

Министерство науки и образования Украины
Национальный университет "Одесская морская академия"
(НУ «ОМА»)

На правах рукописи

Якушев Александр Олегович

УДК 656.61.052.484

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ
БЕЗОПАСНОЙ ОБЛАСТИ СУДНА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ РАЗМЕРОВ**

Специальность 05.22.13 – навигация и управление движением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
к. т. н., профессор Алексишин В.Г.

Одесса – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ	10
1.1. Обзор литературных источников по решению проблемы обеспечения безопасности судоходства.....	10
1.2. Обоснование основного направления диссертационного исследования	32
1.3. Выводы по первой главе	33
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	35
2.1. Выбор темы научного исследования по теме диссертации.....	35
2.2. Методы, применяемые для обеспечения исследования по теме диссертационной работы.....	38
2.3. Методика проведения основных этапов исследования по теме диссертационной работы	44
2.4. Выводы по второй главе	45
ГЛАВА 3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ОБЛАСТИ ЦЕЛИ.....	47
3.1. Факторы, определяющие размеры безопасной области цели.....	47
3.2. Возможные формы безопасной и стохастической областей	52
3.3. Определение размеров стохастической области.....	65

3.4. Расчет параметров стохастической области	76
3.5. Выводы по третьей главе	79
ГЛАВА 4. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ БЕЗОПАСНОЙ ОБЛАСТИ СУДНА	81
4.1. Использование двумерного распределения векториальной погрешности для определения размеров стохастической области.....	81
4.2. Определение размеров стохастических областей при нормальном и смешанных распределений векториальной погрешности.....	85
4.3. Определение минимальных курсов уклонений судна при заданной форме безопасной области судна	99
4.3.1. Определение относительного минимального курса уклонения судна $\tilde{K}_{ymin}$ при использовании безопасной круговой области $D_b^{(Rd)}$	100
4.3.2. Определение относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ в случае применения безопасной эллиптической области $D_b^{(El)}$	101
4.3.3. Расчет относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ для безопасной области цели $D_b^{(Rt)}$ прямоугольной формы.....	112
4.3.4. Расчет относительного минимального курса уклонения судна на $\bar{K}_{ymin}$ для безопасной области цели $D_b^{(Cm)}$ сложной формы.....	116
4.3.5. Расчет относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ для безопасной области цели $D_b^{(RE)}$ сложной формы.....	119

4.4. Выбор оптимальной формы безопасной области судна.....	122
4.5. Выводы по четвертой главе	129
ГЛАВА 5. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	130
5.1. Алгоритм расчета размеров безопасной области заданной формы.....	130
5.2. Имитационное моделирование среднего углаклонения $\Delta K_{отy}$	160
5.3. Расчет значения среднего углаклонения.....	169
5.4. Выводы по пятой главе	179
ВЫВОДЫ.....	181
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	183
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Листинг кода имитационной программы.....	200
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения результатов диссертации.....	284

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Одна из важнейших проблем морского транспорта заключается в обеспечении безопасности судоходства, поскольку ее решение способствует уменьшению количества аварийных случаев и, как следствие, снижению вреда человеческой жизни, окружающей среде, имуществу и производственным процессам.

В ограниченных условиях плавания морских судов усложненных интенсивным судоходством, создается предпосылка для возникновения аварийных ситуаций. Маневрирование судов в таких районах усложнено и связано с возможными посадками на мель, особенно при плохих погодных условиях.

Поэтому актуальной в таких районах становится проблема предупреждения столкновения судов, поскольку через интенсивное судоходство возникают ситуации одновременного опасного сближения нескольких судов. Для решения таких ситуаций предлагается использовать программный аппарат безопасных областей судов, но за его нехваткой разработка механизма безопасности в виде программного продукта становится необходимой.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнялась в соответствии с положениями решения Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16.05.2008 г. «О мероприятиях по обеспечению развития Украины как морского государства» (указ Президента Украины от 20.05.2008 г. №463/2008), Транспортной стратегии Украины на период до 2020 г. (распоряжение Кабинета Министров Украины от 20.10.2010 г., №2174-р), а также в рамках планов научных исследований Одесской национальной морской академии по госбюджетным темам «Совершенствование деятельности операторов в судовой эргатической системе» (№ ДР 0113U000636, 2015 р.), в которой соискатель выполнил отдельный раздел.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является обеспечение безопасности судовождения и минимизации путевых потерь методом выбора оптимальной формы безопасной области судна.

Рабочая гипотеза исследования содержит предположение о зависимости безопасной области судна от отклонения курса судна от начального.

Главная задача исследования заключается в разработке алгоритма определения размеров безопасной области судна, которая обеспечивает минимальное отклонение судна от линии заданного пути.

Решение главной задачи представляет собой поэтапное исследование с применением системного анализа, поэтому главную задачу целесообразно разложить на следующие вспомогательные задания:

- анализ методов формализации безопасных областей судна и формирования их аналитического описания с учетом существенных факторов.
- формирование процедуры расчета параметров стохастической области заданной формы;
- выбор критерия и оптимальной формы безопасной области судна.

Объектом исследования диссертации является процесс судовождения.

Предметом исследования являются безопасные области судна.

Методы исследования. В диссертационном исследовании применены следующие методы:

- дедукции при анализе основных подходов решения проблемы безопасности судовождения;
- системного анализа для выбора темы диссертационной работы и при формировании технологии научного исследования;
- аналитической геометрии для формализации безопасной области цели заданной формы;
- теории вероятности для определения размеров стохастической составляющей безопасной области;

- математического анализа для определения площади безопасной области численным интегрированием;
- оптимизации при выборе формы безопасной области.

Научная новизна полученных результатов заключается в создании метода выбора оптимальной формы безопасной области судна при минимуме отклонения курса судна от начального который определяет ее размеры с совместимым учетом двухмерной плотности распределения позиционной векториальной погрешности, габаритов судов и запаса расстояния на форс-мажорные обстоятельства.

В диссертационной работе впервые получены:

- математическая модель детерминированной составляющей безопасной области судна при расхождении с целью, которая учитывает габариты судов, явления присасывания между судами и запас расстояния на форс-мажорные обстоятельства;
- математическая модель стохастической составляющей безопасной области судна при расхождении с целью, которая учитывает случайную погрешность навигационных измерений представленной двухмерной плотностью нормального и смешанных законов распределения;
- оптимальная форма и размеры безопасной области судна по критерию минимума угла отклонения курса судна от начального, что обеспечивает повышение эффективность плавания.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что полученные в диссертации основные результаты могут быть использованы разработчиками в новых поколениях ЭКДИС и САРП, а также исследования могут быть применены при создании рекомендаций по предупреждению столкновений судов. Практические результаты диссертационного исследования внедрены в производственную деятельность компании «Daphne Shipping Agency, LLC» для переподготовки судоводителей компании (акт внедрения от 25.11.2015 г.), частного высшего учебного заведения «Институт последи-

пломного образования» «Одесский морской тренажерный центр» для подготовки судоводительского плавсостава (акт внедрения от 23.11.2015 г.), Материалы диссертационного исследования используются в научных исследованиях Одесской национальной морской академии (акт внедрения от 29.12.2015 г.), а также в учебном процессе кафедры Судовождения в разделах обеспечения безопасности судовождения (акт от 25.12.2015 г.).

Личный вклад соискателя. Автором все этапы диссертационной работы выполнены самостоятельно: им проведен информационный поиск и обзор литературных источников по проблеме обеспечения безопасности судовождения, произведено методологическое обоснование выбранного исследования, разработан и изложен метод выбора оптимальной формы безопасной области судна и определения ее размеров, выполнено имитационное моделирование, внедрены результаты работы в производственный процесс. Из научных работ, опубликованных в соавторстве, в диссертации использованы только те положения, которые принадлежат автору лично: выбор маневра расхождения судном в условиях штормования [150], методика определения размеров безопасной судовой стохастической области [155], обеспечения безаварийного плавания с помощью безопасной области судна сложной формы для [156], выбор оптимальной формы безопасной области [157], определение размеров безопасной области судна заданной формы [159], процедура определения размеров безопасной области [165], процедура расчета размеров безопасной области судна заданной формы [166].

Апробация результатов диссертации. Основные результаты и положения работы докладывались, обсуждались и были одобрены на научно-практических, научно-технических и научно-методических конференциях: научно-техническая конференция «Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений» (Севастополь, 2-4 октября 2013 г.), научно-техническая конференция «Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека» (Одесса, 19-20 ноября 2013 г.), Всеукраинская научно-техническая

конференція «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Николаев, 21-23 мая 2014 г.), VI Международная научно - практическая конференция «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2014)» (Херсон, 27-29 мая. 2014 г.), научно-техническая конференция «Морські перевезення та інформаційні технології в судноплавстві» (Одесса, 18-19 ноября 2014 г.), научно - практическая конференция «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015)» (Херсон, 26-28 мая, 2015 г.), Всеукраинская научно - техническая конференция «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (Николаев, 20-22 мая 2015г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 18 научных работ (из них 11 единолично), в том числе: в научных профильных изданиях, входящих в перечень МОН Украины — 9 научных статей [150–157.168]; в зарубежных научных профильных изданиях — 2 научных статьи [165, 166]; в сборниках материалов научных конференций — 7 тезисов докладов [158–164].

Структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных литературных источников (168 наименований) и двух приложений. Общий объем работы составляет 288 страниц и содержит 69 рисунков и 25 таблиц, в частности: 182 страницы основного текста, 17 страниц списка использованных источников, 89 страниц приложений.

ГЛАВА 1

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ

1.1. Обзор литературных источников по решению проблемы обеспечения безопасности судоходства.

В результате обзора и анализа литературных источников выявлены основные направления решения проблемы обеспечения безопасного плавания судов, к которым относятся, прежде всего, выбор безопасных стратегий расхождения судов при их опасном сближении, чем предупреждаются их столкновения. Много внимания уделяется вопросам применения современных информационно-управляющих технологий и систем, повышающих безопасность судоходства, а также повышения эффективности управления судами в стесненных районах плавания с помощью систем управления движением судов (СУДС). Также актуальной является проблема обеспечения требуемой точности контроля и прогноза места судна.

В работах [1-12] изложены основные вопросы проблемы обеспечения безопасного плавания судов, к которым относятся использование современных систем автоматического управления движением судов, экспериментальное определение безопасных расстояний при расхождении судов, предупреждающих возникновение явления присасывания. Также рассмотрены вопросы теории управления судном, в частности, аналитический метод определения элементов торможения судов и приближенное аналитическое определение элементов циркуляции судов, а также вопросы предупреждения столкновения судов, учитывая их маневрирование при расхождении и использова-

ния гибких стратегий расхождения. Рассмотрены вопросы обеспечения навигационной безопасности судовождения и мореходной безопасности судов.

В работах [13-17] изложены вопросы обеспечения безопасности судовождения с помощью интегрированных систем ходового мостика, рассмотрены их принципы построения и состав, место таких систем в общей комплексной системе управления судном. Приведены требования, предъявляемые к данным системам ходового мостика.

В работе [13] рассматривается нелинейная задача управления морским судном с целью его удержания в заданной точке и с заданным курсом, причем синтезируется алгоритм нелинейного фильтра Калмана с локальными итерациями для формирования требуемого закона управления, с помощью которого производится оценка текущего состояния системы. В публикации приводятся результаты моделирования, подтверждающие возможность удержания судна в пределах 4-8 м от заданной точки при стабилизации по курсу не хуже 2° .

Значительную роль в обеспечении безопасности судовождения играют навигационно-информационные системы (НИС) судна, о чем указывается в работе [14]. В работе произведен анализ современных датчиков оперативной навигационной информации, а также указываются ограничения и недостатки рассматриваемых систем. Подробно представлены сведения о НИС и электронных картах, приведены характеристика составных частей, функциональных возможностей и рассмотрены особенности отображения информации НИС.

В работе [15] рассматриваются вопросы интеграции сенсоров автоматической идентификационной системы (АИС) в системы управления движением судов (СУДС). Обсуждаются преимущества, которые возникают при интеграции данных судовых АИС транспондеров в СУДС.

Основные сведения о бортовых автоматизированных системах для оценки, прогноза и оптимизации мореходности изложены в работе [16]. Освещены методы прогноза мореходности, а также рассмотрены принципы выбора решений для обеспечения безопасности в штормовых условиях. Рассмотрены особенности отображения информации, приведены характеристики функциональных возможностей таких средств.

Способ выполнения анализа данных нестационарных перемещений корпуса морского судна предложен университетом отрасли морского транспорта Японии в публикации [17]. Для решения задачи применялся метод авторегрессионного моделирования с варьируемыми во времени значениями коэффициентов.

Вопросы моделирования движения судна в стесненных условиях рассмотрены в публикациях [18-24], они посвящены выполнению судами различных маневров, способствующих более эффективному и безопасному плаванию.

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 предложены в работе [18].

В работе [19] 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 и формулируются, как задачи оптимального управления.

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 [20]. Обос-

новывается 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 [21, 22], а процесс моделирования движения судов в скоплении описывается в работе [23] и по полученным результатам предложены рекомендации для определения оптимальных параметров поведения судов в скоплении.

Вопрос о влиянии отстояния рулевого органа от центра масс судна на связь между углом его дрейфа и угловой скоростью рассмотрен в работе [24].

Работы [25-34] посвящены проблеме совершенствования методов управления судном в стесненных районах.

По статистическим данным в узкостях, проливах, на рейдах и портовых акваториях происходит не менее 90% общего числа навигационных аварий, и в первую очередь крупнотоннажных судов отмечается в работе [25]. Субъективная оценка ситуации до начала маневра, и после его реализации является основным источником ошибок, приводящих к авариям. Результаты данной работы могут быть использованы при построении математических моделей судов, а также при построении компьютерных тренажеров швартовок в море в сложных условиях или маневрировании на гибких связях.

В работе [26] предлагается понятие коэффициентов влияния параметров математической модели судна на его маневренные характеристики. Произведены расчеты коэффициентов влияния для радиуса установившейся циркуляции судна, выдвигателя, начальной поворотливости судна и всех характеристик одерживания.

В работе [27] предлагается структура системы управления движением скоростных судов, которая состоит из стратегического и исполнительного уровней. Описана структура двухуровневой системы, приведен ее состав на

примере двух типов скоростных судов, указаны подходы к проектированию локальных подсистем управления.

Вопросы управления судном в экстремальных условиях рассмотрены в работе [28], для этого следует произвести расчет влияния всех внешних сил, имеющим отношение к управлению судном в сложных условиях. В статье представлены основные принципы оценки внешних сил на управление судном и возможность использовать эти силы в экстремальных условиях с учетом необходимости использования буксиров.

Как указывается в публикации [29], 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.

Вопросам разработки системы управлений курсом судна авторулевым с использованием принципов нечеткой логики посвящена статья [30], в ней рассматриваются вопросы адаптации системы с учетом сложной динамики и нелинейности математической модели судна как объекта управления при случайно изменяющихся условиях работы системы.

Оценка адекватности принятой к исследованию математической модели путем исследования влияния дополнительных нелинейных членов на режимы движения судна выполнена в работе [31]. 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.

Теория управления динамическими объектами с переменными параметрами с позиций синергетики изложена в работе [32]. 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.

В большинстве современных систем управления сложными динамическими объектами, как отмечается в работе [33], для формирования управляющих воздействий используется модель управляемого объекта, для получения которой используются нейронные сети. Утверждается, что морские подвижные объекты и, в частности, морские суда относятся к классу т. н. неопределенных объектов.

В работе [34] 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.

В работах [35-39] рассмотрены вопросы оборудования узкостей системами управления движением судов.

Как сообщается в публикации [35], на центры по управлению движением судов СУДС возложена обязанность по обеспечению безопасности судоходства и защиты окружающей среды. Со вступлением в силу ISPS Кода роль центров СУДС изменится, смещаясь в сторону контроля безопасности судна. Разработано новое оборудование фирмами Simrad Mesotech Ltd (Канада) и Norcontrol IT (Норвегия) для удовлетворения требованиям Кода, с использованием системы АИС.

В порту Шанхай ведущая германская фирма в области электроники и системотехники STN ATLAS Electronic разработала и внедрила систему контроля и управления движением судов VTS, на что указывается в публикации [36]. 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.

В публикации [37] рассматривается возможность использования подводного кабеля в качестве эталона траектории движения судна при плавании в стесненных условиях. 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.

Как показано в работе [38], Германская фирма Atlas Electronic заключила договор о поставке в порт Китая системы проводки судов (VTS), которая предназначена для контроля и проводки в порт сухогрузов, а также других судов дедвейтом до 100 тыс. т. Ступенчатая радарная система фирмы Atlas, две установки Close Circuit TV, имеющие связь со специальной лоцманской станцией, и AIS для передачи информации на судно составляют систему VTS.

Проектирование системы информации и управления судоходством VTMISS (Vessel Traffic Management & Information System) в турецких проливах описывается в статье [39]. Моделирование движения судов может повысить безопасность судоходства при наличии переменных течений в стесненных водах, как отмечается в статье.

В работах [40-50] рассмотрены вопросы проблемы обеспечения навигационной безопасности судоходства путем повышения точности контроля и прогноза места судна.

В работах [40, 41] рассмотрены погрешности измерений навигационных параметров. В работе [42] показана зависимость между точностью и надежностью навигации, а основы теории случайных погрешностей навигационных измерений изложены в работе [43].

В работе [44] произведен анализ различных подходов для оценки точности определения места судна с помощью приёмника спутниковой радионавигационной системы. Анализ статистических материалов показал, что

предположение о распределении случайных погрешностей определения широты и долготы по закону Гаусса не является корректным и требует альтернативного подхода.

Результаты исследования возможности применения исходных поправок станции Dziwnow в районе порта Щецин при использовании радионавигационной системы DGPS представлены в работе [45], которое показало целесообразность использования таких поправок. В работе также указано, что 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 [46] предложен новый подход к модели формирования случайных величин навигационных измерений, который отличается от модели, предложенной для обоснования нормального закона распределения вероятностей случайных величин.

В работе [47] показано, что дифференциальные методы корректируют погрешности в определении местоположения по системе GPS, однако поправки могут оказаться недостаточными с течением времени и с увеличением расстояния пользователя системы от станции нулевого отсчета. Показано, что 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 погрешность 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 позиционирования 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.

В работе [48] приведены результаты исследования для описания систем зависимых случайных величин с помощью обобщенного распределения Пуассона с базовым нормальным распределением.

Аналитические выражения для оценки вероятности навигационной безопасности плавания при наличии неравноточных коррелированных погрешностей положения кромок фарватера получены в работе [49]. Достоверность полученных зависимостей доказана методом статистического моделирования.

В работе [50] 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. Вероятность безопасного плавания заданным маршрутом рассчитывается при известной плотности распределения погрешности бокового отклонения судна и продолжительности маршрута.

Последние полвека центральной проблемой обеспечения безопасного судоходства является предупреждение столкновений судов, причем проблема особенно актуальна в прибрежных районах интенсивного судоходства.

Рассмотрим вначале классические подходы к решению задачи безопасного расхождения, которые сформировались в последние сорок лет.

В работах [51, 52] предложено решение задачи синтеза оптимального управления судна при расхождении методами теории оптимальных дискретных процессов. В предлагаемой модели делается допущение об отсутствии внешних возмущений и постоянстве параметров движения встречных судов с учетом ограничения по безопасному расхождению.

Для решения поставленной задачи с помощью ЭВМ производится поиск локально оптимальной безопасной траектории расхождения судна с целями, причем при решении задачи могут применяться три критерия оптимальности: критерий минимума переключений руля, критерий минимального среднеквадратического отклонения судна от заданной траектории, критерий минимального среднеквадратического отклонения судна от заданного курса.

Для сформулированной постановки задачи, как отмечается авторами, справедлива теорема о достаточных условиях существования оптимального управления, т. е. оно существует, если для данного начального состояния существует хотя бы одно допустимое управление. Приводится алгоритм численного решения задачи, использующий аппарат теории оптимальных дискретных процессов. Следует отметить, что алгоритмы поиска оптимального управления по каждому из ранее упомянутых критериев идентичны и базируются на методе возможных направлений, реализованном на ЭВМ, с использованием метода итераций. При изменении исходных данных задача решается заново.

Применению метода нелинейной интегральной инвариантности, изложенного в книгах [53, 54] для описания процесса расхождения судов и создания системы предупреждения столкновений посвящены работы [55-66] сотрудников Института Кибернетики им. В.М. Глушкова АН Украины.

Автор делает сомнительное предположение, что с помощью упомянутого метода, задавая возможные наихудшие для процесса расхождения значения V и K каждого из встречных судов, можно найти допустимую область одношаговых стратегий оперирующего судна. Другими словами, маневров по изменению только одного параметра движения судна (скорости или курса), которые обеспечивают расхождение со всеми судами на заданных допустимых расстояниях.

В работах [55,56] изложен рассматриваемый подход к описанию процесса расхождения. В предлагаемом подходе алгоритмизация МППСС-72 производится в форме задачи выбора множества допустимых альтернатив, задаваемых функциями от параметров движения сближающихся судов. Так как МППСС-72 применяется при расхождении только пар судов, рассмотрена система парных отношений на множестве всех наблюдаемых судов и композиции, порождаемых ими функций. При решении задачи фиксируется судно,

относительно которого необходимо решать задачу выбора, и выделяется множество сближающихся с ним судов.

Сотрудниками Института проблем управления в работах [67-69] исследовались вопросы расхождения судна с одиночной целью без учета ограничений на навигационные опасности и инерционные характеристики маневрирующего судна. В работах рассмотрены соотношения между истинными и относительными параметрами движения оперирующего судна для различных случаев в зависимости от параметров движения судна и цели. Получены аналитические выражения, описывающие допустимые области безопасных курсов и скоростей маневрирующих судов в функции их начального относительного положения и параметров движения.

В работах [70-75] и [76] используется методы позиционных дифференциальных разностных игр и считается, что в процессе расхождения суда взаимодействуют как конфликтующие стороны, причем конфликт возникает на почве пересечения интересов экономичности движения (в обоих случаях в качестве критерия оптимальности выбрано расстояние до пункта назначения).

Произведем анализ исследований, выполненных в ЛЭТИ, результаты которого опубликованы в работах [70- 75].

В работе [70] изложены результаты начального этапа исследований, для которого характерна попытка формализации процесса расхождения судна с несколькими целями методами теории оптимального управления с учетом требований МППСС-72.

В работе предлагается двухуровневая система управления, которая при помощи модели динамического состояния управляемого судна и алгоритма поиска безопасного маневра позволяет прогнозировать движение судна и опасных целей при заданных возмущениях и различных управляющих воздействиях, что позволяет по принятому критерию оптимальности определить требуемые управляющие воздействия.

Быстродействующий уровень системы предназначен для определения алгоритма управления и включает процедуру поиска безопасного маневра, модель управляющего судна и модели управляющих устройств, которые в ускоренном масштабе времени периодически решают задачу.

Работа содержит вариант формализации МППСС, который учитывает начальную относительную позицию судна и цели, а также их параметры движения. В качестве выхода предлагаемая модель МППСС содержит несколько логических переменных, которые характеризуют возможность изменения курса вправо и влево, уступить дорогу или сохранять параметры движения, допуская, что параметры движения сближающихся судов неизменные и предельно-допустимые дистанции кратчайшего сближения с судами заданы.

По исходным данным для каждого из встречных судов находится допустимая область курсов и скоростей оперирующего судна, которая разбивается на две области по признаку стороны изменения курса судна (вправо или влево) по отношению к начальному.

Для каждого из судов вводится характеристика опасности, которая зависит от дистанции и времени кратчайшего сближения, а также от предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения и времени торможения или циркуляции.

Вначале определяется допустимая область для наиболее опасного судна, затем производится поиск допустимой области, являющейся пересечением уже найденной области с допустимой областью следующего по опасности судна. В дальнейшем процедура пересечения допустимых областей продолжается вплоть до последнего судна.

Указанным способом формируется безопасная область курсов и скоростей судна, решающего задачу расхождения, после чего производится выбор оптимального маневра, причем в работе критерием оптимальности является проекция скорости движения оперирующего судна на направление его про-

граммного движения, а в качестве ограничений выбраны линейные неравенства, формализующие безопасное расхождение судна с каждой из целей. Поиск решения предлагается методом линейного программирования.

Для выполнения полученного указанным способом оптимального безопасного маневра следует выполнить поиск соответствующих значений угла кладки руля или оборотов двигателя с помощью модели управляемого движения судна, учитывающей динамику оперирующего судна.

С появлением теории позиционных дифференциальных разностных игр сформировался новый подход к пониманию и формализации процесса расхождения, основанный на методах теории игр. Поэтому первоначальная модель в дальнейшем была значительно дополнена, и ее дальнейшее развитие производилось в направлении использования методов позиционных дифференциально-разностных игр и нашло свое отражение в работах [71-73].

В разработанной модели судно и все цели представляются в виде динамической системы, текущее состояние которой описывается фазовым вектором, изменяющимся во времени в соответствии с дифференциальным уравнением движения. В модели на фазовые координаты судна накладываются ограничения, обусловленные особенностями района плавания, на управляющий вектор судна, причем учитываются требования МППСС и условия безопасности расхождения.

Для облегчения поиска решения задачи дифференциальная игра заменяется многошаговой, при этом предполагается постоянство параметров движения встречных судов в течение одного шага, т. е. в течение заданного интервала времени. Задача поиска оптимальных значений позиционной стратегии, как и в работе [70], редуцируется к задаче линейного программирования, для чего нелинейные ограничения по безопасности расхождения и учета навигационных опасностей линеаризуются.

Поиск управляющих воздействий, значения которых наиболее соответствуют оптимальной стратегии расхождения, предлагается производить с по-

мощью модели управляемого судна аналогично алгоритму, изложенному в работе [70].

Отметим, что применение методов дифференциальных игр к формализации процесса расхождения подробно рассмотрено в работе [76].

В работе [77] предложена формализация МППСС с помощью алгебры логики. 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.

Обратимся к современным исследованиям по проблематике предупреждения столкновений судов.

Проблема безопасного расхождения судов с учетом особенностей их взаимодействия, возникающего при опасном сближении и определяющего процесс расхождения, рассмотрена в работе [78]. Регламентация взаимодействия судов, предписанная МППСС-72, формализована как бинарная координация. Предложена стратегия экстренного расхождения при чрезмерном сближении судов в ситуации неопределенности их дальнейшего поведения и отсутствия координации.

В работе [79] характеристиками взаимодействия судов при их опасном сближении рассмотрены координируемость бинарных взаимодействий и их эффективность, получены аналитические выражения для их численной оценки. Предложена математическая модель взаимодействия группы опасно сближающихся судов при различных типах управления.

Особенности задачи расхождения судов в море освещены в монографии [80], приведены результаты разработки и анализа метода предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути. Повышение эффективности предотвращения столкновений в настоящее время, как отмечается в работе, может достигаться созданием, как новых алгоритмов, так и интеллектуальных систем. В работе для расхождения применяется одна

стратегия – смещение на параллельную линию пути под тем или иным углом к линии исходного курса. Из множества возможных вариантов такой стратегии находится оптимальная стратегия по критерию, учитывающему требования к безопасности, заблаговременности, заметности и экономичности маневра для предотвращения столкновения.

В работах [81-83] рассмотрены вопросы расчета предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения и разработки процедуры определения реализовавшейся области взаимных обязательств опасно сближающихся судов.

Проблема учета маневренных характеристик судна для обеспечения безопасности плавания в стесненных условиях освещается в работе [84], а в работе [85] 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.

В публикации [86] рассмотрен вопрос выбора оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении.

В работах [87-93] рассмотрена процедура расчета параметров маневра безопасного расхождения судов с учетом их инерционности, т. е. с использованием различные модели поворотливости судна.

Вопросы учета навигационных опасностей при выборе безопасного маневра расхождения судна с целью в ситуации опасного сближения исследованы в работах [94-96].

Вопросам расхождения судна с несколькими целями в ситуации опасного сближения посвящены работы [97, 98].

Подробные исследования ситуации опасного сближения пары судов представлены в работах [99-103], в которых рассмотрены условия существования множества безопасных маневров расхождения и процедура выбора оптимального маневра, а в работах [104-107] рассмотрены различные аспекты проблемы оценки ситуации расхождения судов.

Работа [108] посвящена описанию оценочной системы выбора уклонения курсом от столкновения с одиночным судном. В ней описывается трехуровневая моделирующая схема, которая базируется на технологии синтеза. Модули, описывающие программную траекторию движения судна и параметры движения, используют преобразование координат и геометрическую модель. По этим данным производится оценка риска столкновения и этапы действий по уклонению от столкновения.

Работа [109] посвящена правилам по предупреждению столкновений судов в море, в частности комментируются положения пунктов 2 и 3 правила 17. 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 правила должен иметь преимущество перед пунктом 3 правила.

Основные направления обеспечения безаварийного плавания судов отражены в работе [110], а в работе [111] рассмотрены перспективы использования современных технических средств для управления судами в стесненных условиях плавания с целью предупреждения столкновений судов.

Как отмечается в работах [112, 113], практическая реализация предлагаемых современных теоретических концепций создания систем синтеза безопасного маневра, 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 указанных работах предложен способ индивидуального учета каждого из перечисленных ограничений, после чего был разработан метод их совместного учета. При этом стратегией расхождения является маневр изменением курса,

который может содержать несколько участков уклонения и участка возвращения на заданную траекторию движения.

В работе [114] указывается, что университет отрасли морского транспорта (Китай) разработал систему поддержки принятия решений управления морским судном, которая минимизирует риски столкновения судов. В настоящее время не менее 60% всех аварий с морскими судами происходят по причине столкновений, поэтому применение такой системы является актуальным.

В статье [115] представлена модель, которая позволяет выполнить оценку риска столкновения высокоскоростных судов в порядке значимости. С помощью данной модели вахтенный штурман может определить, где может случиться столкновение и делать вывод о степени риска, так как модель позволяет осуществить прогноз степени риска в результате поворота рулей, изменения скорости и величины дистанции кратчайшего сближения.

В работах [116-118] показано, что задача выбора оптимального маневра расхождения характеризуется высокой сложностью из-за того, что процесс управления движением судна является многомерным с нелинейными и нестационарными характеристиками, причем по своему содержанию задача относится к задачам теории игр.

В статье [119] предложена модель автоматизированной системы предупреждения столкновений судов, которую можно применить для построения базы знаний. Также предложен алгоритм модели и программа, имитирующая сближения судов. Результаты имитации доказывают осуществимость, применимость и эффективность модели.

Анализ достоверности разных методов прогнозирования развития опасной ситуации сближения судов приведен в публикации [120].

В статье [121] указывается, что глобальный контроль систем управления стал слишком дорогостоящим и неэффективным, так как он требует большого числа измерений вектора управления и определения статуса процесса. Дина-

мика судна описывается нелинейными и нестационарными характеристиками, а управляющие воздействия зависят от течения, ветра и волнения моря.

В работе [122] произведен анализ возможных критериев установления факта сближения судов противоположными курсами, идущих прямо друг на друга, и показано, что ни по одному из них не возможно уверенно судить о сближении судов, идущих прямо друг на друга, так что в реальности следует ориентироваться на рекомендации правила 14 МППСС-72, т. е. заблаговременно отворачивать вправо.

На основе исследований по автоматизации маневром уклонения судна от столкновения, электронных карт и информационных систем в статье [123] предложен новый тип автоматизированной системы VICAN (Vessel Intelligent Collision Avoidance Navigator). Приводятся состав, функции и рабочий процесс системы VICAN и новые пункты для дальнейшей разработки.

Одним из фундаментальных действий при уклонении от столкновения является измерение пеленга цели, указывается в работе [124], причем безопасность собственного судна зависит также от скорости изменений курсового угла. Дистанция до цели является важнейшим фактором при расчете по числовой формуле.

В публикации [125] предлагается метод *neural fuzzy system* для оценки риска столкновения судов, полученный на основе результатов последних исследований технических проблем морского судоходства. С учетом преимущества искусственной нейронной сети в системе *fuzzy* может быть создан новый тип системы *neural network system*. Некоторые проблемы, которые трудно решались традиционными методами *fuzzy*, могут быть разрешены легко и эффективно в новой системе, причем полученные результаты показали, что новый метод более эффективен по сравнению с традиционными методами.

В работе [126] поясняется понимание содержания автономной судовой системы уклонения от столкновения CA (Collision avoidance) и её теоретическое обоснование. Дополнительно рассмотрены 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 форматах. Классическая техника основана на математических моделях и алгоритмах. Программы основаны на использовании искусственного интеллекта AI (Artificial Itelligence). 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).

Для судов, следующих встречными курсами прямо друг на друга, в работе [127] сделана попытка определить минимально допустимую дистанцию между ними для осуществления маневра безопасного расхождения на заданном расстоянии кратчайшего сближения с учетом маневренных характеристик судов.

Контроль и управление движением судна в публикации [128] рассматриваются, как многоуровневая система, которая управляет системами судна при его переходе между портами, причем судовым подсистемам поставлены в соответствие слои системы контроля.

В работе [129] показано, что 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.

Сложные ситуации в стесненных водах рассмотрены в работе [130], 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.

СУДС, как правило, не имеет технических возможностей контролировать движение судов на участках скопления судов для обеспечения безопасности судоходства указывается в публикации [131]. 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.

Для повышения безопасности и эффективности управления судами разработана система ATSM (Autonomous Traffic Management System), о чем указано в статье [132]. В системе 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. Затем производится 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.

В статье [133] предложен метод расчета дистанции и времени кратчайшего сближения по наблюдениям со своего судна, который позволяет непосредственно получить информацию о величине риска столкновения своего судна с целью, что обеспечивает вахтенного офицера и экспертную систему по предотвращению столкновения эффективным средством для уточнения принятых решений по уклонению от столкновения.

В работе [134] обсуждается 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,. 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.

Модель US-model, являющаяся методом оценки потенциального риска столкновения рассмотрена в работе [135]. 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.

В работах [136-137] обсуждаются вопросы экстренного маневрирования судов для расхождения в ситуации 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 [138], причем оба параметра зависят от длины и ширины судна, его скорости, протяженности тормозного пути.

В работах [5, 139] 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 [140, 141], причем в публикации [140] автор, ссылаясь на зарубежные исследования, описывает домены Гудвина и Дэвиса, а в работе [141] 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 [142] 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 [143], 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 [144-148]. В них предложена математическая модель, содержащая системный учет существенных факторов, которая ориентирована на практическое использование в процессе плавания судна в различных условиях.

В работе [149] предложенные подходы к описанию области риска столкновения, которые формализованы в виде эллиптической или прямоугольной формы.

Ряд работ [150-166] посвящен определению размеров безопасной области судна различной формы с учетом существенных стохастических и детерминированных факторов и разработке процедуры выбора оптимальной формы безопасной области.

1.2. Обоснование основного направления диссертационного исследования.

Выполненный анализ литературных источников по основным направлениям обеспечения безопасности судовождения показал, что одной из наиболее актуальных является проблема предупреждение столкновения судов при их опасном сближении, которая особенно актуальна при плавании судов в стесненных водах из-за повышенной интенсивности судоходства и большого количества навигационных опасностей.

Стесненные районы плавания характеризуются ситуациями опасного сближения судна с несколькими целями, и при выборе стратегии расхождения следует учитывать безопасные области встречных целей, в которые судно не должно попадать при расхождении.

В последнее время помимо круга заданного радиуса предложено более десятка различных форм безопасных областей, причем не исследованы вопросы расчета их минимальных размеров, обеспечивающих безопасное расхождение в ситуациях опасного сближения. Также не рассмотрены вопросы сравнительной характеристики областей различной формы и отсутствуют даже рекомендации по выбору оптимальной формы безопасной области.

Следовательно, задача разработки способа расчета размеров безопасной области судна заданной формы с учетом существенных факторов стохастического и детерминированного характера, а также процедуры выбора оптимальной формы безопасной области судна по определенному критерию является актуальной и перспективной тематикой и составляет основные направления данной диссертационной работы.

1.3. Выводы по первой главе

В первой главе произведен обзор литературы и выполнен анализ основных направлений решения проблемы обеспечения безопасного судовождения

и снижения аварийности судов. В результате установлено, что основными направлениями решения данной проблемы являются совершенствование методов управления судном при плавании в стесненных районах, разработка безопасных методов расхождения для предупреждения столкновения опасно сближающихся судов, а также обеспечение точности контроля места судна с целью повышения навигационной безопасности судовождения.

Произведено обоснование основных направлений исследования диссертации, что определило ее тематику, которая посвящена разработке метода расчета размера безопасных областей различных форм и процедуры выбора оптимальной формы безопасной области.

Объектом исследования является процесс предупреждения столкновений судов, а предметом исследования являются методы расчета размеров безопасных областей судна разной формы и выбора оптимальной формы области.

ГЛАВА 2

МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Выбор темы научного исследования по теме диссертации

В первой главе было показано, что наиболее эффективной мерой обеспечения безопасности судовождения является предупреждение столкновения судов, что особенно актуально в стесненных районах плавания, в которых характерны ситуации опасного сближения судна с несколькими целями.

Для оценки опасности сближения необходимо определить предельно допустимую дистанцию, величина которой зависит от формы безопасной области судна и относительного положения судна и цели.

В работе следует рассмотреть безопасные области судна различной формы, которые наиболее часто используются в судовождении. С учетом существенных факторов необходимо разработать процедуру расчета размеров безопасной области судна заданной формы.

К существенным факторам относятся двумерное распределение позиционной векториальной погрешности, габариты судна, запас дистанции на предупреждение явления присасывания и на форс-мажорные обстоятельства.

Так как позиционная векториальная погрешность может быть распределена по нормальному закону или по смешанным законам двух типов, то следует разработать процедуру определения параметров стохастической составляющей безопасной области судна в зависимости от упомянутых законов распределения позиционной векториальной погрешности.

Безопасная область судна также содержит детерминированную составляющую, которая определяется постоянными для судна параметрами.

Стохастическая и детерминированная составляющие безопасной области по-разному рассчитываются для различных ее форм.

Для пяти наиболее применяемых форм безопасной области следует рассчитать их размеры для одинаковых условий и выявить оптимальную форму, которая вызывает минимальное отклонение судна от программной траектории движения при безопасном расхождении.

Реализация поставленной главной задачи требует, во-первых, разработки процедуры расчета размеров безопасной области заданной формы с учетом стохастических и детерминированных факторов. Во-вторых, следует формализовать способ выбора оптимальной формы безопасной области судна, для чего надлежит сформулировать оптимизационную задачу и предложить метод ее решения.

Следовательно, проблема разработки метода определения размеров оптимальной безопасной области судна является актуальной и перспективной, и это обуславливает выбор темы диссертации, которая формулируется следующим образом: «Разработка метода выбора оптимальной формы безопасной области судна и определение ее размеров».

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

- С помощью методов системного подхода произвести разделение главной задачи диссертационного исследования на несколько составных независимых задач.
- Произвести аналитическое описание форм применяемых в судовождении безопасных областей целей, которые используются для выбора безопасного уклонения судна в ситуациях опасного сближения.
- Разработать процедуру определения размеров безопасной области заданной формы с учетом стохастических и детерминированных факторов. При

расчете стохастической составляющей следует учитывать закон распределения позиционной векториальной погрешности.

- Сформировать алгоритм выбора оптимальной формы безопасной области судна, которая обеспечивает минимальное отклонение судна от программной траектории движения для безопасного расхождения.

- Произвести имитационное моделирование теоретических результатов диссертационной работы для подтверждения их корректности.

Актуальность тематики диссертационного исследования определяют необходимость повышения уровня безопасности судовождения и разработки метода выбора оптимальной формы безопасной области судна.

Научную новизну исследования может составить разработка процедуры расчета размеров безопасной области цели заданной формы, а также синтез метода определения оптимальной формы безопасной области судна.

Возможная экономическая эффективность может быть достигнута за счет сокращения убытков от снижения уровня аварийности по причине предотвращения столкновений судов и минимальных затрат ходового времени для безопасного расхождения.

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

Реализуемость предлагаемого научного исследования заключается в разработке теоретической части работы, которую требуется проверить с помощью имитационного моделирования и экспериментальных исследований. Объектом исследования диссертации является обеспечение безопасности судовождения.

Предметом исследования является безопасная область судна и методы расчета ее размеров.

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

2.2. Методы, применяемые для обеспечения исследования по теме диссертационной работы.

Технологическая карта методологического обеспечения исследования по теме диссертации, которая представляет схему применения методов системного подхода для решения главной задачи диссертационной работы, представлена на рисунке 2.1.

Современными запросами практики являются необходимость повышения уровня безопасности судоходства и разработки метода выбора оптимальной формы безопасной области судна.

Целью диссертационного исследования является обеспечение безопасности судоходства путем разработки метода расчета размеров безопасной области судна оптимальной формы.

