd.Bottom:=419;
FrameRect(Crd);

Crd.Left:=12; Crd.Top:=180; Crd.Right:=342;
Crd.Bottom:=419;
FrameRect(Crd);
end;

CopyChartBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,750,418),
CheckImage.Canvas,Rect(0,40,750,458));

with CheckImage.Canvas do
begin
Brush.Color:=TColor(RGB(220,240,250));
Crd.Left:=30; Crd.Top:=200; Crd.Right:=50;
Crd.Bottom:=220;
FrameRect(Crd);

Brush.Style:=bsClear;
Font.Size:=8;
Font.Style:=[];
Font.Color:=TColor(RGB(220,240,250));
TextOut(35,202,'5');
end;

end;

{ İçeöëý Btn}

if (OkPort=1) then
begin

```

```

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(203,460,323,510),
CheckImage.Canvas,Rect(204,461,324,511));

{if (IndTimer=0) then
begin
OkPort:=0; IndCom:=1; Nbtn:=1; IndPressCrg:=1; Ind10Btn:=0;
IndPort:=0; IndCarg:=0; IndPart:=0; IndPessPort:=0;
IndUp3:=0; IndDown3:=0; IndCancl:=0; IndPrsCargPort:=0;
{IndWiew:=1;}

with CheckImage.Canvas do
begin
Brush.Color:=TColor(RGB(160,175,205));
Font.Size:=11;
Font.Style:=[fsBold];
Font.Color:=TColor(RGB(170,0,0));
TextOut(220,477,'İ î ç è ö è ÿ');

{Brush.Color:=TColor(RGB(220,240,250));
Crd.Left:=30; Crd.Top:=200; Crd.Right:=50;
Crd.Bottom:=220;
FrameRect(Crd);

Brush.Style:=bsClear;
Font.Size:=8;
Font.Style:=[];
Font.Color:=TColor(RGB(220,240,250));
TextOut(35,202,'5');}
end;

Ypr:=170+35;
ColorRect(CheckBmp,CheckImage,380,170+35,740,379+35,RGB(130,135,170),0);

for i:=1 to 5 do
begin
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,380+i,Ypr+i,380+i,413-i,
RGB(30+20*i,35+20*i,70+20*i),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,380+i,Ypr+i,740-i,Ypr+i,
RGB(30+20*i,35+20*i,70+20*i),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,740-i,Ypr+i,740-i,413-i,
RGB(0+20*i,05+20*i,40+20*i),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,380+i,413-i,740-i,413-i,
RGB(30+20*i,35+20*i,70+20*i),1,0);
end;

Rd:=170+10; Gr:=180+10; Bl:=210+10;

for j:=1 to 4 do
begin
for i:=0 to 6 do
begin

```

```

BButtn(CheckBmp,CheckImage,386+50*i,Ypr+6+50*(j-1),48,48,170,180,210);
ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,401+50*i,Ypr+24+50*(j-1),
429+50*i,Ypr+49+50*(j-1),RGB(Rd,Gr,Bl),RGB(150,160,190),0);
end;
end;

```

```

Dms[1]:=0.5; Pelm[1]:=115; V1m[1]:=19; K1m[1]:=170; V2m[1]:=17; K2m[1]:=225;
Ddopm[1]:=0.5;
Dms[2]:=0.5; Pelm[2]:=120; V1m[2]:=19; K1m[2]:=45; V2m[2]:=17; K2m[2]:=330;
Ddopm[2]:=0.5;
Dms[3]:=0.5; Pelm[3]:=45; V1m[3]:=15; K1m[3]:=45; V2m[3]:=17; K2m[3]:=225;
Ddopm[3]:=0.5;
Dms[4]:=0.5; Pelm[4]:=45; V1m[4]:=25; K1m[4]:=45; V2m[4]:=17; K2m[4]:=225;
Ddopm[4]:=0.5;
Dms[5]:=0.5; Pelm[5]:=120; V1m[5]:=15; K1m[5]:=45; V2m[5]:=17; K2m[5]:=330;
Ddopm[5]:=0.5;
Dms[6]:=0.5; Pelm[6]:=115; V1m[6]:=15; K1m[6]:=170; V2m[6]:=17; K2m[6]:=225;
Ddopm[6]:=0.5;
Dms[7]:=0.5; Pelm[7]:=165; V1m[7]:=15; K1m[7]:=200; V2m[7]:=17; K2m[7]:=320;
Ddopm[7]:=1.0;
Dms[8]:=0.35; Pelm[8]:=90; V1m[8]:=25; K1m[8]:=70; V2m[8]:=17; K2m[8]:=325;
Ddopm[8]:=0.5;
Dms[9]:=0.5; Pelm[9]:=240; V1m[9]:=25; K1m[9]:=260; V2m[9]:=17; K2m[9]:=320;
Ddopm[9]:=0.5;
Dms[10]:=0.5; Pelm[10]:=90; V1m[10]:=25; K1m[10]:=70; V2m[10]:=17; K2m[10]:=325;
Ddopm[10]:=1.0;
Dms[11]:=0.5; Pelm[11]:=185; V1m[11]:=15; K1m[11]:=130; V2m[11]:=17; K2m[11]:=30;
Ddopm[11]:=0.5;
Dms[12]:=0.5; Pelm[12]:=150; V1m[12]:=25; K1m[12]:=155; V2m[12]:=17; K2m[12]:=325;
Ddopm[12]:=1.0;
Dms[13]:=0.5; Pelm[13]:=150; V1m[13]:=15; K1m[13]:=70; V2m[13]:=17; K2m[13]:=30;
Ddopm[13]:=0.5;
Dms[14]:=0.5; Pelm[14]:=180; V1m[14]:=25; K1m[14]:=155; V2m[14]:=17; K2m[14]:=45;
Ddopm[14]:=1.0;
Dms[15]:=0.5; Pelm[15]:=165; V1m[15]:=15; K1m[15]:=200; V2m[15]:=17; K2m[15]:=320;
Ddopm[15]:=0.5;
Dms[16]:=0.5; Pelm[16]:=180; V1m[16]:=25; K1m[16]:=155; V2m[16]:=17; K2m[16]:=45;
Ddopm[16]:=0.5;
Dms[17]:=0.5; Pelm[17]:=185; V1m[17]:=25; K1m[17]:=130; V2m[17]:=17; K2m[17]:=30;
Ddopm[17]:=1.0;
Dms[18]:=0.3; Pelm[18]:=45; V1m[18]:=25; K1m[18]:=45; V2m[18]:=17; K2m[18]:=45;
Ddopm[18]:=0.5;
Dms[19]:=0.5; Pelm[19]:=315; V1m[19]:=25; K1m[19]:=300; V2m[19]:=17; K2m[19]:=310;
Ddopm[19]:=0.5;
Dms[20]:=0.3; Pelm[20]:=135; V1m[20]:=25; K1m[20]:=120; V2m[20]:=17; K2m[20]:=150;
Ddopm[20]:=0.5;
Dms[21]:=0.3; Pelm[21]:=225; V1m[21]:=25; K1m[21]:=210; V2m[21]:=17; K2m[21]:=215;
Ddopm[21]:=0.5;
Dms[22]:=0.5; Pelm[22]:=300; V1m[22]:=25; K1m[22]:=315; V2m[22]:=17; K2m[22]:=0;
Ddopm[22]:=1.0;
Dms[23]:=0.5; Pelm[23]:=150; V1m[23]:=25; K1m[23]:=70; V2m[23]:=17; K2m[23]:=30;
Ddopm[23]:=1.0;

```

```

Dms[24]:=0.5; Pelm[24]:=90; V1m[24]:=15; K1m[24]:=70; V2m[24]:=17; K2m[24]:=325;
Ddopm[24]:=1.0;
Dms[25]:=0.5; Pelm[25]:=150; V1m[25]:=15; K1m[25]:=155; V2m[25]:=17; K2m[25]:=325;
Ddopm[25]:=1.0;
Dms[26]:=0.5; Pelm[26]:=180; V1m[26]:=15; K1m[26]:=155; V2m[26]:=17; K2m[26]:=45;
Ddopm[26]:=0.5;
Dms[27]:=0.35; Pelm[27]:=90; V1m[27]:=15; K1m[27]:=70; V2m[27]:=17; K2m[27]:=325;
Ddopm[27]:=0.5;
Dms[28]:=0.5; Pelm[28]:=240; V1m[28]:=15; K1m[28]:=260; V2m[28]:=17; K2m[28]:=320;
Ddopm[28]:=0.5;

```

```

for j:=1 to 4 do
begin
for i:=0 to 6 do
begin
Ns:=i+1+7*(j-1);
Xv:=415+50*i+Round(12*sin((Pelm[Ns]+180)/57.3)/2);
Yv:=Ypr+36+50*(j-1)-Round(12*cos((Pelm[Ns]+180)/57.3)/2);
Xc:=415+50*i+Round(12*sin(Pelm[Ns]/57.3)/2);
Yc:=Ypr+36+50*(j-1)-Round(12*cos(Pelm[Ns]/57.3)/2);

```