Принята гипотеза о существовании возможности определения размеров безопасной области судна заданной формы и выбор оптимальной по выбранному критерию.

Главная задача исследования заключается в разработке алгоритма определения размеров безопасной области судна оптимальной формы.

Главная задача диссертации была решена с помощью декомпозиции на частные составные задачи, полученных в соответствии с методами теории исследования операций.

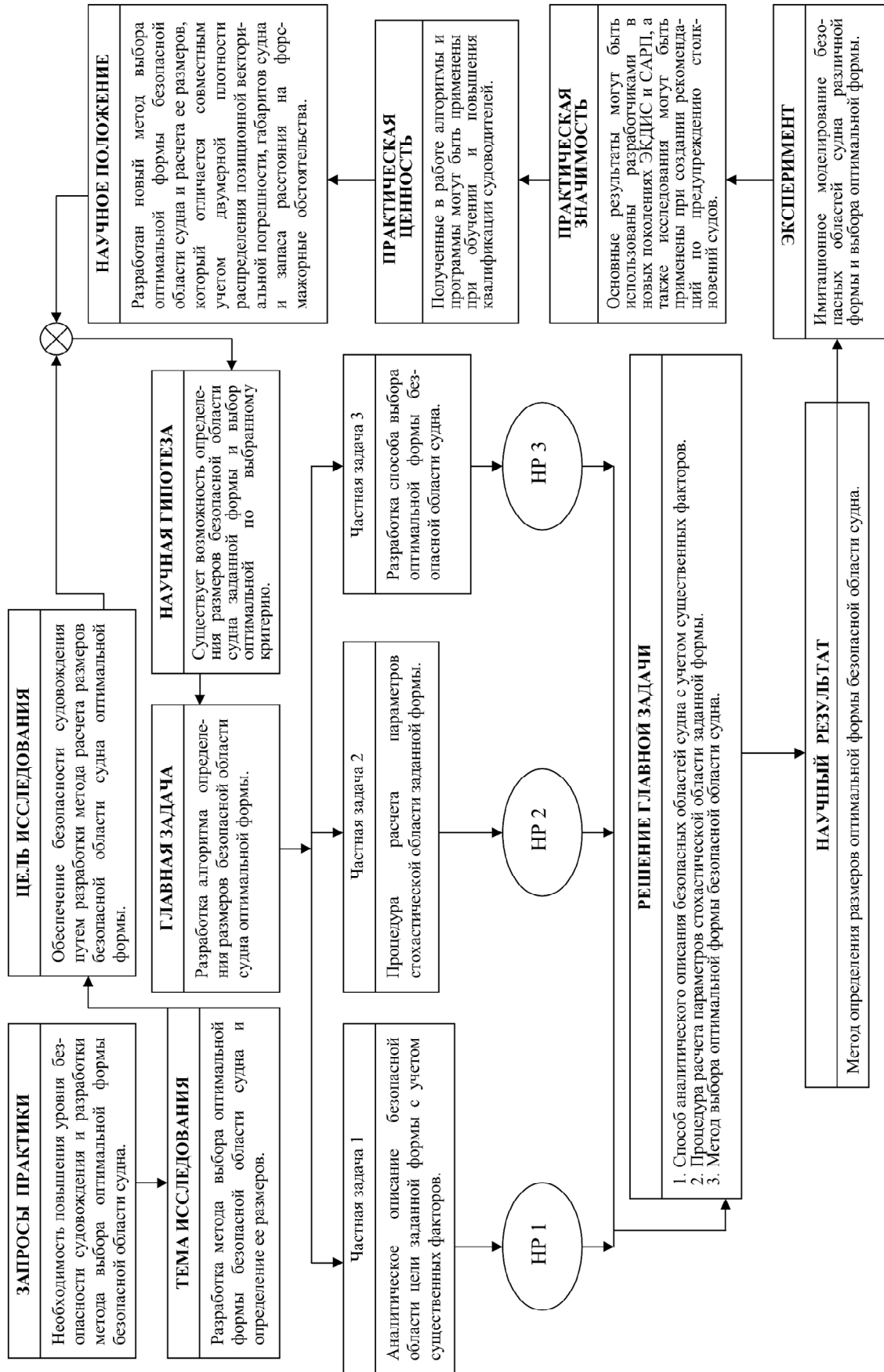


Рисунок 2.1. Технологическая карта диссертации

Как показал проведенный анализ, целесообразно разделение главной задачи диссертационного исследования на следующие три частные составные задачи:

1. Аналитическое описание безопасной области цели заданной формы с учетом существенных факторов.
2. Процедура расчета параметров стохастической области заданной формы.
3. Разработка способа выбора оптимальной формы безопасной области судна.

Рассмотрение первой частной составной задачи, посвященной формализации безопасной области цели заданной формы с учетом существенных факторов, требует анализа и выбора различных форм безопасной области, заданной в системе координат, которая связана с судном. Предварительный анализ показал, что целесообразно рассмотреть пять форм безопасной области, к которым относятся круговая, эллиптическая, прямоугольная и две сложные формы области. Для каждого типа безопасной области цели необходимо найти аналитическое выражение, описывающее ее границы в системе координат связанной с целью.

Учитывая, что каждая из рассмотренных форм безопасной области состоит из стохастической и детерминированной составляющих, следует найти аналитические выражения для их описания каждой из пяти рассматриваемых форм безопасной области.

Процедура расчета параметров стохастической области заданной формы является второй частной составной задачей.

Стохастическая составляющая безопасной области судна обусловлена существованием позиционной векториальной погрешности судна, вызванной случайными погрешностями измерений навигационных параметров. Так как позиционная векториальная погрешность характеризуется двумерной плотностью распределения, то необходимо разработать процедуры расчета пара-

метров стохастической составляющей безопасной области заданной формы в зависимости от закона распределения позиционной векториальной погрешности.

В свою очередь позиционная векториальная погрешность может подчиняться различным двумерным законам распределения вероятностей. Во всяком случае, наиболее часто используются нормальный закон распределения и два типа смешанных законов.

Параметры стохастической составляющей безопасной области определяются путем интегрирования двумерной плотности распределения вероятностей по области заданной формы, получая вероятность попадания истинного места судна в стохастическую составляющую безопасной области, величина которой близка к единице. Такие процедуры расчета параметров размера стохастической составляющей безопасной области надлежит разработать для пяти форм безопасной области с учетом трех возможных законов распределения позиционной векториальной погрешности (нормального и двух типов смешанных).

Для проведения указанных исследований необходимо разработать компьютерную имитационную программу, позволяющую реализовать каждую из 15 упомянутых процедур.

Решение третьей частной составной задачи предусматривает разработку способа выбора оптимальной формы безопасной области судна. При этом следует учесть выбранные для исследования формы безопасной области судна.

Для решения данной задачи надлежит разработать способ определения минимальных курсов уклонений судна при заданной форме безопасной области судна. С этой целью вначале следует определить размеры каждой из безопасных областей судна выбранных форм. В зависимости от формы безопасной области вычисляется минимальный курс уклонения, линия которого является касательной к границе безопасной области. Следует отметить, что при

неизменной относительной позиции судна и цели минимальный курс уклонения судна для безопасного расхождения с целью является постоянным и не зависит от ракурса цели только в случае, когда безопасная область цели имеет форму круга. Для других форм безопасной области цели минимальный курс уклонения судна зависит от ракурса цели. Поэтому для таких случаев необходимо разработать способ определения минимальных курсов уклонений судна, усредняя минимальные курсы уклонения судна при различных ракурсах цели.

Такой способ определения усредненного минимального курса уклонения требует разработки компьютерной программы, позволяющей производить расчет минимального курса уклонения судна для безопасных областей цели, форма которых отличается от круга.

Выбор оптимальной формы безопасной области заключается в расчете минимальных курсов уклонения судна для выбранных пяти форм безопасной области. В качестве оптимальной выбирается та форма, при которой минимальный курс уклонения судна принимает наименьшее значение.

Для расчета минимального курса уклонения компьютерная программа должна содержать модуль формирования безопасной области цели заданной формы и с учетом двумерного закона распределения, которая должна отображаться в центре экрана монитора.

Следует рассмотреть модуль ручного определения минимального курса уклонения судна при выбранном ракурсе цели, в этом случае необходимо обеспечить изменение положения судна относительно цели. Рекомендуется обеспечить изменение ракурса цели с шагом в 5° .

Компьютерная программа также должна содержать модуль автоматического определения минимального курса уклонения судна с помощью усреднения минимальных курсов уклонения судна для различных ракурсов цели, изменяющихся на 5° . Для работы данного модуля следует предварительно сделать выбор безопасной области цели желаемой формы.

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

- научным результатом первой составной задачи НР1 является способ аналитического описания безопасных областей судна с учетом существенных факторов;
- процедура расчета параметров стохастической области заданной формы является научным результатом НР2 второй составной задачи;
- метод выбора оптимальной формы безопасной области судна представляет собой научный результат НР3 третьей составной задачи.

В работе следует произвести имитационное моделирование основных теоретических результатов диссертационного исследования для подтверждения их корректности.

Полученные в диссертационной работе теоретические результаты и имитационное моделирование подтвердили принятую научную гипотезу о существовании возможности определения размеров безопасной области судна заданной формы и выбор оптимальной по выбранному критерию.

Практическая значимость проведенного диссертационного исследования заключается в том, что полученные в диссертации основные результаты могут быть использованы разработчиками в новых поколениях ЭКДИС и САРП, а также исследования могут быть применены при создании рекомендаций по предупреждению столкновений судов.

Результаты диссертационной работы имеют практическую ценность, которая определяется тем, что полученные в работе алгоритмы и программы могут быть применены при обучении 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 оптимальной формы безопасной области судна и расчета ее размеров, который отличается совместным учетом двумерной плотности распределения позиционной векториальной погрешности, габаритов судна и запаса расстояния на форс-мажорные обстоятельства.

2.3. Методика проведения основных этапов исследования по теме диссертационной работы.

Приведем краткую методику проведения основных этапов диссертационного исследования и методы, которые необходимы для решения поставленных в диссертации задач, главной и независимых составных.

С помощью метода дедукции производится обзор литературных источников и анализ основных подходов решения проблемы безопасности судовождения. Результатом обзора литературы и анализа проблематики является возможность выбора основного направления и темы диссертационного исследования.

Очередным этапом диссертационного исследования является декомпозиция главной задачи диссертации на три независимые составные задачи с помощью методов исследования операций, что обеспечивает методологическое обоснование научных исследований по теме диссертационной работы.

Для решения составных задач диссертационной работы следует произвести анализ по выбору наиболее используемых в судовождении форм безопасной области судна для дальнейшего выбора оптимальной формы.

Формализацию безопасной области цели следует производить, предварительно выделив детерминированную и стохастическую составляющие безопасной области и аналитически описать их границы с помощью методов аналитической геометрии и линейной алгебры.

Затем, используя методы теории вероятности, требуется разработать процедуру определения размеров стохастической составляющей безопасной области цели, учитывая их зависимость от двумерной плотности позиционной векториальной погрешности, которая может подчиняться закону Гаусса или двум типам смешанных законов распределения вероятностей.

С учетом дополнительно детерминированной составляющей определяются размеры безопасной области разной формы. После этого, используя методы математического программирования, следует разработать процедуру выбора оптимальной формы, обеспечивающей минимальное отклонение судна от программного курса для безопасного расхождения при опасном сближении.

В заключение работы необходимо произвести имитационное моделирование основных результатов диссертационной работы для проверки их корректности.

2.4. Выводы по второй главе

Вторая глава диссертации посвящена выбору тематики и основным направлениям диссертационного исследования.

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

Технологическая карта содержит цель диссертационного исследования и его главную задачу, которая представлена тремя независимыми составными задачами.

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

Основное научное положение исследования сформулировано в настоящей главе, показаны его практическая ценность и значимость, а также приведено содержание экспериментальной части.

Во второй главе также приведена основная методика решения поставленных в работе задач, - в ней определены основные этапы научного исследования по теме диссертации. В общем, она представляет собой обобщенный перечень этапов реализации исследования по теме диссертации и включает разработку теоретических моделей и проведение имитационного моделирования.

ГЛАВА 3

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ОБЛАСТИ ЦЕЛИ

3.1. Факторы, определяющие размеры безопасной области цели.

Проведенными исследованиями [113-117] были выявлены причины, влияющие на формирование судовой безопасной области. При выборе маневра расхождения судно и цель рассматриваются как точки, а безопасная область D_b формируется относительно цели. Траектория маневра расхождения судна не должна попадать в безопасную область. При этом инерционные характеристики судна учитываются при расчете курса и момента времени начала его маневра уклонения.

Поэтому размеры безопасной области D_b , которая рассчитывается судном и строится при цели, не учитывает инерционные характеристики судна. Зато на размеры области D_b влияют габариты судна и цели, явление присасывания, стохастические характеристики векториальной погрешности положения цели относительно судна и запас на форс-мажорные обстоятельства (непредвиденные поломки, лишаящие судно возможности управляться).

Используемые в настоящее время безопасные области имеют различную форму, обеспечивающую безопасное расхождение судна с целью. Для выбора наиболее предпочтительной формы безопасной области выбирается неизменная исходная относительная позиция судна и цели, а затем определяются минимальные отклонения ΔK_y курса уклонения судна от начального курса для безопасного расхождения с целью. Полученные отклонения курса судна $\Delta K_{y1}, \dots, \Delta K_{yi}, \dots, \Delta K_{yn}$ по каждой из областей сравниваются между собой и оптимальной является та форма безопасной области, для которой значение отклонения ΔK_{y0} принимает минимальное значение т.е.

$$\Delta K_{y0} = \min \{ \Delta K_{y1}, \dots, \Delta K_{yi}, \dots, \Delta K_{yn} \}.$$

Рассмотрим учет габаритов судна и цели в безопасной области D_b . Прежде всего, следует учесть габариты цели, т. е. ее длину L_t и ширину B_t , которые представляют размеры области габаритов цели, имеющую форму прямоугольника, ориентированного по направлению диаметральной плоскости цели. Длина данной области состоит из двух составляющих: L_{tn} и L_{tk} - соответственно расстояния от обсервованной точки цели до носовой оконечности цели и до кормовой оконечности, причем $L_{tn} = 0,7L_t$ и $L_{tk} = 0,3L_t$. Ширина области габаритов цели равна ее ширине B_t . Учет габаритов судна производится по следующим соображениям. При сближении с целью на противоположных курсах и носовых курсовых углах судна к ширине области габаритов цели добавляется величина, равная половине ширине судна $0,5B_v$, где B_v - ширина судна. На такую же величину увеличивается длина области габаритов цели, если сближение происходит на взаимно перпендикулярных курсах.

Таким образом, совместный учет габаритов судна и цели будем характеризовать областью габаритов D_s , которая имеет прямоугольную форму и размеры: длину $L_s = L_t + B_v$ и ширину $B_s = B_t + B_v$, как показано на рис. 3.1.

Явление присасывания учитывается средним значением максимальной дистанции L_{pr} , при которой начинает проявляться присасывание. Следовательно, прямоугольную область D_s необходимо увеличить на величину L_{pr} с каждой стороны.

Учет форс-мажорных обстоятельств можно произвести, следуя рекомендациям, изложенным в работе [6]. Для этого задается дистанция от обсервованной точки цели по носу L_{fnn} , по корме L_{fmk} и по бортам B_{fmb} . Указанные дистанции добавляются к размерам ранее полученной области с учетом явления присасывания. Таким образом, рассмотренные три фактора формирования безопасной области D_b , а именно габариты судна и цели,

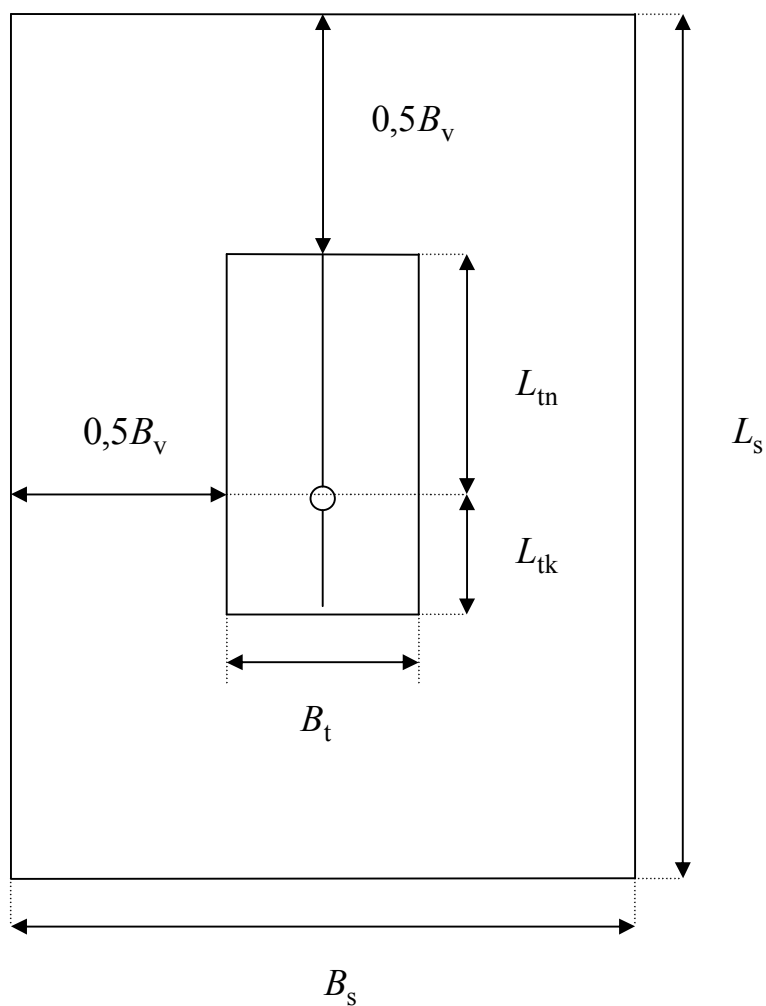


Рис. 3.1. Область габаритов D_s

явление присасывания и форс-мажорные обстоятельства, формируют детерминированную прямоугольную область D_{det} , ориентированную по направлению диаметральной плоскости цели и расположенную относительно обсервованной точки цели. Расстояние от точки цели в сторону носа цели $L_{\text{det n}}$ области D_{det} определяется выражением:

$$L_{\text{det n}} = 0,7L_t + 0,5B_v + L_{\text{pr}} + L_{\text{fnn}}.$$

Расстояние от точки цели в сторону ее кормы $L_{\text{det k}}$ равно:

$$L_{\text{det k}} = 0,3L_t + 0,5B_v + L_{\text{pr}} + L_{\text{fmk}}.$$

Область D_{det} по ширине B_{det} симметрична относительно наблюдаемой точки цели, причем:

$$B_{\text{det}} = B_t + B_v + 2(L_{\text{pr}} + B_{\text{fmb}}).$$

Детерминированная область цели D_{det} показана на рис. 3.2.

В данном случае детерминированная область цели D_{det} имеет форму прямоугольника. Эту же область можно представить в другой форме.

Рассмотрим возможность представления детерминированной области цели D_{det} в форме круга. В этом случае круговую форму имеет область габаритов D_s , причем ее радиус R_s определяется следующим выражением:

$$R_s = 0,7L_t + 0,5B_v.$$

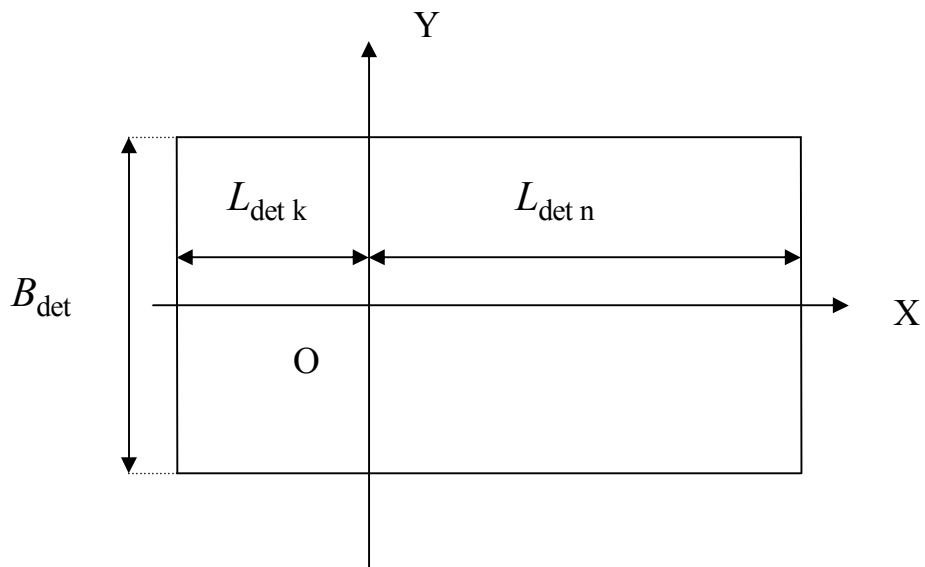


Рис. 3.2. Детерминированная область цели D_{det}

Явление присасывания и возможность форс-мажорных обстоятельств учитываются прибавлением к радиусу R_s значений L_{pr} и L_{fmb} , поэтому детерминированная область цели D_{det} круговой формы определяется радиусом R_{det} , величина которого:

$$R_{\text{det}} = 0,7L_t + 0,5B_v + L_{\text{pr}} + L_{\text{fmb}}.$$

В случае, когда детерминированную область цели D_{det} необходимо задать в форме эллипса (рис. 3.3), то, очевидно, полуоси эллипса выражаются следующим образом:

$$a_{\text{det}} = 0,5(L_{\text{det n}} + L_{\text{det k}}) \text{ и } b_{\text{det}} = 0,5B_{\text{det}},$$

причем центр эллипса смещен относительно обсервованной точки цели по оси X в нос на величину $\Delta X_{\text{det}} = 0,5(L_{\text{det n}} - L_{\text{det k}})$.

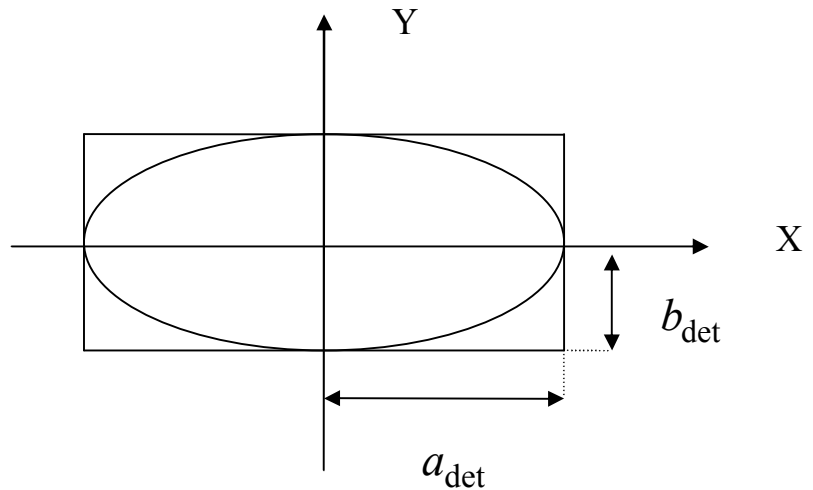


Рис. 3.3. Детерминированная область цели D_{det} эллиптической формы

Таким образом, детерминированную область цели D_{det} можно задать разными формами: в виде круга ($D_{\text{det}}^{(\text{Rd})}$), в виде эллипса ($D_{\text{det}}^{(\text{El})}$) и прямоугольной формы ($D_{\text{det}}^{(\text{Rt})}$).

Помимо детерминированной области D_{det} безопасную область цели D_{b} формирует еще и стохастическая область, которую обозначим D_{st} . Так, как безопасная область цели D_{b} является объединением детерминированной D_{det} и стохастической D_{st} областей, причем области D_{b} и D_{det} могут выражаться

в различных заданных формах, то возникает вопрос, какую форму имеет стохастическая область D_{st} при заданных формах областей D_b и D_{det} .

В общем случае соотношение между областями имеют следующий вид:

$$D_b = D_{det} \cup D_{st} \text{ и } D_{st} = D_b - D_{det}.$$

Следовательно, для выявления формы стохастической области D_{st} необходимо рассмотреть возможные формы безопасной области цели D_b , учитывая, что детерминированная область может представляться в трех формах: круга $D_{det}^{(Rd)}$, эллипса $D_{det}^{(El)}$ и прямоугольника $D_{det}^{(Rt)}$.

3.2. Возможные формы безопасной и стохастической областей

В настоящее время предложено более десяти форм безопасной области цели D_b [Вагуш]. Рассмотрим наиболее часто используемые пять форм безопасной области, которые показаны на рис. 3.4., и обозначим их следующим образом:

- 1 - $D_b^{(Rd)}$ - форма круга с целью в центре;
- 2 - $D_b^{(El)}$ - форма эллипса со смещенной целью;
- 3 - $D_b^{(Rt)}$ - форма прямоугольника со смещенной целью;
- 4 - $D_b^{(Cm)}$ - сложная форма со смещенной целью;
- 5 - $D_b^{(RE)}$ - форма полукруг – полуэллипс со смещенной целью.

Причем первые три типа безопасной области цели D_b являются простыми, а два последних – сложными. Размеры области D_b в зависимости от ее формы характеризуются следующими параметрами.

Первая область $D_b^{(Rd)}$ имеет форму круга с единственной характеристикой – радиусом R_b . Вторая область $D_b^{(El)}$, имеющая эллиптическую форму,

характеризуется тремя параметрами: полуосями a_b и b_b , а также смещением ΔX_b обсервованной точки цели относительно центра области D_b .

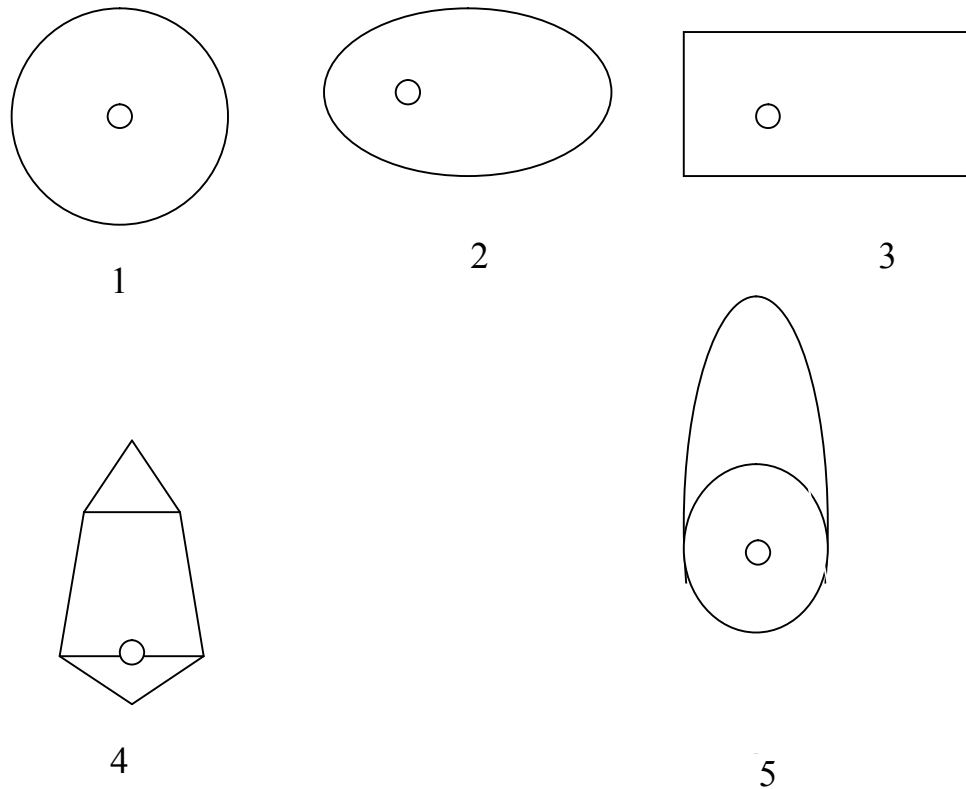


Рис. 3.4. Основные формы безопасной области цели D_b

Третья область $D_b^{(Rt)}$ прямоугольной формы определяется также тремя параметрами: длина области от обсервованной точки цели в носовом направлении L_{bn} , в кормовом направлении - L_{bk} и ширина области B_b . Четвертая область $D_b^{(Cm)}$ сложной формы имеет четыре параметра: носовая L_{bn} и кормовая L_{bk} части длины области, а также меньшая b_1 и большая b_2 ширина области (рис. 3.5).

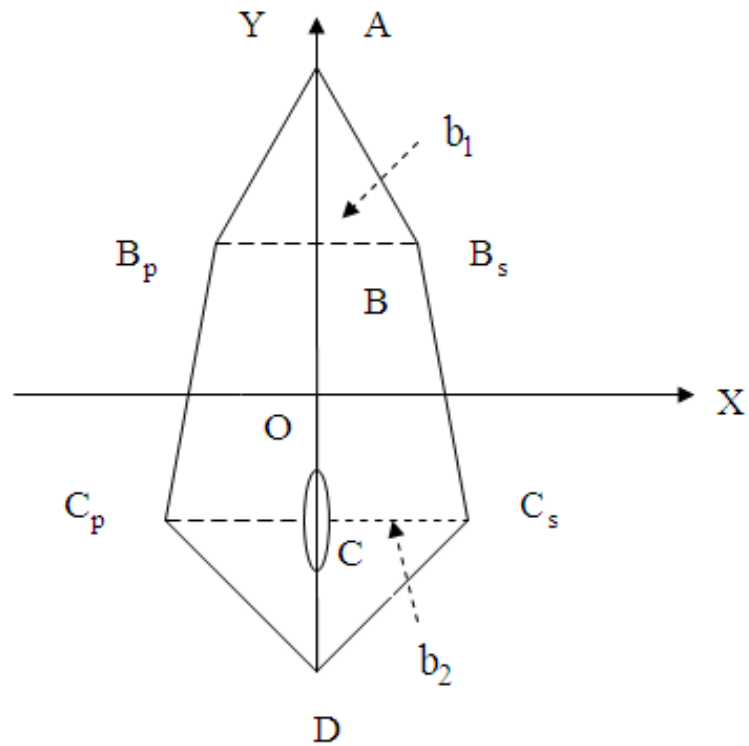


Рис. 3.5. Безопасная область $D_b^{(Cm)}$ цели сложной формы

И, наконец, пятая область $D_b^{(RE)}$, имеющая форму полукруга полуэллипса, характеризуется двумя параметрами: радиусом круга R_b и большей полуосью эллипса a_b (рис. 3.6).

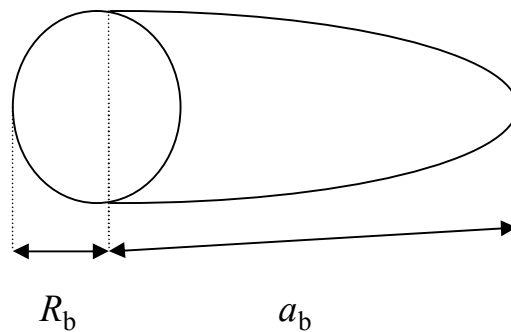


Рис 3.6. Безопасная область $D_b^{(RE)}$ цели пятого типа

Рассматриваемой в подразделе задачей является определение возможных форм стохастической области D_{st} , поэтому следует аналитически описать границы рассмотренных безопасных и детерминированных областей D_b и D_{det} , позволяющих получить уравнения границ области D_{st} .

Отметим, что три формы (круговая, эллиптическая и прямоугольная) областей D_b и D_{det} совпадают. В случае круговой области, ее граница в системе координат, начало которой совпадает с обсервованной точкой цели (рис. 3.7) имеет вид:

$$X^2 + Y^2 = R^2.$$

Уравнение границы эллиптической области в той же системе координат имеет стандартный вид:

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1.$$

В обоих рассмотренных случаях имеются в виду обе области, т.е. безопасная и детерминированная D_b и D_{det} .

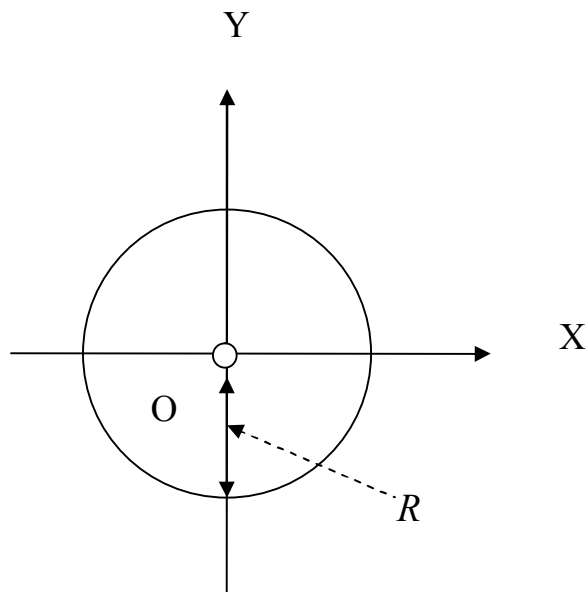


Рис 3.7. Области круговой формы

В случае прямоугольной формы уравнение границы области выражается следующим образом (рис.3.8):

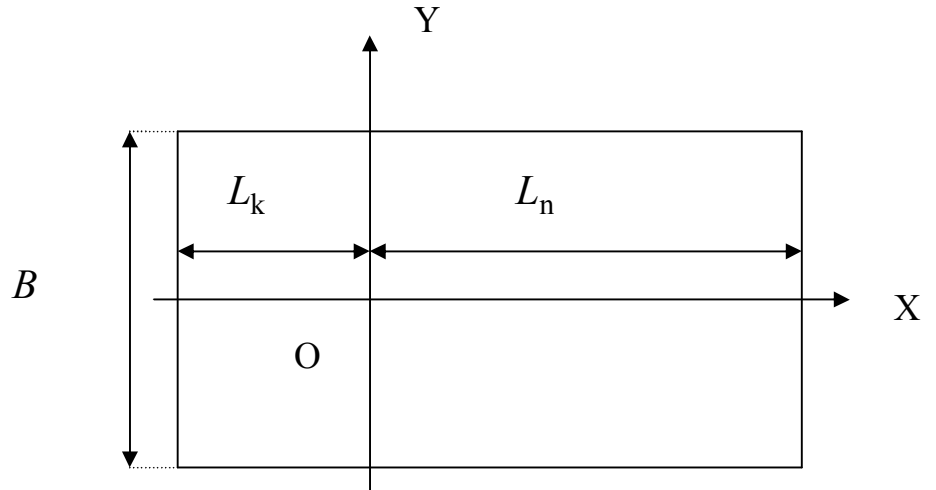


Рис 3.8. Границы области прямоугольной формы

$$y \in \left[-\frac{B}{2}, \frac{B}{2}\right], \text{ при } x = -L_k \text{ и } x = L_n,$$

$$y = -\frac{B}{2}, \text{ при } x \in [-L_k, L_n] \text{ и } y < 0,$$

$$y = \frac{B}{2}, \text{ при } x \in [-L_k, L_n] \text{ и } y > 0.$$

В случае сложной формы безопасной области $D_b^{(Cm)}$ цели выразим ее параметры (рис. 3.4) через ее длину a , которая равна $a = L_{bn} + L_{bk}$, учитывая, что $AB = BO = OC = CD = 0,25a$. При этом $b_1 = 0,5a$ и $b_2 = 0,7a$.

Уравнение границы области $D_b^{(Cm)}$ в координатной системе OXY $y = f(x)$ принимает следующий вид:

$$y = \begin{cases} -0,5a + \frac{0,25}{0,35}x, & \text{если } -0,5a < y < -0,25a; \quad x \in [0, 0,35a]; \\ 1,5a - 5x, & \text{если } -0,25a < y < 0,25a; \quad x \in [0,35a, 0,25a]; \\ 0,5a - x, & \text{если } 0,25a < y < 0,5a; \quad x \in [0, 0,25a]; \\ 0,5a + x, & \text{если } 0,25a < y < 0,5a; \quad x \in [-0,25a, 0]; \\ 1,5a + 5x, & \text{если } -0,25a < y < 0,25a; \quad x \in [-0,35a, -0,25a]; \\ -0,5a - \frac{0,25}{0,35}x, & \text{если } -0,5a < y < -0,25a; \quad x \in [0, -0,35a]. \end{cases}$$

В заключительном случае безопасной области $D_b^{(RE)}$ (рис. 5) уравнение границы области имеет вид:

$$y = \begin{cases} X^2 + Y^2 = R_b^2, & \text{если, } x < 0, \\ \frac{X^2}{a_b^2} + \frac{Y^2}{R_b^2} = 1, & \text{если } x > 0. \end{cases}$$

При исследовании вопроса формы области стохастической области D_{st} следует учитывать определяющее соотношение $D_{st} = D_b - D_{det}$, причем области D_b и D_{det} должны быть одинаковой формы, что возможно для первых трех типов областей.

Рассмотрим случай, когда безопасная область имеет форму круга $D_b^{(Rd)}$. В этом случае детерминированная область также должна иметь форму круга, т.е. $D_{det}^{(Rd)}$. В этом случае форма стохастической области D_{st1} определяется соотношением $D_{st1} = D_b^{(Rd)} - D_{det}^{(Rd)}$. Предварительный анализ показал, что в данном случае целесообразно использовать уравнение окружности в полярных координатах. Связь между полярными координатами (α, d) и прямоугольными выражается соотношением:

$$X = d \sin \alpha \text{ и } Y = d \cos \alpha, \text{ откуда} \\ d = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right).$$

В прямоугольной системе координат уравнение окружности имеет вид:

$$X^2 + Y^2 = R^2,$$

что с использованием переходных формул дает уравнение окружности в полярных координатах: $d = R$. Полученное уравнение показывает, что дистанция d для всех точек окружности не зависит от направления α и равна радиусу R .

Уравнения границ областей $D_b^{(Rd)}$ и $D_{det}^{(Rd)}$ имеет соответственно вид:

$$D_b^{(Rd)} \rightarrow d = R_b; \quad D_{det}^{(Rd)} \rightarrow d = R_{det}. \quad (3.1)$$

Поэтому из соотношения $D_{st1} = D_b^{(Rd)} - D_{det}^{(Rd)}$ следует, что область D_{st1} имеет границу $d = R_b - R_{det}$, что означает круглую форму области D_{st1} , т. е. $D_{st1} = D_{st}^{(Rd)}$. Следовательно, безопасной области $D_b^{(Rd)}$ соответствует стохастическая область той же формы $D_{st}^{(Rd)}$ с радиусом R_{st} .

Рассмотрим уравнение эллипса в полярной системе координат. Для этого в уравнение $\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{b^2} = 1$ следует подставить переходные выражения X и Y :

$$\frac{(d \sin \alpha)^2}{a^2} + \frac{(d \cos \alpha)^2}{b^2} = 1, \text{ откуда получим:}$$

$$d^2 (b^2 \sin^2 \alpha + a^2 \cos^2 \alpha) = a^2 b^2, \text{ или}$$

$$d^2 = \frac{a^2 b^2}{b^2 \sin^2 \alpha + a^2 \cos^2 \alpha}. \quad (3.2)$$

Полученное выражение является уравнением эллипсом в полярной системе координат. Его анализ показывает, что при $\alpha = 0$ и $\alpha = 180$ $d^2 = b^2$, т. е. расстояние равно малой полуоси эллипса.

Если же $\alpha = 90$ или $\alpha = 270$, то $d^2 = a^2$, т. е. расстояние равно большой полуоси эллипса.

Для рассматриваемого случая области $D_b^{(El)}$ и $D_{det}^{(El)}$ при $\alpha = 0$ и $\alpha = 180$ характеризуются соотношениями:

$$D_b^{(El)} \rightarrow d = b_b; \quad D_{det}^{(El)} \rightarrow d = b_{det}.$$

Поэтому из соотношения $D_{st2} = D_b^{(El)} - D_{det}^{(El)}$ следует, что для области D_{st2} справедливо соотношение $d = b_b - b_{det}$, при $\alpha = 0$ и $\alpha = 180$ и $d = a_b - a_{det}$, при $\alpha = 90$ или $\alpha = 270$. Таким образом, стохастическая область D_{st2} является эллипсом, полуоси которого $b_{st} = b_b - b_{det}$ и $a_{st} = a_b - a_{det}$. Поэтому $D_{st2} = D_{st}^{(El)}$.

Для прямоугольной формы безопасной области $D_b^{(Rt)}$ уравнение границы имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} y &\in \left[-\frac{B_b}{2}, \frac{B_b}{2}\right], \text{ при } x = -L_{bk} \text{ и } x = L_{bn}, \\ y &= -\frac{B_b}{2}, \text{ при } x \in [-L_{bk}, L_{bn}] \text{ и } y < 0, \\ y &= \frac{B_b}{2}, \text{ при } x \in [-L_{bk}, L_{bn}] \text{ и } y > 0. \end{aligned}$$

Уравнение границы прямоугольной формы детерминированной области $D_{det}^{(Rt)}$ описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} y &\in \left[-\frac{B_{det}}{2}, \frac{B_{det}}{2}\right], \text{ при } x = -L_{detk} \text{ и } x = L_{detn}, \\ y &= -\frac{B_{det}}{2}, \text{ при } x \in [-L_{detk}, L_{detn}] \text{ и } y < 0, \\ y &= \frac{B_{det}}{2}, \text{ при } x \in [-L_{detk}, L_{detn}] \text{ и } y > 0. \end{aligned}$$

Очевидно, для стохастической области D_{st3} соотношение $D_{st3} = D_b^{(Rt)} - D_{det}^{(Rt)}$ границы имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} y &\in \left[-\frac{B_b - B_{det}}{2}, \frac{B_b - B_{det}}{2}\right], \text{ при } x = -L_{bk} - L_{detk} \text{ и } x = L_{bn} - L_{detn}, \\ y &= -\frac{B_b - B_{det}}{2}, \text{ при } x \in [-(L_{bk} - L_{detk}), L_{bn} - L_{detn}] \text{ и } y < 0, \\ y &= \frac{B_b - B_{det}}{2}, \text{ при } x \in [-(L_{bk} - L_{detk}), L_{bn} - L_{detn}] \text{ и } y > 0. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Таким образом, стохастическая область D_{st3} имеет прямоугольную форму с параметрами $L_{stn} = L_{bn} - L_{detn}$, $L_{stk} = L_{bk} - L_{detk}$ и $B_{st} = B_b - B_{det}$. Следовательно, $D_{st3} = D_{st}^{(Rt)}$.

Рассмотрим безопасную область сложной формы $D_b^{(Cm)}$ и соответствующую ему стохастическую область D_{st4} . Особенностью этого случая является то, что отсутствует соответствующая форма детерминированной области D_{det} . Поэтому для поиска разностной области $D_b^{(Cm)} - D_{det}$ в качестве D_{det} следует выбрать наиболее близкую по форме, т.е. прямоугольную детерминированную область $D_{det}^{(Rt)}$. С учетом указанного рассмотрим выражение $D_{st4} = D_b^{(Cm)} - D_{det}^{(Rt)}$. При описании сложной формы безопасной области $D_b^{(Cm)}$ будем полагать, что меньшая ширина b_1 области $D_b^{(Cm)}$ равна ширине B_{det} детерминированной области $D_{det}^{(Rt)}$ (рис. 3.9). В этом

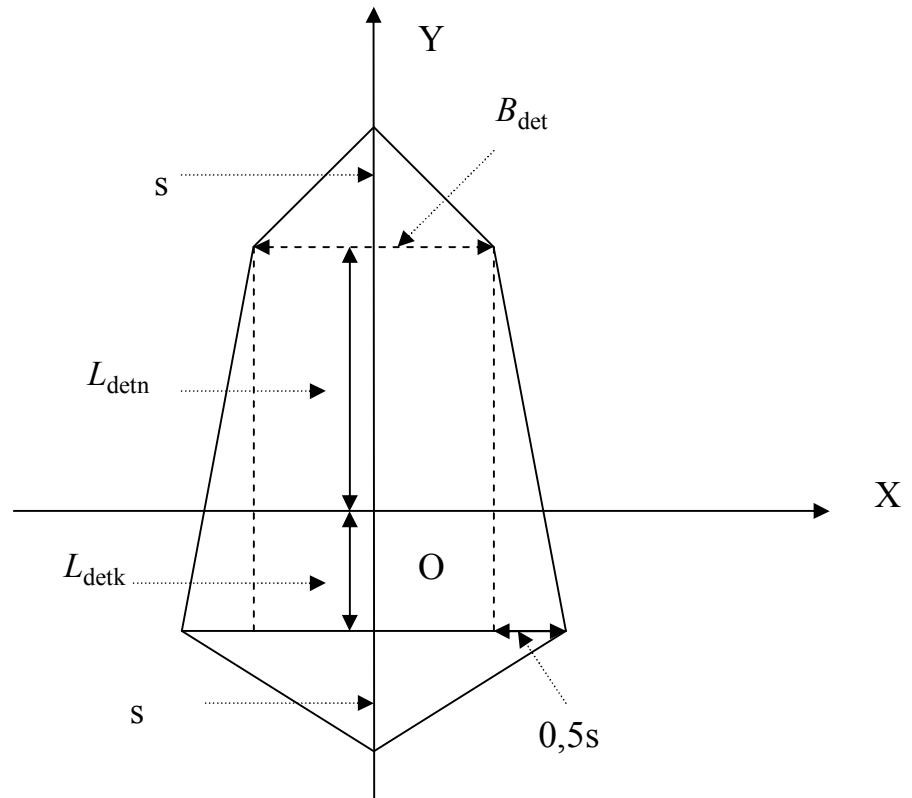


Рис 3.9. Границы безопасной $D_b^{(Cm)}$ и детерминированной $D_{det}^{(Rt)}$ областей

случае граница безопасной области сложной формы $D_b^{(Cm)}$ описывается следующим уравнением:

$$y = \begin{cases} -(s + L_{detk}) + \frac{s}{0,5(s + B_{det})} x, & \text{если } -(s + L_{detk}) < y < -L_{detk}; \quad x \in [0, 0,5(s + B_{det})]; \\ -L_{detk} + \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0, s} x, & \text{если } -L_{detk} < y < L_{detn}; \quad x \in [0,5(s + B_{det}), 0,5B_{det}]; \\ L_{detn} + s - \frac{s}{0,5B_{det}} x, & \text{если } L_{detn} < y < L_{detn} + s; \quad x \in [0,5B_{det}, 0]; \\ L_{detn} + s + \frac{s}{0,5B_{det}} x, & \text{если } L_{detn} < y < L_{detn} + s; \quad x \in [0, -0,5B_{det}]; \\ L_{detn} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0, s} x, & \text{если } -L_{detk} < y < L_{detn}; \quad x \in [-0,5B_{det}, -0,5(s + B_{det})]; \\ -L_{detk} - s + \frac{s}{0,5(s + B_{det})} x, & \text{если } -(s + L_{detk}) < y < -L_{detk}; \quad x \in [0, 0,5(s + B_{det})]. \end{cases}$$

Так, как граница детерминированной области $D_{det}^{(Rt)}$ записывается следующим образом:

$$y \in \left[-\frac{B_{det}}{2}, \frac{B_{det}}{2}\right], \text{ при } x = -L_{detk} \text{ и } x = L_{detn},$$

$$y = -\frac{B_{det}}{2}, \text{ при } x \in [-L_{detk}, L_{detn}] \text{ и } y < 0,$$

$$y = \frac{B_{det}}{2}, \text{ при } x \in [-L_{detk}, L_{detn}] \text{ и } y > 0,$$

то разностная область, которая является стохастической областью D_{st4} , показана на рис. 3.10, а ее аналитический вид представляется следующим образом:

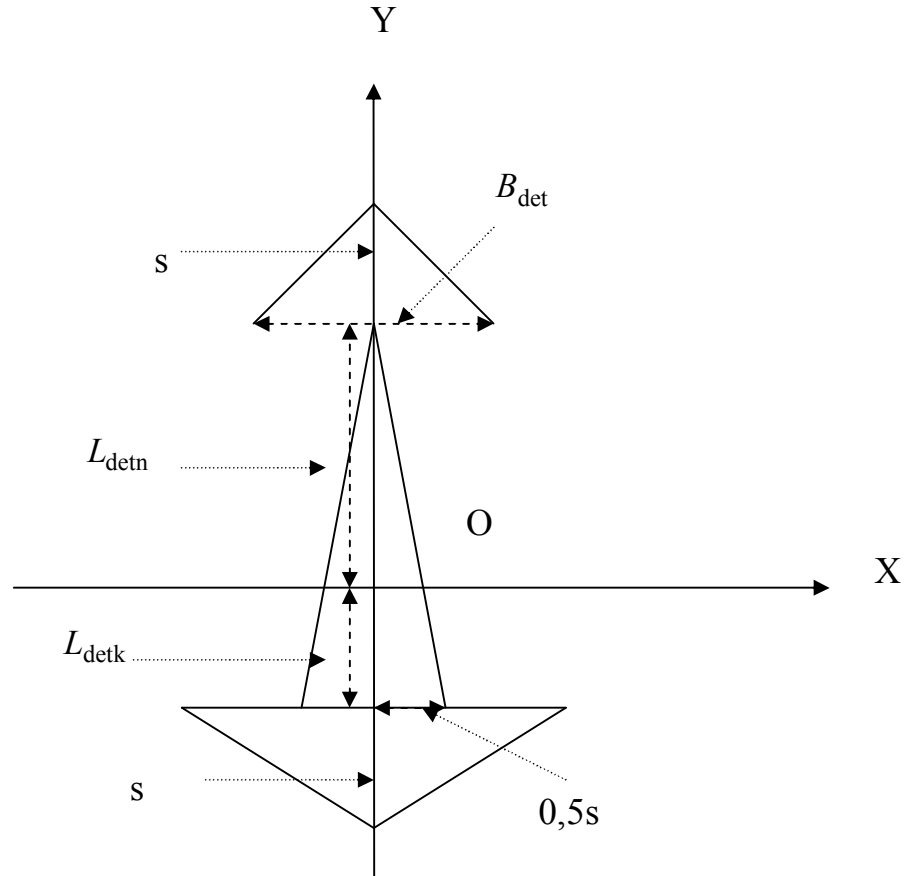


Рис. 3.10. Границы стохастической области D_{st4}

$$y = \begin{cases} -L_{\text{detk}} - s + \frac{s}{0,5(s + B_{\text{det}})} x, & \text{если } -(L_{\text{detk}} + s) < y < -L_{\text{detk}}; \quad x \in [0, 0,5(s + B_{\text{det}})]; \\ -L_{\text{detk}}, & \text{если } x \in [-0,5(s + B_{\text{det}}), 0,5(s + B_{\text{det}})]; \\ L_{\text{detn}} - \frac{L_{\text{detk}} + L_{\text{detn}}}{0,5s} x, & \text{если } -L_{\text{detk}} < y < L_{\text{detn}}; \quad x \in [0, 0,5s]; \\ L_{\text{detn}}, & \text{если } x \in [-0,5B_{\text{det}}, 0,5B_{\text{det}}]; \\ L_{\text{detn}} + \frac{s}{0,5B_{\text{det}}} x, & \text{если } L_{\text{detn}} < y; \quad x \in [0, 0,5B_{\text{det}}]; \\ L_{\text{detn}} + s - \frac{s}{0,5B_{\text{det}}} x, & \text{если } L_{\text{detn}} < y; \quad x \in [-0,5B_{\text{det}}, 0]; \\ L_{\text{detn}} + \frac{L_{\text{detk}} + L_{\text{detn}}}{0,5s} x, & \text{если } -L_{\text{detk}} < y < L_{\text{detn}}; \quad x \in [0, -0,5s]; \\ -L_{\text{detk}} - s - \frac{s}{0,5(s + B_{\text{det}})} x, & \text{если } -(L_{\text{detk}} + s) < y < -L_{\text{detk}}; \quad x \in [0, -0,5(s + B_{\text{det}})]; \end{cases} \quad (3.4)$$

Безопасная область $D_b^{(\text{RE})}$ цели пятого типа имеет сложную форму полукруга – полуэллипса, причем детерминированные области не имеют такой формы. Поэтому для определения стохастической области в данном случае детерминированную область можно также представить в виде сложной формы полукруга – полуэллипса со следующими параметрами: радиусом $R_{\text{det}} = L_{\text{detk}}$, меньшим полудиаметром $b_{\text{det}} = R_{\text{det}}$ и большим полудиаметром $a_{\text{det}} = 0,5(L_{\text{detk}} + L_{\text{detn}})$. Тогда стохастическая область для рассматриваемого случая D_{st5} определяется соотношением $D_{\text{st5}} = D_b^{(\text{RE})} - D_{\text{det}}^{(\text{RE})}$. Приведем уравнения границ областей $D_b^{(\text{RE})}$ и $D_{\text{det}}^{(\text{RE})}$. Так, для безопасной области $D_b^{(\text{RE})}$:

$$y = \begin{cases} X^2 + Y^2 = R_b^2, & \text{если } x < 0, \\ \frac{X^2}{a_b^2} + \frac{Y^2}{R_b^2} = 1, & \text{если } x > 0. \end{cases}$$

Для детерминированной области $D_{\text{det}}^{(\text{RE})}$ граница выражается следующим образом:

$$y = \begin{cases} X^2 + Y^2 = R_{\text{det}}^2, & \text{если } x < 0, \\ \frac{X^2}{a_{\text{det}}^2} + \frac{Y^2}{R_{\text{det}}^2} = 1, & \text{если } x > 0. \end{cases}$$

Для определения формы разностной стохастической области D_{st5} следует записать уравнения границ областей $D_{\text{b}}^{(\text{RE})}$ и $D_{\text{det}}^{(\text{RE})}$ в полярной системе координат. Используя ранее полученные выражения (3.1) и (3.2), записываем уравнение границы безопасной области $D_{\text{b}}^{(\text{RE})}$ в полярной системе координат:

$$d = \begin{cases} R_{\text{b}}, & \text{если } \alpha \in [\pi, 2\pi], \\ \sqrt{\frac{a_{\text{b}}^2 R_{\text{b}}^2}{R_{\text{b}}^2 \sin^2 \alpha + a_{\text{b}}^2 \cos^2 \alpha}}, & \text{если } \alpha \in [0, \pi]. \end{cases}$$

Аналогично, уравнение границы для детерминированной области $D_{\text{det}}^{(\text{RE})}$ имеет следующий вид:

$$d = \begin{cases} R_{\text{det}}, & \text{если } \alpha \in [\pi, 2\pi], \\ \sqrt{\frac{a_{\text{det}}^2 R_{\text{det}}^2}{R_{\text{det}}^2 \sin^2 \alpha + a_{\text{det}}^2 \cos^2 \alpha}}, & \text{если } \alpha \in [0, \pi]. \end{cases}$$

Поэтому для стохастической области D_{st5} граница выражается следующим образом:

$$d = \begin{cases} R_{\text{b}} - R_{\text{det}}, & \text{если } \alpha \in [\pi, 2\pi], \\ \sqrt{\frac{(a_{\text{b}} - a_{\text{det}})^2 (R_{\text{b}} - R_{\text{det}})^2}{(R_{\text{b}} - R_{\text{det}})^2 \sin^2 \alpha + (a_{\text{b}} - a_{\text{det}})^2 \cos^2 \alpha}}, & \text{если } \alpha \in [0, \pi]. \end{cases} \quad (3.5)$$

Из полученного выражения (3.5) следует, что стохастическая область D_{st5} имеет форму полукруга – полуэллипса с параметрами $R_{\text{st}} = R_{\text{b}} - R_{\text{det}}$ и $a_{\text{st}} = a_{\text{b}} - a_{\text{det}}$. Таким образом, $D_{\text{st5}} = D_{\text{st}}^{(\text{RE})}$.

Таким образом, для всех пяти форм безопасной области D_b получены формы и уравнения границ стохастических областей D_{st} .

3.3. Определение размеров стохастической области

Будем считать, что точность определения положения цели относительно судна известна и характеризуется двумерной плотностью распределения $f(x, y)$ векториальной погрешности. Также предполагается, что место цели получено с максимально возможной точностью, т.е. оценки ее обсервованных координат являются эффективными. Поэтому центр стохастической области D_{st} целесообразно связать с местом цели, в котором элементы ковариационной матрицы достигают минимума.

Двумерная область D_{st} , построенная относительно места цели, с заданной вероятностью P_d , близкой к единице, должна содержать (накрывать) истинное место судна. Для поиска двумерной области D_{st} следует воспользоваться следующим уравнением:

$$\iint_{D_{st}} f(x, y) dx dy = P_d. \quad (3.6)$$

Покажем, что область D_{st} , соответствующая некоторой заданной вероятности P_d , действительно будет минимальной, если ее центр симметрии будет совпадать с обсервованной точкой. Очевидно, чем меньше дисперсии ковариационной матрицы распределения, тем меньше размеры области D_{st} , накрывающей с заданной вероятностью P_d истинное место судна. Запишем выражения для дисперсий D_X и D_Y ковариационной матрицы, если они зада-

ны относительно обсервованной точки, когда математические ожидания равны нулю:

$$D_X = \int_{R_2} x^2 f(x, y) dx dy; \quad D_Y = \int_{R_2} y^2 f(x, y) dx dy.$$

Если записать выражения для дисперсий относительно точки, не совпадающей с обсервованной и смещенной на величины X_o и Y_o , то получим:

$$\begin{aligned} D_X(X_o) = \int_{R_2} (x - X_o)^2 f(x, y) dx dy &= \int_{R_2} (x^2 - 2xX_o + X_o^2) f(x, y) dx dy = \\ &= \int_{R_2} x^2 f(x, y) dx dy - 2X_o \int_{R_2} x f(x, y) dx dy + X_o^2 \int_{R_2} f(x, y) dx dy. \end{aligned}$$

Если учесть, что второе слагаемое полученного выражения содержит в качестве сомножителя математическое ожидание центрированной случайной величины, равное нулю, то получим:

$$D_X(X_o) = D_X + X_o^2,$$

так как $\int_{R_2} f(x, y) dx dy = 1$.

Аналогично получаем выражение для дисперсии $D_Y(Y_o)$:

$$D_Y(Y_o) = \int_{R_2} (y - Y_o)^2 f(x, y) dx dy = D_Y + Y_o^2.$$

Анализ полученных выражений для дисперсий $D_X(X_o)$ и $D_Y(Y_o)$ показывает, что они достигают своего минимального значения при $X_o = 0$ и $Y_o = 0$, т.е. при отсутствии смещений относительно обсервованной точки. Полученный вывод подтверждает необходимость выбора центра области D_{st} в обсервованной точке цели, чем достигается минимизация ее размеров.

Рассмотрим уравнение (3.6) для различных форм стохастической области D_{st} , учитывая аналитическое выражение ее границ, которые для разных форм представлены ранее полученными зависимостями (3.3)...(3.5).

Рассмотрим стохастическую область круговой формы $D_{st}^{(Rd)}$. Уравнение ее границы записываем в виде:

$$y = \pm \sqrt{R^2 - x^2}.$$

В этом случае область $D_{st}^{(Rd)}$ можно представить в виде четырех равных секторов, как показано на рис. 3.11.

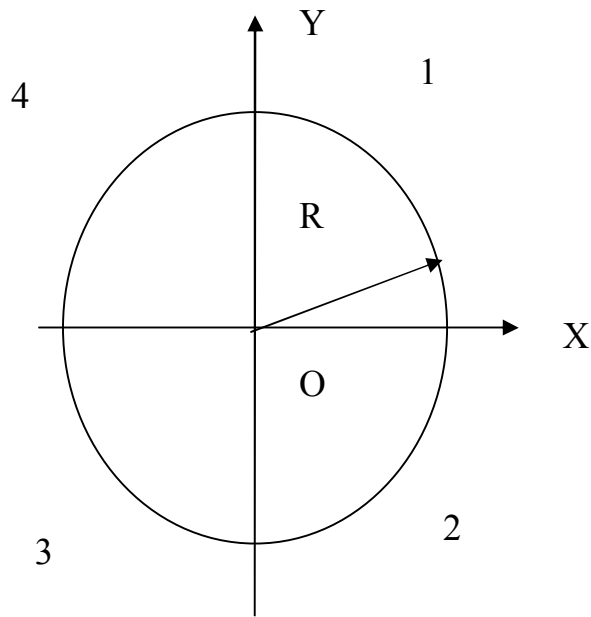


Рис. 3.11. Представление стохастической области $D_{st}^{(Rd)}$

Уравнение (3.6) можно записать в следующем виде:

$$4 \iint_{\frac{1}{4}D_{st}} f(x, y) dx dy = P_d. \quad (3.7)$$

В свою очередь для одного сектора справедливо выражение:

$$\int_0^R \int_0^{\sqrt{R^2 - x^2}} f(x, y) dy dx = \frac{1}{4} P_d,$$

с учетом которого, уравнение (3.7) принимает вид:

$$4 \int_0^{R\sqrt{R^2 - x^2}} \int_0^R f(x, y) dy dx = P_d. \quad (3.8)$$

Решая данное уравнение относительно переменной R , определяем размеры стохастической области $D_{st}^{(Rd)}$.

Если стохастическая область принимает форму эллипса, т.е. реализуется стохастическая область $D_{st}^{(El)}$, то следует записать уравнение ее границы в следующем виде:

$$y = \pm b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}, \text{ или } y = \pm \gamma \sqrt{a^2 - x^2},$$

где $\gamma = b/a$ – сжатие эллипса.

Аналогично предыдущему случаю область $D_{st}^{(El)}$ целесообразно представить в виде четырех равных частей (рис. 3.12).

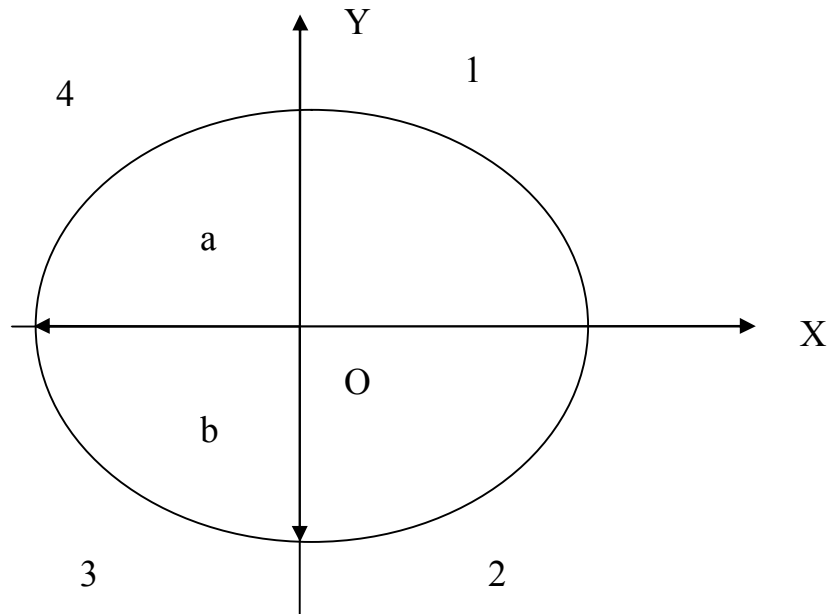


Рис. 3.12. Представление стохастической области $D_{st}^{(El)}$

Для одной части стохастической области $D_{st}^{(El)}$ справедливо выражение:

$$\int_0^a \gamma \sqrt{a^2 - x^2} \int_0^{\gamma \sqrt{a^2 - x^2}} f(x, y) dy dx = \frac{1}{4} P_d,$$

Поэтому уравнение (3.6) для определения параметров области $D_{st}^{(El)}$ принимает следующий вид:

$$4 \int_0^a \gamma \sqrt{a^2 - x^2} \int_0^{\gamma \sqrt{a^2 - x^2}} f(x, y) dy dx = P_d. \quad (3.9)$$

Решаем полученное уравнение относительно переменной a , а затем с помощью сжатия γ определяется меньшая полуось b .

Рассмотрим случай, когда реализуется стохастическая область $D_{st}^{(Rt)}$, имеющая прямоугольную форму.

Прямоугольную форму стохастической области $D_{st}^{(Rt)}$ цели представим через единичный элемент размера r , причем:

$$B_{st} = n_b r, \quad L_{stn} = n_n r, \quad L_{stk} = n_k r, \quad (3.10)$$

где n_b, n_n и n_k принимают целочисленные значения.

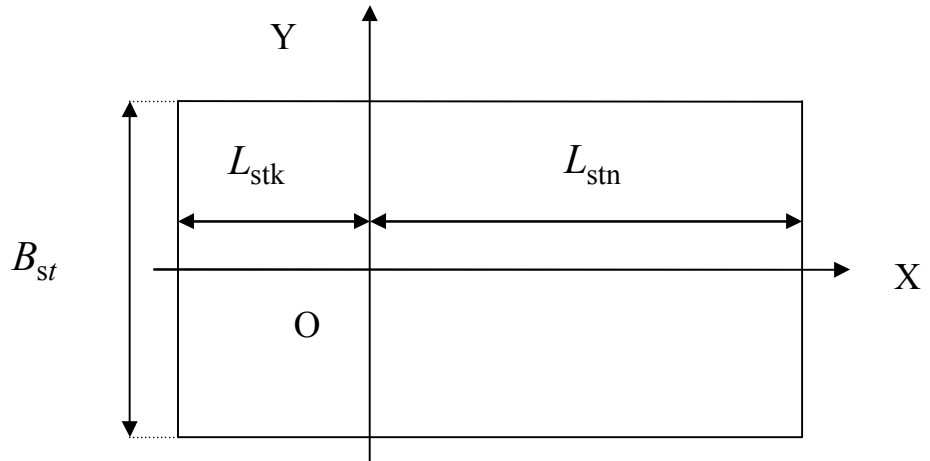


Рис. 3.13. Представление стохастической области $D_{st}^{(Rt)}$

Исходя из рис. 3.13 и учитывая уравнения (3.3) границы стохастической

области $D_{st}^{(Rt)}$, отмечаем, что область $D_{st}^{(Rt)}$ симметрична относительно оси ОХ. Поэтому уравнение (3.6) для стохастической области $D_{st}^{(Rt)}$ принимает вид:

$$2 \int_{-L_k}^{L_n} \int_0^{B/2} f(x, y) dy dx = P_d,$$

С учетом выражения (3.10) последнее уравнение можно записать в следующем виде:

$$2 \int_{-r n_k}^{r n_n} \int_0^{r n_b / 2} f(x, y) dy dx = P_d, \quad (3.11)$$

из которого следует определить неизвестную переменную r , учитывая, что соотношения между размерами области $D_{st}^{(Rt)}$ задано, т.е. значения n_b, n_n и n_k известны.

Рассмотрим стохастическую область сложной формы D_{st4} , границы которой описываются уравнением (3.4), а форма показана на рис. 3.14.

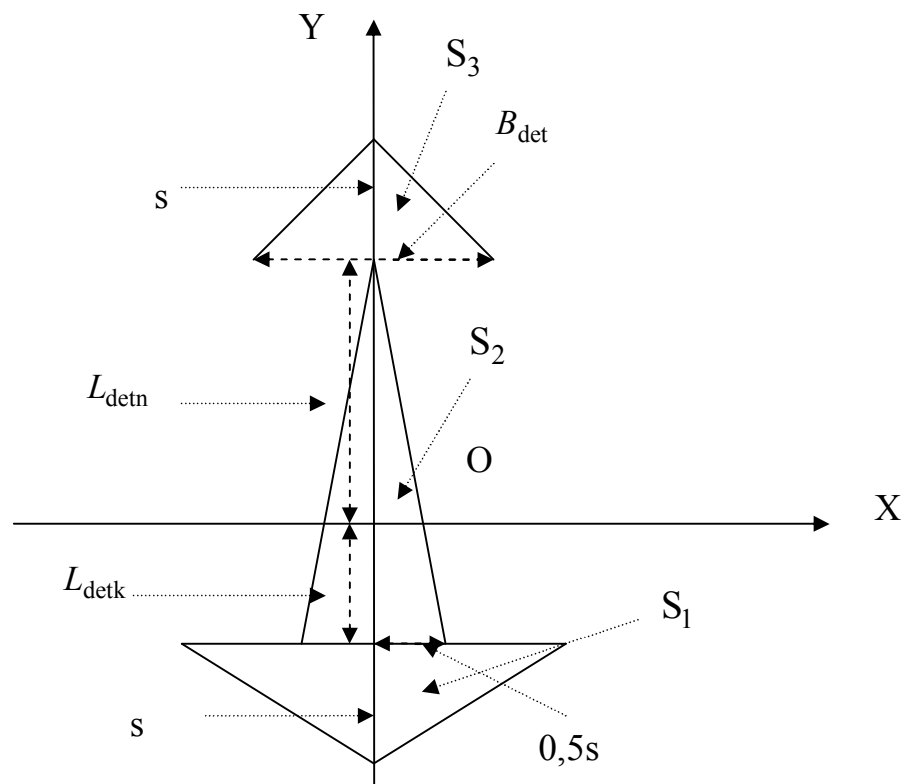


Рис. 3.14. Форма стохастической области D_{st4}

Как следует из рис. 3.14, стохастическая область D_{st4} состоит из трех парных составляющих, поэтому основное уравнение (3.6) для данной стохастической области имеет следующий вид:

$$\iint_{D_{st4}} f(x, y) dx dy = 2(S_1 + S_2 + S_3) = P_d .$$

Используя уравнение границы стохастической области D_{st4} (3.4) и рис. 3.14, получим выражения для составляющих S_1 , S_2 и S_3 , которые имеют следующий вид:

$$S_1 = \int_0^{0,5(s+B_{det})} \int_{-s-L_{detk}}^{-s-L_{detk} + \frac{s}{0,5(s+B_{det})}x} f(x, y) dy dx ,$$

$$S_2 = \int_0^{0,5s} \int_{-L_{detk}}^{L_{detn} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0,5s}x} f(x, y) dy dx ,$$

$$S_3 = \int_0^{0,5B_{det}} \int_{L_{detn}}^{L_{detn} + \frac{s}{0,5B_{det}}x} f(x, y) dy dx .$$

Учитывая полученные выражения, запишем уравнение для определения размеров области D_{st4} :

$$2 \left[\int_0^{0,5(s+B_{det})} \int_{-s-L_{detk}}^{-s-L_{detk} + \frac{s}{0,5(s+B_{det})}x} f(x, y) dy dx + \int_0^{0,5s} \int_{-L_{detk}}^{L_{detn} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0,5s}x} f(x, y) dy dx + \int_0^{0,5B_{det}} \int_{L_{detn}}^{L_{detn} + \frac{s}{0,5B_{det}}x} f(x, y) dy dx \right] = P_d .$$

Решая полученное уравнение относительно переменной s , определяем размеры стохастической области D_{st4} .

В заключение подраздела рассмотрим стохастическую область $D_{st}^{(RE)}$, форма которой приведена на рис. 3.15.

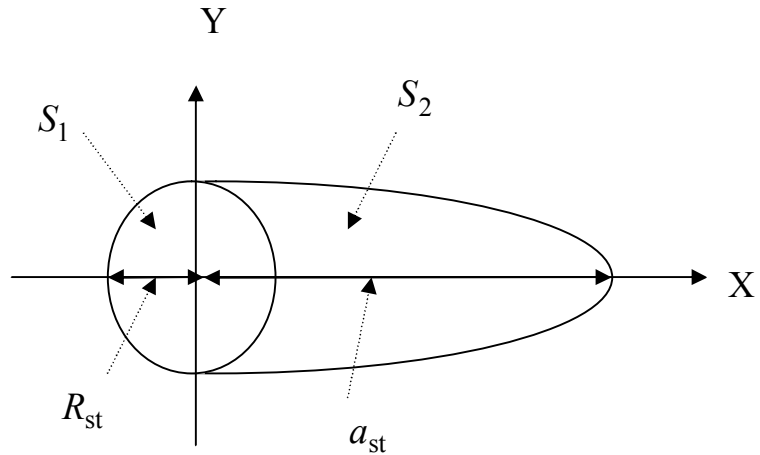


Рис 3.15. Стохастическая область $D_{st}^{(RE)}$

Запишем уравнение границы области $D_{st}^{(RE)}$:

$$y = \begin{cases} \pm \sqrt{R_{st}^2 - x^2}, & \text{если, } x < 0, \\ \pm \gamma \sqrt{a_{st}^2 - x^2}, & \text{если, } x > 0. \end{cases}$$

где $\gamma = \frac{S_{st}}{a_{st}}$ – сжатие эллипса.

Уравнение (3.6) для стохастической области $D_{st}^{(RE)}$ с учетом рис. 3.13 принимает следующий вид:

$$\iint_{D_{st} 4} f(x, y) dx dy = 2(S_1 + S_2) = P_d. \quad (3.12)$$

Запишем выражения для составляющих S_1 и S_2 , учитывая, что $a_{st} = \frac{R_{st}}{\gamma}$:

$$S_1 = \int_0^{R_{st}} \int_0^{\sqrt{R_{st}^2 - x^2}} f(x, y) dy dx,$$

$$S_2 = \int_0^{R_{st}/\gamma} \int_0^{\gamma \sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - x^2}} f(x, y) dy dx.$$

С учетом полученных выражений уравнение (3.12) принимает следующий вид:

$$2 \left[\int_0^{R_{st}} \sqrt{R_{st}^2 - x^2} \int_0^{\gamma \sqrt{R_{st}^2 / \gamma^2 - x^2}} f(x, y) dy dx + \int_0^{R_{st} / \gamma} \gamma \sqrt{(R_{st} / \gamma)^2 - x^2} \int_0^{\gamma \sqrt{R_{st}^2 / \gamma^2 - x^2}} f(x, y) dy dx \right] = P_d. \quad (3.13)$$

Решая полученное уравнение относительно переменной R_{st} и учитывая заданное значение γ , можно определить размеры стохастической области $D_{st}^{(RE)}$.

Размеры безопасной области D_b определяется объединением детерминированной области D_{det} и стохастической области D_{st} , т. е. имеет место соотношение $D_b = D_{det} \cup D_{st}$.

Обращаем внимание на то обстоятельство, что только формы стохастической области D_{st4} и детерминированной области $D_{det}^{(Rt)}$ в случае безопасной области сложной формы $D_b^{(Cm)}$ являются различными. В остальных случаях формы стохастической и детерминированной областей совпадают.

Поэтому, анализируя вышеизложенное, можно получить значения параметров безопасной области D_b , исходя из заданных параметров детерминированной области D_{det} и вычисленных параметров стохастической области D_{st} .

В случае безопасной области круговой формы $D_b^{(Rd)}$, ее единственный параметр R_b определяется соотношением объединения детерминированной и стохастической областей $D_b^{(Rd)} = D_{det}^{(Rd)} \cup D_{st}^{(Rd)}$ при этом справедливо равенство:

$$R_b = R_{det} + R_{st}. \quad (3.14)$$

Если безопасная область имеет форму эллипса $D_b^{(El)}$, то она является

также объединением детерминированной и стохастической эллиптических областей $D_b^{(El)} = D_{det}^{(El)} \cup D_{st}^{(El)}$. Поэтому параметры безопасной области $D_b^{(El)}$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} a_b &= a_{det} + a_{st}, \\ b_b &= b_{det} + b_{st}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Безопасная область прямоугольной формы $D_b^{(Rt)}$ сформирована детерминированной и стохастической областями такой же формы, и ее размеры определяются выражением $D_b^{(Rt)} = D_{det}^{(Rt)} \cup D_{st}^{(Rt)}$, из которого следуют выражения для параметров области $D_b^{(Rt)}$:

$$\begin{aligned} L_{bn} &= L_{detn} + L_{stn}, \\ L_{bk} &= L_{detk} + L_{stk}, \\ B_b &= B_{det} + B_{st}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Спецификой обладает безопасная область сложной формы $D_b^{(Cm)}$, которая является объединением прямоугольной детерминированной $D_{det}^{(Rt)}$ и стохастической D_{st4} областей, формы которых различны и не совпадают со сложной формой безопасной области, т.е. $D_b^{(Cm)} = D_{det}^{(Rt)} \cup D_{st4}$. В этом случае параметры безопасной области определяются формулами:

$$\begin{aligned} L_{bn} &= L_{detn} + s, \\ L_{bk} &= L_{detk} + s, \\ b_1 &= B_{det}, \\ b_2 &= B_{det} + s. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Наконец, безопасная область формы полукруг – полуэллипс $D_b^{(RE)}$ является объединением детерминированной и стохастической областей такой же формы $D_b^{(RE)} = D_{det}^{(RE)} \cup D_{st}^{(RE)}$, поэтому параметры области $D_b^{(RE)}$ рассчитываются с помощью формул:

$$R_b = R_{\text{det}} + R_{\text{st}},$$

$$a_b = a_{\text{det}} + a_{\text{st}}.$$
(3.17)

Информацию о параметрах безопасных областей приведем в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Параметры безопасных областей

Безопасная область D_b	Параметры де-терминированной области D_{det}	Параметры стохастической области D_{st}	Параметры безопасной области D_b
$D_b^{(\text{Rd})} = D_{\text{det}}^{(\text{Rd})} \cup D_{\text{st}}^{(\text{Rd})}$ R_b	$D_{\text{det}}^{(\text{Rd})}$ R_{det}	$D_{\text{st}}^{(\text{Rd})}$ R_{st}	$R_b = R_{\text{det}} + R_{\text{st}}$
$D_b^{(\text{El})} = D_{\text{det}}^{(\text{El})} \cup D_{\text{st}}^{(\text{El})}$ a_b, b_b	$D_{\text{det}}^{(\text{El})}$ $a_{\text{det}}, b_{\text{det}}$	$D_{\text{st}}^{(\text{El})}$ $a_{\text{st}}, b_{\text{st}}$	$a_b = a_{\text{det}} + a_{\text{st}}$ $b_b = b_{\text{det}} + b_{\text{st}}$
$D_b^{(\text{Rt})} = D_{\text{det}}^{(\text{Rt})} \cup D_{\text{st}}^{(\text{Rt})}$ $L_{\text{bn}}, L_{\text{bk}}, B_b$	$D_{\text{det}}^{(\text{Rt})}$ $L_{\text{detn}}, L_{\text{detk}}, B_{\text{det}}$	$D_{\text{st}}^{(\text{Rt})}$ $L_{\text{stn}}, L_{\text{stk}}, B_{\text{st}}$	$L_{\text{bn}} = L_{\text{detn}} + L_{\text{stn}}$ $L_{\text{bk}} = L_{\text{detk}} + L_{\text{stk}}$ $B_b = B_{\text{det}} + B_{\text{st}}$
$D_b^{(\text{Cm})} = D_{\text{det}}^{(\text{Rt})} \cup D_{\text{st}4}$ $L_{\text{bn}}, L_{\text{bk}}, b_1, b_2$	$D_{\text{det}}^{(\text{Rt})}$ $L_{\text{detn}}, L_{\text{detk}}, B_{\text{det}}$	$D_{\text{st}4}$ s	$L_{\text{bn}} = L_{\text{detn}} + s$ $L_{\text{bk}} = L_{\text{detk}} + s$ $b_1 = B_{\text{det}}$ $b_2 = B_{\text{det}} + s$
$D_b^{(\text{RE})} = D_{\text{det}}^{(\text{RE})} \cup D_{\text{st}}^{(\text{RE})}$ R_b, a_b	$D_{\text{det}}^{(\text{RE})}$ $R_{\text{det}}, a_{\text{det}}$	$D_{\text{st}}^{(\text{RE})}$ $R_{\text{st}}, a_{\text{st}}$	$R_b = R_{\text{det}} + R_{\text{st}}$ $a_b = a_{\text{det}} + a_{\text{st}}$

3.4. Расчет параметров стохастической области

Размеры стохастической области в зависимости от формы определяются уравнениями (3.8)..3.13, из которых вычисляется определяющий параметр рассматриваемой формы. Указанные уравнения являются интегральными, в которых определяющий параметр входит в пределы интегрирования, а подынтегральная функция, как правило, не имеет первообразной в явном виде. Поэтому определенные интегралы упоминаемых уравнений представляются в виде сумм, что позволяет найти определяющий параметр формы стохастической области.

Для стохастической области круговой формы $D_{st}^{(Rd)}$ определяющим параметром является радиус R_{st} , расчет которого производится с помощью интегрального уравнения (3.8):

$$4 \int_0^{R_{st}} \int_0^{\sqrt{R_{st}^2 - x^2}} f(x, y) dy dx = P_d,$$

которому соответствует уравнение:

$$4 \sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} f(i, j) = P_d.$$

Стохастическая область эллиптической формы $D_{st}^{(El)}$ характеризуется определяющим параметром a – большей полуосью эллипса, которая находится из интегрального уравнения (3.9):

$$4 \int_0^a \gamma \sqrt{a^2 - x^2} \int_0^{\sqrt{a^2 - x^2}} f(x, y) dy dx = P_d,$$

где сжатие эллипса γ определяется параметрами детерминированной областью, т.е. $\gamma = \frac{b_{det}}{a_{det}}$. Интегральному уравнению (3.9) соответствует уравнение:

$$4 \sum_{i=0}^a \gamma \sqrt{a^2 - i^2} \sum_{j=0}^b f(i, j) = P_d.$$

В случае стохастической области прямоугольной формы $D_{st}^{(Rt)}$ определяющим параметром является переменная r , которую можно найти из уравнения (3.11):

$$2 \int_{-r r_{nk}}^{r r_{nn}} \int_0^{r r_{nb}/2} f(x, y) dy dx = P_d,$$

в котором преобразуем пределы интегрирования, обозначая $\gamma_n = \frac{L_{detn}}{B_{det}}$ и

$$\gamma_k = \frac{L_{detk}}{B_{det}}:$$

$$2 \int_{-\gamma_k B_{st}}^{\gamma_n B_{st}} \int_0^{B_{st}/2} f(x, y) dy dx = P_d \quad (3.18)$$

Уравнение (3.18) запишем в следующем виде:

$$2 \left[\int_0^{\gamma_k B_{st}} \int_0^{B_{st}/2} f(x - \gamma_k B_{st}, y) dy dx + \int_0^{\gamma_n B_{st}} \int_0^{B_{st}/2} f(x, y) dy dx \right] = P_d,$$

которое имеет эквивалентный аналог, позволяющий использовать суммы вместо определенных интегралов:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} f(i - \gamma_k B_{st}, j) + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} f(i, j) \right] = P_d.$$

Решая полученное уравнение относительно переменной B_{st} , определим размеры (L_{stn}, L_{stk}) стохастической области $D_{st}^{(Rt)}$.