```

with CheckImage.Canvas do
begin
Xo:=415+50*i;
Yo:=Ypr+36+50*(j-1);
Brush.Color:=TColor(RGB(200,210,220));
Pen.Color:=TColor(RGB(170,180,210));
if Ddopm[Ns]=1.0 then D3:=11
else D3:=7;
Ellipse(Xo-D3,Yo-D3,Xo+D3,Yo+D3);
Brush.Color:=TColor(RGB(210,90,80));
Pen.Color:=TColor(RGB(210,90,90));
Ellipse(Xc-3,Yc-3,Xc+3,Yc+3);
Brush.Color:=TColor(RGB(150,150,210));
Pen.Color:=TColor(RGB(150,150,210));
Ellipse(Xv-3,Yv-3,Xv+3,Yv+3);

```

```
end;
```

```

if V1m[Ns]>V2m[Ns] then
begin
D1:=12; D2:=8;
end
else
begin
D2:=12; D1:=8;
end;

```

```

ColorLine(CheckBmp,CheckImage,Xv,Yv,Xv+Round(D1*sin(K1m[Ns]/57.3)),
Yv-Round(D1*cos(K1m[Ns]/57.3)),RGB(50,50,180),1,0);
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,Xc,Yc,Xc+Round(D2*sin(K2m[Ns]/57.3)),
Yc-Round(D2*cos(K2m[Ns]/57.3)),RGB(190,10,10),1,0);

```

```

end;

end;

with CheckImage.Canvas do
begin
Font.Style:=[];
Font.Size:=6;
Brush.Color:=TColor(RGB(170,180,200));
Font.Color:=TColor(RGB(10,10,20));

for j:=1 to 4 do
begin
for i:=1 to 7 do
begin
Str(i+7*(j-1),Str1);
TextOut(392+50*(i-1),Ypr+11+50*(j-1),Str1);
end;
end;
end;

BtnBmp.Canvas.CopyRect(Rect(340,0,706,217),
CheckImage.Canvas,Rect(377,201,743,418));

if IndWork=1 then
begin
IndWiew:=1; {MarkOK:=1;}
CButtn(CheckBmp,CheckImage,674,461,100,50,170,185,215,210,225,255,50,65,95);

with CheckImage.Canvas do
begin
Brush.Color:=TColor(RGB(160,175,205));
Brush.Color:=TColor(RGB(170,185,215));
Font.Style:=[];
Font.Size:=10;
Font.Color:=TColor(RGB(40,10,50));
TextOut(693,479,'Ñòàíààðò');
end;
end;

SkrollBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,550,25),
CheckImage.Canvas,Rect(115,425,665,450));
end;

{ Óïðââââââèâ Btn}

if (OkCarg=1) then
begin
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(333,460,453,510),
CheckImage.Canvas,Rect(334,461,454,511));
IndCarg:=0; OkCarg:=0;

```



```

if (IndContr=0) then
begin
IndCom:=1; Nbtn:=2; IndPressCrg:=0; Ind10Btn:=0;
IndPort:=0; {IndCarg:=1;} IndPart:=0; IndPessPort:=0;
IndUp3:=0; IndDown3:=0; IndCancl:=0; IndPrsCargPort:=0; IndTimer:=1;
Count1:=Count1+1; IndWiew:=0;
if IndWork=1 then IndContr:=1;

{!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
      TIMER
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!}

Xv1:=Xv; Yv1:=Yv; Xc1:=Xc; Yc1:=Yc; K11:=K1; K21:=K2; K2o:=K2;
Xco:=Xc; Yco:=Yc;
Xc2o:=Xc2; Yc2o:=Yc2;

DeltaCour(K2,Pel,DelK,sigo);

DeltaCour(K1,Pel,DK1,sigm);
DeltaCour(K2,Pel,DK2,sigm);

if (DK1<=15) and (DK2<=15) and ( V1>V2) then
begin
Cirbeg:=1;
DeltaCour(K1,Pel,DK2,sigm); sigo:=sigm;
end;

with CheckImage.Canvas do
begin
Font.Style:=[fsBold];
Font.Size:=11;
Font.Color:=TColor(RGB(240,10,10));
Brush.Style:=bsClear;
Str(Cirbeg,StC);
TextOut(35,30,'Cirk= '+StC);

end;
{!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
      TIMER
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!}

if WChMark=1 then
begin
if IndStand=1 then
begin
if WiewN=1 then
begin
WiewN:=0;

end;

```

```

    end
else
    begin

        ScrollBar2.Visible:=False;
        ScrollBar3.Visible:=False;
        CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(75,24,660,458),
        ChoiseABmp.Canvas,Rect(0,0,585,434));

        Xch1:=XB-DXm; Ych1:=YB-DYm;
        Xch2:=XB+DXm; Ych2:=YB+DYm;

        BigBmp.Canvas.CopyRect(Rect(0,0,2*DXm,2*DYm),
        Back2Bmp.Canvas,Rect(Xch1,Ych1,Xch2,Ych2));
        end;
    end;

    Xv1:=Xv; Yv1:=Yv; Xc1:=Xc; Yc1:=Yc;

    ShowTyp:=1;

    Xe:=DXm; Ye:=DYm;

    Xm1:=Xe-261; Ym1:=Ye-189; Xm2:=Xe+261; Ym2:=Ye+189;
    Xmt:=Xm1; Ymt:=Ym1;

    Xso:=Xm1+(Xc-132)+Round(940*sin(K2/57.3));
    if Xso<0 then Xso:=0;
    Yso:=Ym1+(Yc-33)-Round(940*cos(K2/57.3));
    if Yso<0 then Yso:=0;

    ColorLine(BigBmp,CheckImage,Xm1+(Xc-132),Ym1+(Yc-
33),Xso,Yso,RGB(160,10,10),1,1);

    TwoVslBmp.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),
    BigBmp.Canvas,Rect(Xm1+1,Ym1+1,Xm2-1,Ym2-1));
    K1o:=K1;

    if ShowTyp=1 then
        begin
            CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),
            BigBmp.Canvas,Rect(Xm1+1,Ym1+1,Xm2-1,Ym2-1));

Ship(CheckBmp,CheckImage,2,1,0,Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,Round(K1),Xc,Yc,Round(K2),V1,V2,0
);
        end
    else
        begin

```

```

Vesl_2(TwoVslBmp,CheckImage,1,1,1,K1,K2,Round(V1),Round(V2),Xc,Yc,Xv,Yv,1);

ColorLine(TwoVslBmp,CheckImage,138,34,639,34,RGB(130,150,170),1,1);
ColorLine(TwoVslBmp,CheckImage,138,34,138,488,RGB(130,150,170),1,1);
ColorLine(TwoVslBmp,CheckImage,638,34,638,488,RGB(130,150,170),1,1);
ColorLine(TwoVslBmp,CheckImage,138,487,639,487,RGB(130,150,170),1,1);

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),
TwoVslBmp.Canvas,Rect(133,34,652,409));
end;

```

## A2. Программный код расчета параметров стратегии экстренного расхождения в ситуации чрезмерного сближения

```

procedure TCheckForm.Timer1Timer(Sender: TObject);
label 1,2,3,4;
var
  StC : string[4];
  StF : string[6];

  a1,a2,DK1,DK2,DK11,DK21,DK12,DK22,Kyex1,Kyex2,gam,DelK :real;
  sigm : Integer;
  i,j : byte;
  StrNm : array[1..10] of string[4];
  StD : array[1..10] of string[4];
  k : word;

begin
  (*if (sin((Pel+67.5-K2)/57.3)>0) and (sin((K2+67.5-Pel)/57.3)>0) then St:=5 {îãîîýþùåå}
  if (sin((Pel-112.5-K1)/57.3)>0) and (sin((K1+247.5-Pel)/57.3)>0) then St:=6 {îãîîýâîîå}

  if (cos((Pel-K1)/57.3)>=0.996) and (cos((Pel+180-K2)/57.3)>=0.996) then St:=9
  {îãðàîè÷ãñèèà êîððîêîðñ} *)

  if (TimerOk=1) and (IndDang=1) then
    begin
      t:=t+dt;
      aw:={0.04}0.05*bet;
      K11:=K11+aw*dt;
      K1:=Cour(Round(K11));

      if VesM=1 then
        begin
          if t<21 then
            begin
              if IndWork=1 then
                begin

```

```

ScrollBar1.Enabled:=True;

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,346,483,Round(344+5*t),488,RGB(80,80,100),
  RGB(120,120,120),0);
  end;
  {sigv:=0;}
  if (IndMan=1) and (aw<>0) then
    begin
      IndMan:=0;
      MarkManuv:=1;
      if aw>0 then
        begin
          sigv:=1; bet:=50;
        end
      else
        begin
          sigv:=-1; bet:=-50;
        end;
      end;
    end
  else
    begin
      bet:=0; Nscl:=18; VesM:=0;

      if IndWork=1 then
        ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,278,425,507,429,RGB(120,130,150),
          RGB(120,130,150),0);