Рассмотрим стохастическую область D_{st4} , которая характеризуется определяющим параметром s , значение которого вычисляется с помощью следующего интегрального уравнения, которое необходимо преобразовать таким образом, чтобы нижние пределы интегрирования не имели отрицательных значений:

$$2\left[\int_0^{0,5(s+B_{\text{det}})} \int_{-s-L_{\text{detk}}}^{-s-L_{\text{detk}}+\frac{s}{0,5(s+B_{\text{det}})}x} f(x,y)dydx + \int_0^{0,5s} \int_{-L_{\text{detk}}}^{L_{\text{detn}}-\frac{L_{\text{detn}}+L_{\text{detk}}}{0,5s}x} f(x,y)dydx + \int_0^{0,5B_{\text{det}}} \int_{L_{\text{detn}}}^{L_{\text{detn}}+\frac{s}{0,5B_{\text{det}}}x} f(x,y)dydx\right] = P_d.$$

Приведенное уравнение запишем в следующем виде:

$$2\left[\int_0^{0,5(s+B_{\text{det}})} \int_0^{\frac{s}{0,5(s+B_{\text{det}})}x} f(x, y-s-L_{\text{detk}})dydx + \int_0^{0,5s} \int_0^{L_{\text{detn}}+L_{\text{detk}}-\frac{L_{\text{detn}}+L_{\text{detk}}}{0,5s}x} f(x, y-L_{\text{detk}})dydx + \int_0^{0,5B_{\text{det}}} \int_0^{\frac{s}{0,5B_{\text{det}}}x} f(x, y+L_{\text{detn}})dydx\right] = P_d.$$

Для расчета определяющего параметра s в полученном уравнении определенные интегралы заменяем суммами:

$$2\left[\sum_{i=0}^{0,5(s+B_{\text{det}})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{\text{det}})}i} f(i, j-s-L_{\text{detk}}) + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{\text{detn}}+L_{\text{detk}}-\frac{L_{\text{detn}}+L_{\text{detk}}}{0,5s}i} f(i, j-L_{\text{detk}}) + \sum_{i=0}^{0,5B_{\text{det}}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{\text{det}}}i} f(i, j+L_{\text{detn}})\right] = P_d.$$

В заключение рассмотрим стохастическую область $D_{\text{st}}^{(\text{RE})}$, определяющим параметром которой является радиус R_{st} , являющийся одновременно малой полуосью эллипса, причем расчет параметра R_{st} возможен с помощью интегрального уравнения (3.13):

$$2\left[\int_0^{R_{\text{st}}} \int_0^{\sqrt{R_{\text{st}}^2-x^2}} f(x,y)dydx + \int_0^{R_{\text{st}}/\gamma} \int_0^{\gamma\sqrt{(R_{\text{st}}/\gamma)^2-x^2}} f(x,y)dydx\right] = P_d.$$

Приведенное уравнение целесообразно представить в виде уравнения, содержащего суммы вместо определенных интегралов:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} f(i, j) + \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2}} f(i, j) \right] = P_d.$$

Решая полученное уравнение относительно переменной R_{st} с учетом заданного значения $\gamma = \frac{R_{det}}{a_{det}}$, можно определить размеры стохастической области $D_{st}^{(RE)}$.

3.5. Выводы по третьей главе диссертации

В главе рассмотрены существенные факторы, влияющие на размеры безопасной области цели, к которым относятся габариты судна и цели, явление присасывания судов, случайное положение цели относительно ее полученного места и возможные форс-мажорные обстоятельства.

Рассмотрены наиболее часто предлагаемые формы безопасной области цели, к которым отнесены три типа простых форм: круг, эллипс и прямоугольник и два типа сложных форм, являющихся комбинацией некоторых простых форм.

Показано, что безопасная область цели является объединением детерминированной и стохастической областей, причем определены параметры детерминированной области и выявлены возможные формы стохастической области и ее определяющих параметров.

Получено уравнение для расчета размеров стохастической области, зависящее от уравнения границы стохастической области и двумерной плотности распределения векториальной погрешностью положения цели.

Для каждой из форм безопасной, детерминированной и стохастической областей получены уравнения их границ и взаимозависимость параметров.

С учетом уравнения границ стохастической области для каждой из форм получены интегральные, а затем и модифицированные уравнения, содержащие вместо определенных интегралов эквивалентные суммы, для расчета определяющих параметров.

Выявлено, что четыре формы, а именно круг, эллипс, прямоугольник и сложная форма полукруга и полу-эллипса являются общими для всех трех типов областей. И только для сложной формы четвертого типа безопасная, детерминированная и стохастическая области имеют различные формы.

ГЛАВА 4

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ БЕЗОПАСНОЙ ОБЛАСТИ СУДНА

4.1. Использование двумерного распределения векториальной погрешности для определения размеров стохастической области.

Как показано в предыдущей главе, на размер стохастической области D_{st} заданной формы определяющим образом влияет закон распределения векториальной погрешности, как показано в выражении:

$$\iint_{D_{st}} f(x, y) dx dy = P_d .$$

Определение положения цели относительно судна производится, как правило, по двум линиям положения: пеленгу с судна на цель и расстоянию между ними. Очевидно, эти две линии положения взаимно перпендикулярны и их погрешности независимы.

Поэтому, в первом приближении двумерная плотность распределения векториальной погрешности положения цели с учетом независимости погрешностей линий положения в прямоугольной системе координат XOY выражается следующим образом:

$$f(x, y) = f_x(x) f_y(y), \quad (4.1)$$

$f_x(x)$ и $f_y(y)$ - маргинальная плотность погрешностей измерений по осям системы координат.

Рассмотрим вопрос плотности распределения случайной величины. В настоящее время принята гипотеза о нормальном законе распределения (законе Гаусса) погрешностей навигационных измерений, причем плотность распределения нормального закона центрированной случайной величины ξ имеет следующий вид:

$$f(\xi) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right),$$

где σ – среднее квадратичное отклонения случайной величины.

Очевидно, плотность двумерного нормального распределения независимых случайных погрешностей навигационных измерений, согласно выражению (4.1), описывается формулой:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right], \quad (4.2)$$

где σ_x и σ_y - средние квадратичные отклонения векториальной погрешности.

Однако в последнее время во многих случаях при обработке статистических данных погрешностей навигационных измерений, полученных в натурных наблюдениях, обнаружено, что они не подчиняются нормальному закону. Оказывается, в таких случаях погрешности навигационных измерений подчиняются смешанным законам распределения первого или второго типа, плотность распределения которых выражается в явном виде, причем плотность первого типа смешанного распределения (обобщенное распределение Коши) описывается следующим выражением [167]:

$$f_1(x) = \frac{2^n \alpha^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (2n-1)} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^{n+1}}, \quad (n \leq 6)$$

причем n является существенным параметром.

Данное распределение вероятностей целесообразно применять для описания случайных погрешностей навигационных измерений, которые встречаются в граничных разрядах чаще, чем в нормальном законе. Причем существенный параметр должен быть меньше 7.

Семейство плотностей смешанного распределения второго типа, которое можно использовать для случайных погрешностей, имеющих гистограммы с

«утяжеленными хвостами», причем аналитически они выражаются следующим образом [Ас24]:

$$f_2(x) = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!} \frac{1}{(x^2/2 + \alpha)^{n + \frac{3}{2}}}, \quad (n \leq 5)$$

где α - масштабный параметр;

n – существенный параметр.

Значение существенного параметра не должно превосходить значения 5 для выполнения требования наличия «утяжеленных хвостов».

Для двумерной плотности распределения при смешанных законах будем полагать, что погрешности обеих линий положения одного типа, имеют одинаковый существенный параметр и разные масштабные параметры α_x и α_y .

Поэтому двумерная плотность смешанного распределения первого типа принимает следующий вид:

$$f_1(x, y) = \frac{A_x A_y}{(x^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (y^2/2 + \alpha_y)^{n+1}}, \quad (n \leq 6) \quad (4.3)$$

где

$$A_x = \frac{2^n \alpha_x^{n + \frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2} \pi 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)},$$

$$A_y = \frac{2^n \alpha_y^{n + \frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2} \pi 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)}.$$

Обращаем внимание, что приведенные коэффициенты в общем виде можно записать следующим образом:

$$A = A_0 \alpha^{n + \frac{1}{2}},$$

где $A_0 = \frac{2^n n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)}$.

Так, как значение существенного параметра n может изменяться от 1 до 6, а значение коэффициента A_0 зависит только от значения существенного параметра n , то приведем значения коэффициента A_0 , которые представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1.

Значения коэффициента A_0

n	1	2	3	4	5	6
A_0	0,4503	0,6005	0,72064	0,8236	0,915	0,9982

Двумерная плотность смешанного распределения второго типа описывается следующим выражением:

$$f_2(x, y) = \frac{B_x B_y}{(x^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (y^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}}, \quad (n \leq 5) \quad (4.4)$$

где

$$B_x = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha_x^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!},$$

$$B_y = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha_y^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!}.$$

Аналогично предыдущему случаю, полученные коэффициенты второго типа смешанного распределения в общем виде имеют следующий аналитический вид:

$$B = B_0 \alpha^{n+1},$$

где $B_0 = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1)}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!}$.

Значение существенного параметра n во втором типе смешанного рас-

пределения может принимать значения от 1 до 5, причем значение коэффициента B_0 зависит только от значения существенного параметра n . Поэтому в табл. 4.2. приведены значения коэффициента B_0 .

Таблица 4.2.

Значения коэффициента B_0

n	1	2	3	4	5
B_0	0,5303	0,663	0,7734	0,8701	0,9571

В дальнейшем при определении размеров стохастических областей будем рассматривать три закона распределения векториальной погрешности: нормальный закон, смешанные законы первого и второго типа.

4.2. Определение размеров стохастических областей при нормальном и смешанных распределениях векториальной погрешности.

Рассмотрим аналитические выражения для расчета размеров стохастических областей в случае, если погрешности навигационных измерений подчинены нормальному распределению.

Для стохастической области круговой формы $D_{st}^{(Rd)}$ расчет определяющего параметра R_{st} производится с помощью выражения (3.18):

$$4 \sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} f(i, j) = P_d.$$

Подставляя выражение для двумерной плотности распределения нормального закона (4.2), получим:

$$4 \sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = P_d,$$

или, окончательно, расчет определяющего параметра производится с помощью выражения:

$$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \frac{\pi\sigma_x\sigma_y}{2} P_d$$

В случае стохастической области $D_{st}^{(El)}$ эллиптической формы определяющим параметром является большая полуось эллипса a и ее расчет производится с помощью выражения (3.19):

$$4 \sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^{\sqrt{a^2 - i^2}} f(i, j) = P_d,$$

которое с учетом аналитического вида двумерной плотности распределения векториальной погрешности выражается следующим образом:

$$4 \sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^{\sqrt{a^2 - i^2}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = P_d.$$

Расчет определяющего параметра a производится решением уравнения:

$$\sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^{\sqrt{a^2 - i^2}} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \frac{\pi\sigma_x\sigma_y}{2} P_d.$$

Размеры стохастической области $D_{st}^{(Rt)}$ прямоугольной формы, характеризующейся обобщенным параметром B_{st} , по которому находятся параметры длины области, определяется формулой (3.21):

$$2\left[\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} f(i - \gamma_k B_{st}, j) + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} f(i, j)\right] = P_d.$$

Подставляя в данное уравнение выражение для двумерной плотности распределения нормального закона, получим следующее выражение:

$$2\left[\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{(i - \gamma_k B_{st})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \right.$$

$$+ \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{(i - \gamma_k B_{st})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = P_d.$$

Для расчета параметра B_{st} полученное уравнение представим в виде:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \exp\left[-\left(\frac{(i - \gamma_k B_{st})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \\ & + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \exp\left[-\left(\frac{(i - \gamma_k B_{st})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \pi\sigma_x\sigma_y P_d. \end{aligned}$$

Рассмотрим стохастическую область D_{st4} , определяющим параметром которой является s . Расчет данного параметра производится с помощью формулы (3.22):

$$\begin{aligned} 2\left[\sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})}i} f(i, j - s - L_{detk}) + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn} + L_{detk} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0,5s}i} f(i, j - L_{detk}) + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}}i} f(i, j + L_{detk}) \right] = P_d, \end{aligned}$$

подстановка в которую аналитического выражения для двумерной плотности распределения вероятностей нормального закона преобразует ее к следующему виду:

$$\begin{aligned} 2\left[\sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})}i} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j - s - L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \right. \\ + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn} + L_{detk} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0,5s}i} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j - L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \\ \left. + \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}}i} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j + L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \right] = P_d. \end{aligned}$$

Для расчета параметра s полученное уравнение записываем в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=0}^{0,5(s+B_{\text{det}})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{\text{det}})}} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j-s-L_{\text{detk}})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \\
 & + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{\text{detn}}+L_{\text{detk}}-\frac{L_{\text{detn}}+L_{\text{detk}}}{0,5s}i} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j-L_{\text{detk}})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \\
 & + \sum_{i=0}^{0,5B_{\text{det}}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{\text{det}}}} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j+L_{\text{detk}})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \pi\sigma_x\sigma_y P_d.
 \end{aligned}$$

Наконец, заключительная стохастическая область $D_{\text{st}}^{(\text{RE})}$, имеющая форму полукруга полу-эллипса, характеризуется определяющим параметром R_{st} , для расчета которого используется уравнение (3.23):

$$2 \left[\sum_{i=0}^{R_{\text{st}}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{\text{st}}^2 - i^2}} f(i, j) + \sum_{i=0}^{R_{\text{st}}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{\text{st}}/\gamma)^2 - i^2}} f(i, j) \right] = P_d.$$

Подставляем в данное уравнение выражение для двумерной плотности распределения вероятностей векториальной погрешности по закону Гаусса, в результате чего получим:

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\sum_{i=0}^{R_{\text{st}}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{\text{st}}^2 - i^2}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \right. \\
 & + \left. \sum_{i=0}^{R_{\text{st}}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{\text{st}}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \right] = P_d.
 \end{aligned}$$

Для расчета определяющего параметра R_{st} последнее уравнение записывается следующим образом:

$$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] +$$

$$+ \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma\sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2}} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \pi\sigma_x\sigma_y P_d.$$

Найдем аналитические выражения, позволяющие рассчитывать размеры стохастических областей различных форм в случае, если погрешности навигационных измерений подчинены смешанному закону первого типа.

Расчет определяющего параметра R_{st} для стохастической области круговой формы $D_{st}^{(Rd)}$ производится с помощью выражения (3.18), подставляя в которое выражение для двумерной плотности распределения смешанного закона первого типа (4.3), получим:

$$4 \sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = P_d.$$

Окончательно, расчет определяющего параметра R_{st} производится с помощью выражения:

$$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = \frac{1}{4A_x A_y} P_d,$$

где

$$A_x = \frac{2^n \alpha_x^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)},$$

$$A_y = \frac{2^n \alpha_y^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)}.$$

Для стохастической области $D_{st}^{(El)}$ эллиптической области определяющим параметром является большая полуось эллипса a , для расчета которой используется формула (3.19), которая при подстановке

аналитического выражения двумерной плотности распределения векториальной погрешности имеет следующий вид:

$$4 \sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{a^2 - i^2}} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = P_d.$$

При этом расчет определяющего параметра a производится решением уравнения:

$$\sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{a^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = \frac{1}{4A_x A_y} P_d.$$

Формулой (3.21) определяются размеры безопасной области $D_{st}^{(Rt)}$ прямоугольной формы, характеризующейся обобщенным параметром B_{st} , по которому находятся параметры длины области.

Подставляя в уравнение (3.21) выражение для двумерной плотности распределения смешанного закона первого типа, получим следующее выражение:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{A_x A_y}{[(i - \gamma_k B_{st})^2/2 + \alpha_x]^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} \right] = P_d.$$

Изменим вид полученного уравнения для расчета параметра B_{st} :

$$\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{[(i - \gamma_k B_{st})^2/2 + \alpha_x]^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} + \\ + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = \frac{1}{2A_x A_y} P_d.$$

Определяющим параметром безопасной области D_{st4} является s . Расчет данного параметра производится с помощью формулы (3.22), подстановка в которую аналитического выражения для двумерной плотности распределения вероятностей смешанного закона первого типа преобразует ее к следующему виду:

$$\begin{aligned}
 & 2 \left[\sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})}i} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j-s-L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} + \right. \\
 & + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn}+L_{detk}-\frac{L_{detn}+L_{detk}}{0,5s}i} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j-L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} + \\
 & \left. + \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}}i} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j+L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} \right] = P_d.
 \end{aligned}$$

Полученное уравнение для расчета параметра s записываем в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})}i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j-s-L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} + \\
 & + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn}+L_{detk}-\frac{L_{detn}+L_{detk}}{0,5s}i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j-L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} + \\
 & + \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}}i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j+L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} = \frac{1}{2A_x A_y} P_d.
 \end{aligned}$$

Стохастическая область $D_{st}^{(RE)}$, имеющая форму полукруга полу-эллипса, характеризуется определяющим параметром R_{st} , для расчета которого используется уравнение (3.23).

Подставляя в уравнение (3.23) выражение для двумерной плотности

распределения вероятностей векториальной погрешности по смешанному закону первого типа, получим:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} + \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} \right] = P_d.$$

Для расчета определяющего параметра R_{st} последнее уравнение записывается следующим образом:

$$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} + \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = \frac{1}{2A_x A_y} P_d.$$

В заключение займемся поиском аналитических выражений расчета размеров стохастических областей различных форм при условии, что погрешности навигационных измерений подчинены смешанному распределению второго типа.

В случае стохастической области круговой формы $D_{st}^{(Rd)}$ расчет определяющего параметра R_{st} производится с помощью выражения (3.18), в которое подставляем выражение для двумерной плотности распределения смешанного закона второго типа (4.4) и получим:

$$4 \sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = P_d.$$

Для расчета определяющего параметра R_{st} последнее выражение

представим в следующем виде:

$$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sqrt{R_{st}^2 - i^2} \sum_{j=0}^{R_{st}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = \frac{1}{4B_x B_y} P_d,$$

где

$$B_x = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha_x^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!},$$

$$B_y = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha_y^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!}.$$

Как раньше упоминалось, в случае стохастической области $D_{st}^{(El)}$ эллиптической области определяющим параметром является большая полуось эллипса a и ее расчет производится с помощью выражения (3.19).

С учетом аналитического вида двумерной плотности распределения векторальной погрешности выражение (3.19) принимает следующий вид:

$$4 \sum_{i=0}^a \gamma \sqrt{a^2 - i^2} \sum_{j=0}^{R_{st}} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = P_d.$$

Последнее уравнение для расчета определяющего параметра a представим следующим образом:

$$\sum_{i=0}^a \gamma \sqrt{a^2 - i^2} \sum_{j=0}^{R_{st}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = \frac{1}{4B_x B_y} P_d.$$

Для определения размеров безопасной области $D_{st}^{(Rt)}$ прямоугольной формы, которая характеризуется обобщенным параметром B_{st} , используется формула (3.21), подставляя в которую выражение для двумерной плотности распределения смешанного закона второго типа, получим следующее

выражение:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{B_x B_y}{[(i - \gamma_k B_{st})^2 / 2 + \alpha_x]^{n+3/2} (j^2 / 2 + \alpha_y)^{n+3/2}} + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{B_x B_y}{(i^2 / 2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2 / 2 + \alpha_y)^{n+3/2}} \right] = P_d.$$

Видоизменим полученное уравнение для расчета параметра B_{st} , представив его в виде:

$$\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{[(i - \gamma_k B_{st})^2 / 2 + \alpha_x]^{n+3/2} (j^2 / 2 + \alpha_y)^{n+3/2}} + \\ + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{(i^2 / 2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2 / 2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = \frac{1}{2B_x B_y} P_d.$$

Стохастическая область D_{st4} характеризуется определяющим параметром s , расчет которого производится с помощью формулы (3.22). Подстановка в формулу аналитического выражения для двумерной плотности распределения вероятностей смешанного закона второго типа преобразует ее к следующему виду:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})}i} \frac{B_x B_y}{(i^2 / 2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j - s - L_{detk})^2 / 2 + \alpha_y]^{n+3/2}} + \right. \\ + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn} + L_{detk} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0,5s}i} \frac{B_x B_y}{(i^2 / 2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j - L_{detk})^2 / 2 + \alpha_y]^{n+3/2}} + \\ \left. + \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}}i} \frac{B_x B_y}{(i^2 / 2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j + L_{detk})^2 / 2 + \alpha_y]^{n+3/2}} \right] = P_d.$$

Для расчета параметра s полученное уравнение записываем в следующем виде:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=0}^{0,5(s+B_{\text{det}})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{\text{det}})} i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j-s-L_{\text{detk}})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} + \\
& + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{\text{detn}} + L_{\text{detk}} - \frac{L_{\text{detn}} + L_{\text{detk}}}{0,5s} i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j-L_{\text{detk}})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} + \\
& + \sum_{i=0}^{0,5B_{\text{det}}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{\text{det}}}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j+L_{\text{detk}})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} = \frac{1}{2B_x B_y} P_d.
\end{aligned}$$

В завершение стохастическая область $D_{\text{st}}^{(\text{RE})}$, имеющая форму полукруга полу-эллипса, характеризуется определяющим параметром R_{st} , для расчета которого используется уравнение (3.23).

Подставляем в данное уравнение выражение для двумерной плотности распределения вероятностей векториальной погрешности по смешанному закону второго типа, в результате чего получим:

$$\begin{aligned}
& 2 \left[\sum_{i=0}^{R_{\text{st}}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{\text{st}}^2 - i^2}} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} + \right. \\
& \left. + \sum_{i=0}^{R_{\text{st}}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{\text{st}}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} \right] = P_d.
\end{aligned}$$

Для расчета определяющего параметра R_{st} последнее уравнение записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=0}^{R_{\text{st}}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{\text{st}}^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} + \\
& + \sum_{i=0}^{R_{\text{st}}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{\text{st}}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = \frac{1}{2B_x B_y} P_d.
\end{aligned}$$

Результаты данного подраздела обобщим в сводной табл. 4.3, обозначая

S_{st} - определяющий параметр стохастической области.

Таблица 4.3.

Формулы расчета определяющих параметров стохастических областей

D_{st}	S_{st}	Выражения для расчета размеров стохастической области D_{st}
		Нормальный закон
$D_{st}^{(Rd)}$	R_{st}	$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sqrt{R_{st}^2 - i^2} \sum_{j=0} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \frac{\pi\sigma_x\sigma_y}{2} P_d$
$D_{st}^{(El)}$	a	$\sum_{i=0}^a \gamma \sqrt{a^2 - i^2} \sum_{j=0} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \frac{\pi\sigma_x\sigma_y}{2} P_d$
$D_{st}^{(Rt)}$	B_{st}	$\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \exp\left[-\left(\frac{(i - \gamma_k B_{st})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] +$ $+ \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \exp\left[-\left(\frac{(i - \gamma_k B_{st})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \pi\sigma_x\sigma_y P_d$
D_{st4}	s	$\sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \frac{s}{0,5(s+B_{det})} i \sum_{j=0} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j - s - L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] +$ $+ \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn} + L_{detk} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0,5s} i} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j - L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] +$ $+ \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \frac{s}{0,5B_{det}} i \sum_{j=0} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j + L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = \pi\sigma_x\sigma_y P_d$

$D_{st}^{(RE)}$	R_{st}	$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \exp[-(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2})] +$ $+ \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2}} \exp[-(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2})] = \pi \sigma_x \sigma_y P_d$
		Смешанный закон первого типа
$D_{st}^{(Rd)}$	R_{st}	$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = \frac{1}{4A_x A_y} P_d$
$D_{st}^{(El)}$	a	$\sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^{\sqrt{a^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = \frac{1}{4A_x A_y} P_d$
$D_{st}^{(Rt)}$	B_{st}	$\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{[(i - \gamma_k B_{st})^2/2 + \alpha_x]^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} +$ $+ \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = \frac{1}{2A_x A_y} P_d$
D_{st4}	s	$\sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})} i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j - s - L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} +$ $+ \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn} + L_{detk} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0,5s} i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j - L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} +$ $+ \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}} i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j + L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} = \frac{1}{2A_x A_y} P_d$

$D_{st}^{(RE)}$	R_{st}	$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} +$ $+ \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = \frac{1}{2A_x A_y} P_d$
		Смешанный закон второго типа
$D_{st}^{(Rd)}$	R_{st}	$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = \frac{1}{4B_x B_y} P_d$
$D_{st}^{(El)}$	a	$\sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^{\sqrt{a^2 - i^2}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = \frac{1}{4B_x B_y} P_d$
$D_{st}^{(Rt)}$	B_{st}	$\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{[(i - \gamma_k B_{st})^2/2 + \alpha_x]^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} +$ $+ \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = \frac{1}{2B_x B_y} P_d$
D_{st4}	s	$\sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})} i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j - s - L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} +$ $+ \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn} + L_{detk} - \frac{L_{detn} + L_{detk}}{0,5s} i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j - L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} +$ $+ \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}} i} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j + L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} = \frac{1}{2B_x B_y} P_d$

$D_{st}^{(RE)}$	R_{st}	$\sum_{i=0}^{R_{st}} \sqrt{R_{st}^2 - i^2} \sum_{j=0}^{R_{st}} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} +$ $+ \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \gamma \sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2} \sum_{j=0}^{R_{st}/\gamma} \frac{1}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = \frac{1}{2B_x B_y} P_d$
-----------------	----------	--

4.3. Определение минимальных курсов уклонений судна при заданной форме безопасной области судна.

Как указывалось в предыдущей главе, эффективность безопасной области определяется минимальным приращением ΔK_{ymin} курса уклонения судна K_{ymin} к начальному курсу K_n , относительный курс которого равен пеленгу на цель, т. е. $K_{otn} = \alpha$, как показано на рис. 4.1. При этом для единообразия минимальное уклонение будем рассматривать уклонением судна вправо.

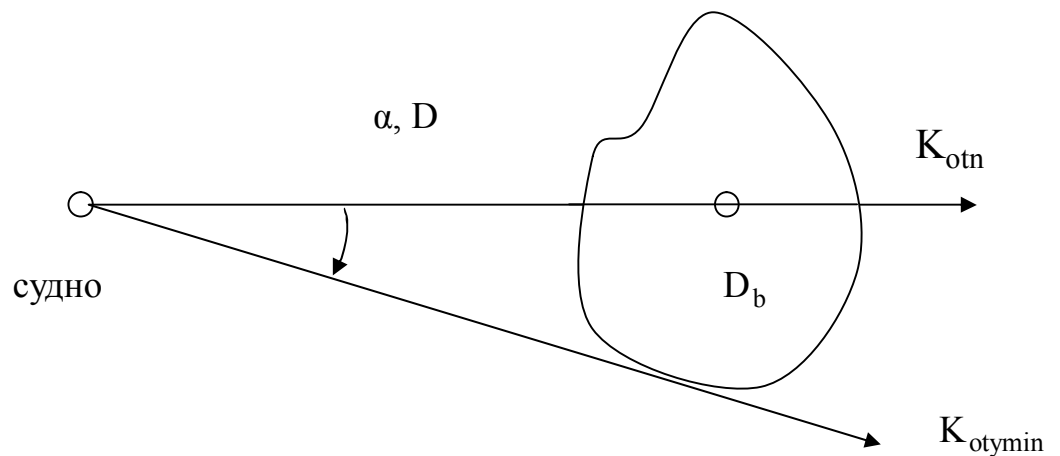


Рис. 4.1. Минимальное приращение ΔK_{ymin}

В предыдущей главе рассматривались пять типов безопасной области цели различной формы, для каждой из которых необходимо найти выражения ΔK_{ymin} . При этом для каждой области сохраняются неизменные значения α , D и параметры движения судна V_o , K_n , а также скорость V_c и курс K_c цели, причем $V_o > V_c$.

Поэтому вначале необходимо рассмотреть способ расчета минимального курса уклонения судна K_{ymin} для каждой из пяти форм безопасных областей. Очевидно, для этого следует сначала определить относительный курс минимального уклонения K_{otymin} , затем рассчитать соответствующий истинный курс минимального уклонения K_{ymin} , и, наконец, вычислить величину ΔK_{ymin} .

4.3.1. Определение относительного минимального курса уклонения судна $\tilde{K}_{ymin}$ при использовании безопасной круговой области $D_b^{(Rd)}$. Независимо от ракурса цели относительно судна касательная к границе безопасной круговой области $D_b^{(Rd)}$ сохраняет неизменное положение и зависит только от относительной позиции (рис. 4.2).

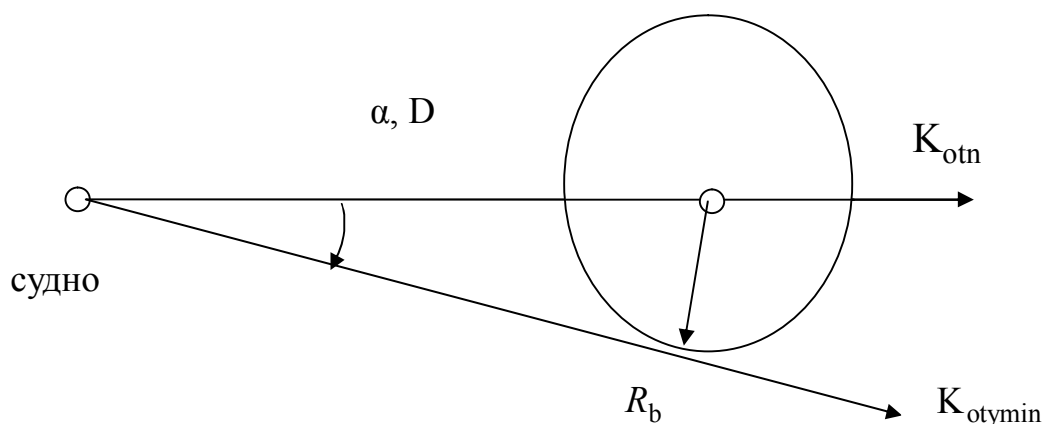


Рис. 4.2. Минимальное приращение ΔK_{ymin}

Из рис. 4.2 значение относительного курса уклонения K_{otymin} определяется очевидным соотношением:

$$K_{otymin} = K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}. \quad (4.5)$$

Для определения истинного курса минимального уклонения K_{ymin} по известному относительному курсу минимального уклонения K_{otymin} воспользуемся зависимостью из работы [12] в случае $V_o > V_c$:

$$K_{ymin} = K_{otymin} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - K_{otymin})], \quad (4.6)$$

где $\rho = V_o / V_c$.

4.3.2. Определение относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ в случае безопасной эллиптической области $D_b^{(El)}$. В этом случае относительный курс минимального уклонения K_{otymin} , как и в предыдущем, определяется касательной к границе безопасной области $D_b^{(El)}$, положение которой зависит от ракурса цели, так как полуоси a_b и b_b области совпадают по направлению соответственно с продольной и поперечной осями цели. С областью $D_b^{(El)}$ связываем судовую систему координат XOY (рис. 4.3).

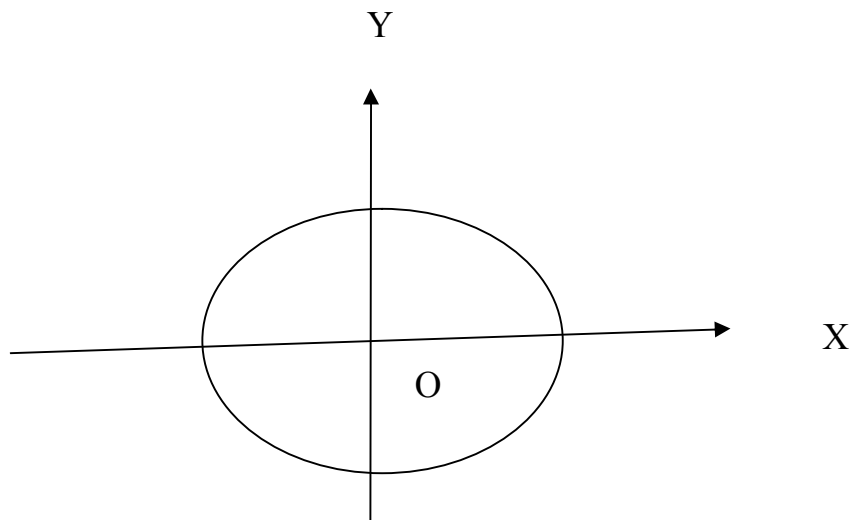


Рис. 4.3. Система координат XOY

В этой системе координат уравнение эллипса имеет следующий вид:

$$\frac{x^2}{a_b^2} + \frac{y^2}{b_b^2} = 1. \quad (4.7)$$

Приведем аналитическое выражение для безопасной области при произвольном расположении цели в опорной системе координат $\overline{XOY}$, ось которой $\overline{XX}$ совпадает с полуденной линией NS. Для этого введем в рассмотрение еще промежуточную систему координат $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$ (рис. 4.4).

Допустим, в начале системы координат $\overline{XOY}$ находится судно. Промежуточная система координат $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$ смещена относительно начала опорной системы и ее центр совпадает с центром эллипса, хотя оси обеих систем координат параллельны (рис. 4.4). Начало системы координат XOY

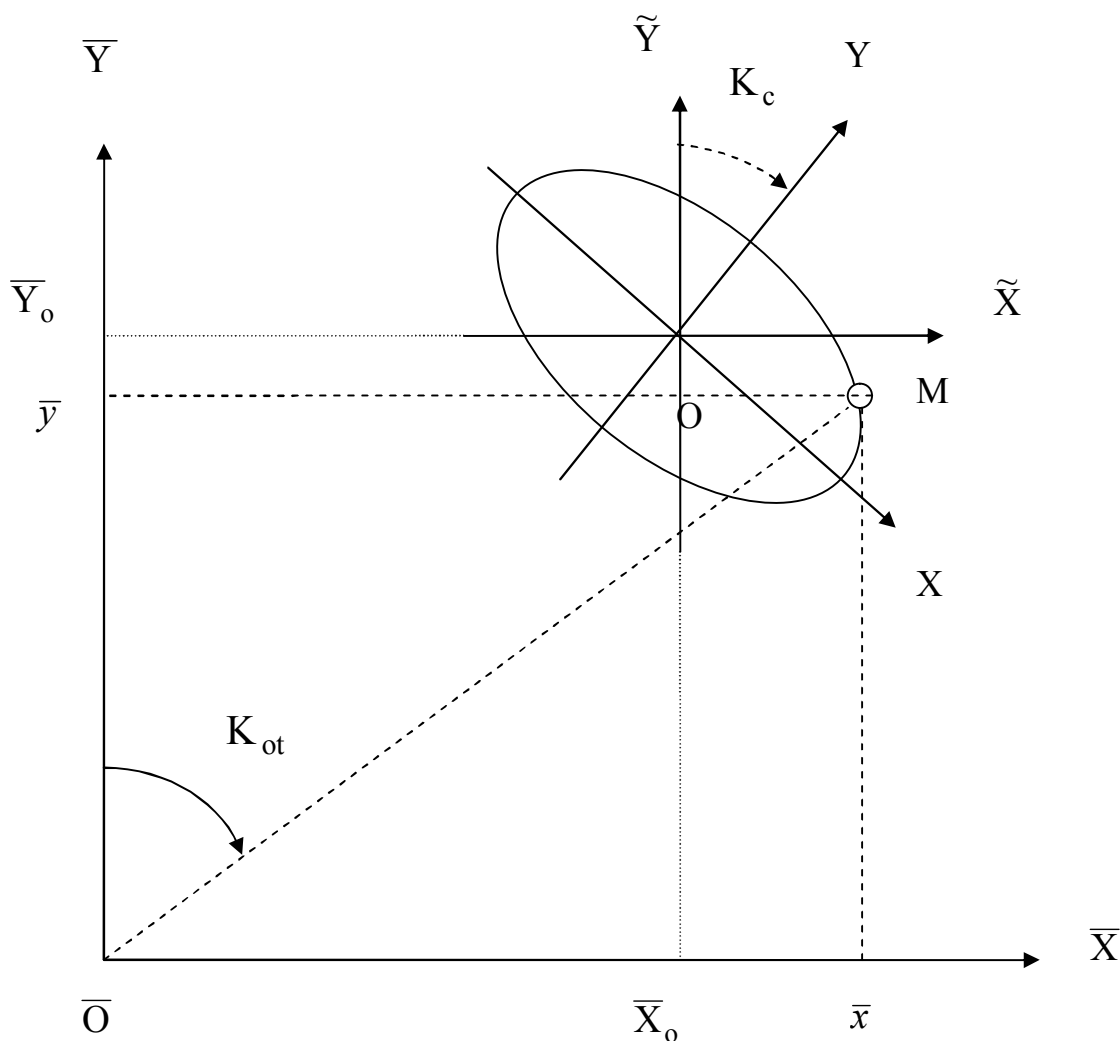


Рис. 4.4. Связь между системами координат

совмещено с началом $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$, но оси XOY повернуты на угол курса судна K относительно осей системы координат $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$.

Очевидно, справедливы соотношения:

$$\bar{x} = \bar{X}_o + \tilde{x}, \quad \bar{y} = \bar{Y}_o + \tilde{y}, \quad (4.8)$$

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

В свою очередь, как следует из рис. 4.5, координаты произвольной точки $M(\tilde{x}, \tilde{y})$ в зависимости от ее координат (x, y) в системе XOY выражаются следующим образом:

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

В этом случае выражение (4.8) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \bar{X}_o + y \sin K_c + x \cos K_c, \\ \bar{y} &= \bar{Y}_o + y \cos K_c - x \sin K_c. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Используя исходное уравнение эллипса (4.7) в системе координат XOY , получим следующее соотношение:

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

Выбирая соответствующее значение y (например, со знаком плюс) и подставляя в выражения (4.9), получим:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \sin K_c + x \cos K_c, \\ \bar{y} &= \bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \cos K_c - x \sin K_c. \end{aligned} \quad (4.10)$$

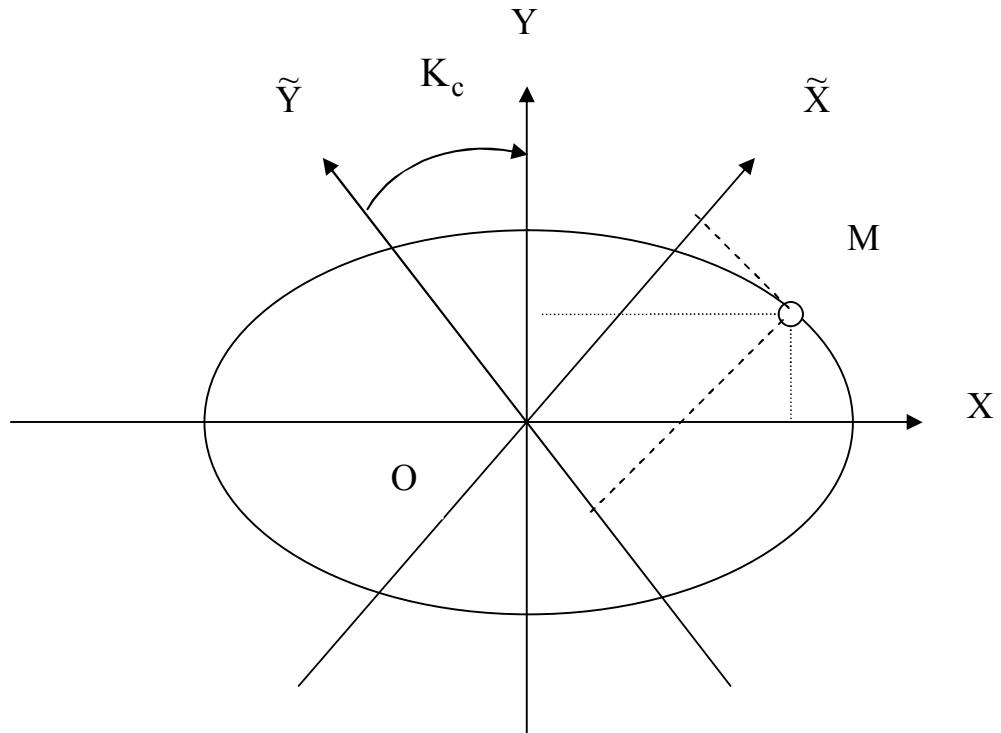


Рис. 4.5. Преобразование координат

Значение относительного курса K_{ot} , проходящего через точку M и принадлежащую эллипсу в опорной системе координат $\overline{XOY}$, можно найти из выражения (рис. 4.4):

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{\bar{x}}{\bar{y}}, \text{ откуда следует}$$

$$K_{ot} = \operatorname{arctg} \frac{\bar{x}}{\bar{y}} = \operatorname{arctg} \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \sin K_c + x \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \cos K_c - x \sin K_c} \quad (4.11)$$

Для нахождения минимального курса уклонения судна K_{ymin} при уклонении судна вправо необходимо взять первую относительного курса K_{ot} по переменной x ($x \in [-a, a]$) и приравнять ее к нулю. Из полученного уравнения надлежит найти значения переменной x , при которых достигаются экстре-

мальные значения пеленга, а затем найти значение K_{ymin} , подставляя полученные значения x в формулу (4.10).

Продифференцируем по x выражение (4.11):

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

Очевидно, искомому уравнению $\frac{\partial K_{ot}}{\partial x} = 0$ соответствует $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right) = 0$.

Найдем выражение для $\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right)$. Так, как $\bar{x}$ и $\bar{y}$ зависят от переменной x ,

следовательно:

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

поэтому исходное уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial \bar{x}}{\partial x} \bar{y} - \frac{\partial \bar{y}}{\partial x} \bar{x} = 0. \quad (4.12)$$

Из выражения (4.10) найдем частные производные $\frac{\partial \bar{x}}{\partial x}$ и $\frac{\partial \bar{y}}{\partial x}$:

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

Подставляя последние выражения в уравнение (4.12), получим:

$$\begin{aligned} & \left(\cos K_c - \frac{b}{a^2} \sin K_c \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} \right) \left(\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \cos K_c - x \sin K_c \right) + \\ & + \left(\frac{b}{a^2} \cos K_c \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} + \sin K_c \right) \left(\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \sin K_c + x \cos K_c \right) = 0. \end{aligned}$$

Выполним несложные преобразования и получим:

$$\begin{aligned} & \bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c + \frac{b}{a^2} \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} (\bar{X}_o \cos K_c - \bar{Y}_o \sin K_c) + \\ & + b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} (\sin^2 K_c + \cos^2 K_c) + \frac{b}{a^2} \frac{x^2}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} (\sin^2 K_c + \cos^2 K_c) = 0, \end{aligned}$$

упростим полученное выражение:

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

Перепишем последнее уравнение следующим образом:

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

откуда получим уравнение, содержащее в левой части переменную x :

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

Полученное выражение можно записать в следующем виде:

$$x = c[r \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} + b(1 - \frac{x^2}{a^2}) + \frac{b}{a^2} x^2], \quad (4.13)$$

где $c = \frac{a^2}{b(\bar{Y}_o \sin K_c - \bar{X}_o \cos K_c)}$ и $r = (\bar{Y}_o \cos K_c + \bar{X}_o \sin K_c)$.

Уравнение (4.13) запишем следующим образом:

$$x + cb = cr \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}.$$

Возведем в квадрат обе части последнего уравнения:

$$x^2 + 2cbx + c^2b^2 = c^2r^2(1 - \frac{x^2}{a^2}), \quad \text{или}$$

$$(a^2 + c^2r^2)x^2 + 2a^2cbx + a^2(c^2b^2 - c^2r^2) = 0.$$

Окончательно получим квадратное уравнение:

$$x^2 + 2\frac{a^2cb}{(a^2 + c^2r^2)}x + \frac{a^2c^2(b^2 - r^2)}{(a^2 + c^2r^2)} = 0. \quad (4.14)$$

Корни x_1 и x_2 квадратного уравнения (4.14) равны:

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

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

Каждому из полученных корней в уравнении эллипса соответствует две координаты y , поэтому относительный минимальный курс уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ достигается в одной точке эллипса из четырех (рис. 4.6). Поэтому вначале необходимо вычислить значения четырех значений относительного минимального курса уклонения соответствующих полученным значениям корней x_1 и x_2 с помощью следующих выражений, полученных с помощью формулы (4.11)):

$$\bar{K}_{ymin1} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin2} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin3} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}, \quad (4.15)$$

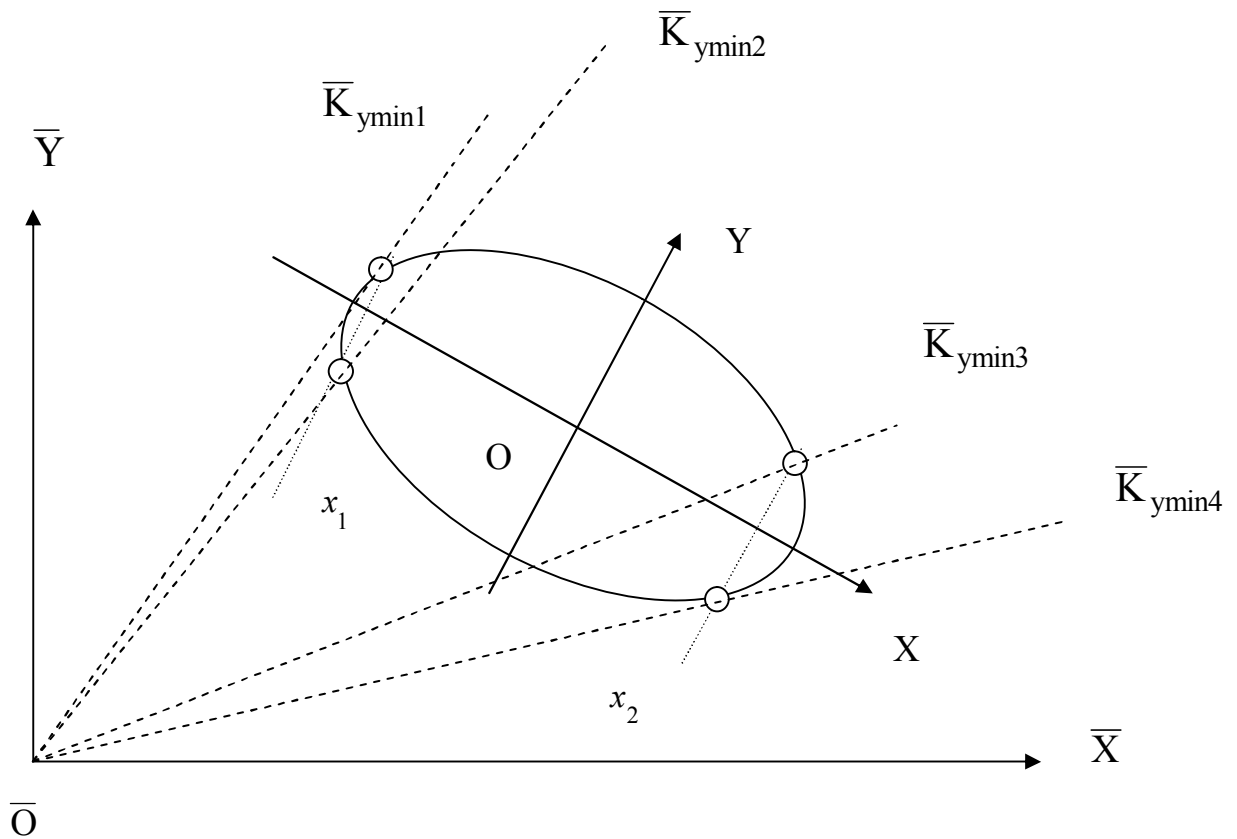


Рис. 4.6. Определение относительного минимального курса уклонения $\bar{K}_{ymin}$

$$\bar{K}_{ymin4} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}.$$

После расчета значений $\bar{K}_{ymin1}$, $\bar{K}_{ymin2}$, $\bar{K}_{ymin3}$ и $\bar{K}_{ymin4}$ искомая величина относительного минимального курса уклонения судна K_{ymin} при уклонении вправо находится из выражения:

$$\bar{K}_{ymin} = \max \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}.$$

Полученные выражения (4.15) справедливы в случае, когда значения $\bar{x}$ и $\bar{y}$ одновременно являются положительными. Если это условие не выполняется,

то в случае, когда $\bar{y} = 0$ при $\bar{x} > 0$ значение $\bar{K}_{ymin} = 90^\circ$, а при $\bar{x} < 0$ $\bar{K}_{ymin} = 270^\circ$.

Если же $\bar{y} > 0$, то при $\bar{x} < 0$ $\bar{K}_{ymin} = 360^\circ - \arctg \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$, а в случае $\bar{y} < 0$ и $\bar{x} \neq 0$ значение $\bar{K}_{ymin} = 180^\circ + \arctg \frac{\bar{x}}{\bar{y}}$ с учетом знака $\bar{x}$.

Обращаем внимание на следующее обстоятельство: расчеты относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ производились относительно центра эллипса зоны безопасности $(\bar{X}_o, \bar{Y}_o)$, 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 α_v . Если обозначить $\bar{X}_v$ и $\bar{Y}_v$ координаты цели в опорной системе координат, то очевидно (рис. 4.7) 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, как видно с рис. 4.7, можно найти из соотношения $dL_e = a_b - l_k$, то дистанция D_o и пеленг α_o на центр эллипса определяются из выражений:

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

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

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

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

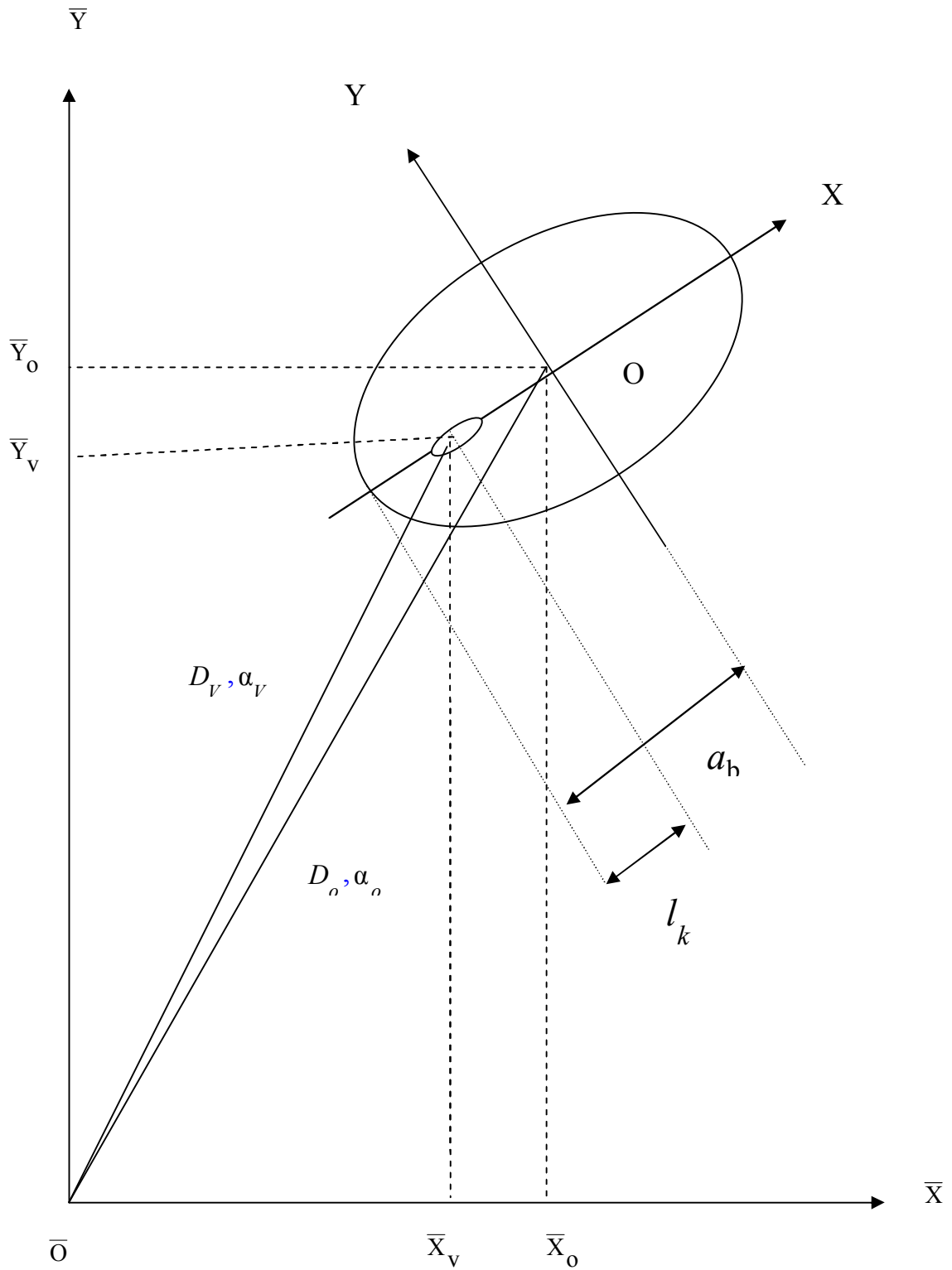


Рис. 4.7. Связь центров судна и эллипса

Окончательно выражения для $\bar{X}_O$ и $\bar{Y}_O$ принимают следующий вид:

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

Подставляя полученные значения $\bar{X}_o$ и $\bar{Y}_o$ в (4.15) рассчитываем значение $\bar{K}_{ymin}$ с учетом смещения центра эллипса относительно обсервованного места цели.

Расчет истинного минимального курса уклонения K_{ymin} по относительно $\bar{K}_{ymin}$ производится с помощью формулы (4.6).

4.3.3. Расчет относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ для безопасной области цели $D_b^{(Rt)}$ прямоугольной формы.

Безопасную область цели $D_b^{(Rt)}$ прямоугольной формы целесообразно задавать относительно центра цели четырьмя угловыми точками А, В, С и D (рис. 4.8).

Положения угловых точек А, В, С и D относительно центра судна будем задавать дистанциями D_n , D_k и углами ψ_n , ψ_k . Значения D_n , D_k , ψ_n и ψ_k в зависимости от параметров l_n , l_k и b безопасной области определяются, как следует с рис. 4.8, следующим образом:

$$\psi_n = \arctg \frac{b}{2l_n}, \quad \psi_k = \arctg \frac{b}{2l_k},$$

$$D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}, \quad D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}.$$

С учетом полученных выражений положения угловых точек в судовой системе координат XOY определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} X_A &= D_n \sin \psi_n, & Y_A &= D_n \cos \psi_n, \\ X_B &= D_k \sin(\pi - \psi_k), & Y_B &= D_k \cos(\pi - \psi_k), \\ X_C &= D_k \sin(\pi + \psi_k), & Y_C &= D_k \cos(\pi + \psi_k), \\ X_D &= D_n \sin(2\pi - \psi_n), & Y_D &= D_n \cos(2\pi - \psi_n). \end{aligned}$$

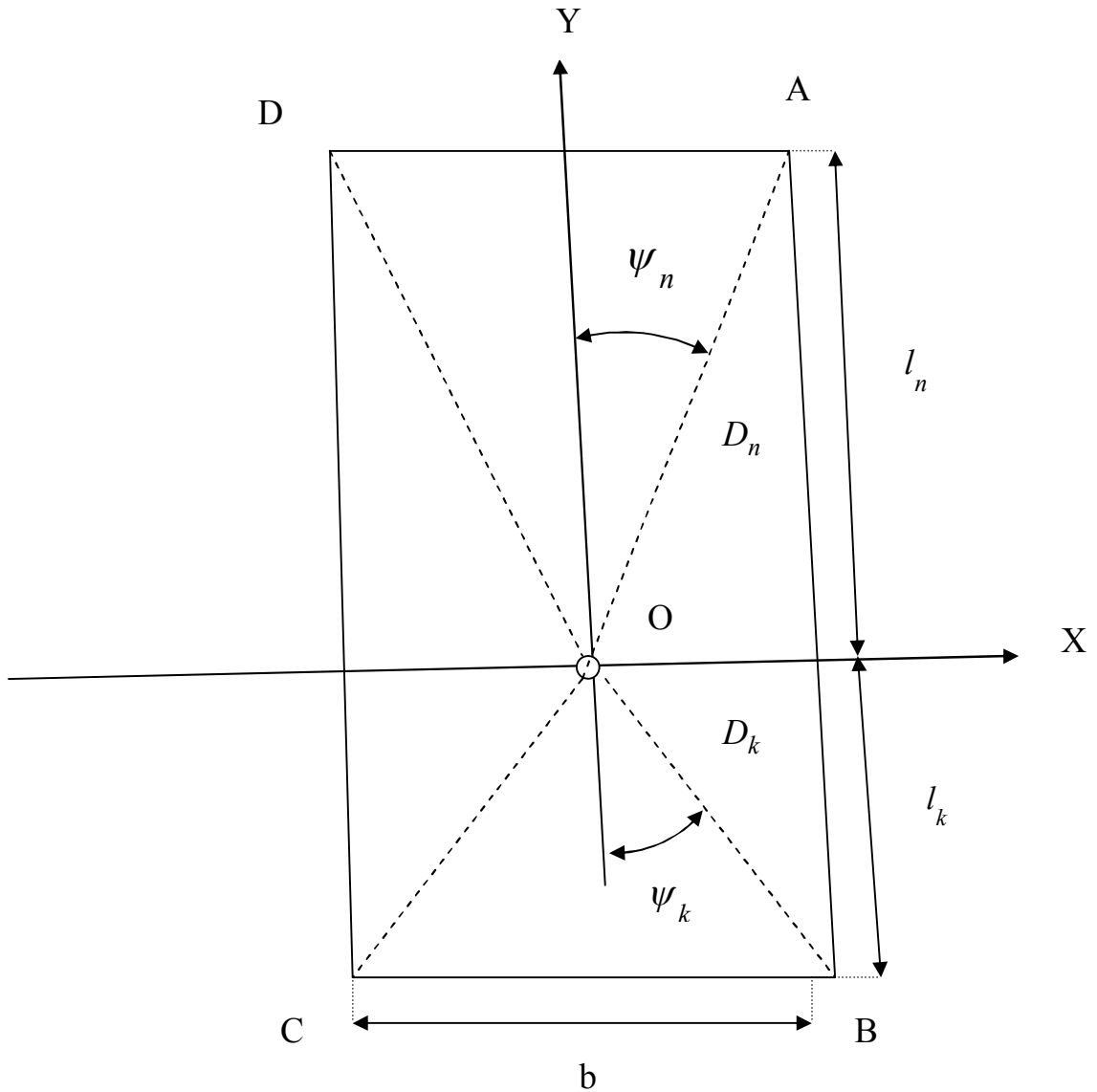


Рис. 4.8. Параметры безопасной области $D_b^{(Rt)}$ прямоугольной формы

Для получения формул расчета относительных минимальных курсов уклонения, проходящих через угловые точки следует ввести, как и в предыдущем случае, опорную $\overline{XOY}$ и промежуточную $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$ системы координат (рис. 4.9). При курсе цели K_c и положении его центра $\overline{X}_o, \overline{Y}_o$ в системе координат $\overline{XOY}$, координаты критических точек А, В, С и D в этой же координатной системе определяются, как следует с рис. 4.9, следующими формулами:

$$\begin{aligned}\overline{X}_A &= \overline{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K_c), & \overline{Y}_A &= \overline{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K_c), \\ \overline{X}_B &= \overline{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K_c), & \overline{Y}_B &= \overline{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K_c),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{X}_C &= \bar{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K_c), & \bar{Y}_C &= \bar{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K_c), \\ \bar{X}_D &= \bar{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K_c), & \bar{Y}_D &= \bar{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K_c).\end{aligned}$$

Значения относительного минимального курса уклонения $\bar{K}_{yminI}$, проходящего через угловые точки будет определяться выражениями:

$$\begin{aligned}\tilde{K}_{yminI} &= 360 + \bar{K}_{yminI}, \text{ при } \bar{Y}_I > 0; & (I = A, B, C, D) \\ \tilde{K}_{yminI} &= 180 + \bar{K}_{yminI}, \text{ при } \bar{Y}_I < 0,\end{aligned} \quad (4.16)$$

где $\bar{K}_{yminI}$ определяется следующим образом:

$$\bar{K}_{yminA} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminB} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminC} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminD} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K_c)}.$$

Используя полученные выражения, с помощью формулы (4.16) находим значение относительных минимального курсов уклонения $\tilde{K}_{yminA}$, $\tilde{K}_{yminB}$, $\tilde{K}_{yminC}$, $\tilde{K}_{yminD}$. Для выбора относительного минимального курса уклонения $\tilde{K}_{ymin}$ воспользуемся следующим соотношением:

$$\tilde{K}_{ymin} = \max\{\tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD}\}.$$

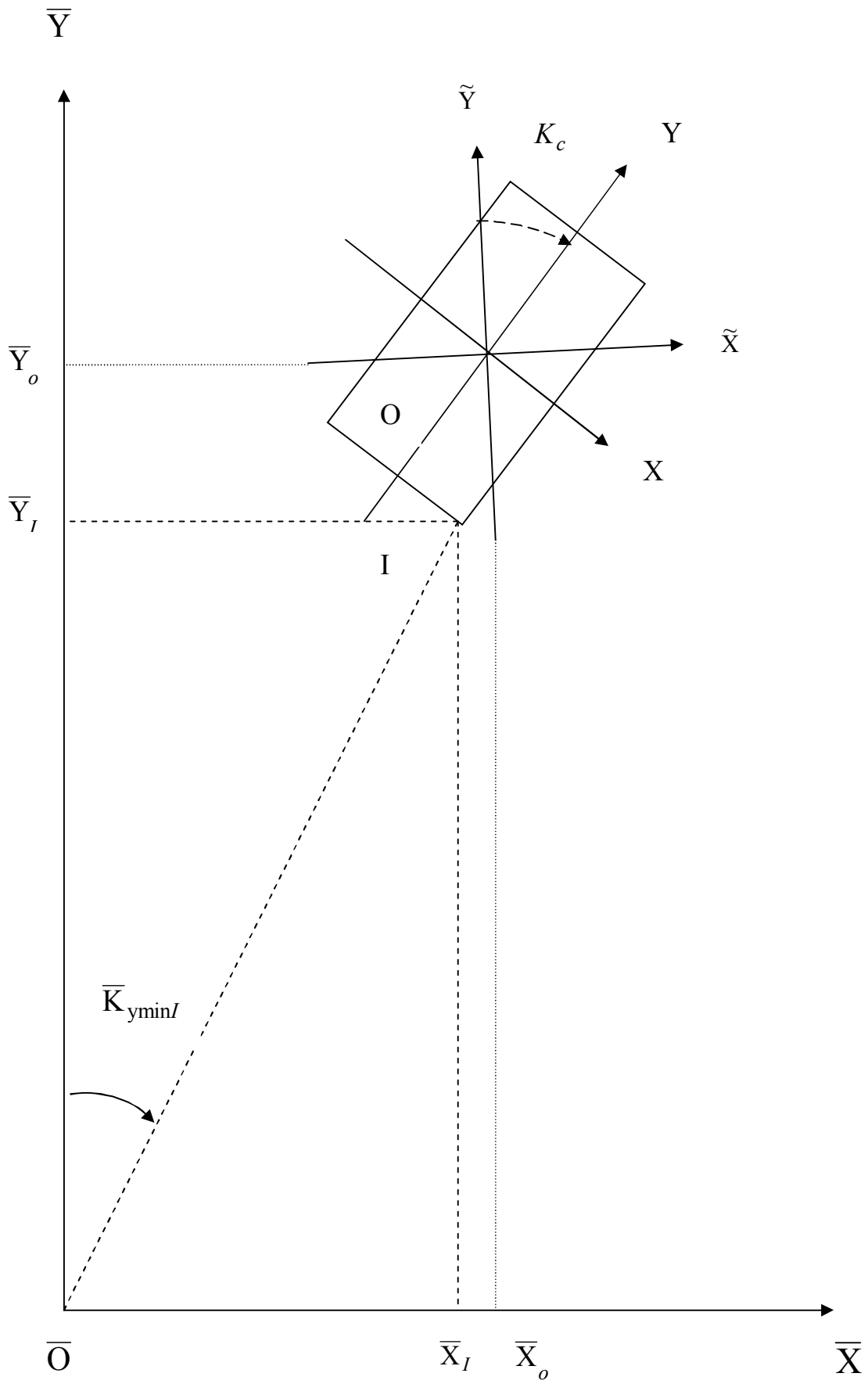


Рис. 4.9. К определению минимального курса уклонения $\bar{K}_{ymin/I}$

Для расчета истинного минимального курса уклонения K_{ymin} по отношению к $\tilde{K}_{ymin}$ следует воспользоваться формулой (4.6).

4.3.4. Расчет относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ для безопасной области цели $D_b^{(Cm)}$ сложной формы.

Безопасную область цели $D_b^{(Cm)}$ сложной формы представим относительно центра цели угловыми точками А, В, С, D, Е и F (рис. 4.10). Их координаты в судовой системе координат ХОУ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} X_A &= 0, & Y_A &= L_{bn}, \\ X_B &= \frac{b_1}{2}, & Y_B &= L_{bn} - L_{bk}, \\ X_C &= \frac{b_2}{2}, & Y_C &= 0, \\ X_D &= 0, & Y_D &= -L_{bk}, \\ X_E &= -\frac{b_2}{2}, & Y_E &= 0, \\ X_F &= -\frac{b_1}{2}, & Y_F &= L_{bn} - L_{bk}. \end{aligned}$$

Для получения формул расчета относительных минимальных курсов уклонения, проходящих через угловых точки следует ввести, как и раньше, опорную $\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$ и промежуточную $\tilde{X}\tilde{O}\tilde{Y}$ системы координат (рис. 4.11). При курсе цели K_c и положении его центра $\bar{X}_o, \bar{Y}_o$ в системе координат $\bar{X}\bar{O}\bar{Y}$, координаты критических точек А, В, С, D, Е и F в этой же координатной системе определяются, как следует с рис. 4.11, следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{X}_A &= \bar{X}_o + L_{bn} \sin K_c, & \bar{Y}_A &= \bar{Y}_o + L_{bn} \cos K_c, \\ \bar{X}_B &= \bar{X}_o + D_s \sin(\psi + K_c), & \bar{Y}_B &= \bar{Y}_o + D_s \cos(\psi + K_c), \end{aligned}$$

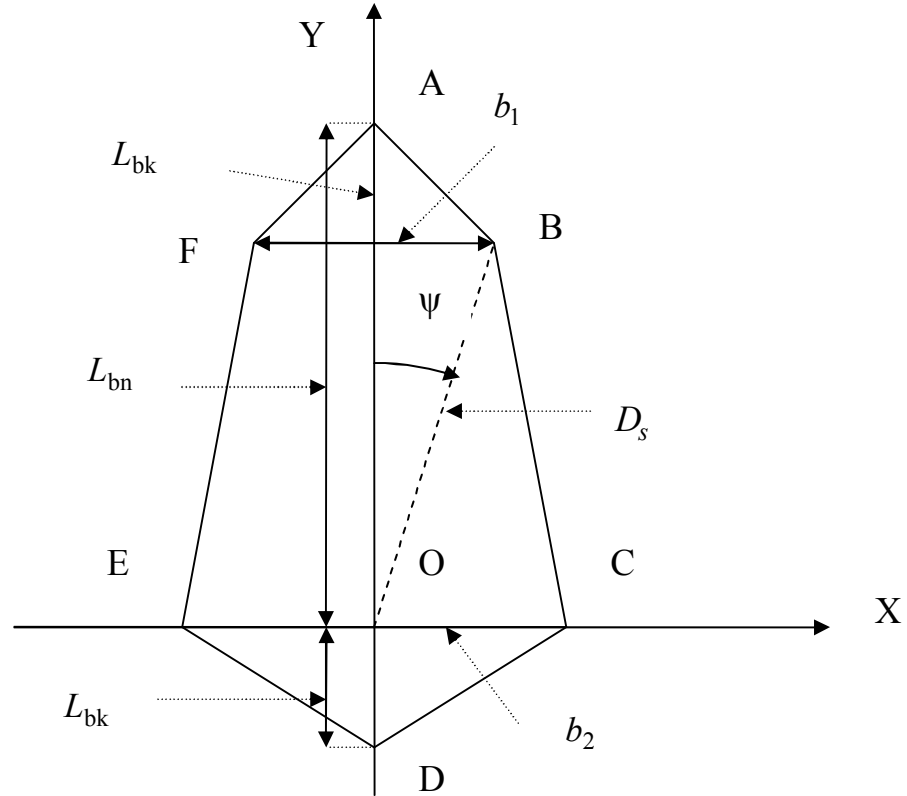


Рис. 4.10. Координаты точек безопасной области $D_b^{(Cm)}$ сложной формы

$$\bar{X}_C = \bar{X}_o + (b_2 / 2) \sin K_c, \quad \bar{Y}_C = \bar{Y}_o - (b_2 / 2) \cos K_c,$$

$$\bar{X}_D = \bar{X}_o - L_{bk} \sin K_c, \quad \bar{Y}_D = \bar{Y}_o - L_{bk} \cos K_c,$$

$$\bar{X}_E = \bar{X}_o - (b_2 / 2) \sin K_c, \quad \bar{Y}_E = \bar{Y}_o + (b_2 / 2) \cos K_c,$$

$$\bar{X}_F = \bar{X}_o + D_s \sin(K_c - \psi), \quad \bar{Y}_F = \bar{Y}_o + D_s \cos(K_c - \psi),$$

где $D_s = [(L_{bn} - L_{bk})^2 + (b_1 / 2)^2]^{1/2}$, $\psi = \arctg[(b_1 / 2) / (L_{bn} - L_{bk})]$ (рис. 4.10).

Значения относительных минимальных курсов уклонения $\bar{K}_{yminI}$, проходящих через угловые точки определяются с помощью следующих выражений:

$$\bar{K}_{yminA} = \arctg \frac{\bar{X}_o + L_{bn} \sin K_c}{\bar{Y}_o + L_{bn} \cos K_c},$$

$$\bar{K}_{yminB} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_s \sin(\psi + K_c)}{\bar{Y}_o + D_s \cos(\psi + K_c)},$$

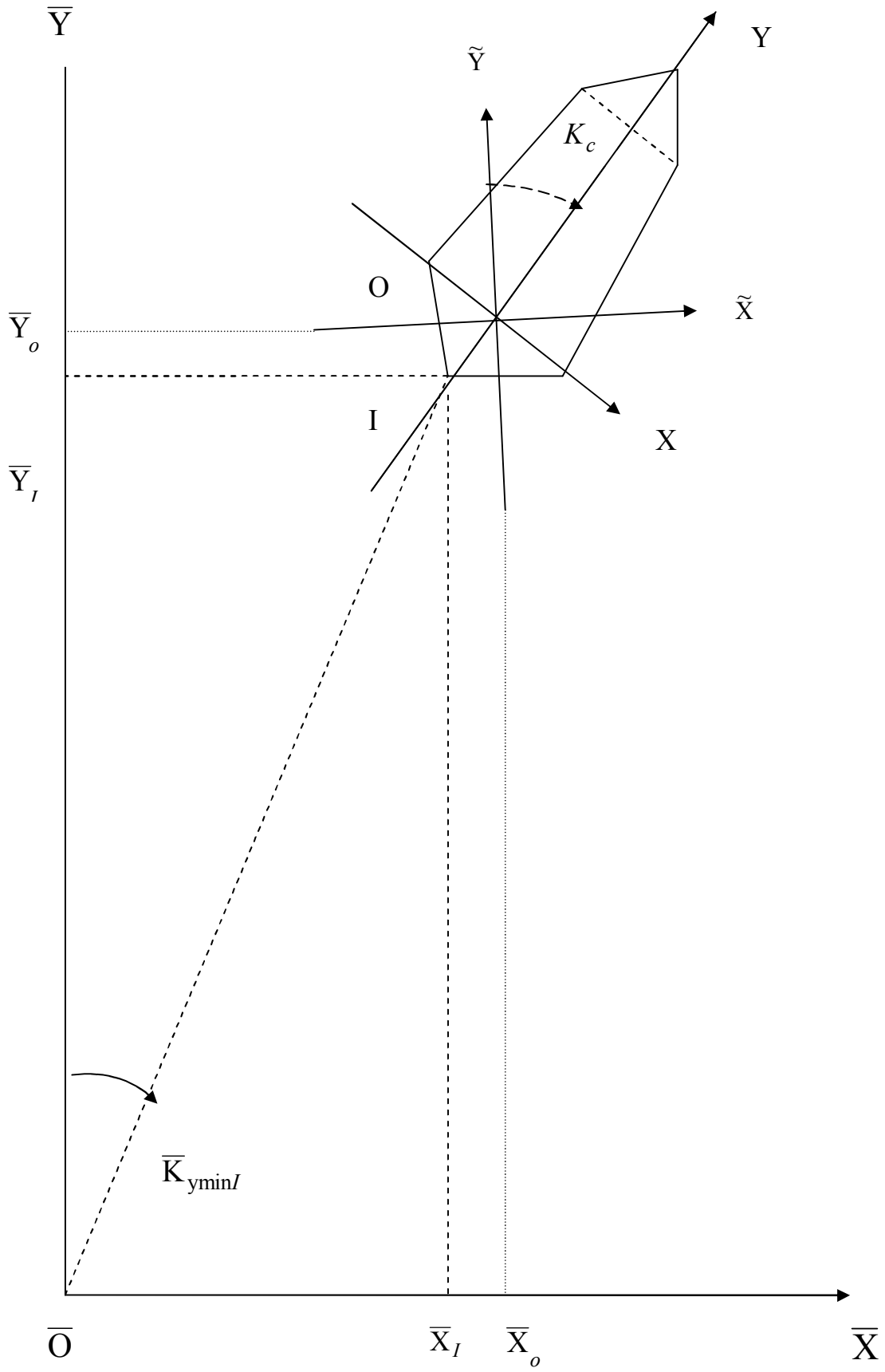


Рис. 4.11. К определению минимального курса уклонения $\bar{K}_{yminI}$

$$\bar{K}_{yminC} = \arctg \frac{\bar{X}_o + (b_2 / 2) \sin K_c}{\bar{Y}_o - (b_2 / 2) \cos K_c}, \quad (4.17)$$

$$\bar{K}_{yminD} = \arctg \frac{\bar{X}_o - L_{bk} \sin K_c}{\bar{Y}_o - L_{bk} \cos K_c},$$

$$\bar{K}_{yminE} = \arctg \frac{\bar{X}_o - (b_2 / 2) \sin K_c}{\bar{Y}_o + (b_2 / 2) \cos K_c},$$

$$\bar{K}_{yminF} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_s \sin(K_c - \psi)}{\bar{Y}_o + D_s \cos(K_c - \psi)}.$$

Используя полученные выражения, находим значения относительных минимальных курсов уклонения $\tilde{K}_{yminI}$ с помощью формулы (4.16), а выбор относительного минимального курса уклонения $\tilde{K}_{ymin}$ производится с помощью следующего соотношения:

$$\tilde{K}_{ymin} = \max \{ \tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD}, \tilde{K}_{yminE}, \tilde{K}_{yminF} \}.$$

Для расчета истинного минимального курса уклонения K_{ymin} по относительному курсу $\tilde{K}_{ymin}$ следует воспользоваться формулой (4.6).

4.3.5. Расчет относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ для безопасной области цели $D_b^{(RE)}$ сложной формы.

Как раньше указывалось, относительный минимальный курс уклонения судна является касательной с места судна к безопасной области цели. В рассматриваемом случае сложной области $D_b^{(RE)}$, представляющей комбинацию половины эллипса и половины круга, в зависимости от курсового угла цели $\beta = \alpha_c - K_c$ (α_c - пеленг с цели на судно) касательная с места судна может

быть к эллипсу или к кругу, как показано на рис. 4.12.

Причем, как следует из того же рис. 4.12, при курсовых углах левого борта положение касательной определяется кругом, а если курсовые углы цели правого борта, то эллипс характеризует положение касательной. Следовательно, минимальный курс уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ в зависимости от курсового угла цели вычисляется по разным формулам.

Рассмотрим этот вопрос более подробно. В случае когда касательная к полукругу безопасной области $D_b^{(RE)}$, относительный минимальный курс уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ рассчитывается с помощью формулы (4.5):

$$\bar{K}_{ymin} = K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}.$$

Из анализа данной формулы следует, что относительный курс $\bar{K}_{ymin}$ не зависит от курса цели K_c и его значение неизменно. Поэтому для курсовых углов цели β левого борта, что аналитически выражается неравенством $\sin \beta < 0$, относительный минимальный курс уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ рассчитывается по приведенному выражению.

При курсовых углах цели β правого борта, как следует из рис. 4.12, относительный минимальный курс уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ равен касательной к полу-эллипсу безопасной области сложной формы $D_b^{(RE)}$, причем условие реализации курсового угла цели β определяется неравенством $\sin \beta > 0$.

В общем случае относительный минимальный курс уклонения судна $\bar{K}_{ymin}$ определяется выражением:

$$\bar{K}_{ymin} = \begin{cases} K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}, & \text{если } \sin \beta < 0, \\ \max \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \}, & \text{если } \sin \beta > 0, \end{cases} \quad (4.18)$$

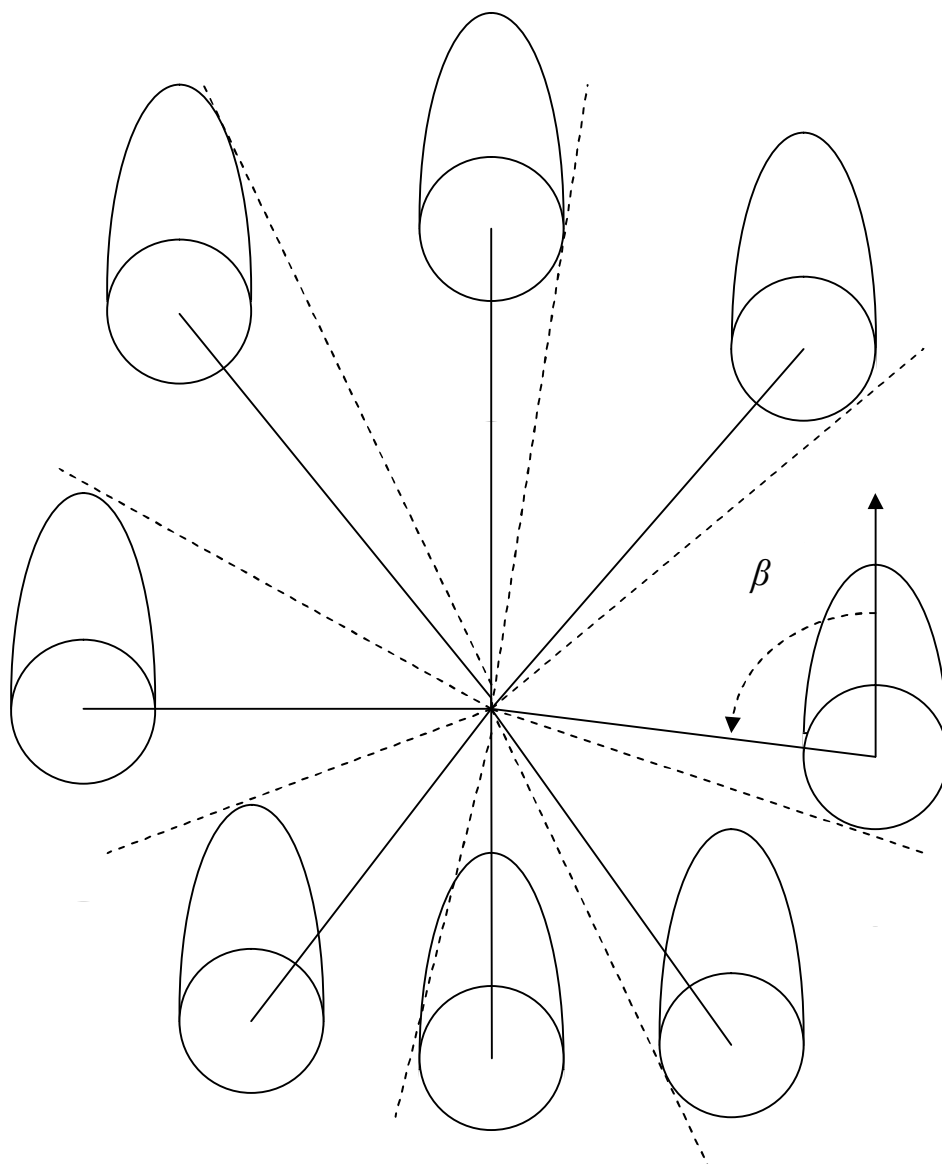


Рис. 4.12. Положение касательной по отношению к области $D_b^{(RE)}$

где

$$\bar{K}_{ymin1} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin2} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin3} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin4} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}.$$

4.4. Выбор оптимальной формы безопасной области судна.