        ScrollBar1.Enabled:=False;

        with CheckImage.Canvas do
          begin
            Font.Style:=[fsBold];
            Font.Color:=TColor(RGB(40,10,50));
            Brush.Color:=TColor(RGB(160,175,205));
            Font.Size:=9;
            TextOut(486,475,'Scl = 18');
          end;

          { ColorRect(CheckBmp,CheckImage,674,60,774,85,RGB(120,130,150),0);}

        ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,483,490,483+Nscl*3,497,RGB(210,230,0),RGB(210,230,0),0);

        Timer1.Interval:=1000-50*(Nscl-1);

        if (IndCir=1) and ( MarkManuv=1) then
          begin
            t:=dt; Cirbeg:=0; IndTab:=0; IndK2:=1; IndT:=1; IndKk:=0; IndC:=1;
            IndCir:=0; IndCiro:=1;

```

```

Xv1:=Xv; Yv1:=Yv; Xc1:=Xc; Yc1:=Yc; K11:=K1; K21:=K2; {K2o:=K2;}
Xco:=Xc; Yco:=Yc;
Xc2o:=Xc2; Yc2o:=Yc2;

```

```

DeltaCour(K2,Br,DelK,sigo);

```

```

DeltaCour(K1,Br,DK1,sigm);
DeltaCour(K2,Br,DK2,sigm);

```

```

if (DK1<=15) and (DK2<=15) and ( V1>V2) then
begin
  Cirbeg:=1;
  DeltaCour(K1,Br,DK2,sigm); sigo:=sigm;
end;

```

```

with CheckImage.Canvas do
begin
  Font.Style:=[fsBold];
  Font.Size:=11;
  Font.Color:=TColor(RGB(40,210,10));
  Brush.Style:=bsClear;
  Str(Cirbeg,StC);
  TextOut(35,470,'Cirk= '+StC);

```

```

end;
end;

```

```

(*if (cos((Pel-K1)/57.3)>=0.966) and (cos((Pel+180-K2)/57.3)>=0.966) then
begin
  if sigo*sigv>0 then Manuv:=0
  else Manuv:=1;
end
else
begin
  if sigo*sigv<0 then Manuv:=0
  else Manuv:=1;
end;

```

```

if Manuv=1 then
begin

```

```

  end;*)

```

```

  end;

```

```

end;

```

```

if (MarkManuv=1) and (Nekl<10) then
begin
  Nekl:=Nekl+1;
  if OkEkl=1 then
  begin
    OkEkl:=0;
    with CheckImage.Canvas do

```

```

begin
  Font.Style:=[fsBold];
  Font.Size:=12;
  Font.Color:=TColor(RGB(240,10,10));
  Brush.Style:=bsClear;
  TextOut(20,435,'MANOEUVRE');
end;
end
else
begin
  OkEkl:=1;
  CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(11,430,219,520),
  ShowBmp.Canvas,Rect(11,10,210,100));
end;
end;
{else MarkManuv:=0;}

Xv1:=Xv1+(150*V1*dt/3600)*sin(K1/57.3);
Yv1:=Yv1-(150*V1*dt/3600)*cos(K1/57.3);
Xv:=Round(Xv1); Yv:=Round(Yv1);

Ds:=Distn(Xv-Xc,Yv-Yc)/15;
Br:=Pelg(Xc-Xv,Yv-Yc);
Bro:=Cour(Round(Br+180));

if (Cirbeg=1) then
begin
  IndCir:=1; ton:=t; Kalf:=K2; Cirbeg:=0;

  {DeltaKb(K2o,Bro,IndSP);}

  K2b:=Cour(Round(K2o-sigo*40));

  goto 3;
end;

if IndTab=0 then
begin
  if IndK2=1 then
  begin
    K21:=K21+2*sigo*dt;
    ColorRect(CheckBmp,CheckImage,681,67,767,78,RGB(220,230,250),0);
    ColorLine(CheckBmp,CheckImage,724,67,724,78,RGB(10,10,10),1,0);
    if sigo>0 then
    ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,762,67,766,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0)
    else
    ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,682,67,686,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
    end
  else K21:=Br;
  end;

  if (t>5*dt) and (IndT=1) then

```

```

begin
Vd:=-V1*cos((Br-K1)/57.3)-V2*cos((K21-(Br+180))/57.3);
if Vd>0 then
  begin
    Xcon:=Round(1000*Xc2); Ycon:=Round(1000*Yc2);
    Bron:=Pelg(Xcon-Xc2o,Yc2o-Ycon);

    DeltaKb(K2o,Bron,IndSP);

    K2b:=Cour(Round(K2o+IndSP*40));

    ton:=t;
    Kalf:=K2;
    goto 3;
    end;

if (IndT=1) and (Abs(sin((K2-Br)/57.3))<=0.090) and (cos((K2-Br)/57.3)>0) then
  begin
    IndK2:=0; ton:=t; IndT:=0; Kalf:=Br;
    end;
end;

if IndT=0 then
  begin
    Xcon:=Round(1000*Xc2); Ycon:=Round(1000*Yc2);
    Bron:=Pelg(Xcon-Xc2o,Yc2o-Ycon);

    DeltaKb(K2o,Bron,IndSP);

    K2b:=Cour(Round(K2o+IndSP*40));

    Vd:=-V1*cos((Br-K1)/57.3)-V2*cos((K2b-(Br+180))/57.3);

    if Vd>0 then
      begin
3:   tn:=ton-dt; tex:=tn; texn:=tn; texk:=tn; ty:=tn; tyn:=tn; tyk:=tn;
      tb:=ton; tbn:=ton;
      Kyex:=Kalf; Ky:=Kalf;

      DeltaTau(Kalf,K2b,2,taub);

      if IndCiro=1 then
        begin

          goto 4;
          end;

      DeltaCour(K2,Bro,DK1,sigm);

      if (IndCir=1) and (taub<90) then taub:=180-taub
      else
        begin

```

```

if DK1>90 then
  begin
    DeltaCour(K1,Br,DK1,sigm);
    if sigm*IndSP<0 then
      begin
        {!!!!}
        taub:=180-taub;
        if taub>90 then Indb:=1;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

(*if DK1>90 then
  begin
    DeltaCour(K1,Br,DK1,sigm);
    if sigm*IndSP<0 then
      begin
        {!!!!}
        taub:=180-taub;
        if taub>90 then Indb:=1;
      end;
    end;
  end;

```

```

if (IndCir=1) and (taub<90) then taub:=180-taub;*)

```

```

4:  tbk:=tbn+taub;
    IndTab:=1;
    Mn:=0;
  end
else
  begin
    Vd:=-V1*cos((Br-K1)/57.3)-V2*cos((K21-(Br+180))/57.3);
    if Vd>0 then goto 3;
    if V2<V1 then
      begin
        Kotmx:=Cour(Round(K1+180+ArcSin(V2/V1)));
        maxDm1:=Abs(0.1*Ds*sin((Kotmx-Bro)/57.3)); {!!!}
        Kotmn:=Cour(Round(K1+180-ArcSin(V2/V1)));
        maxDm2:=Abs(0.1*Ds*sin((Kotmn-Bro)/57.3)); {!!!}
        if maxDm1>maxDm2 then maxDm:=maxDm1
        else maxDm:=maxDm2;
      end
    else maxDm:=0.07*Ds;

    KotVot(Round(K2b),Round(K1),V2,V1,Kotb,Votb);
    Dmb:=Abs(0.1*Ds*sin((Bro-Kotb)/57.3)); {!!!!}

    if maxDm<Ddop then Mn:=1
    else
      begin
        if Dmb>=Ddop then Mn:=7
        else
          begin

```



```

    if V2<V1 then
        begin
            if Abs(maxDm-Ddop)<=0.05 then Mn:=3
            else Mn:=5;
            end
        else Mn:=5;
        end;
    end;
end;

if Mn=3 then
    begin
        tn:=ton-dt;
        texn:=ton; tex:=ton;
        Dok:=0.1*Ds; Pelok:=Bro;

        Kyex1:=Cour(Round(K1-arccos(V2/V1)));
        Kyex2:=Cour(Round(K1+arccos(V2/V1)));
        if maxDm1>maxDm2 then
            begin
                maxDm:=maxDm1; Kyex:=Kyex1;
            end
        else
            begin
                maxDm:=maxDm2; Kyex:=Kyex2;
            end;

        DeltaCour(Kalf,Kyex,DK1,sigm);

        if DK1<=15 then
            begin
                Kyex:=Kalf; texk:=tok;
            end
        else
            begin
                if sin((K1-Br)/57.3)>0 then
                    begin
                        psiex:=-1;
                    end
                else
                    begin
                        psiex:=1;
                    end;