В предыдущей главе указывалось, что при сравнении различных безопасных областей цели D_b в качестве критерия оптимальности целесообразно выбрать приращение курса уклонения судна ΔK_{yi} для безопасного расхождения с целью при уклонении вправо, при этом оптимальной является та форма безопасной области, для которой значение отклонения ΔK_{y0} принимает минимальное значение т.е.

$$\Delta K_{y0} = \min \{ \Delta K_{y1}, \dots, \Delta K_{yi}, \dots, \Delta K_{yn} \}.$$

Очевидно, при ранее принятых допущениях в случае $V_o > V_c$ оптимальная область будет характеризоваться минимальным отклонением относительного курса уклонения от начального относительного курса, т. е. $\Delta \bar{K}_{yi} = K_{otn} - \bar{K}_{ymin}$. Поэтому для оптимальной безопасной области справедливо соотношение $\Delta \bar{K}_{y0} = \min \{ \Delta \bar{K}_{y1}, \dots, \Delta \bar{K}_{yi}, \dots, \Delta \bar{K}_{yn} \}$.

Обращаем внимание на следующее обстоятельство. Относительное минимальное уклонение $\Delta \bar{K}_{yi}$ определяется относительным минимальным курсом $\bar{K}_{ymini}$, линия которого совпадает с касательной к безопасной области цели. Заметим, только для круговой безопасной области цели величина относительного минимального курса $\bar{K}_{ymin}^{(Rd)}$ не зависит от курса цели. Остальные четыре безопасные области лишены такого достоинства - для них относительный минимальный курс $\bar{K}_{ymini}$ при неизменном пеленге зависит от курса цели K_c . Поэтому расчет $\Delta \bar{K}_{yi}$ четырех упомянутых безопасных областей следует производить по осредненному значению относительного минимального курса $\bar{K}_{ymin}^{(k)}$, причем, очевидно, расчет производится с помощью следующей формулы:

$$\bar{K}_{ymin}^{(k)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \bar{K}_{ymini}(K_c) dK_c. \quad (4.19)$$

Рассмотрим расчет осредненного относительного минимального курса $\bar{K}_{ymin}^{(El)}$ для безопасной области цели эллиптической формы $D_b^{(El)}$. В этом случае подынтегральная функция выражения (4.19) определяется формулой (4.12) и может принимать одно из четырех аналитических выражений. Это обстоятельство мотивирует решение определенного интеграла (4.19) находить численным методом, используя способ Симпсона.

Согласно этому способу, интервал интегрирования разбиваем на четное число n элементарных интервалов h_i , величину каждого из которых

целесообразно выбрать равной $h = 2^\circ$, при этом $n=180$. Так как значения K_c для 0° и 360° равны, то верхний предел интегрирования принимаем равным 180.

Введем обозначение $y = \bar{K}_{y\min}(K_c)$, причем $y_i = \bar{K}_{y\min}(K_{ci})$. Интеграл (4.19) представляется выражением:

$$\int_0^{2\pi} y dK_c = \frac{h}{3} [y_0 + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{n-1}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{n-2}) + y_n]. \quad (4.20)$$

Учитывая изменения курса цели в градусной мере, последнее выражение записываем в следующем виде:

$$\int_0^{360} y dK_c = \frac{2}{3} [y_0 + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{179}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{178}) + y_{180}]. \quad (4.21)$$

Так, как подынтегральная функция выражается четырьмя альтернативными выражениями (4.15), то для вычисления определенного интеграла (4.21) каждое значение y_i необходимо рассчитать по каждому из выражений формулы (4.15), а затем выбрать максимальное для расчета выражения (4.21). В результате расчета среднее значение относительного минимального курса (4.19) используем выражение:

$$\bar{K}_{y\min}^{(El)} = \frac{1}{270} [y_0 + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{179}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{178}) + y_{180}], \quad (4.22)$$

где $y_i = \max\{y_{iA}^{(El)}, y_{iB}^{(El)}, y_{iC}^{(El)}, y_{iD}^{(El)}\}$,

здесь

$$y_{iA}^{(El)} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b\sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b\sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$y_{iB}^{(El)} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$y_{iC}^{(El)} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

$$y_{iD}^{(El)} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}.$$

Для безопасной области прямоугольной формы $D_b^{(Rt)}$ расчет осредненного значения относительного минимального курса $\bar{K}_{ymin}^{(Rt)}$ производится аналогично предыдущему случаю, только в этом случае подынтегральная функция выражения (4.19) определяется формулой (4.16) и принимает одно из четырех аналитических выражений, причем, как и в предыдущем случае, применяется способ Симпсона. При этом выражение для среднего значения относительного минимального курса $\bar{K}_{ymin}^{(Rt)}$ производится с помощью выражения (4.22), причем для каждого значения y_i выбирается максимальная величина из четырех значений подынтегральной функции, полученных из выражения (4.16).

Для области $D_b^{(Rt)}$ расчетная формула среднего значения относительного

минимального курса $\overline{K}_{ymin}^{(Rt)}$ имеет вид:

$$\overline{K}_{ymin}^{(Rt)} = \frac{1}{270} [y_0 + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{179}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{178}) + y_{180}],$$

где $y_i = \max\{y_{iA}^{(Rt)}, y_{iB}^{(Rt)}, y_{iC}^{(Rt)}, y_{iD}^{(Rt)}\}$,

здесь

$$y_{iA}^{(Rt)} = \arctg \frac{\overline{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K_c)}{\overline{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K_c)},$$

$$y_{iB}^{(Rt)} = \arctg \frac{\overline{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K_c)}{\overline{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K_c)},$$

$$y_{iC}^{(Rt)} = \arctg \frac{\overline{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K_c)}{\overline{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K_c)},$$

$$y_{iD}^{(Rt)} = \arctg \frac{\overline{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K_c)}{\overline{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K_c)}.$$

Расчет осредненного значения относительного минимального курса $\overline{K}_{ymin}^{(Cm)}$ для безопасной области сложной формы $D_b^{(Cm)}$ производится с помощью выражения (4.19), подынтегральная функция которого определяется формулой (4.17) и представлена шестью выражениями. Расчет $\overline{K}_{ymin}^{(Cm)}$ производится способом Симпсона, причем каждое значение y_i в выражении (4.22) является максимальным из шести предварительно рассчитанных по формуле (4.17).

Таким образом, расчет $\overline{K}_{ymin}^{(Cm)}$ производится следующим путем:

$$\overline{K}_{ymin}^{(Cm)} = \frac{1}{270} [y_0 + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{179}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{178}) + y_{180}],$$

где $y_i = \max\{y_{iA}^{(Cm)}, y_{iB}^{(Cm)}, y_{iC}^{(Cm)}, y_{iD}^{(Cm)}, y_{iE}^{(Cm)}, y_{iF}^{(Cm)}\}$,

причем

$$y_{iA}^{(Cm)} = \arctg \frac{\bar{X}_o + L_{bn} \sin K_c}{\bar{Y}_o + L_{bn} \cos K_c},$$

$$y_{iB}^{(Cm)} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_s \sin(\psi + K_c)}{\bar{Y}_o + D_s \cos(\psi + K_c)},$$

$$y_{iC}^{(Cm)} = \arctg \frac{\bar{X}_o + (b_2 / 2) \sin K_c}{\bar{Y}_o - (b_2 / 2) \cos K_c},$$

$$y_{iD}^{(Cm)} = \arctg \frac{\bar{X}_o - L_{bk} \sin K_c}{\bar{Y}_o - L_{bk} \cos K_c},$$

$$y_{iE}^{(Cm)} = \arctg \frac{\bar{X}_o - (b_2 / 2) \sin K_c}{\bar{Y}_o + (b_2 / 2) \cos K_c},$$

$$y_{iF}^{(Cm)} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_s \sin(K_c - \psi)}{\bar{Y}_o + D_s \cos(K_c - \psi)}.$$

Для безопасной области $D_b^{(RE)}$ характерно, что для половины курсов цели величина относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}^{(Rd)}$ является постоянной и равна:

$$\bar{K}_{ymin}^{(Rd)} = K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D},$$

а для остальных курсов цели величина среднего относительного минимального курса уклонения судна $\bar{K}_{ymin}^{(El)}$ определяется, как для половины эллипса, поэтому формула (4.22) модифицируется:

$$\bar{K}_{ymin}^{(El)} = \frac{1}{135} [y_0 + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{179}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{178}) + y_{180}],$$

где $y_i = \max\{y_{iA}^{(El)}, y_{iB}^{(El)}, y_{iC}^{(El)}, y_{iD}^{(El)}\}$, и

$$y_{iA}^{(El)} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$y_{iB}^{(El)} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$y_{iC}^{(El)} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

$$y_{iD}^{(El)} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

причем $K_c \in [0, 180]$.

Очевидно, среднее значение относительного минимального курса $\bar{K}_{ymin}^{(RE)}$

для безопасной области сложной формы $D_b^{(RE)}$ производится с помощью

формулы: $\bar{K}_{ymin}^{(RE)} = (\bar{K}_{ymin}^{(Rd)} + \bar{K}_{ymin}^{(El)})/2$.

Таким образом производится расчет среднего значения относительного минимального курса безопасных областей различных форм.

4.5. Выводы по четвертой главе диссертации.

В четвертой главе диссертации разработана процедура выбора оптимальной формы безопасной области, предусматривающая определение размеров безопасной области заданной формы в зависимости от закона распределения вероятностей векториальной погрешности.

Рассмотрены выражения для двумерных распределений вероятностей векториальной погрешности для нормального и двух типов смешанных законов. Получены уравнения для расчета определяющих параметров стохастических областей пяти форм при условии, что векториальная погрешность подчинена нормальному или смешанным законам распределения вероятностей. Приведена сводная таблица уравнений вычисления определяющих параметров стохастических областей пяти форм с возможными тремя типами законов распределения вероятностей.

Разработана процедура определения минимальных курсов уклонений судна при заданной форме безопасной области судна. Так как для безопасных областей, кроме круговой, минимальный курс уклонения зависит от ракурса цели, поэтому получены выражения для вычисления осредненных курсов уклонения, характерной для конкретной формы безопасной области.

В последнем подразделе главы изложена процедура выбора оптимальной формы безопасной области судна, которая предусматривает сравнение величин осредненных курсов уклонения и в качестве оптимальной выбирается та форма безопасной области, для которой значение осредненного курса уклонения является минимальным.

ГЛАВА 5

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Алгоритм расчета размеров безопасной области заданной формы.

Имитационное моделирование предусматривает проверку корректности полученной процедуры расчета размеров безопасной области и способа выбора оптимальной области. Поэтому имитационное моделирование должно решать две указанные задачи, что определяет два режима работы имитационной компьютерной программы.

Рассмотрим первый режим работы имитационной программы. Для его выбора следует «кликнуть» клавишу «РЕЖИМ» (рис. 5.1), после чего на

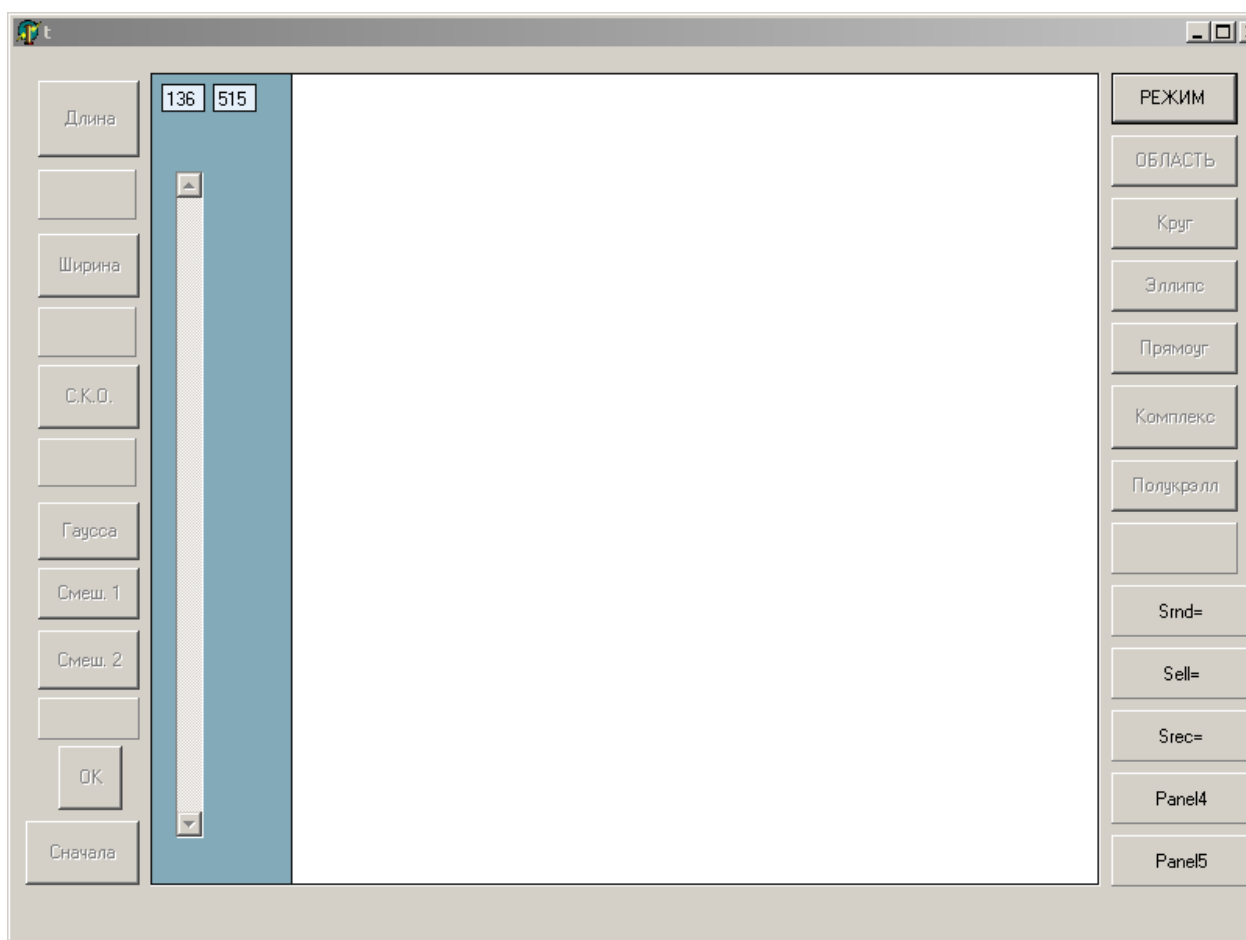


Рис. 5.1. Интерфейс при начале работы имитационной программы

клавише появляется сообщение «Режим 1» и происходит инициализация клавиши «ОБЛАСТЬ».

С помощью этой клавиши выбирается тип отображаемой области: стохастической, детерминированной или безопасной, являющейся объединением стохастической и детерминированной областей. При однократном «кликании» клавиши «ОБЛАСТЬ» производится выбор детерминированной области (рис. 5.2).

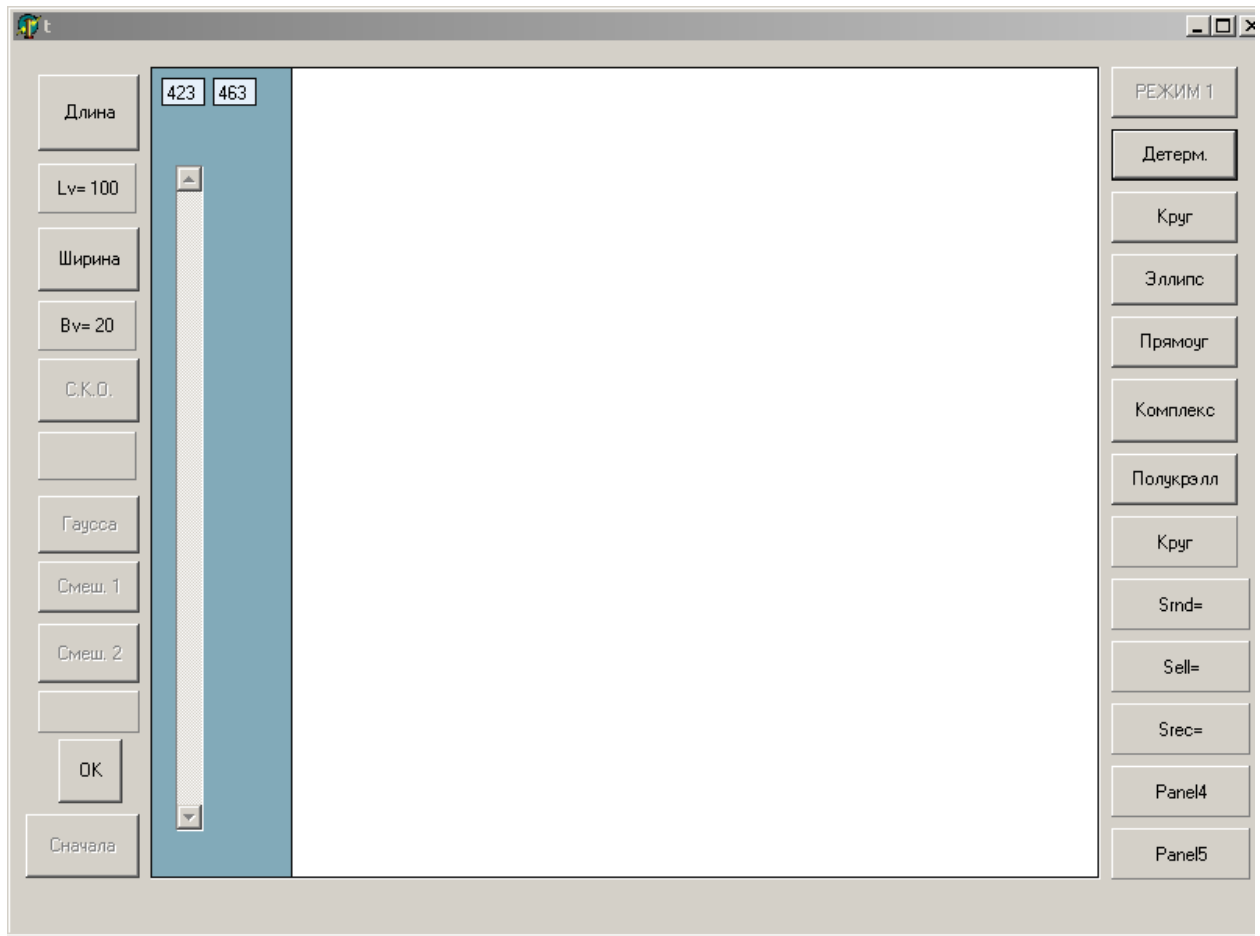


Рис. 5.2. Выбор отображения детерминированной области

Как указывалось раньше, детерминированную область цели D_{det} можно задать разными формами: в виде круга ($D_{\text{det}}^{(\text{Rd})}$), в виде эллипса ($D_{\text{det}}^{(\text{El})}$) и прямоугольной формы ($D_{\text{det}}^{(\text{Rt})}$).

Детерминированная область цели прямоугольной формы $D_{\text{det}}^{(\text{Rt})}$ определяется расстоянием от точки цели в сторону ее носа $L_{\text{det n}}$:

$$L_{\text{det n}} = 0,7L_t + 0,5B_v + L_{\text{pr}} + L_{\text{fnn}},$$

расстоянием от точки цели в сторону ее кормы $L_{\text{det k}}$:

$$L_{\text{det k}} = 0,3L_t + 0,5B_v + L_{\text{pr}} + L_{\text{fmk}}.$$

Область $D_{\text{det}}^{(\text{Rt})}$ по ширине B_{det} симметрична относительно обсервованной точки цели, причем:

$$B_{\text{det}} = B_t + B_v + 2(L_{\text{pr}} + B_{\text{fmb}}).$$

Причем в приведенных выражениях:

L_t и B_t - соответственно длина и ширина цели;

B_v - ширина судна;

L_{pr} - среднее значение максимальной дистанции для предотвращения явления присасывания, принимаемое для моделирования 200 м;

L_{fnn} , L_{fmk} и B_{fmb} - дистанции от обсервованной точки цели соответственно по носу, по корме и по бортам, предусматривающие учет возможного влияния форс-мажорных обстоятельств, причем при моделировании принимали $L_{\text{fnn}} = 10L_t$, $L_{\text{fmk}} = 3L_t$, $B_{\text{fmb}} = 5L_t$.

Детерминированная область цели круглой формы $D_{\text{det}}^{(\text{Rd})}$ характеризуется радиусом R_{det} , величина которого определяется выражением:

$$R_{\text{det}} = 0,7L_t + 0,5B_v + L_{\text{pr}} + L_{\text{fnn}}.$$

Если детерминированная область цели имеет форму эллипса $D_{\text{det}}^{(\text{El})}$, то полуоси эллипса выражаются следующим образом:

$$a_{\text{det}} = 0,5(L_{\text{det n}} + L_{\text{det k}}) \text{ и } b_{\text{det}} = 0,5B_{\text{det}}.$$

В работе предусмотрено пять форм безопасной области и получены соответствующие им детерминированные области. В имитационной программе выбор формы безопасной области производится клавишами «Круг», «Эл-

липс», «Прямоуг», «Комплекс» и «Полукрэлл», которые расположены в верхней правой части экрана монитора (рис. 5.2).

Для отображения детерминированной области, имеющей форму круга, используется клавиша «Круг» (рис. 5.3).

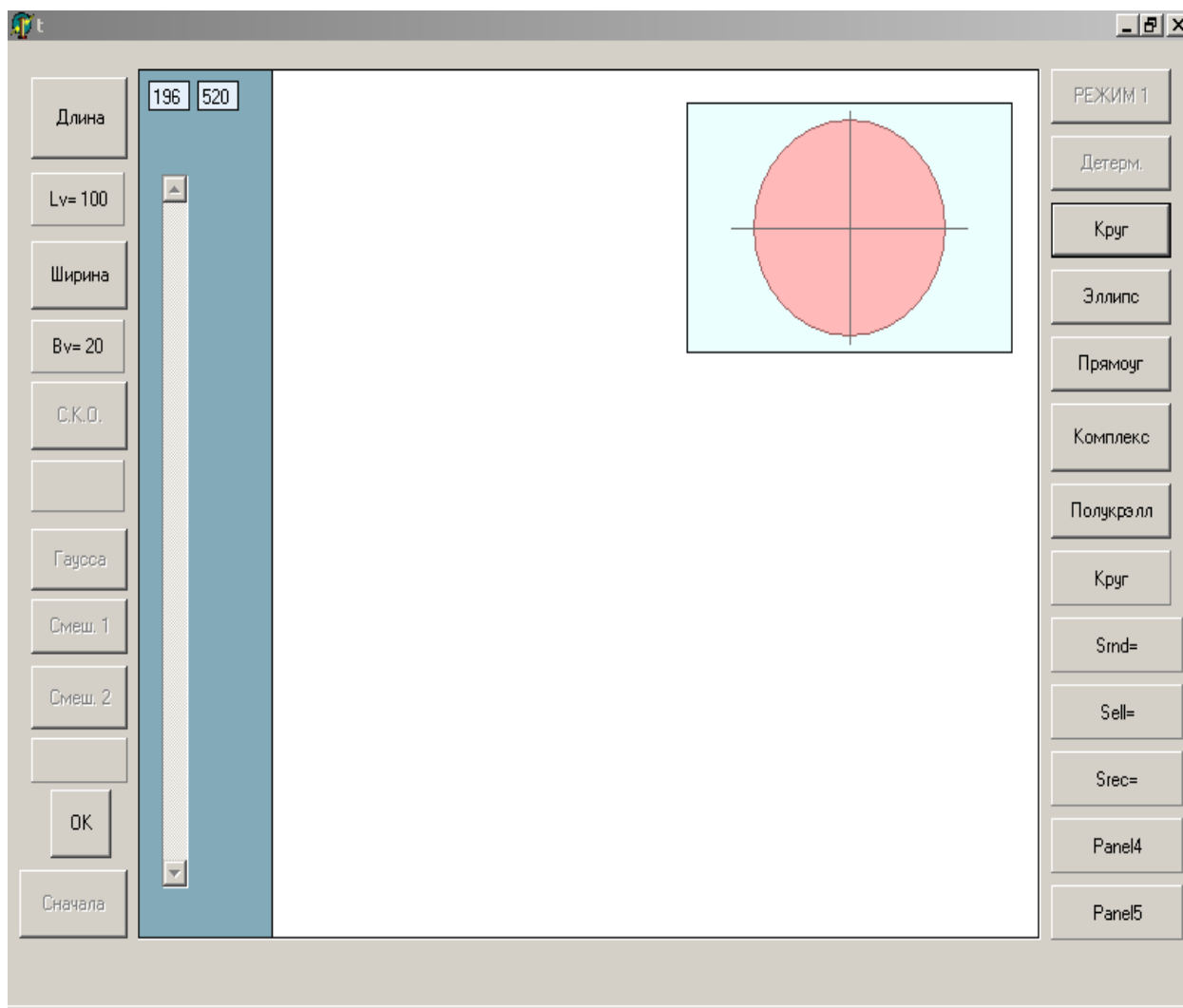


Рис. 5.3. Выбор детерминированной области круглой формы

После выбора формы безопасной области следует ввести длину и ширину судна, для чего используются клавиши с левой стороны экрана монитора. Значение вводимой величины выбирается с помощью линейки прокрутки, которое указывается на соответствующей панели, как показано на рис. 5.4. На

рисунке отображен случай ввода максимальных значений длины и ширины судна.

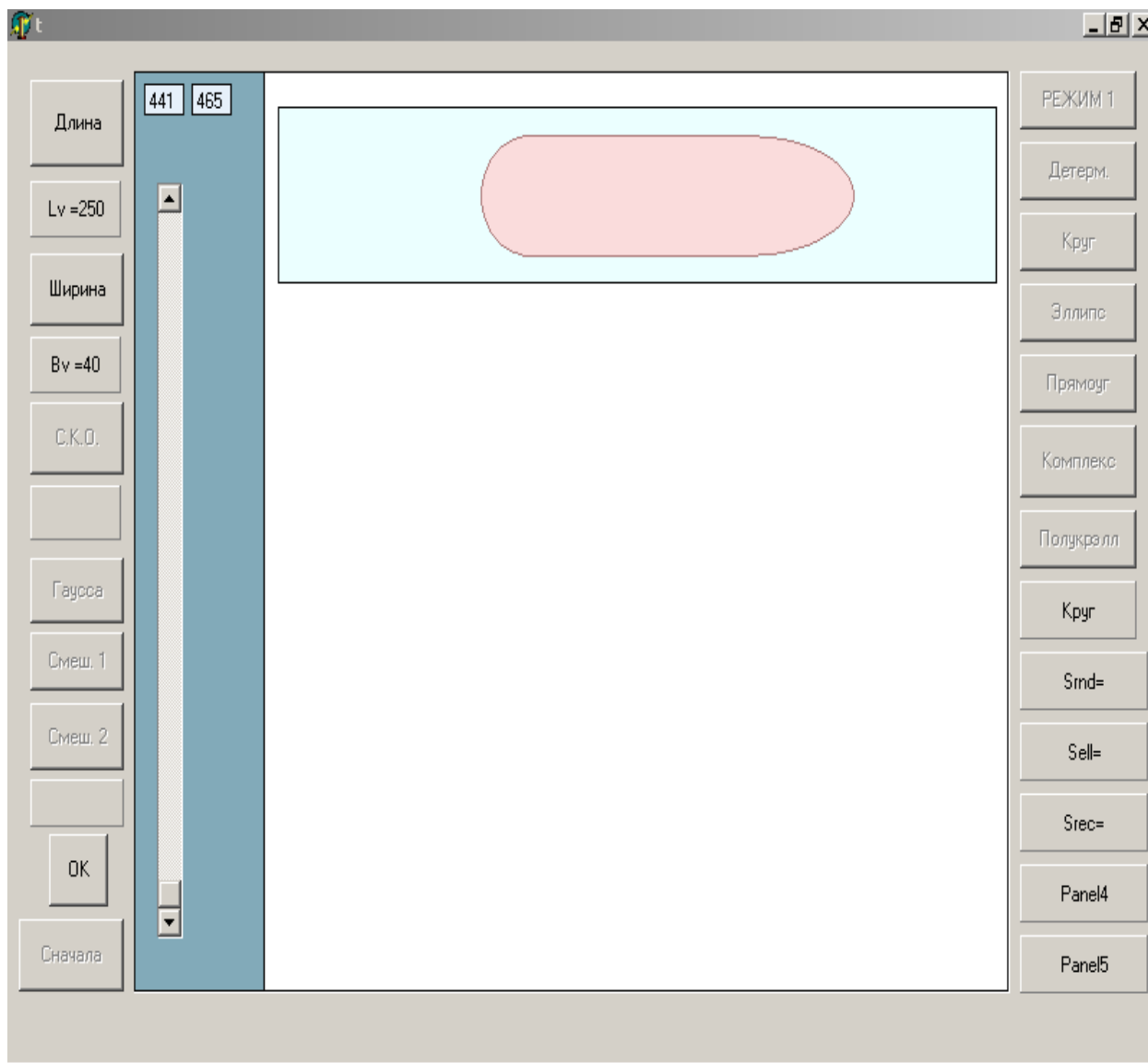


Рис. 5.4. Ввод размерностей судна

С помощью клавиши «ОК» выводится детерминированная область круглой безопасной области, размеры которой можно оценить визуально, а ее площадь выводится на соответствующем информационном табло, расположенном с правой части экрана монитора, как показано на рис. 5.5.

Как показано на рис. 5.5, площадь детерминированной области круглой формы для максимальных размеров судна с длиной 250 м и шириной 40м равна 26329767 кв.м.

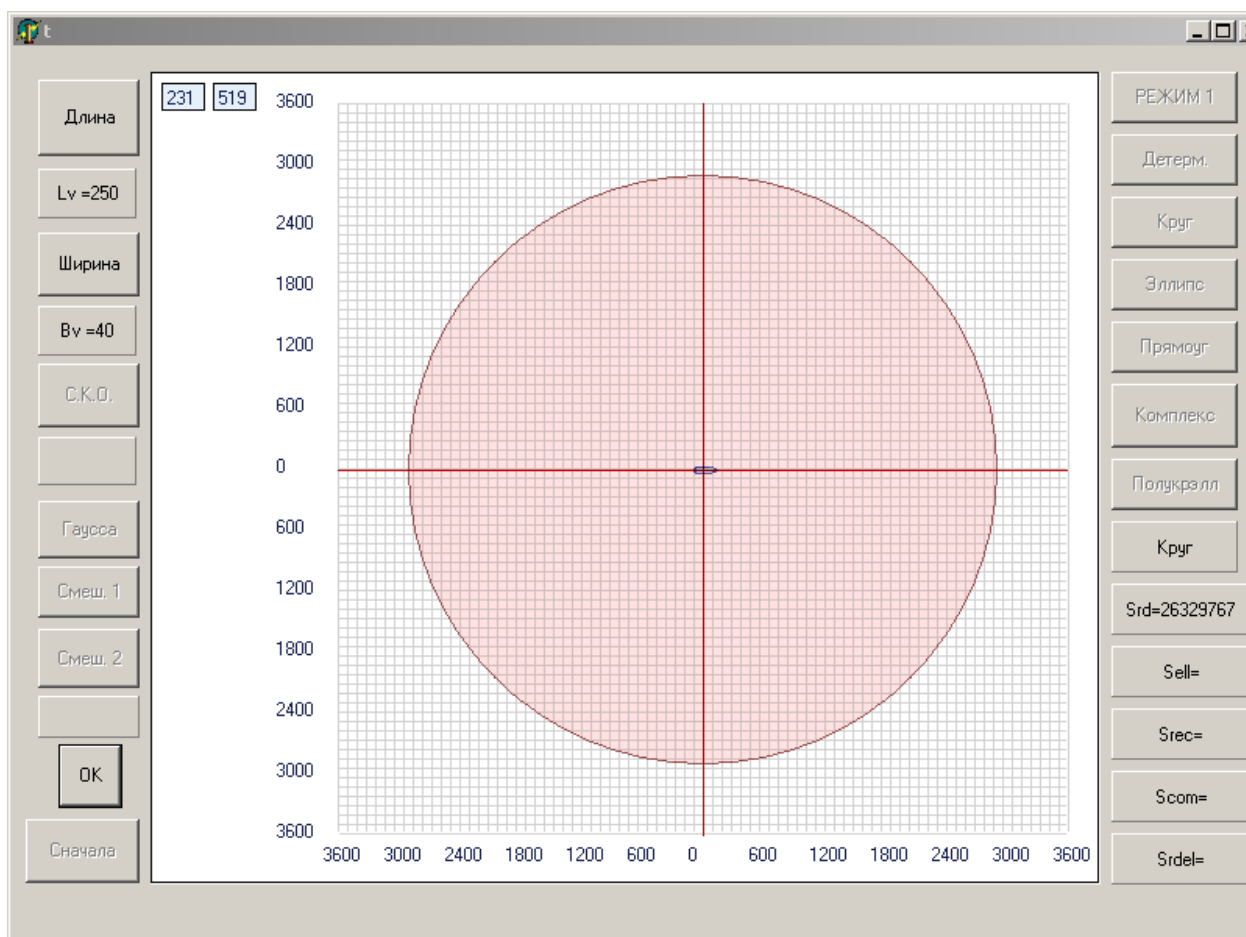


Рис. 5.5. Отображение детерминированной области круглой формы

Для отображения детерминированной области эллиптической формы необходимо использовать клавишу «Эллипс», как показано на рис. 5.6. После чего необходимо ввести размеры судна с помощью клавиш «Длина» и «Ширина», причем значение выбранной величины вводится линейкой прокрутки.

После введения максимальных размеров судна, предусмотренных имитационной программой, (длины 250 м и ширины 40 м) детерминированная область эллиптической формы характеризуется большой полуосью, равной 1970 м, малой полуосью величиной 1490 м, а ее площадь равна 9221517 кв. м, как показано на рис. 5.7. На этом рисунке также видно, что центр эллиптической области не совпадает с местом судна, т.е. детерминированная область смещена вперед по направлению движения судна.

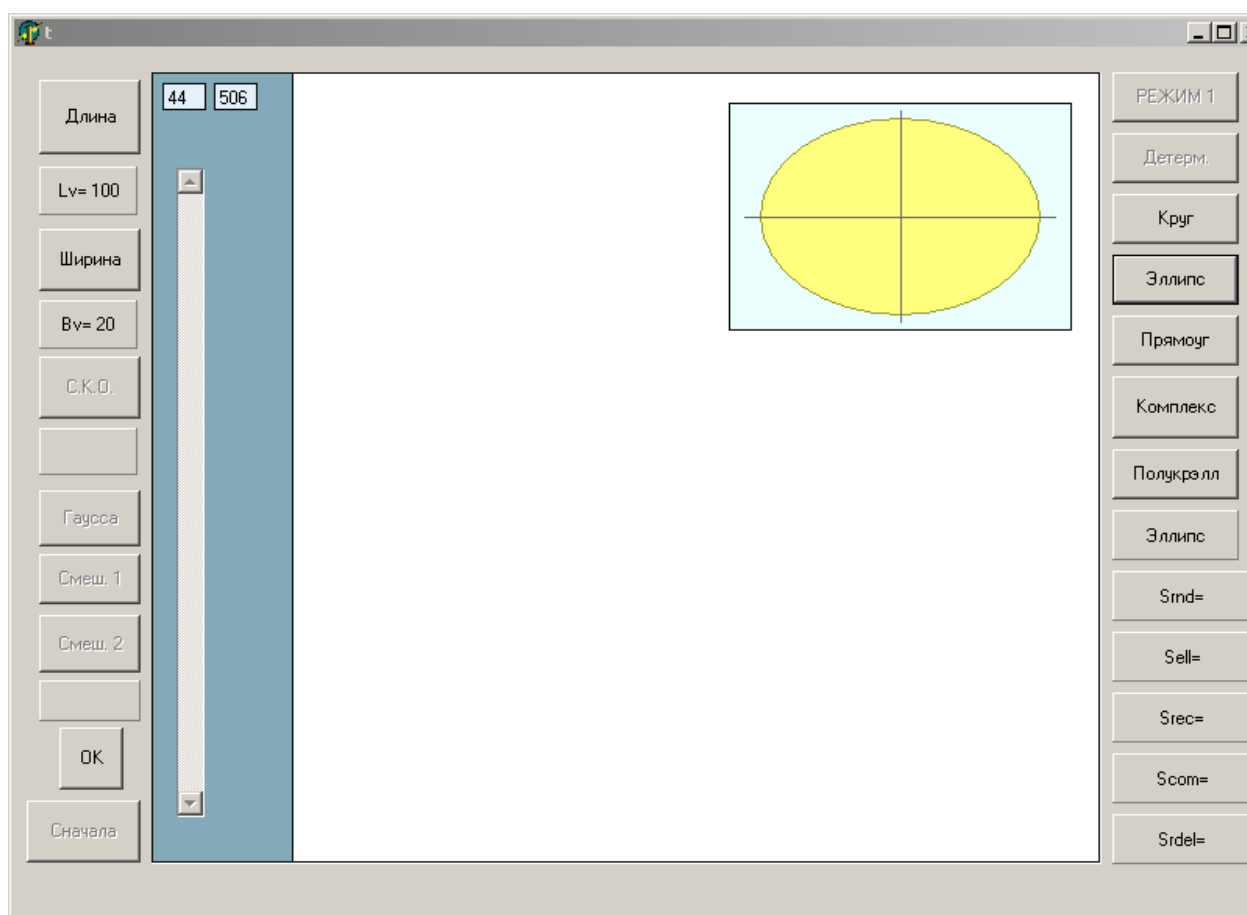


Рис. 5.6. Выбор эллиптической детерминированной области

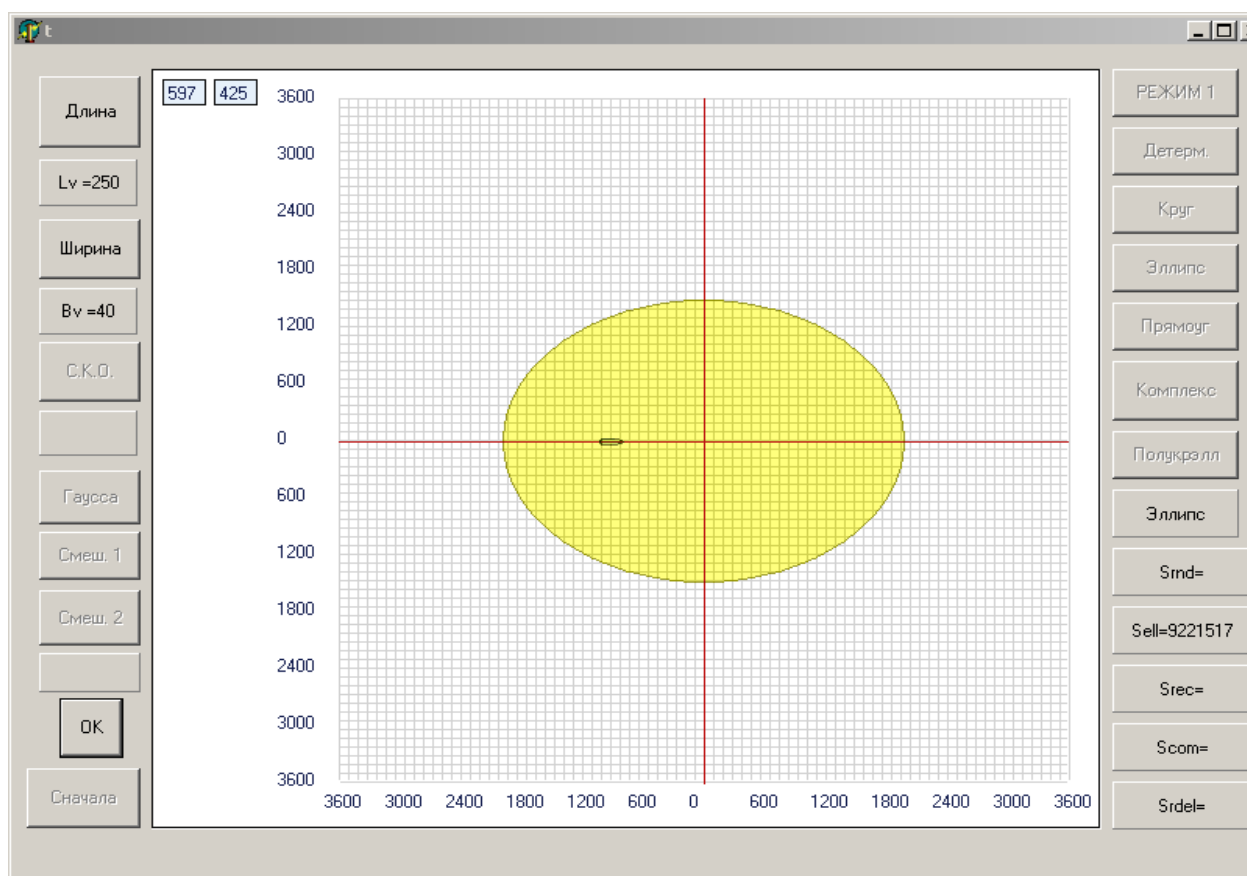


Рис. 5.7. Отображение детерминированной эллиптической области

Выбор детерминированной области прямоугольной формы производится с помощью клавиши «Прямоуг», расположенной в правой части монитора, как показано на рис. 5.8, при этом в верхней правой части экрана появляется характеристика выбранной формы детерминированной области. После ввода габаритов судна и использования клавиши «ОК» производится отображение прямоугольной детерминированной области для максимальных габаритов судна, причем площадь области равна 11741200 кв. м (рис.5.9).