                DeltaTau(Kalf,Kyex,2,tauex);
                texk:=texn+tauex;
            end;

            KotVot(Round(Kyex),Round(K1),V2,V1,Kotex,Votex);

            ty:=ton+3600*(Dok*cos((Pelok-Kotex)/57.3)+Ddop/2)/(Votex);

```

```

if sin((Pelok-Kotex)/57.3)>0 then gam:=1
else gam:=-1;

Koty:=Cour(Round(Kotex+gam*90));
Ky:=Koty+arcsin((V1/V2)*sin((K1-Koty)/57.3));

DeltaCour(Kyex,Ky,DK1,sgm);

if DK1<=15 then
  begin
    Ky:=Kyex; tyn:=ty; tyk:=ty;
  end
else
  begin
    if sin((Ky-Kyex)/57.3)>0 then sig:=1
    else sig:=-1;

    DelaT(Kyex,Ky,V1,V2,K1,sig,2,-1,tauy,dtty);
    tyn:=ty-dty; tyk:=tyn+tauy;
  end;

  KotVot(Round(K2b),Round(K1),V2,V1,Kotb,Votb);
  KotVot(Round(Ky),Round(K1),V2,V1,Koty,Voty);

  if sin((Koty-Bro)/57.3)>0 then Delt1:=1
  else Delt1:=-1;
  if sin((Kotb-Koty)/57.3)>0 then Delt2:=1
  else Delt2:=-1;

  Delt3:=Delt1*Delt2;

  if sin((K1-Br)/57.3)>0 then
    begin
      psi:=-1;
    end
  else
    begin
      psi:=1;
    end;

  DelaT(Ky,K2b,V1,V2,K1,2,psi,Delt3,taub,dtb);

  if Delt3<0 then
    begin
      tb:=tyk+3600*(Abs(Ddop*(cos(0.5*(180-(Kotb-Koty))/57.3)/sin(0.5*(180-(Kotb-
Koty))/57.3)))
      +0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);
      tbn:=tb-dtb;
    end
  else
    begin
      tb:=tyk+3600*(0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);

```

```

    tbn:=tb;
    end;

    tbk:=tbn+taub;
    IndTab:=1;
    end;

if Mn=5 then
    begin
        tn:=ton-dt; tex:=tn; texn:=tn; texk:=tn; Kyex:=Kalf;
        ty:=ton; tyn:=ton;
        Kyot21:=Cour(Round(Bro+ArcSin(Ddop/(0.2*Ds))));
        Ky21:=Cour(Round(Kyot21+Arcsin((V1/V2)*sin((K1-Kyot21)/57.3))));
        Kyot22:=Cour(Round(Bro-ArcSin(Ddop/(0.2*Ds))));
        Ky22:=Cour(Round(Kyot22+Arcsin((V1/V2)*sin((K1-Kyot22)/57.3))));

        DeltaCour(K2o,Ky21,DK1,sigm);
        DeltaCour(K2o,Ky22,DK2,sigm);

        if DK2<DK1 then Ky:=Ky22
        else Ky:=Ky21;

        DeltaCour(Kalf,Ky,DK1,sigm);

        if DK1<=15 then
            begin
                Ky:=Kalf; tyn:=ty; tyk:=ty;
            end
        else
            begin
                if sin((Ky-Kalf)/57.3)>0 then sig:=1
                else sig:=-1;

                DelaT(Kalf,Ky,V1,V2,K1,sig,2,-1,tauy,dtty);
                tyk:=tyn+tauy;
            end;

            KotVot(Round(Ky),Round(K1),V2,V1,Koty,Voty);

            if sin((Koty-Bro)/57.3)>0 then Delt1:=1
            else Delt1:=-1;
            if sin((Kotb-Koty)/57.3)>0 then Delt2:=1
            else Delt2:=-1;

            Delt3:=Delt1*Delt2;
            if sin((K2b-Ky)/57.3)>0 then psi:=1
            else psi:=-1;

            DelaT(Ky,K2b,V1,V2,K1,2,psi,Delt3,taub,dtb);

            if Delt3<0 then
                begin

```

```

tb:=tyk+3600*(Abs(Ddop*(cos(0.5*(180-(Kotb-Koty))/57.3)/sin(0.5*(180-(Kotb-
Koty))/57.3)))
+0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);
tbn:=tb-dtb;
end
else
begin
tb:=tyk+3600*(0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);
tbn:=tb;
end;

tbk:=tbn+taub;
IndTab:=1;
end;

```

```

if (Mn=7) or (Mn=8) then
begin
KotVot(Round(K2b),Round(K1),V2,V1,Kotb,Votb);
Dmb:=Abs(0.1*Ds*sin((Bro-Kotb)/57.3));
Vd:=-V1*cos((Br-K1)/57.3)-V2*cos((K2b-(Br+180))/57.3);
if (Dmb>=Ddop/2) or (Vd>0) then
begin
tn:=ton-dt; tex:=tn; texn:=tn; textk:=tn; ty:=tn; tyn:=tn; tyk:=tn;
tb:=ton; tbn:=ton;
Kyex:=Kalf; Ky:=Kalf;

DeltaTau(Kalf,K2b,2,taub);

tbk:=tbn+taub;
end
else
begin
tn:=ton-dt; tex:=tn; texn:=tn; textk:=tn; Kyex:=Kalf;
ty:=ton; tyn:=ton;

Kyot21:=Cour(Round(Bro+ArcSin(Ddop/(0.1{2}*Ds))));
Ky21:=Cour(Round(Kyot21+Arcsin((V1/V2)*sin((K1-Kyot21)/57.3))));
Kyot22:=Cour(Round(Bro-ArcSin(Ddop/(0.1{2}*Ds))));
Ky22:=Cour(Round(Kyot22+Arcsin((V1/V2)*sin((K1-Kyot22)/57.3))));

DeltaCour(K2o,Ky21,DK1,sigm);
DeltaCour(K2o,Ky22,DK2,sigm);

if DK2<DK1 then Ky:=Ky22
else Ky:=Ky21;

DeltaCour(Ky,K2b,DK1,sigm);

if DK1<=15 then
begin
Ky:=K2b; tyk:=ty; tbn:=ty;

```

```

if sin((K2b-Kalf)/57.3)>0 then psi:=1
else psi:=-1;

DelaT(Kalf,K2b,V1,V2,K1,2,psi,Delt3,taub,dtb);
tbk:=tbn+taub;
end
else
begin
if sin((Ky-Kalf)/57.3)>0 then psi:=1
else psi:=-1;

DelaT(Kalf,Ky,V1,V2,K1,2,psi,-1,tauy,dy);
tyk:=tyn+tauy;

KotVot(Round(Ky),Round(K1),V2,V1,Koty,Voty);

if sin((Koty-Bro)/57.3)>0 then Delt1:=1
else Delt1:=-1;
if sin((Kotb-Koty)/57.3)>0 then Delt2:=1
else Delt2:=-1;

Delt3:=Delt1*Delt2;

if sin((K2b-Ky)/57.3)>0 then psi:=1
else psi:=-1;

DelaT(Ky,K2b,V1,V2,K1,2,psi,Delt3,taub,dtb);

if Delt3<0 then
begin
tb:=tyk+3600*(Abs(Ddop*(cos(0.5*(180-(Kotb-Koty))/57.3)/sin(0.5*(180-(Kotb-
Koty))/57.3)))
+0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);
tbn:=tb-dtb;
end
else
begin
tb:=tyk+3600*(0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);
tbn:=tb;
end;

tbk:=tbn+taub;
end;
end;

IndTab:=1;
end;

IndT:=2;
end;

if Mn=1 then

```

```

begin
K21:=Br; Kalf:=Br;

Xcon:=Round(1000*Xc2); Ycon:=Round(1000*Yc2);
Bron:=Pelg(Xcon-Xc2o,Yc2o-Ycon);

DeltaKb(K2o,Bron,IndSP);

K2b:=Cour(Round(K2o+IndSP*40));

Vd:=-V1*cos((Br-K1)/57.3)-V2*cos((K2b-(Br+180))/57.3);

if Vd>0 then
begin
2: tok:=t;
tn:=ton-dt; tex:=tn; texn:=tn; texk:=tn; ty:=tn; tyn:=tn; tyk:=tn;
tb:=tok; tbn:=tok;
Kyex:=Kalf; Ky:=Kalf;

DeltaTau(Kalf,K2b,2,taub);