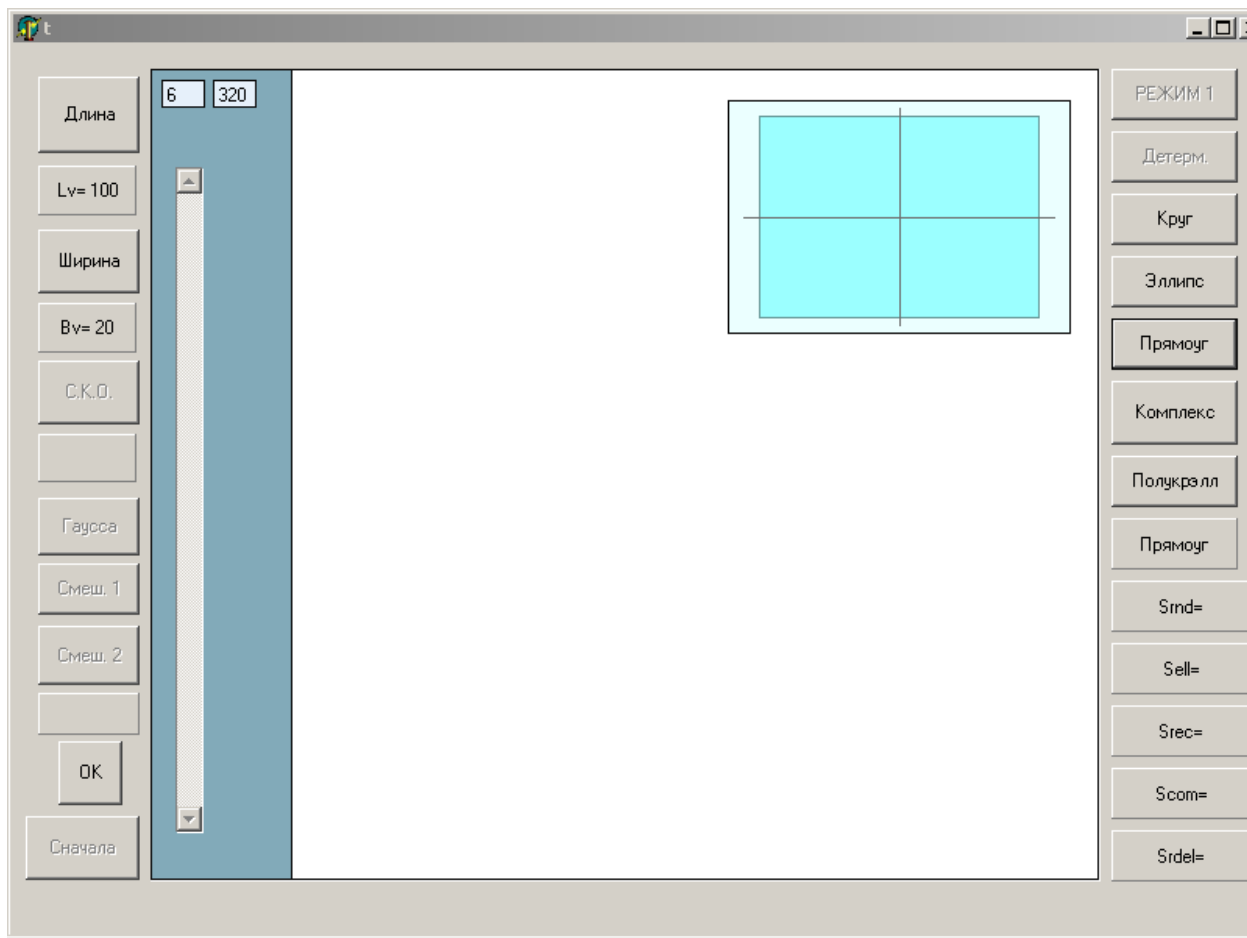


Рис. 5.8. Выбор прямоугольной детерминированной области

С помощью клавиши «Комплекс» производится выбор детерминированной области сложной формы, как показано на рис. 5.10. Так как в случае сложной области судна детерминированная область имеет прямоугольную форму, зависящую от размеров судна, то ее площадь при максимальных размерах судна равна 11741200 кв. м, как показано на следующем рис. 5.11.

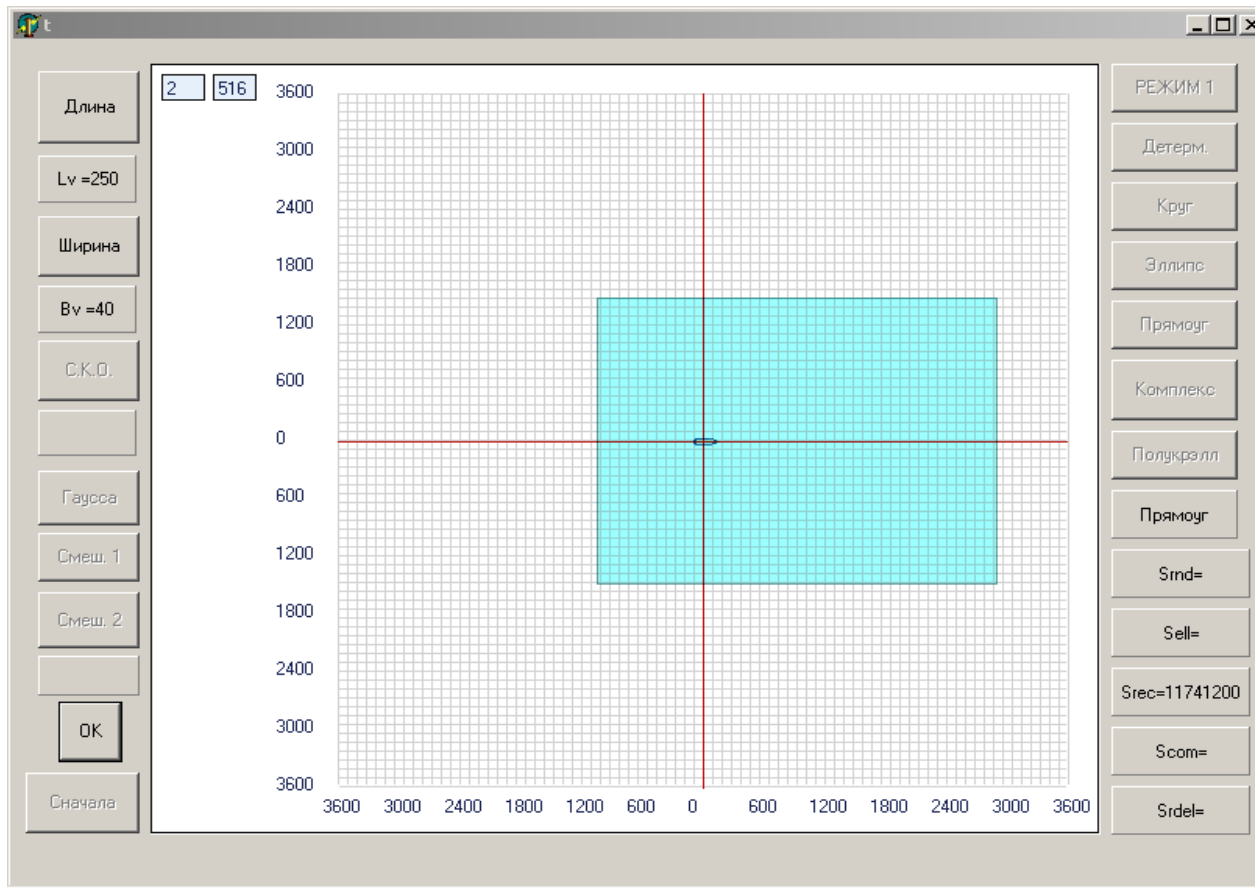


Рис. 5.9. Отображение детерминированной прямоугольной области

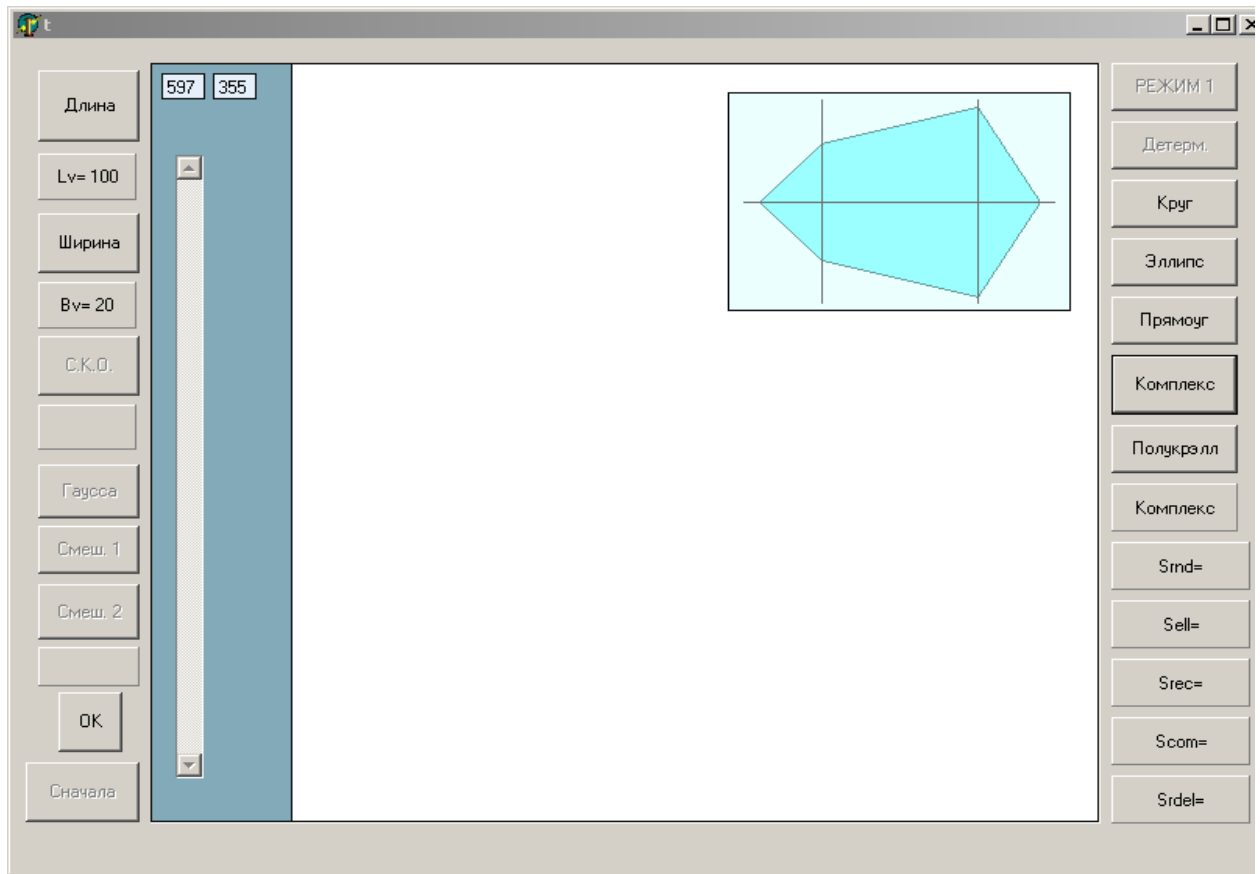


Рис. 5.10. Выбор детерминированной области сложной формы

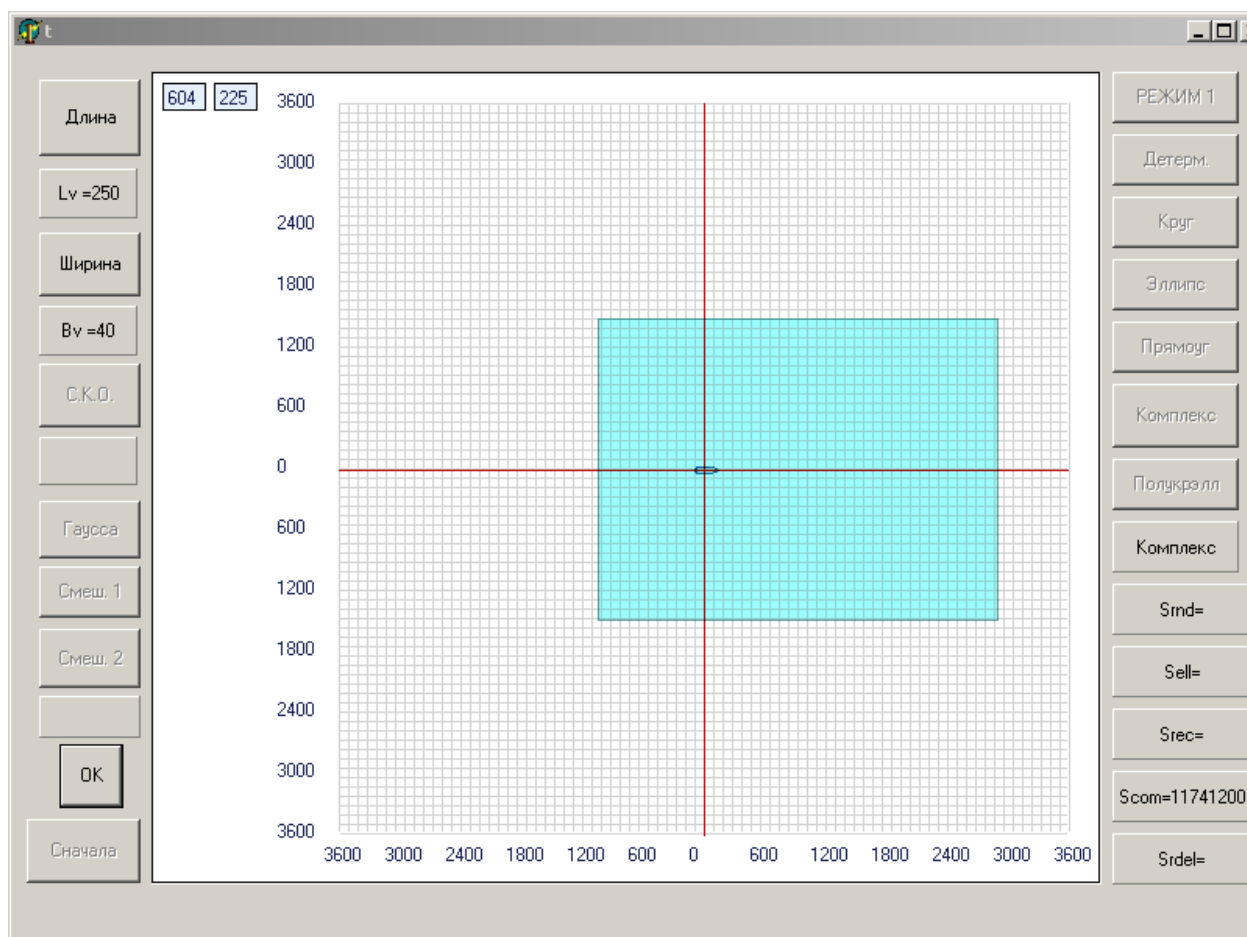


Рис. 5.11. Отображение детерминированной области сложной формы

Для выбора детерминированной области, имеющую форму полукруга – полуэллипса, необходимо использовать клавишу «Полукрэлл», как показано на рис. 5.12.

В этом случае в верхней правой части экрана появляется характеристика выбранной формы детерминированной области. После выбора длины и ширины судна, а также использования клавиши «ОК» производится отображение детерминированной области сложной формы для максимальных габаритов судна, причем, как следует из рис.5.13, площадь области равна 4820340 кв. м.

Для имитационного моделирования стохастической области помимо ее формы необходимо учитывать закон распределения случайной погрешности.

Как показано в предыдущих главах, в работе рассмотрено три закона

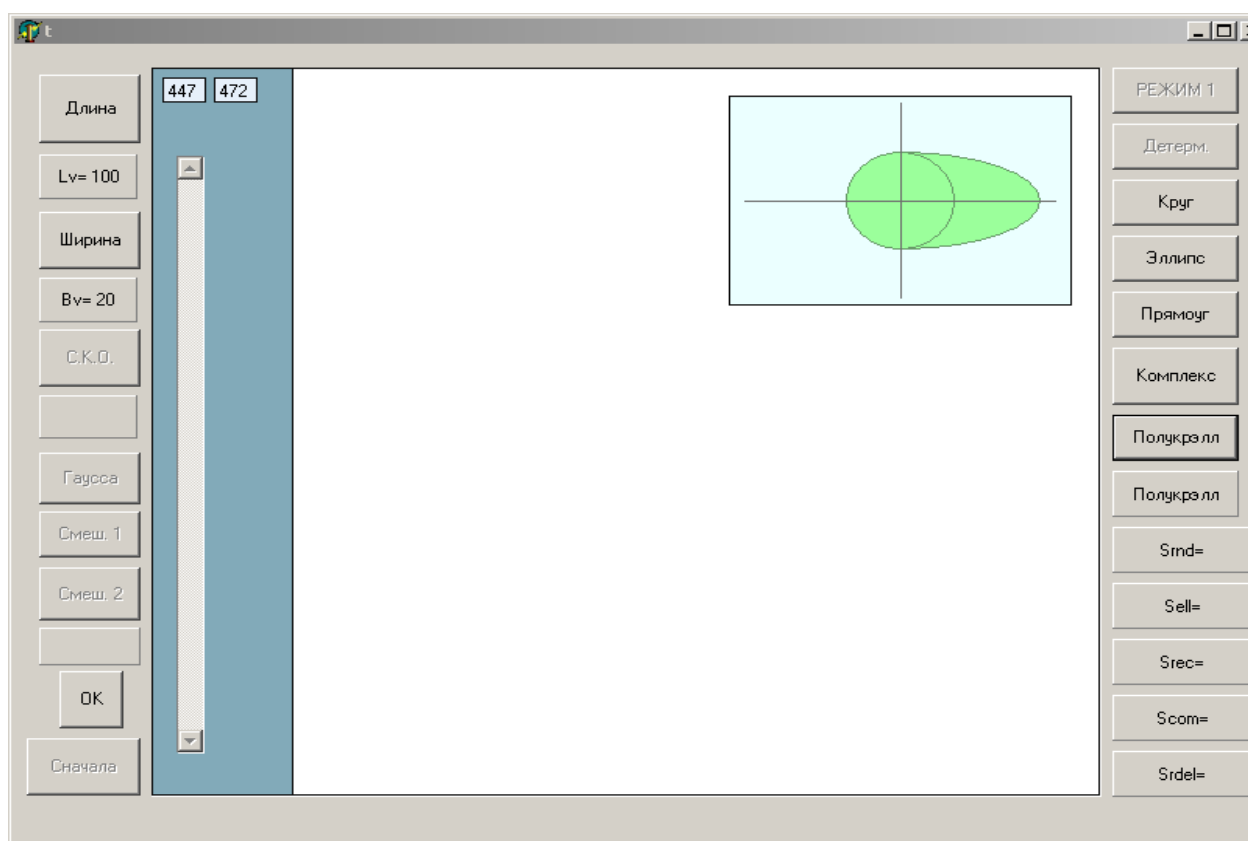


Рис. 5.12. Выбор детерминированной области формы полукруга-эллипса

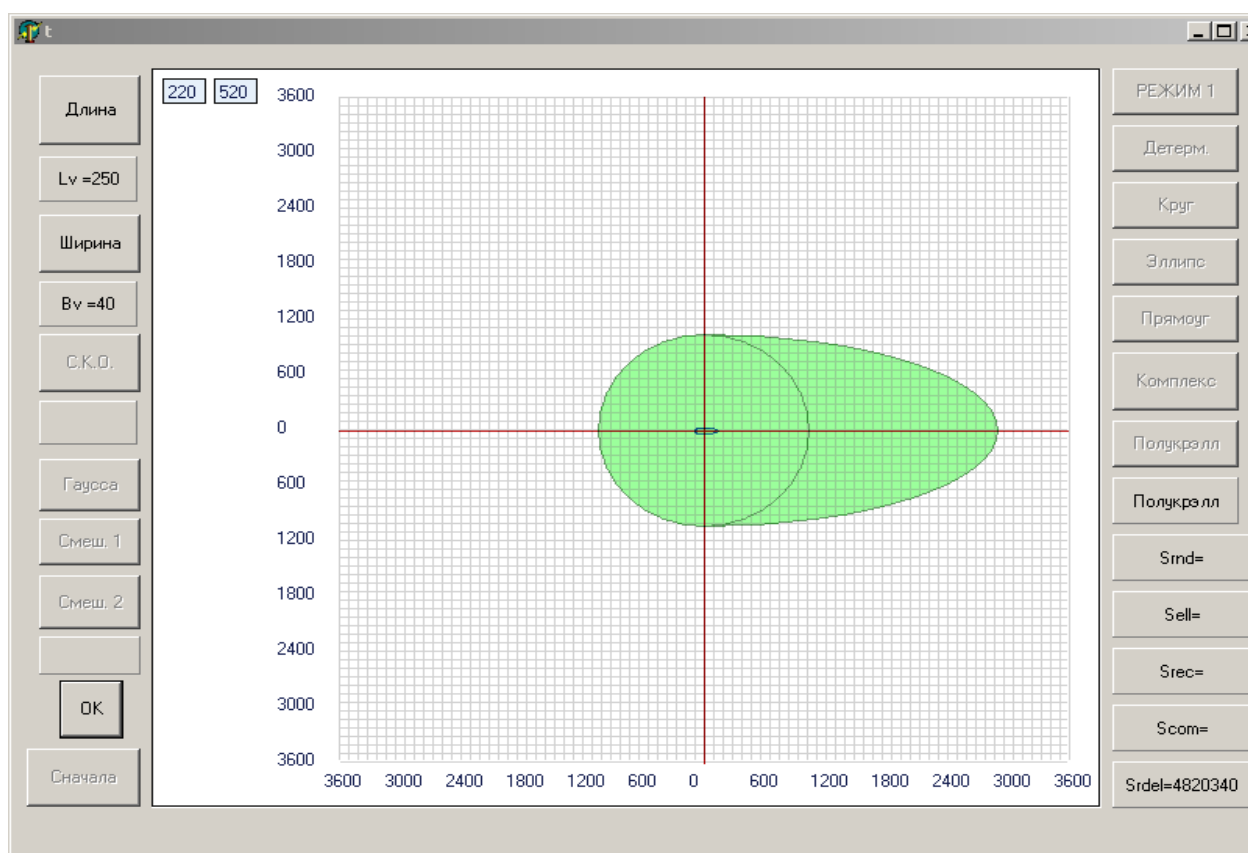


Рис. 5. 13. Отображение детерминированной области полукруга-эллипса

распределения погрешностей измерений: Гаусса и два типа смешанных законов.

В случае распределения векториальной погрешности по закону Гаусса размеры стохастической области в зависимости от ее формы определяются следующим образом, причем при расчетах принималось значение вероятности $P_d = 0,995$.

Если стохастическая область имеет форму круга, то ее радиус R_{st} рассчитывается из уравнения:

$$4 \sum_{i=0}^{R_{st}} \sqrt{R_{st}^2 - i^2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = 0,995.$$

В имитационной программе принято $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ и $\sigma = 100$ м. В этом случае искомая величина радиуса R_{st} , полученная в результате решения приведенного уравнения составляет 295 м, а ее размеры равны 273397 кв. м. Стохастическая область для этого случая показана на рис. 5.14.

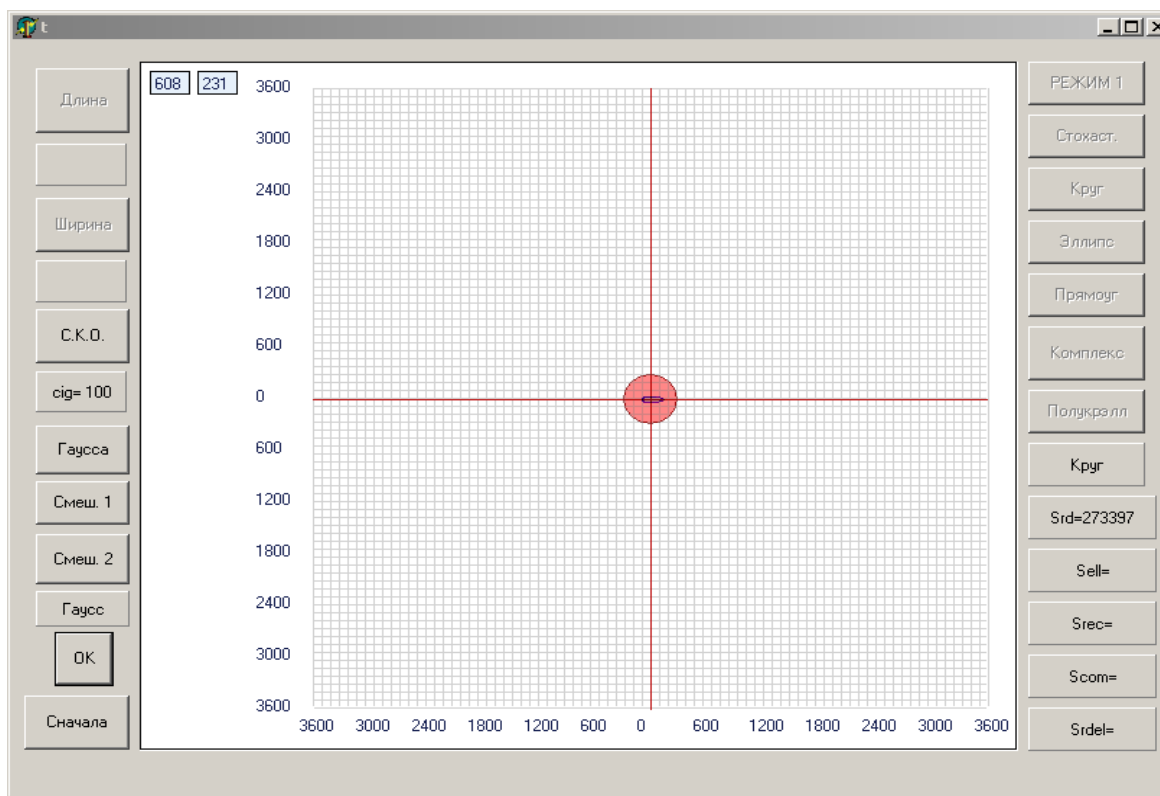


Рис. 5.14. Стохастическая область круглой формы

Если стохастическая область имеет эллиптическую форму, то для расчета полуосей a и b эллипса области с учетом смещения места судна относительно центра эллипса, используются выражения:

$$4 \sum_{i=0}^a \gamma \sqrt{a^2 - i^2} \sum_{j=0}^b \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{(i - a/2)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] = P_d,$$

$$b = \gamma a,$$

где γ - сжатие эллипса, причем сжатие стохастической области должно быть

таким же, как и детерминированной, т.е. $\gamma = \frac{B_{\text{det}}}{L_{\text{det n}} + L_{\text{det k}}}$.

На рис. 5.15 показана стохастическая область эллиптической формы.

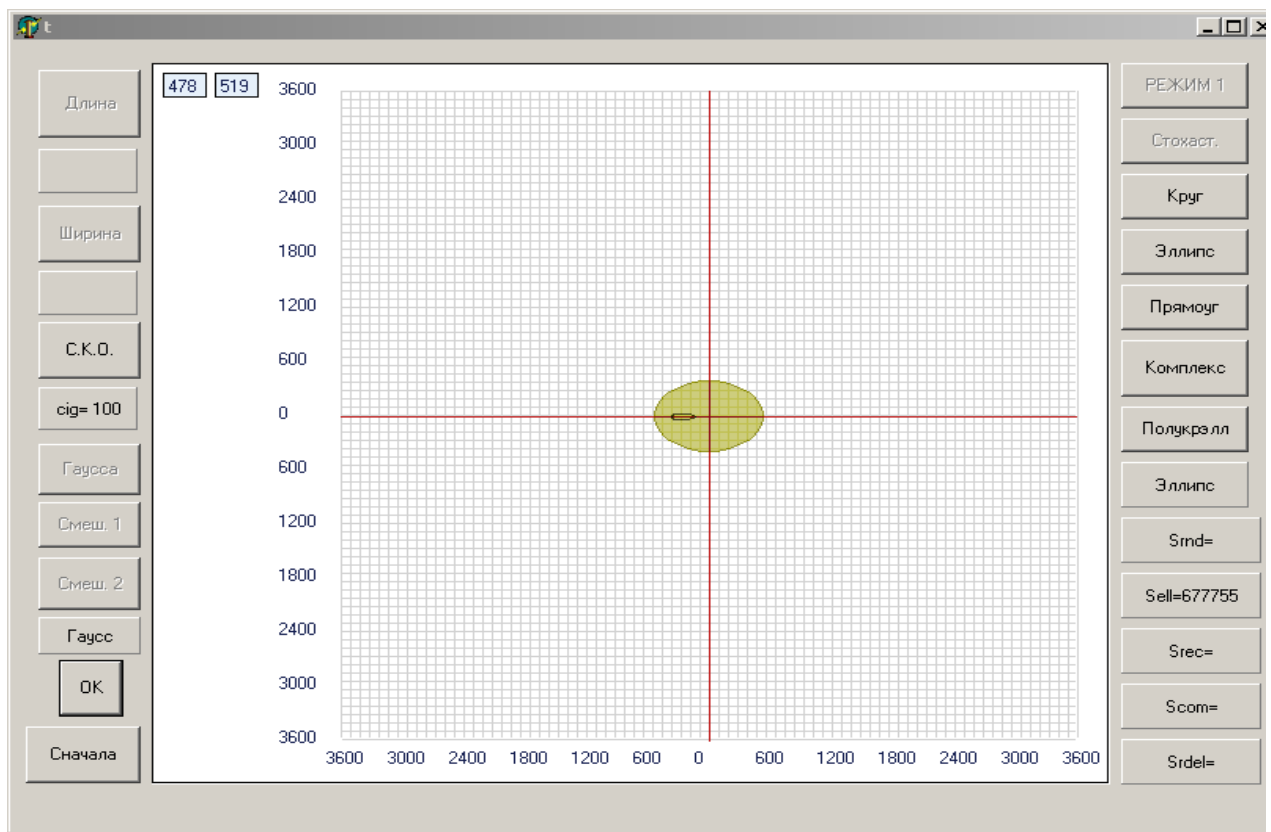


Рис. 5.15. Стохастическая область эллиптической формы

Полуоси эллипса при заданном значении с.к.о. принимают значения $a = 534\text{ м}$ и $b = 404\text{ м}$ при $\gamma = 0,7563$, а площадь стохастической области составляет 677755 кв. м.

В случае стохастической области квадратной формы расчет ее ширины B_{st} производится с помощью выражения:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{(i - \gamma_k B_{st})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{(i - \gamma_n B_{st})^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \right] = P_d,$$

где $\gamma_k = L_{det k} / B_{det}$, $\gamma_n = L_{det n} / B_{det}$.

В результате расчета получили ширину области, равную 360 м, и длину, равную 476 м, площадь стохастической области составляет 171360 кв. м, как показано на рис. 5.16.

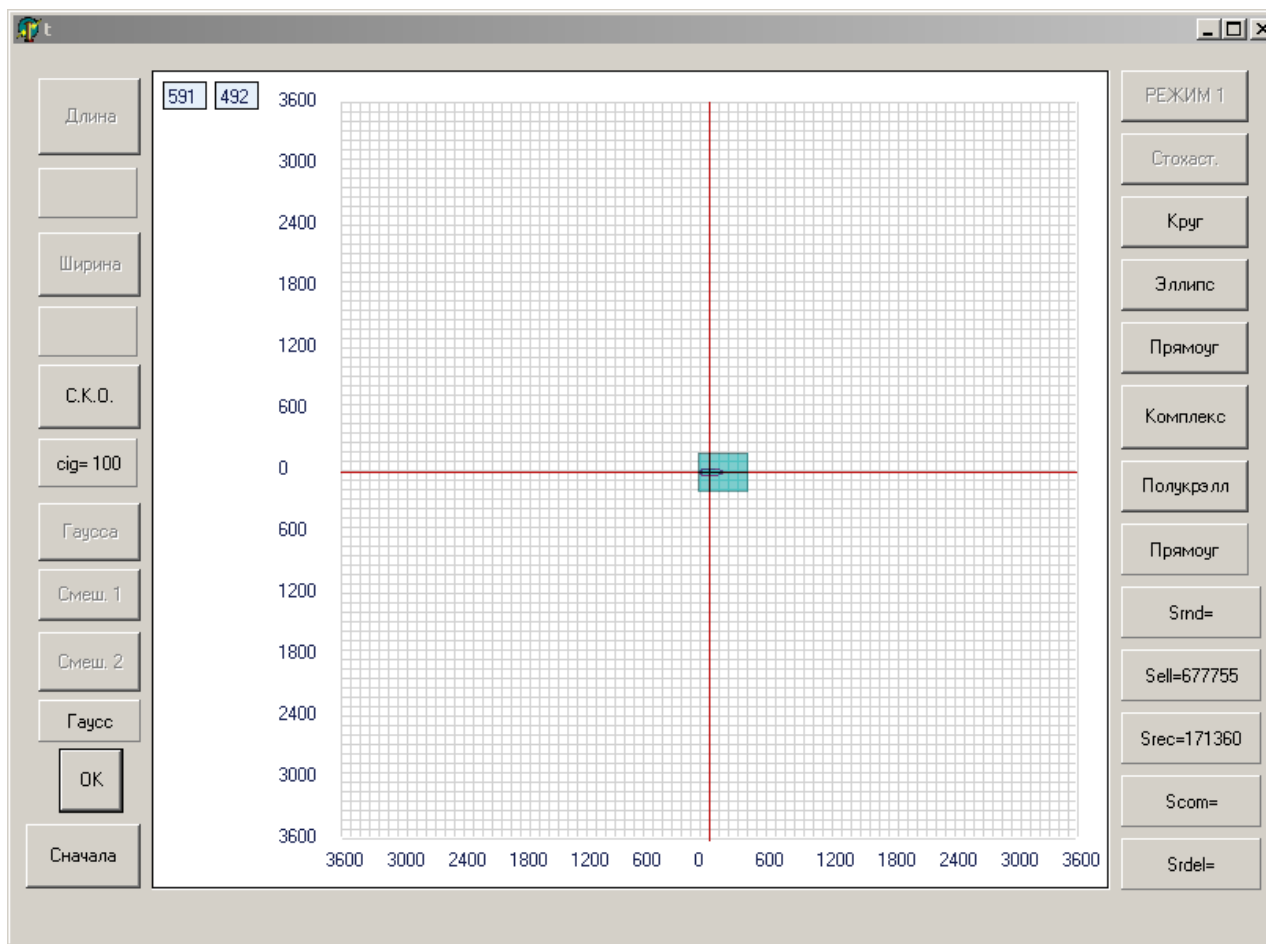


Рис. 5.16. Стохастическая область квадратной формы

Стохастическая область сложной формы D_{st4} характеризуется параметром s , расчет которого производится с помощью формулы:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi\sigma_x\sigma_y} \left\{ \sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})}i} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j-s-L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \right. \\ & + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn}+L_{detk}-\frac{L_{detn}+L_{detk}}{0,5s}i} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j-L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \\ & \left. + \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}}i} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(j+L_{detk})^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \right\} = P_d. \end{aligned}$$

Стохастическая область D_{st4} показана на рис. 5.17, а ее площадь составляет 3794862 кв. м при максимальных размерах судна и принятом значении с.к.о. 100 м.

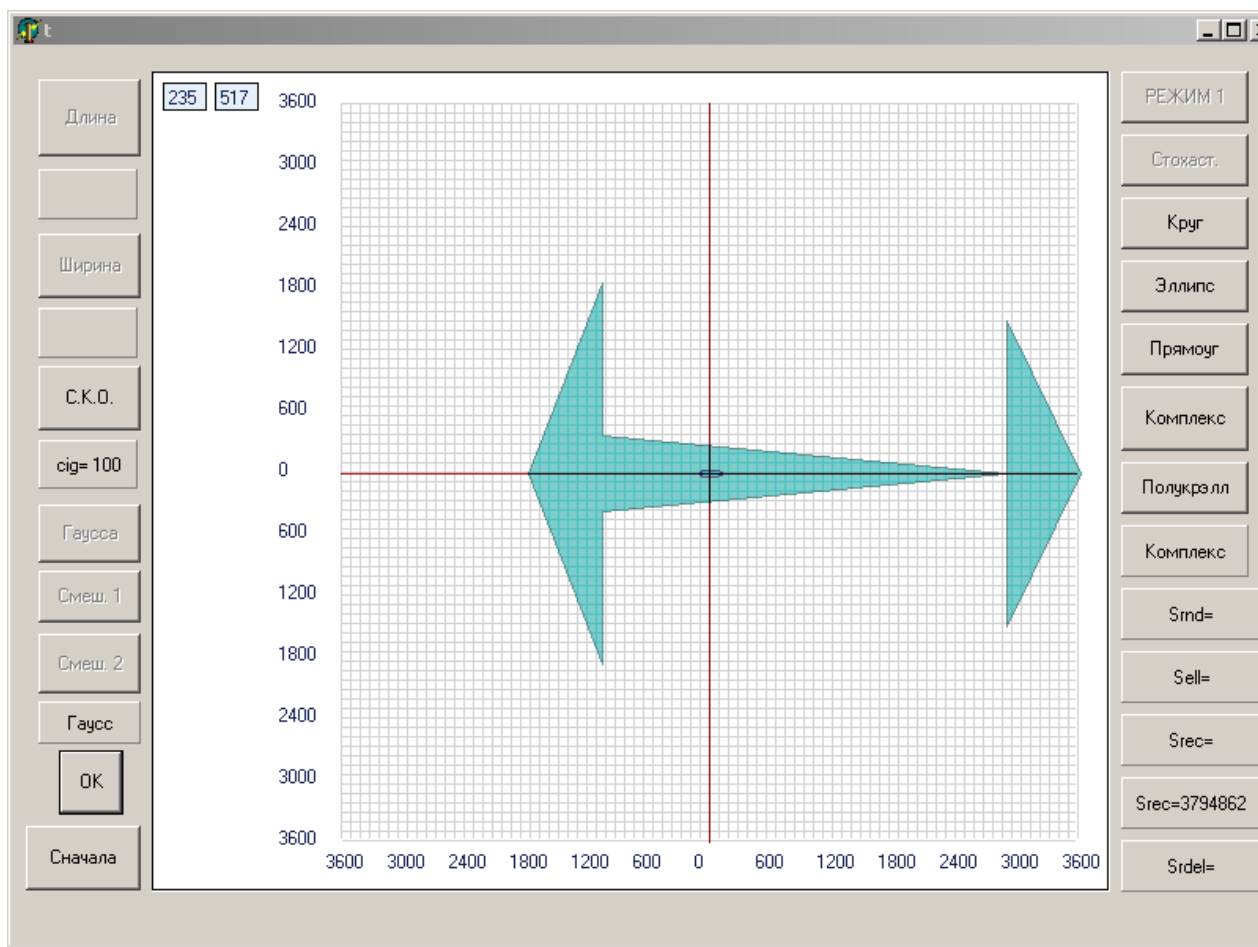


Рис. 5.17. Стохастическая область сложной формы

Наконец, заключительная стохастическая область $D_{st}^{(RE)}$, имеющая форму полукруга полу-эллипса, характеризуется определяющим параметром R_{st} , для расчета которого используется уравнение:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma\sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{i^2}{2\sigma_x^2} + \frac{j^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \right] = P_d.$$

Для принятого значения с.к.о. площадь стохастической области составляет 928026 кв. м, как показано на рис. 5.18.