DeltaCour(K2,Bro,DK1,sigm);

if DK1>90 then
begin
DeltaCour(K1,Br,DK1,sigm);
if sigm*IndSP<0 then
begin {!!!!}
taub:=180-taub;
if taub>90 then Indb:=1;
end;
end;

if IndCir=1 then taub:=180-taub;

tbk:=tbn+taub;
IndTab:=1;
Mn:=0;
end
else
begin
Vd:=-V1*cos((Br-K1)/57.3)-V2*cos((K21-(Br+180))/57.3);
if Vd>0 then goto 2;
if V2<V1 then
begin
maxDm1:=Abs(0.1*Ds*sin((Kotmx-Bro)/57.3));
maxDm2:=Abs(0.1*Ds*sin((Kotmn-Bro)/57.3));
Kyex1:=Cour(Round(K1-arccos(V2/V1)));
Kyex2:=Cour(Round(K1+arccos(V2/V1)));

if maxDm1<maxDm2 then
begin

```

```

    maxDm:=maxDm1; Kyex:=Kyex1;
    end
else
    begin
        maxDm:=maxDm2; Kyex:= Kyex2;
    end;
end
else maxDm:=0.07*Ds;

if Abs(maxDm-Ddop/2)<0.03 then
    begin
        tok:=t; Dok:=0.1*Ds; Pelok:=Bro;

        DeltaCour(Kalf,K2b,DK1,sgm);

        if DK1<=15 then
            begin
                tn:=ton-dt; tex:=tn; texn:=tn; texk:=tn; ty:=tn; tyn:=tn; tyk:=tn;
                tb:=ton; tbn:=ton; tbk:=ton;
                K2b:=Kalf; IndKk:=1;
            end
        else
            begin
                if V2<V1 then
                    begin
                        tn:=ton; tex:=tok; texn:=tok;

                        DeltaCour(Kalf,Kyex,DK1,sgm);

                        if DK1<=15 then
                            begin
                                Kyex:=Kalf; texk:=tok;
                            end
                        else
                            begin
                                if sin((K1-Br)/57.3)>0 then
                                    begin
                                        psiex:=-1;
                                    end
                                else
                                    begin
                                        psiex:=1;
                                    end;
                                end;

                                DeltaTau(Kalf,Kyex,2,tauex);
                                texk:=texn+tauex;
                                end;

                                KotVot(Round(Kyex),Round(K1),V2,V1,Kotex,Votex);
                                ty:=tok+3600*(Dok*cos((Pelok-Kotex)/57.3)+Ddop/2)/(Votex);

                                if sin((Pelok-Kotex)/57.3)>0 then gam:=1

```

```

else gam:=-1;

Koty:=Cour(Round(Kotex+gam*90));
Ky:=Cour(Round(Koty+arcsin((V1/V2)*sin((K1-Koty)/57.3))));
KotVot(Round(K2b),Round(K1),V2,V1,Kotb,Votb);
KotVot(Round(Ky),Round(K1),V2,V1,Koty,Voty);

if sin((Ky-Kyex)/57.3)>0 then psi:=1
else psi:=-1;

DelaT(Kyex,Ky,V1,V2,K1,2,psi,-1,tauy,dty);

tyn:=ty-dty; tyk:=tyn+tauy;

if sin((Koty-Bro)/57.3)>0 then Delt1:=1
else Delt1:=-1;
if sin((Kotb-Koty)/57.3)>0 then Delt2:=1
else Delt2:=-1;

Delt3:=Delt1*Delt2;

if sin((K2b-Ky)/57.3)>0 then psi:=1
else psi:=-1;

DelaT(Ky,K2b,V1,V2,K1,2,psi,Delt3,taub,dtb);

if Delt3<0 then
begin
tb:=tyk+3600*(Abs(Ddop*(cos(0.5*(180-(Kotb-Koty))/57.3)/sin(0.5*(180-(Kotb-
Koty))/57.3)))
+0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);
tbn:=tb-dtb;
end
else
begin
tb:=tyk+3600*(0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);
tbn:=tb;
end;

tbk:=tbn+taub;
end
else
begin
tn:=ton; tex:=tn; texn:=tn; texk:=tn;
Kyex:=Kalf; ty:=tok; tyn:=tok;

Kyot21:=Cour(Round(Bro+ArcSin(Ddop/(0.1*Ds))));
Ky21:=Cour(Round(Kyot21+Arcsin((V1/V2)*sin((K1-Kyot21)/57.3))));
Kyot22:=Cour(Round(Bro-ArcSin(Ddop/(0.1*Ds))));
Ky22:=Cour(Round(Kyot22+Arcsin((V1/V2)*sin((K1-Kyot22)/57.3))));

DeltaCour(Ky21,K2b,DK1,sigm);

```



```

DeltaCour(Ky22,K2b,DK2,sign);

if DK2<DK1 then Ky:=Ky22
else Ky:=Ky21;

DeltaCour(Ky,K2b,DK1,sign);

if DK1<=15 then
begin
K2b:=Ky;
Ky:=Kalf; tyk:=tok;
tb:=tok; tbn:=tok;

if sin((K2b-Kalf)/57.3)>0 then psi:=1
else psi:=-1;

DelaT(Kalf,K2b,V1,V2,K1,2,psi,Delt3,taub,dtb);
tbk:=tbn+taub;
end
else
begin
if sin((Ky-Kalf)/57.3)>0 then psi:=1
else psi:=-1;

DelaT(Kalf,Ky,V1,V2,K1,2,psi,Delt3,tauy,dtu);

tyk:=tyn+tauy;

KotVot(Round(Ky),Round(K1),V2,V1,Koty,Voty);

if sin((Koty-Bro)/57.3)>0 then Delt1:=1
else Delt1:=-1;
if sin((Kotb-Koty)/57.3)>0 then Delt2:=1
else Delt2:=-1;

Delt3:=Delt1*Delt2;

if sin((K2b-Ky)/57.3)>0 then psi:=1
else psi:=-1;

DelaT(Ky,K2b,V1,V2,K1,2,psi,Delt3,taub,dtb);

if Delt3<0 then
begin
tb:=tyk+3600*(Abs(Ddop*(cos(0.5*(180-(Kotb-Koty))/57.3)/sin(0.5*(180-(Kotb-
Koty))/57.3)))
+0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);
tbn:=tb-dtb;
end
else
begin
tb:=tyk+3600*(0.1*Ds*cos((Bro-Koty)/57.3))/(Voty);

```

```

        tbn:=tb;
        end;

        tbk:=tbn+taub;
        end;
        IndTab:=1;
        Mn:=0;
        end;
        end;
        end;
        end;
        end;

if IndTab=1 then
begin

for i:=0 to 9 do
begin
ColorRect(CheckBmp,CheckImage,25,17+40*i,95,53+40*i,RGB(190,210,225),0);

for j:=2 to 13 do
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,26,17+40*i+j,94,17+40*i+j,
    RGB(216-2*j,236-2*j,251-2*j),1,0);
for j:=2 to 13 do
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,26,53+40*i-j,94,53+40*i-j,
    RGB(164+2*j,184+2*j,199+2*j),1,0);

if (i<9) and (i-2*Trunc(i/2)=1 ) then
ColorLine(CheckBmp,CheckImage,20,54+40*i,100,54+40*i,
    RGB(205,245,255),1,0);
end;

with CheckImage.Canvas do
begin
Brush.Color:=TColor(RGB(160,175,205));
Font.Style:=[fsBold];
Font.Size:=9;

Font.Color:=TColor(RGB(40,10,50));
Font.Style:=[fsBold];
Font.Size:=10;

StrNm[1]:='Ka='; StrNm[2]:='ta='; StrNm[3]:='Ke='; StrNm[4]:='te=';
StrNm[5]:='Ky='; StrNm[6]:='ty='; StrNm[7]:='Kb='; StrNm[8]:='tb=';

Str(Round(Kalf),StD[1]);
Str(Round(ton),StD[2]);
Str(Round(Kyex),StD[3]);
Str(Round(tex),StD[4]);
Str(Round(Ky),StD[5]);
Str(Round(ty),StD[6]);

```

```

Str(Round(Kb),StD[7]);
Str(Round(tb),StD[8]);

Brush.Color:=TColor(RGB(190,210,225));
Brush.Style:=bsClear;
for i:=0 to 7{9} do
begin
  TextOut(35,26+40*i,StrNm[i+1]+StD[i+1]);
end;
end;

K21:=Kalf;

IndTab:=2;
IndStr:=1;

Xsto:=Xc; Ysto:=Yc;
end;

if IndTab=2 then
begin
  ColorRect(CheckBmp,CheckImage,681,67,767,78,RGB(220,230,250),0);
  ColorLine(CheckBmp,CheckImage,724,67,724,78,RGB(10,10,10),1,0);
  if (t>tn) and (t<texn) then
  begin
    if sigo>0 then

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,722+5,67,726+5,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0)
    else
      ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,722-5,67,726-
5,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
      K21:=Kalf;
    end
  else
    begin
      if (t>=texn) and (t<texk) then
      begin
        DeltaCour(Kalf,Kyex,DelK,sig);
        K21:=Cour(Round(K21+2*sig*dt));
        if sig>0 then

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,762,67,766,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0)
        else

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,682,67,686,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
        end
      else
        begin
          if (t>=texk) and (t<tyn) then
          begin
            K21:=Kyex;

```

```

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,722,67,726,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
    end
else
    begin
        if (t>=tyn) and (t<tyk) then
            begin
                DeltaCour(Kyex,Ky,DelK,sig);
                K21:=Cour(Round(K21+2*sig*dt));
                if sig>0 then

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,762,67,766,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0)
                    else

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,682,67,686,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
                    end
                else
                    begin
                        if (t>=tyk) and (t<tbn) then
                            begin
                                K21:=Ky;

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,722,67,726,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
                                end
                            else
                                begin
                                    if (t>=tbn) and (t<=tbk) then
                                        begin
                                            if (IndC=1) and (t>=tbk-3) then
                                                begin
                                                    IndC:=0; IndKk:=1;

                                end;

                                DeltaCour(Ky,K2b,DelK,sig);
                                if IndCir=1 then sig:=sigo;
                                if Indb=1 then sig:=-sig;
                                K21:=Cour(Round(K21+2*sig*dt));
                                if sig>0 then

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,762,67,766,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0)
                                    else

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,682,67,686,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
                                    end
                                else
                                    begin
                                        if (t>=tbk) and (t<tkn) then
                                            begin
                                                K21:=K2b;

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,722,67,726,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);

```

```

        end
    else
        begin
            if (t>=tkn) and (t<tkk) then
                begin
                    DeltaCour(K2b,K2o,DelK,sig);
                    K21:=Cour(Round(K21+2*sig*dt));
                    if sig>0 then

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,762,67,766,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0)
                        else

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,682,67,686,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
                            end
                        else
                            begin
                                if t>=tkk then
                                    begin
                                        K21:=K2o;

ColorRectBor(CheckBmp,CheckImage,722,67,726,78,RGB(170,0,0),RGB(170,0,0),0);
                                            if t>tkk+30 then
                                                begin
                                                    TimerOk:=0; IndWiew:=0; OkWiew:=0; IndRet:=1;
                                                    RepitC:=0;
                                                    CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(566,430,774,520),
                                                    ShowBmp.Canvas,Rect(566,10,774,100));

CButtn(CheckBmp,CheckImage,675,430,100,50,160,175,205,200,215,245,50,65,95);
                                with CheckImage.Canvas do
                                    begin
                                        Brush.Color:=TColor(RGB(160,175,205));
                                        Font.Style:=[fsBold];
                                        Font.Size:=9;
                                        Font.Color:=TColor(RGB(40,10,50));
                                        TextOut(697,449,'R e t u r n');
                                        if Rig=1 then
                                            begin
                                                TextOut(707,23,'    ');
                                                TextOut(707,23,'History');
                                                HistOk:=1;
                                            end
                                        else
                                            begin
                                                TextOut(707,23,'    ');
                                                IndTrack:=0; IndTimer:=0; IndRepT:=0; IndRepV:=0;
                                            end;
                                        end;
                                    end;
                                end;
                            end;
                        end;
                    end;
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

        end;
    end;
end;
end;
end;
end;
end;

K2:=Cour(Round(K21));

Xc1:=Xc1+(150*V2*dt/3600)*sin(K2/57.3);
Yc1:=Yc1-(150*V2*dt/3600)*cos(K2/57.3);
Xc:=Round(Xc1); Yc:=Round(Yc1);

Xvs:=Xv; Yvs:=Yv; Xcs:=Xc; Ycs:=Yc;

Xc2:=Xc2+(V2*dt/3600)*sin(K2/57.3);
Yc2:=Yc2-(V2*dt/3600)*cos(K2/57.3);

Ntr:=Ntr+1;

Xtv[Ntr]:=Xv; Ytv[Ntr]:=Yv; Ktv[Ntr]:=Round(K1);
Xtc[Ntr]:=Xc; Ytc[Ntr]:=Yc; Ktc[Ntr]:=Round(K2);

if IndKk=1 then
begin
    IndKk:=0;

    Xcb:=Round(1000*Xc2); Ycb:=Round(1000*Yc2);
    Brb:=Pelg(Xcb-Xc2o,Yc2o-Ycb);

    Dsb:=Distn(Xcb-Xc2o,Ycb-Yc2o)/1000;
    Dp:=Abs(Dsb*sin((Brb-K2o)/57.3));
    Dk:=Dp/Abs(sin((K2o-K2b)/57.3));
    tk:=tbk+3600*Dk/V2;

    if sin((K2o-K2b)/57.3)>0 then psi:=1
    else psi:=-1;

    DelaT(K2b,K2o,V1,V2,K1,2,psi,-1,tauk,dtk);

    tkn:=tk-tauk/2; tkk:=tkn+tauk;

    with CheckImage.Canvas do
    begin
        Brush.Color:=TColor(RGB(160,175,205));
        Font.Style:=[fsBold];
        Font.Size:=9;

        Font.Color:=TColor(RGB(40,10,50));
        Font.Style:=[fsBold];
        Font.Size:=10;
    end;
end;

```

```

StrNm[9]:='Kk='; StrNm[10]:='tk=';

Str(Round(Kk),StD[9]);
Str(Round(tk),StD[10]);

Brush.Color:=TColor(RGB(190,210,225));
Brush.Style:=bsClear;
for i:=8 to 9 do
begin
  TextOut(35,26+40*i,StrNm[i+1]+StD[i+1]);
end;

end;

IndKk:=0;
end;

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(690,163,759,290),
CopyCrgBkBmp .Canvas,Rect(0,0,69,127));

with CheckImage.Canvas do
begin
  Brush.Style:=bsClear;
  Font.Size:=11;
  Font.Style:=[fsBold];
  Font.Color:=TColor(RGB(10,10,10));

  Str(Round(t),StF);
  TextOut(697,167,' t =' +StF);

  StC:=FloatToStr(0.1*Ds);
  TextOut(697,167+25,'D = ' +StC);
  Str(Round(Br),StC);
  TextOut(697,167+50,'B = ' +StC);
  Str(Round(K1),StC);
  TextOut(697,167+75,'Kv = ' +StC);
  Str(Round(K2),StC);
  TextOut(697,167+100,'Kt = ' +StC);
end;

      {đăîèòăđû}

if RepitC=1 then
begin
  if K1>=60 then Xn:=140+Round(4*(K1-60))
  else Xn:=1580-Round(4*(60-K1));

  CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(571,434,769,472),
  ShowBmp.Canvas,Rect(Xn,117,Xn+200,155));

  K1t:=Round(10*(K1/10-Trunc(K1/10)));

```

```

if K1t>=2 then Xn1:=60+Round(80*(K1t-2))
else Xn1:=860-Round(80*(2-K1t));

```

```

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(571,472,769,514),
ShowBmp.Canvas,Rect(Xn1,155,Xn1+200,155+42));

```

```

ColorLine(CheckBmp,CheckImage,670,434,670,514,RGB(210,10,10),1,0);
end;

```

```

if RepitV=1 then
begin
if K2>=60 then Xn:=140+Round(4*(K2-60))
else Xn:=1580-Round(4*(60-K2));

```

```

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(16,434,214,472),
ShowBmp.Canvas,Rect(Xn,117,Xn+200,155));

```

```

K2t:=Round(10*(K2/10-Trunc(K2/10)));

```

```

if K2t>=2 then Xn1:=60+Round(80*(K2t-2))
else Xn1:=860-Round(80*(2-K2t));

```

```

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(16,472,214,514),
ShowBmp.Canvas,Rect(Xn1,155,Xn1+200,155+42));

```

```

ColorLine(CheckBmp,CheckImage,116,434,116,514,RGB(210,10,10),1,0);

end;

```

{îòîáðàæáîèâ îáîèð ñóáîâ}

```

if Rig=1 then
begin
Xmo:=Xm1; Ymo:=Ym1;

```

```

Xg:=Abs(40*sin(K2/57.3)); Yg:=Abs(40*cos(K2/57.3));

```

```

if (Xc-132<=Xg) or (Yc-33<=Yg) or (653-Xc<=Xg) or (410-Yc<=Yg) then
begin
Xck:=Xc; Yck:=Yc;
Xm1:=Xmo+(Xck-Xcn)+DXc; Ym1:=Ymo+(Yck-Ycn)-DYc;
Xm2:=Xm1+521; Ym2:=Ym1+377;
Xc:=392; Yc:=221; K2:=K21;
Xv:=Xc+Round(15*Ds*sin((Br+180)/57.3));
Yv:=Yc-Round(15*Ds*cos((Br+180)/57.3));
Xv1:=Xv; Yv1:=Yv; Xc1:=Xc; Yc1:=Yc;
Xvs:=Xv; Yvs:=Yv; Xcs:=Xc; Ycs:=Yc;
end;
end;

```

```

if Rig=2 then

```



```

begin
Xmt:=Xmt+(150*V1*dt/3600)*sin(K1/57.3);
Ymt:=Ymt-(150*V1*dt/3600)*cos(K1/57.3);
Xm1:=Round(Xmt); Ym1:=Round(Ymt);
Xvs:=392; Yvs:=221;
Xcs:=Xvs+Round(15*Ds*sin((Br)/57.3));
Ycs:=Yvs-Round(15*Ds*cos((Br)/57.3));
{Xvs:=Xv; Yvs:=Yv; Xcs:=Xc; Ycs:=Yc;}
end;

if Rig=3 then
begin
Xmt:=Xmt+(150*V2*dt/3600)*sin(K2/57.3);
Ymt:=Ymt-(150*V2*dt/3600)*cos(K2/57.3);
Xm1:=Round(Xmt); Ym1:=Round(Ymt);
Xc:=392; Yc:=221;
Xv:=Xc+Round(15*Ds*sin((Br+180)/57.3));
Yv:=Yc-Round(15*Ds*cos((Br+180)/57.3));
Xvs:=Xv; Yvs:=Yv; Xcs:=Xc; Ycs:=Yc;
end;

Xm2:=Xm1+521; Ym2:=Ym1+377;

if ShowTyp=1 then
begin
ShipBmp.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),
BigBmp.Canvas,Rect(Xm1+1,Ym1+1,Xm2-1,Ym2-1));

Ship(ShipBmp,CheckImage,2,1,0,Lv,Bv,L1,L2,Xvs,Yvs,Round(K1),Xcs,Ycs,Round(K2),V1,V2
,1);

if (MarkTr=1) and (Rig=1) then
begin
with ShipBmp.Canvas do
begin
for k:=1 to Ntr do
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(250,100,50));
Brush.Color:=TColor(RGB(250,100,50));
Ellipse(Xtc[k]-1,Ytc[k]-1,Xtc[k]+1,Ytc[k]+1);
Pen.Color:=TColor(RGB(0,20,210));
Brush.Color:=TColor(RGB(0,20,210));
Ellipse(Xtv[k]-1,Ytv[k]-1,Xtv[k]+1,Ytv[k]+1);
end;
end;
end;

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),
ShipBmp.Canvas,Rect(133,34,652,409));
end

```

```

else
begin
TwoVslBmp.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),
BigBmp.Canvas,Rect(Xm1+1,Ym1+1,Xm2-1,Ym2-1));

```

```

Vesl_2(TwoVslBmp,CheckImage,1,1,1,K1,K2,Round(V1),Round(V2),Xcs,Ycs,Xvs,Yvs,1);

```

```

if (MarkTr=1) and (Rig=1) then
begin
with TwoVslBmp.Canvas do
begin
for k:=1 to Ntr do
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(250,100,50));
Brush.Color:=TColor(RGB(250,100,50));
Ellipse(Xtc[k]-1,Ytc[k]-1,Xtc[k]+1,Ytc[k]+1);
Pen.Color:=TColor(RGB(0,20,210));
Brush.Color:=TColor(RGB(0,20,210));
Ellipse(Xtv[k]-1,Ytv[k]-1,Xtv[k]+1,Ytv[k]+1);
end;
end;
end;
end;

```

```

ColorLine(TwoVslBmp,CheckImage,138,34,639,34,RGB(130,150,170),1,1);
ColorLine(TwoVslBmp,CheckImage,138,34,138,488,RGB(130,150,170),1,1);
ColorLine(TwoVslBmp,CheckImage,638,34,638,488,RGB(130,150,170),1,1);
ColorLine(TwoVslBmp,CheckImage,138,487,639,487,RGB(130,150,170),1,1);

```

```

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),
TwoVslBmp.Canvas,Rect(133,34,652,409));
end;
end;
end;

```

```

procedure TCheckForm.ScrollBar3Scroll(Sender: TObject;
ScrollCode: TScrollCode; var ScrollPos: Integer);
var
StC : string[4];
StF : string[5];
StrNm : array[1..7] of string[4];
StD : array[1..7] of string[4];
i : byte;

```

```

begin
Pos3:=ScrollPos;
if IndStand=1 then
begin
if MarkPos=1 then
begin

```

```

if IndScroll3=1 then
begin
D:= ScrollPos/100;
end;
if IndScroll3=2 then
begin
Pel:= ScrollPos;
end;
if IndScroll3=3 then
begin
Ddop:= ScrollPos/100;
end;
if IndScroll3=4 then
begin
K1:= ScrollPos;
end;
if IndScroll3=5 then
begin
V1:= ScrollPos/10;
end;
if IndScroll3=6 then
begin
K2:= ScrollPos;
end;
if IndScroll3=7 then
begin
V2:= ScrollPos/10;
end;

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(14,60,350,160),
PortCrgBmp.Canvas,Rect(0,0,336,100));

StD[1]:=' '; StD[2]:=' '; StD[3]:=' ';
StD[4]:=' '; StD[5]:=' '; StD[6]:=' '; StD[7]:=' ';

StrNm[1]:=FloatToStr(D);
if D=1 then StrNm[1]:='1,00';
Str(Round(Pel),StrNm[2]);
StrNm[3]:=FloatToStr(Ddop);
if Ddop=1 then StrNm[3]:='1,00';
Str(Round(K1),StrNm[4]);
Str(Round(V1),StrNm[5]);
Str(Round(K2),StrNm[6]);
Str(Round(V2),StrNm[7]);

with CheckImage.Canvas do
begin
Font.Style:=[fsBold];
Font.Size:=10;
Brush.Color:=TColor(RGB(190,210,225));
Font.Color:=TColor(RGB(40,50,70));

```

```

for i:=0 to 2 do
  TextOut(54+45+85*i,65+15,StrNm[i+1]+StD[i]);
for i:=0 to 3 do
  TextOut(14+42+85*i,116+15,StrNm[i+4]+StD[i+4]);
end;

```

```

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(41,211,310,388),
PortCrgBmp.Canvas,Rect(0,101,269,278));

```

```

Xv:=176+Round(D*70*sin((Pel+180)/57.3)/2);
Yv:=300-Round(D*70*cos((Pel+180)/57.3)/2);
Xc:=176+Round(D*70*sin(Pel/57.3)/2);
Yc:=300-Round(D*70*cos(Pel/57.3)/2);

```

```

Bv:=15; L1:=20; L2:=5; Lv:=60;

```

```

Ship(CheckBmp,CheckImage,2,0,0,Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,Round(K1),Xc,Yc,Round(K2),0.7*V1,
0.7*V2,0);

```

```

IndDang:=0;

```

```

KotVot(Round(K1),Round(K2),V1,V2,Kot,Vot);
Vd:=-V1*cos((Pel-K1)/57.3)-V2*cos((K2-(Pel+180))/57.3);

```

```

if Vd<0 then
  begin
    KotVot(Round(K2),Round(K1),V2,V1,Kot,Vot);
    Dm:=Abs(D*sin((Pel-Kot)/57.3));

```

```

  if Dm<Ddop then
    begin
      if V2<V1 then
        begin
          Kotmx:=K1+180+ArcSin(V2/V1);
          maxDm1:=Abs(D*sin((Kotmx-Pel)/57.3));
          Kotmn:=K1+180-ArcSin(V2/V1);
          maxDm2:=Abs(D*sin((Kotmn-Pel)/57.3));
          if maxDm1>maxDm2 then maxDm:=maxDm1
          else maxDm:=maxDm2;
        end
      else maxDm:=0.5*D;

```

```

  if maxDm<=Ddop then
    begin
      IndDang:=1;
      with CheckImage.Canvas do
        begin
          Font.Color:=TColor(RGB(170,10,10));
          Font.Size:=11;
          Font.Style:=[fsBold];
          Brush.Color:=TColor(RGB(230,250,255));

```

```

        TextOut(42,214,'DANGER');
    end;
end
else
begin
IndDang:=0;
end;
end;
end;

end;
end
else
begin
Xmap:=ScrollPos;

if WiewReg=0 then
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),
Back2Bmp.Canvas,Rect(Xmap,Ymap,Xmap+521,Ymap+377))
else
begin

Xm1:=Round(ScrollPos*0.1324);

Xmap:=Round((Xm1+176{158}-39{25})/0.1324);

ChoiseBmp.Canvas.CopyRect(Rect(25,48,610,482),
Back2Bmp.Canvas,Rect(Xmap+125,Ymap+135,Xmap+125+585,Ymap+135+434));

with ChoiseBmp.Canvas do
begin
Pen.Mode:=pmMask;
Brush.Color:=TColor(RGB(180,140,180{245-30,220-30,170-30}));
Pen.Color:=TColor(RGB(175-40,150-40,100-40));
Polygon(Pnt);

Font.Size:=10;
Font.Color:=TColor(RGB({20,40,100}140,0,0));
Brush.Style:=bsClear;

TextOut(255,245,'Àëóîèà');
TextOut(293,225,'ßèòà');
TextOut(155,180,'Ñåâàñòîñü');
TextOut(500,100,'Ñóääê');
TextOut(340,148,'Àëóøòà');

Brush.Color:=TColor(RGB(255,250,230));
Pen.Color:=TColor(RGB(75,50,50));

Ellipse(282-6,273-6,282+6,273+6);
Ellipse(312-6,249-6,312+6,249+6);
Ellipse(168-6,205-6,168+6,205+6);
```

```

Ellipse(522-6,126-6,522+6,126+6);
Ellipse(375-6,176-6,375+6,176+6);

Brush.Color:=TColor(RGB(85,90,90));

Ellipse(282-3,273-3,282+3,273+3);
Ellipse(312-3,249-3,312+3,249+3);
Ellipse(168-3,205-3,168+3,205+3);
Ellipse(522-3,126-3,522+3,126+3);
Ellipse(375-3,176-3,375+3,176+3);
end;

with ChoiseBmp.Canvas do
begin
Pen.Mode:=pmMask;

ColorRectBor(ChoiseBmp,CheckImage,Xm1+25,Ym1+48,Xm1+25+345,Ym1+48+245,
RGB(255{105},255,205),RGB(125,15,15),1);

ColorLine(ChoiseBmp,CheckImage,Xm1+25+172,Ym1+48,Xm1+25+172,Ym1+48+245,RGB(
195,10,10),1,1);

ColorLine(ChoiseBmp,CheckImage,Xm1+25,Ym1+48+122,Xm1+25+345,Ym1+48+122,RGB(
195,10,10),1,1);

ColorRectBor(ChoiseBmp,CheckImage,Xm1+25+172-39,Ym1+48+128-
29,Xm1+25+172+39,
Ym1+48+128+29,RGB(105,255,105),RGB(15,125,15),1);
XB:=Round((Xm1+201)/0.1324); YB:=Round((Ym1+176)/0.1350);

Pen.Mode:=pmCopy;
end;

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(75+1,24+1,660-1,458-1),
ChoiseBmp.Canvas,Rect(25+1,48+1,610-1,482-1));

end;
end;
end;

procedure TCheckForm.ScrollBar2Scroll(Sender: TObject;
ScrollCode: TScrollCode; var ScrollPos: Integer);
var
StF : string[5];

begin
Ymap:=ScrollPos;
if WiewReg=0 then
begin
CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(133,34,652,409),

```

```

Back2Bmp.Canvas.Rect(Xmap,Ymap,Xmap+521,Ymap+377));

end
else
begin
Ym1:=Round(ScrollPos*0.1350);

Ymap:=Round((Ym1+128{176}-29)/0.1350);

ChoiseBmp.Canvas.CopyRect(Rect(25,48,610,482),
Back2Bmp.Canvas.Rect(Xmap+125,Ymap+135,Xmap+125+585,Ymap+135+434));

with ChoiseBmp.Canvas do
begin
Pen.Mode:=pmMask;

Brush.Color:=TColor(RGB(180,140,180{245-30,220-30,170-30}));
Pen.Color:=TColor(RGB(175-40,150-40,100-40));
Polygon(Pnt);

Font.Size:=10;
Font.Color:=TColor(RGB({20,40,100}140,0,0));
Brush.Style:=bsClear;

TextOut(255,245,'Àěóîèà');
TextOut(293,225,'ßëòà');
TextOut(155,180,'Ñâââñòîîëü');
TextOut(500,100,'Ñóääê');
TextOut(340,148,'Àěóøòà');

Brush.Color:=TColor(RGB(255,250,230));
Pen.Color:=TColor(RGB(75,50,50));

Ellipse(282-6,273-6,282+6,273+6);
Ellipse(312-6,249-6,312+6,249+6);
Ellipse(168-6,205-6,168+6,205+6);
Ellipse(522-6,126-6,522+6,126+6);
Ellipse(375-6,176-6,375+6,176+6);

Brush.Color:=TColor(RGB(85,90,90));

Ellipse(282-3,273-3,282+3,273+3);
Ellipse(312-3,249-3,312+3,249+3);
Ellipse(168-3,205-3,168+3,205+3);
Ellipse(522-3,126-3,522+3,126+3);
Ellipse(375-3,176-3,375+3,176+3);
end;

with ChoiseBmp.Canvas do
begin
Pen.Mode:=pmMask;

```

```

ColorRectBor(ChoiseBmp,CheckImage,Xm1+25,Ym1+48,Xm1+25+345,Ym1+48+245,
RGB(255{105},255,205),RGB(125,15,15),1);

ColorLine(ChoiseBmp,CheckImage,Xm1+25+172,Ym1+48,Xm1+25+172,Ym1+48+245,RGB(
195,10,10),1,1);

ColorLine(ChoiseBmp,CheckImage,Xm1+25,Ym1+48+122,Xm1+25+345,Ym1+48+122,RGB(
195,10,10),1,1);

ColorRectBor(ChoiseBmp,CheckImage,Xm1+25+172-39,Ym1+48+128-
29,Xm1+25+172+39,
Ym1+48+128+29,RGB(105,255,105),RGB(15,125,15),1);

Pen.Mode:=pmCopy;
XB:=Round((Xm1+201)/0.1324); YB:=Round((Ym1+176)/0.1350);

end;

CheckImage.Canvas.CopyRect(Rect(75+1,24+1,660-1,458-1),
ChoiseBmp.Canvas,Rect(25+1,48+1,610-1,482-1));

end;
end;

```



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор ОНМА

професор Шемякін О.М.

«25» 12 2015 р.



## А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача Бурмака Олексія Ігоровича на тему „Розробка методу вибору екстреної стратегії розходження при надмірному зближенні суден” у навчальному процесі академії

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М.М., декан факультету Морських перевезень та технологій к.т.н., доцент Ворохобін І.І. і завідувач кафедри Управління судном д.т.н., професор Мальцев А.С. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Бурмака Олексія Ігоровича на тему „Розробка методу вибору стратегії розходження в ситуації надзвичайного зближення суден” впроваджені у навчальний процес на кафедрі Управління судном в розділах забезпечення морехідної безпеки судна.

Начальник навчального  
відділу



Пархоменко М.М.

Морських перевезень та технологій  
к.т.н., доцент



Ворохобін І.І.

Завідувач кафедри Управління судном,  
д.т.н., професор



Мальцев А.С.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор по науковій роботі Одеської  
національної морської академії  
д.т.н., професор

 В.А. Голіков

« 07 » лютого 20 13 р.

## А К Т

про використанні результатів дисертаційної роботи Бурмака О.І. на  
тему «Розробка методу вибору стратегії розходження в ситуації  
надзвичайного зближення суден» в наукових дослідженнях, які  
виконуються в  
академії

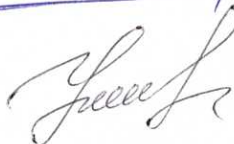
Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини академії Савчук В.Д., провідний фахівець НДЧ Фірсанова О.О. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Бурмака О.І. увійшли складовою частиною в звіт по науково-дослідній роботі «Розробка методів забезпечення безаварійного плавання суден», ОНМА, Одеса – 2012 р. ( № ДР. 0111U001610, науковий керівник – професор Цимбал М.М.), розділ 1.2.

Начальник науково-дослідної  
частини ОНМА,  
к.т.н., с.н.с., професор



В.Д. Савчук

Провідний фахівець



О.О.Фірсанова

# АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в частном высшем учебном заведении «Институт последипломного образования» «Одесский морской тренажерный центр» получили внедрение в процесс подготовки судоводителей следующие результаты диссертационной работы Бурмака Алексея Игоревича на тему „Разработка метода выбора стратегии расхождения в ситуации чрезвычайного сближения судов”:

- процедура идентификации ситуации чрезмерного сближения судна с целью;
- метод выбора маневра экстренного расхождения.

Директор

Института последипломного образования

«Одесский морской тренажерный центр»

к.т.н., профессор



Пащенко Ю.В.

22.12.2015 г.

## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в компании “Бурбон Оффшор Украина” получил внедрение метод выбора экстренного маневра расхождения при чрезмерном сближении судов, разработанный в диссертационной работе Бурмака Алексея Игоревича на тему „Разработка метода выбора стратегии расхождения в ситуации чрезвычайного сближения судов”.

Метод может быть рекомендованным для использования на морских судах других компаний.



**Анжелви Б.А.**

Директор “Бурбон Оффшор Украина”

08.12.2015 г.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что в фирме «СМА ШИПС УКРАИНА» получил внедрение метод расчета параметров экстренного маневра расхождения при чрезмерном сближении судов, разработанный в диссертационной работе Бурмака Алексея Игоревича на тему „Разработка метода выбора стратегии расхождения в ситуации чрезвычайного сближения судов”.

Метод может быть рекомендованным для использования на морских судах других фирм.

Управляющий директор  
СМА Шипс Украина  
к.т.н., доцент



Е.Е. Тюпиков

16.12.2015 г.