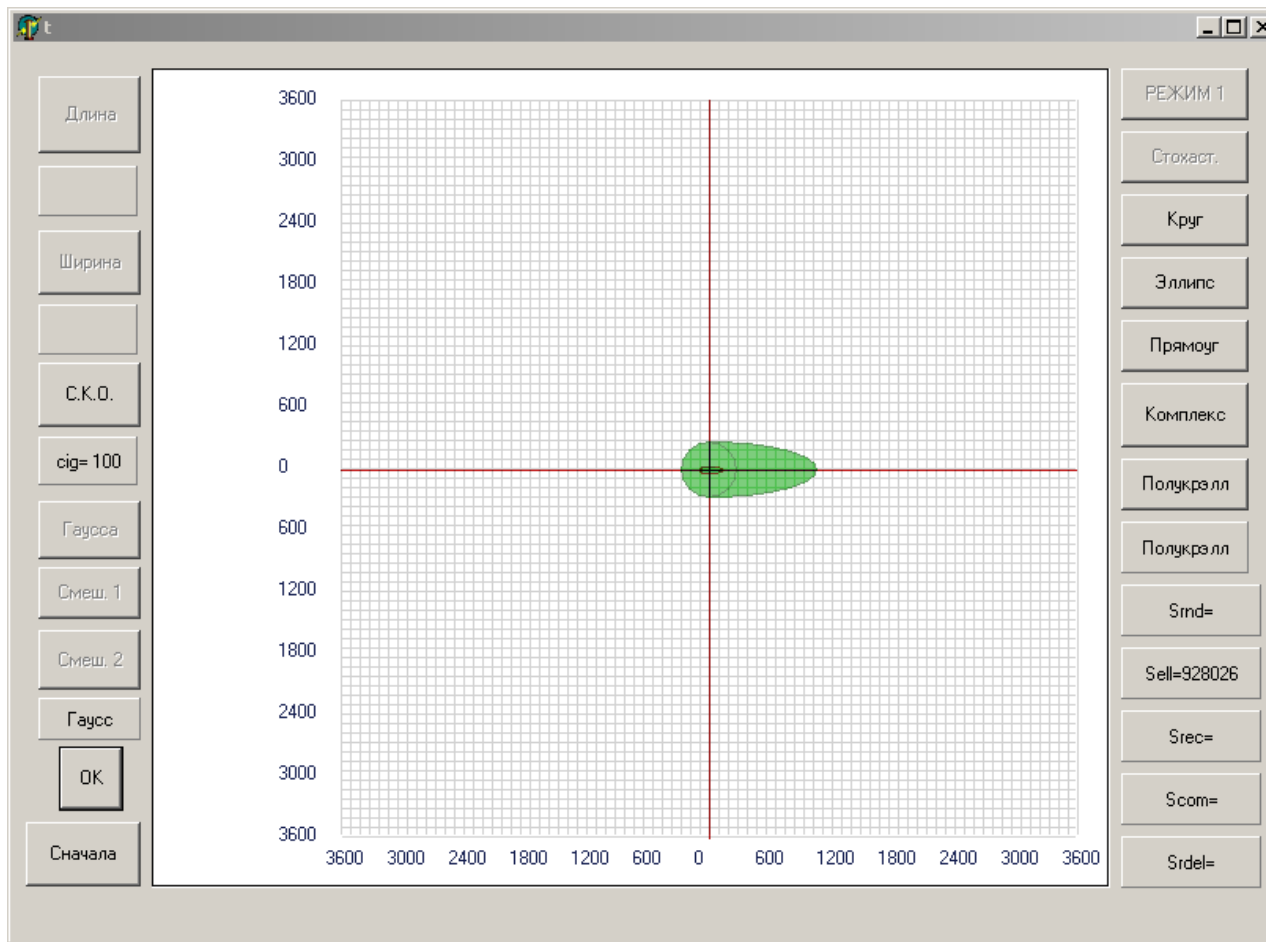


Рис. 5.18. Стохастическая область формы полукруга полу-эллипса

Рассмотрим процедуру расчета размеров стохастической области цели различной формы в случае распределения векторной погрешности по первому смешанному закону.

Расчет радиуса R_{st} для стохастической области круговой формы $D_{st}^{(Rd)}$ в этом случае производится с помощью выражения:

$$4 \sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{A_x A_y}{[i^2/2 + \alpha_x]^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = P_d,$$

где $A_x = \frac{2^n \alpha_x^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)}$, $A_y = \frac{2^n \alpha_y^{n+\frac{1}{2}} n!}{\sqrt{2\pi} 1 \cdot 3 \cdot \dots (2n-1)}$, $\alpha_x = \frac{(2n-1)}{2} \sigma_x^2$, $\alpha_y = \frac{(2n-1)}{2} \sigma_y^2$.

Так как значение существенного параметра n изменяется в пределах 1..6, то в таблице 5.1 приведена зависимость площади области $D_{st}^{(Rd)}$ и радиуса круга R_{st} от параметра n .

Таблица 5.1.

Зависимость параметров стохастической области $D_{st}^{(Rd)}$ от параметра n

n	1	2	3	4	5	6
S_{M^2}	402639	378276	344196	323712	315535	307778
$R_{st} \text{ м}$	358	347	331	321	317	313

Для стохастической области $D_{st}^{(El)}$ эллиптической формы определяющим параметром является большая полуось эллипса a , для расчета которой используется формула:

$$4 \sum_{i=0}^a \sum_{j=0}^{\sqrt{a^2 - i^2}} \frac{A_x A_y}{[(i - a/2)^2/2 + \alpha_x]^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} = P_d.$$

Зависимость площади S и параметров a , b области от параметра распределения n приведена в табл. 5.2.

Таблица 5.2.

Зависимость параметров стохастической области $D_{st}^{(El)}$ от параметра n

n	1	2	3	4	5	6
S_{M^2}	1004681	898417	812321	771795	757924	745939
a_{M}	650	615	585	570	565	560
b_{M}	492	465	442	431	427	424

В стохастической области $D_{st}^{(Rec)}$ прямоугольной формы определяющий параметр – ширина области B_{st} рассчитывается с помощью формулы:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{A_x A_y}{[(i - \gamma_k B_{st})^2 / 2 + \alpha_x]^{n+1} (j^2 / 2 + \alpha_y)^{n+1}} + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{A_x A_y}{(i^2 / 2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2 / 2 + \alpha_y)^{n+1}} \right] = P_d.$$

В табл. 5.3 приведена зависимость площади и параметров области $D_{st}^{(Rec)}$ от значения существенного параметра n .

Таблица 5.3.

Зависимость параметров области $D_{st}^{(El)}$ от существенного параметра n

n	1	2	3	4	5	6
S_{M^2}	267750	233100	212530	200850	192210	189000
L_{M}	595	555	530	515	505	500
B_M	450	420	401	390	382	378

Определяющим параметром безопасной области D_{st4} является величина s . Расчет данного параметра производится с помощью формулы:

$$\begin{aligned}
& 2 \left\{ \sum_{i=0}^{0,5(s+B_{\text{det}})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{\text{det}})} i} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j-s-L_{\text{detk}})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} + \right. \\
& + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{\text{detn}} + L_{\text{detk}} - \frac{L_{\text{detn}} + L_{\text{detk}}}{0,5s} i} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j-L_{\text{detk}})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} + \\
& \left. + \sum_{i=0}^{0,5B_{\text{det}}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{\text{det}}}} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} [(j+L_{\text{detk}})^2/2 + \alpha_y]^{n+1}} \right\} = P_d.
\end{aligned}$$

Зависимость площади и параметров области D_{st4} от значения существенного параметра n приведена в табл. 5.4.

Таблица 5.4.

Зависимость параметров области D_{st4} от существенного параметра n

n	1	2	3	4	5	6
S_{M}^2	4684950	4510800	4280000	4165200	4079362	4022262
s_{M}	870	840	800	780	765	755

Стохастическая область $D_{\text{st}}^{(\text{RE})}$, имеющая форму полукруга полу-эллипса, характеризуется определяющим параметром R_{st} , для расчета которого используется следующее уравнение, полученное методом численного интегрирования:

$$\begin{aligned}
& 2 \left[\sum_{i=0}^{R_{\text{st}}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{\text{st}}^2 - i^2}} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} + \right. \\
& \left. + \sum_{i=0}^{R_{\text{st}}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{\text{st}}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{A_x A_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+1} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+1}} \right] = P_d.
\end{aligned}$$

Решая его, получим значения площади S , параметров R_{st} и A_{st} стохастической области $D_{\text{st}}^{(\text{RE})}$, причем их зависимость от параметра распределения n приведена в табл. 5.5.

Таблица 5.5.

Зависимость параметров области $D_{st}^{(RE)}$ от существенного параметра n

n	1	2	3	4	5	6
S_M^2	1229085	1211398	1122428	1073278	1045019	1017137
A_{stM}	1215	1205	1160	1135	1120	1105
R_{stM}	322	320	308	301	297	293

В случае распределения векторной погрешности по второму смешанному закону процедура расчета размеров стохастической области цели различной формы реализуется следующим образом.

Для стохастической области круговой формы $D_{st}^{(Rd)}$ расчет радиуса R_{st} производится с помощью выражения:

$$4 \sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = P_d,$$

$$\text{где } B_x = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha_x^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!}, \quad B_y = \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot (2n+1) \alpha_y^{n+1}}{\sqrt{2} 2^{n+1} n!}, \quad \alpha_x = n\sigma_x^2, \quad \alpha_y = n\sigma_y^2.$$

Производился расчет площади S и радиуса R_{st} данной области для различных значений параметра n ($n < 6$), результаты которого представлены в табл. 5.6.

Таблица 5.6.

Зависимость параметров области $D_{st}^{(Rd)}$ от существенного параметра n

n	1	2	3	4	5
S_M^2	416248	365307	342119	325733	315696
R_{stM}	364	341	330	322	317

Расчет большей полуоси a стохастической эллиптической области $D_{st}^{(El)}$

производится в результате решения уравнения:

$$4 \sum_{i=0}^a \gamma \sqrt{a^2 - i^2} \sum_{j=0}^b \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} = P_d.$$

В табл. 5.7 приведены результаты расчета полуосей a и b области $D_{st}^{(El)}$, а также ее площади S в зависимости от параметра распределения n .

Таблица 5.7.

Зависимость параметров области $D_{st}^{(El)}$ от существенного параметра n

n	1	2	3	4	5
$S \text{ м}^2$	1018582	883447	826678	785790	771795
$a \text{ м}$	655	610	590	575	570
$b \text{ м}$	495	461	446	435	431

Ширина B_{st} стохастической области $D_{st}^{(Rec)}$ прямоугольной формы рассчитывается с помощью формулы:

$$2 \left[\sum_{i=0}^{\gamma_k B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{B_x B_y}{[(i - \gamma_k B_{st})^2/2 + \alpha_x]^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} + \sum_{i=0}^{\gamma_n B_{st}} \sum_{j=0}^{B_{st}/2} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} \right] = P_d.$$

В зависимости от существенного параметра n в табл. 5.8 приведены рассчитанные значения длины L , ширины B и площади S области $D_{st}^{(Rec)}$.

Таблица 5.8.

Зависимость параметров области $D_{st}^{(Rec)}$ от существенного параметра n

n	1	2	3	4	5
$S \text{ м}^2$	267750	228800	212530	204360	196860
$L \text{ м}$	595	550	530	520	510
$B \text{ м}$	450	416	401	393	386

Стохастическая область сложной формы D_{st4} характеризуется определяющим параметром s , расчет которого производится с помощью формулы:

$$2\left\{ \sum_{i=0}^{0,5(s+B_{det})} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5(s+B_{det})}i} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j-s-L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{0,5s} \sum_{j=0}^{L_{detn}+L_{detk}-\frac{L_{detn}+L_{detk}}{0,5s}i} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j-L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{0,5B_{det}} \sum_{j=0}^{\frac{s}{0,5B_{det}}i} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} [(j+L_{detk})^2/2 + \alpha_y]^{n+3/2}} \right\} = P_d.$$

Результаты расчета параметра s стохастической области D_{st4} и ее площади в зависимости от существенного параметра n приведены в табл. 5.9.

Таблица 5.9.

Зависимость параметров области D_{st4} от существенного параметра n

n	1	2	3	4	5
S_M^2	4772362	4452950	4308762	4193862	4136562
s_M	885	830	805	785	775

Стохастическая область $D_{st}^{(RE)}$, имеющая форму полукруга полу-эллипса, характеризуется определяющим параметром R_{st} , для расчета которого используется уравнение:

$$2\left[\sum_{i=0}^{R_{st}} \sum_{j=0}^{\sqrt{R_{st}^2 - i^2}} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} + \right. \\ \left. + \sum_{i=0}^{R_{st}/\gamma} \sum_{j=0}^{\gamma \sqrt{(R_{st}/\gamma)^2 - i^2}} \frac{B_x B_y}{(i^2/2 + \alpha_x)^{n+3/2} (j^2/2 + \alpha_y)^{n+3/2}} \right] = P_d.$$

В табл. 5.10 приведены результаты расчета параметров R_{st} , A_{st} области

$D_{st}^{(RE)}$ и ее площади в зависимости от параметра n .

Таблица 5.10.

Зависимость параметров области $D_{st}^{(RE)}$ от существенного параметра n

n	1	2	3	4	5
S_{M^2}	1312918	1190082	1122428	1081527	1053218
$A_{st \text{ м}}$	1255	1195	1160	1140	1125
$R_{st \text{ м}}$	333	317	308	302	298

Анализ табл. 5.1...5.10 показывает, что для смешанных законов первого и второго типа площади стохастических областей убывают с увеличением существенного параметра n и приближаются к площади, полученной при законе Гаусса.

Значения параметров безопасной области D_b рассчитывались, исходя из заданных параметров детерминированной области D_{det} и вычисленных параметров стохастической области D_{st} .

В случае безопасной области круговой формы $D_b^{(Rd)}$, ее радиус R_b определяется соотношением:

$$R_b = R_{det} + R_{st}.$$

Если векториальная погрешность распределена по нормальному закону, то безопасная область $D_b^{(Rd)}$ показана на рис. 5.19, а ее площадь равна 31969161 м^2 .

В табл. 5.11 приведены значения радиуса R_b и площади безопасной области $D_b^{(Rd)}$ в зависимости от параметра n при распределении векториальной погрешности по первому смешанному закону, а в табл. 5.12 – по второму смешанному закону.

Таблица 5.11.

Параметры области $D_b^{(Rd)}$ при первом смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5	6
S_M^2	33244361	33019910	32694793	32492412	32411635	32330959
R_b м	3253	3242	3226	3216	3212	3208

Таблица 5.12.

Параметры области $D_b^{(Rd)}$ при втором смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5
S_M^2	33367110	32897803	32674527	32512621	32411635
R_b м	3259	3236	3225	3217	3212

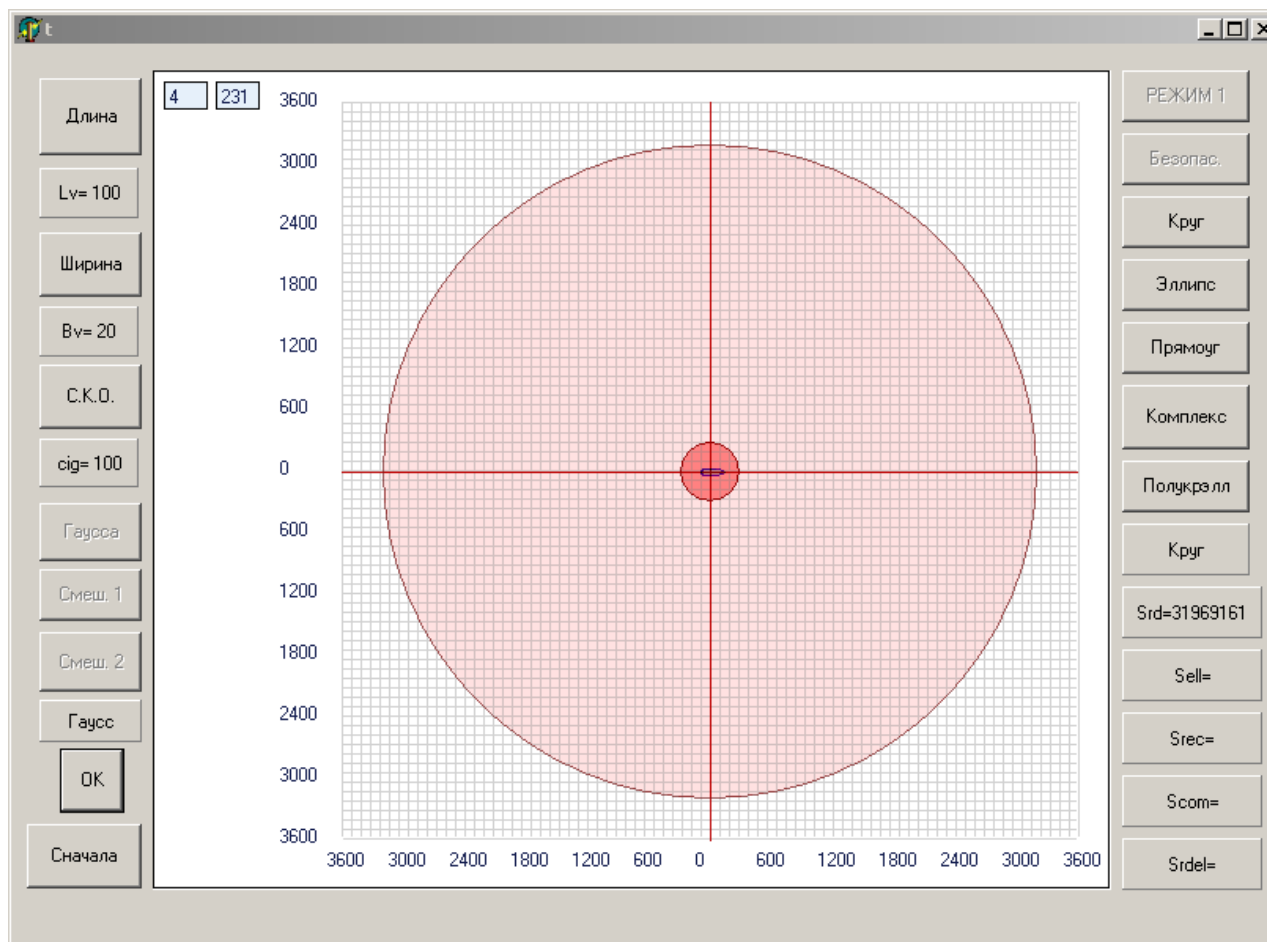


Рис. 5.19. Безопасная область $D_b^{(Rd)}$ круговой формы

Если безопасная область имеет форму эллипса $D_b^{(El)}$, то ее параметры определяются выражениями:

$$a_b = a_{det} + a_{st},$$

$$b_b = b_{det} + b_{st}.$$

При распределении векториальной погрешности по нормальному закону безопасная область эллиптической формы $D_b^{(El)}$ показана на рис. 5.20, и ее площадь равна 14913062 м^2 .

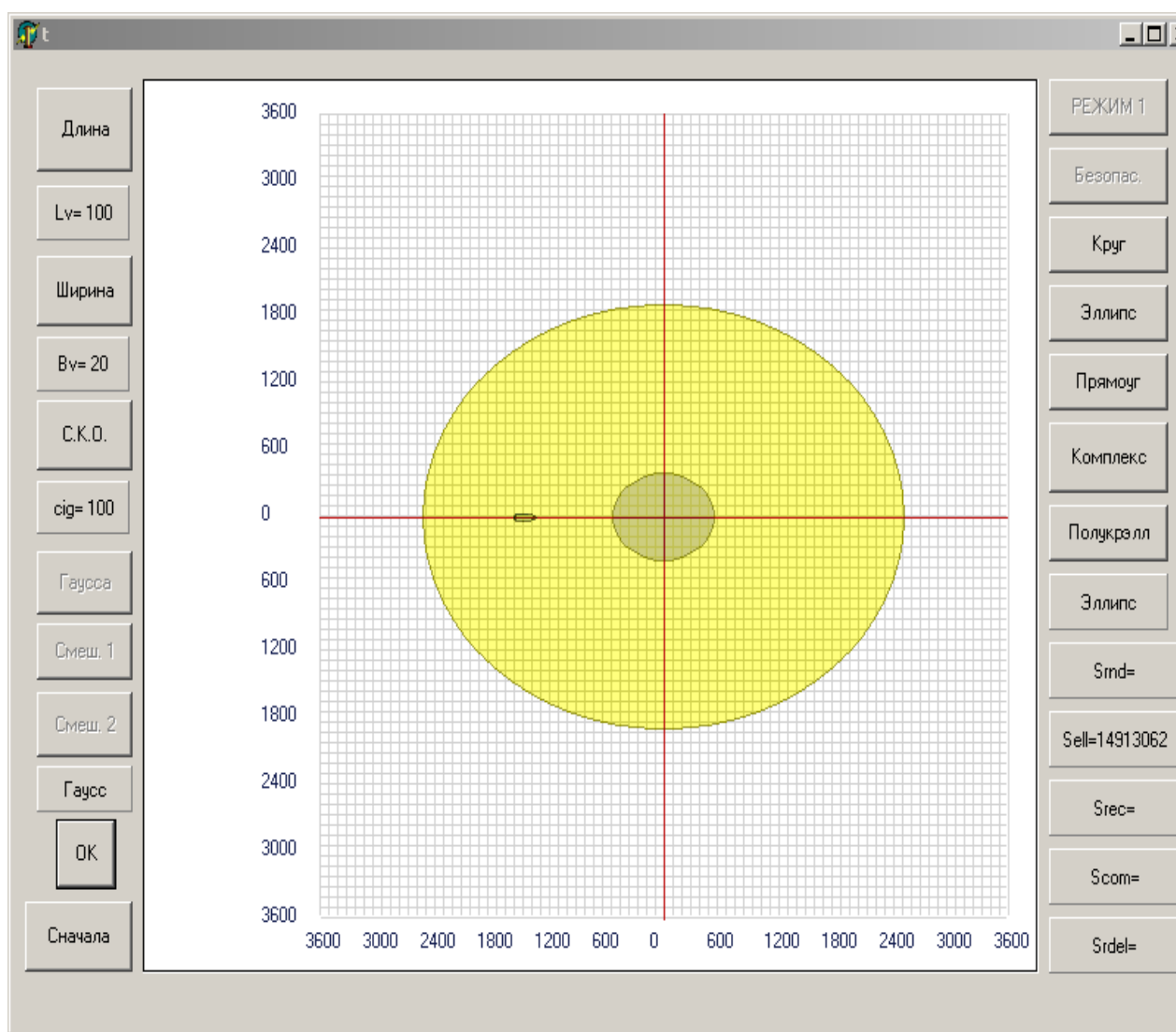


Рис. 5.20. Безопасная область $D_b^{(El)}$ эллиптической формы

В табл. 5.13 и табл. 5.14 приведены значения радиуса R_b и площади безопасной области $D_b^{(El)}$ в зависимости от параметра n при распределении векториальной погрешности соответственно по первому и второму смешанному закону.

Таблица 5.13.

Параметры области $D_b^{(El)}$ при первом смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5	6
$S \text{ м}^2$	16313788	15876588	15507718	15328898	15266867	15212911
$a \text{ м}$	2620	2585	2555	2540	2535	2530
$b \text{ м}$	1982	1985	1932	1921	1917	1914

Таблица 5.14.

Параметры области $D_b^{(El)}$ при втором смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5
$S \text{ м}^2$	16369661	15813458	15570236	15391055	15328898
$a \text{ м}$	2625	2580	2560	2545	2540
$b \text{ м}$	1985	1951	1936	1925	1921

Безопасная область прямоугольной формы $D_b^{(Rt)}$ сформирована детерминированной и стохастической областями такой же формы, и ее размеры определяются выражением $D_b^{(Rt)} = D_{det}^{(Rt)} \cup D_{st}^{(Rt)}$, из которого следуют выражения для параметров области $D_b^{(Rt)}$:

$$L_{bn} = L_{detn} + L_{stn},$$

$$L_{bk} = L_{detk} + L_{stk},$$

$$B_b = B_{det} + B_{st}.$$

На рис. 5.21 показана безопасная область прямоугольной формы $D_b^{(Rt)}$ для случая распределения векториальной погрешности по нормальному закону, причем ее площадь равна 14776060 м^2 .

В табл. 5.15 и табл. 5.16 приведены значения длины L_b , ширины B_b и площади безопасной области $D_b^{(Rt)}$ в зависимости от параметра n при распределении векториальной погрешности соответственно по первому и второму смешанному закону.

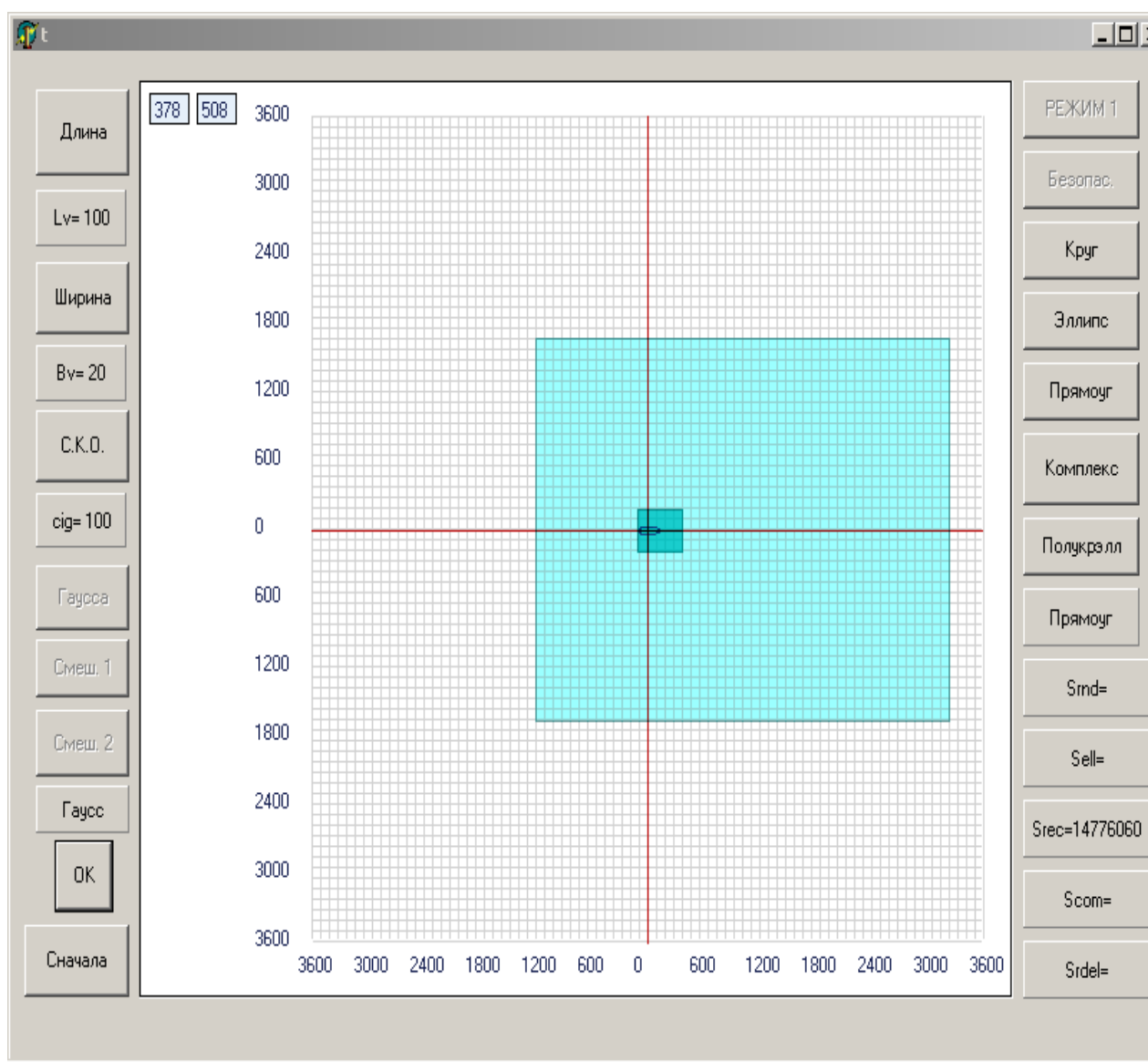


Рис. 5.21. Безопасная область $D_b^{(Rt)}$ прямоугольной формы

Таблица 5.15.

Параметры области $D_b^{(Rt)}$ при первом смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5	6
$S_{\text{м}^2}$	15555050	15283000	15113070	15013350	14944090	14909520
$L_b \text{ м}$	4535	4495	4470	4455	4445	4440
$B_b \text{ м}$	3430	3400	3381	3370	3362	3358

Таблица 5.16.

Параметры области $D_b^{(Rt)}$ при втором смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5
$S_{\text{м}^2}$	15555050	15248040	15113070	15043580	14978700
$L_b \text{ м}$	4535	4490	4470	4460	4455
$B_b \text{ м}$	3430	3396	3381	3373	3366

Спецификой обладает безопасная область сложной формы $D_b^{(Cm)}$, которая является объединением прямоугольной детерминированной $D_{\text{det}}^{(Rt)}$ и стохастической D_{st4} областей, т.е. $D_b^{(Cm)} = D_{\text{det}}^{(Rt)} \cup D_{\text{st4}}$. В этом случае параметры безопасной области определяются формулами:

$$L_{bn} = L_{\text{detn}} + s,$$

$$L_{bk} = L_{\text{detk}} + s,$$

$$b_1 = B_{\text{det}},$$

$$b_2 = B_{\text{det}} + s.$$

Безопасная область сложной формы $D_b^{(Cm)}$ представлена на рис. 5.22 для случая распределения векториальной погрешности по нормальному закону с площадью равной 15536062 м^2 .

Значения параметра s и площади безопасной области $D_b^{(Cm)}$ в зависимости от параметра n приведены в табл. 5.17 и табл. 5.18 при распределении век-

ториальной погрешности соответственно по первому и второму смешанному закону.

Таблица 5.17.

Параметры области $D_b^{(Cm)}$ при первом смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5	6
S_M^2	16426150	16252000	16021200	15906400	15820562	15763462
s_M	870	840	800	780	765	755

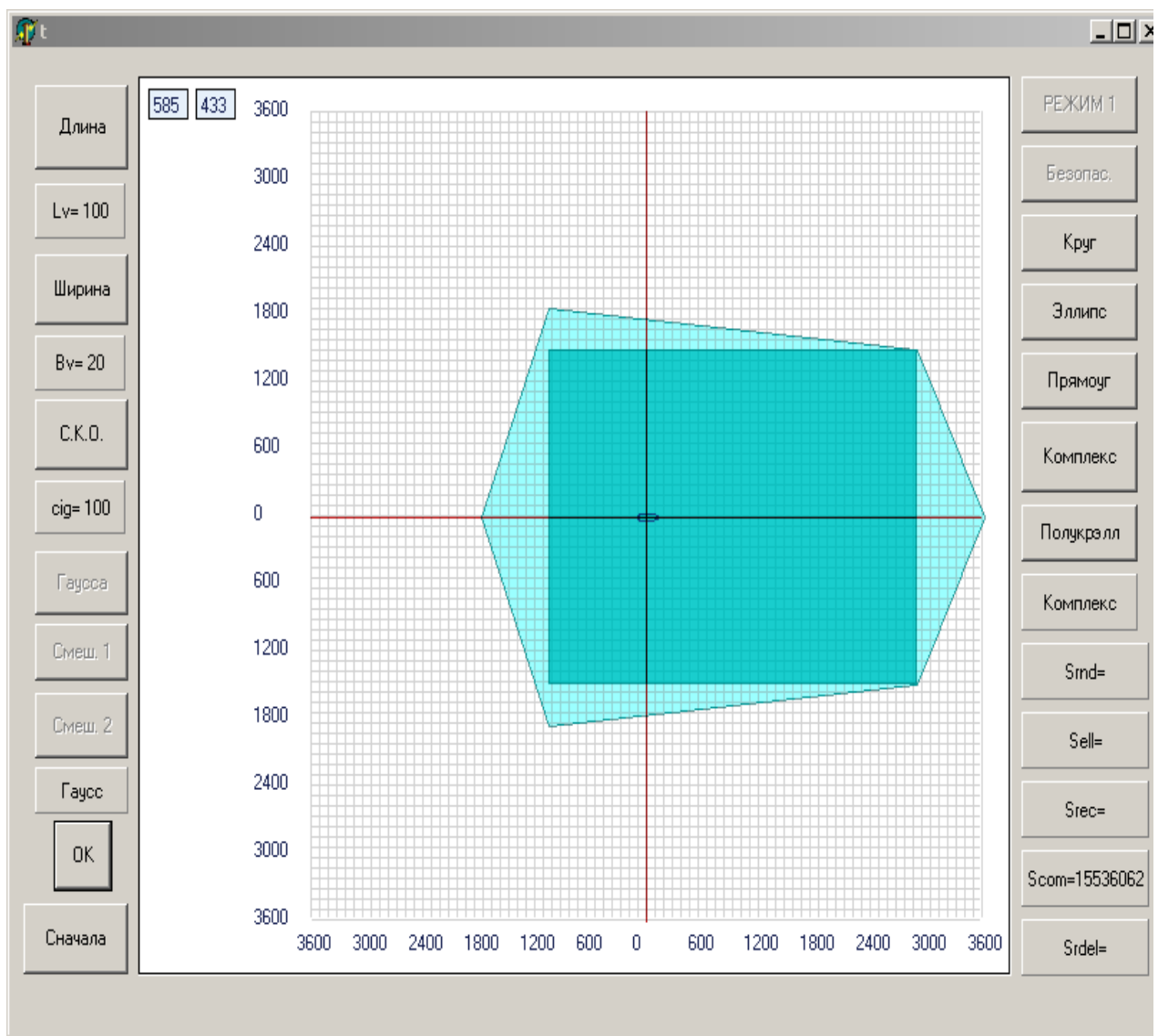


Рис. 5.22. Безопасная область сложной формы $D_b^{(Cm)}$

Таблица 5.18.

Параметры области $D_b^{(Cm)}$ при втором смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5
$S \text{ м}^2$	16513562	16194150	16049963	15935062	15877762
s м	885	830	805	785	775

Параметры области $D_b^{(RE)}$, имеющей форму полукруга – полуэллипса, рассчитываются с помощью формул:

$$R_b = R_{det} + R_{st},$$

$$a_b = a_{det} + a_{st}.$$

На рис. 5.23 представлена безопасная область $D_b^{(RE)}$ в случае распределения векториальной погрешности по нормальному закону, площадь которой равна 10978885 м^2 .

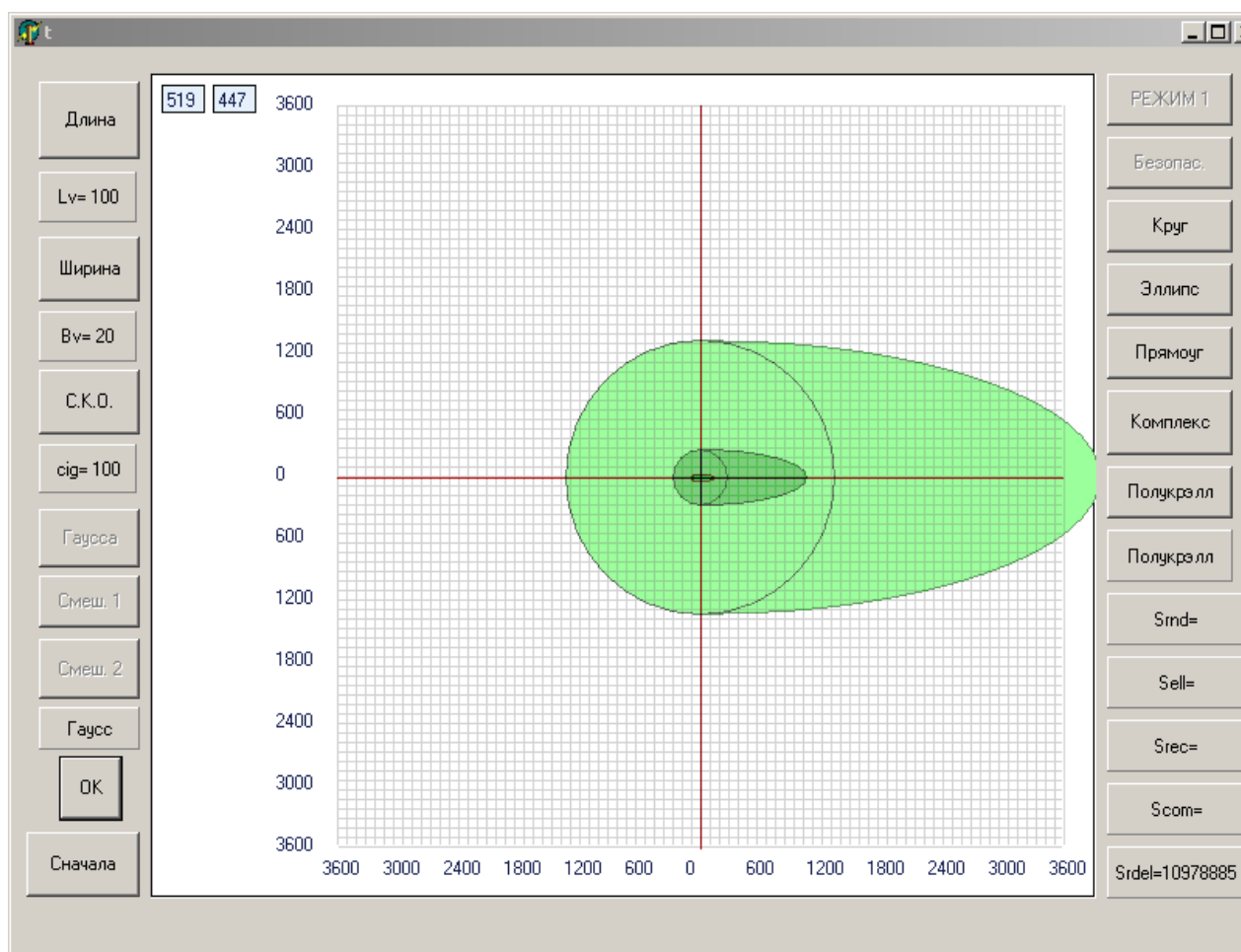


Рис. 5.23. Безопасная область $D_b^{(RE)}$ формы полукруга – полуэллипса

В табл. 5.19 и табл. 5.20 приведены значения параметров A_b , B_b и площади безопасной области $D_b^{(RE)}$ в зависимости от параметра n при распределении векториальной погрешности соответственно по первому и второму смешанному закону.

Таблица 5.19.

Параметры области $D_b^{(RE)}$ при первом смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5	6
$S_{\text{м}}^2$	11760644	11717708	11493554	11366433	11292602	11219010
$A_b \text{ м}$	4110	4100	4055	4030	4015	4000
$B_b \text{ м}$	1367	1365	1353	1346	1342	1338

Таблица 5.20.

Параметры области $D_b^{(RE)}$ при втором смешанном законе распределения

n	1	2	3	4	5
$S_{\text{м}}^2$	11965672	11664142	11493554	11387572	11313674
$A_b \text{ м}$	4150	4090	4055	4035	4020
$B_b \text{ м}$	1378	1362	1353	1347	1343

Анализ табл. 5.11...5.20 показывает, что площади безопасных областей для одинаковых габаритов судна и значения с.к.о. уменьшаются с ростом параметра n , приближаясь к площади безопасной области в случае нормального распределения векториальной погрешности.

5.2. Имитационное моделирование среднего угла уклонения $\Delta K_{\text{оты}}$.

Для расчета среднего значения минимального приращения курса уклонения ΔK_{ymin} необходимо клавишей «РЕЖИМ» выбрать процедуру «РЕЖИМ 2», и вариант имитационного моделирования «Ручной». После использования

клавиши «ОК» происходит инициализация клавиш формы безопасной области, как показано на рис. 5.24.

После выбора клавиши формы безопасной области цели, например, клавиши «Круг», выводится изображение безопасной области выбранной формы, в данном случае круглой для габаритов судна 200 м длиной и 40 м шириной и значения с.к.о. 100 м. Указанная безопасная область показана на рис. 5.25, причем после ее вывода активизируется клавиша «Позиция», использование которой ведет к отображению судна в начальной позиции с курсом 0° , равным пеленгу на цель в дистанции 5 миль от цели (рис. 5.25). После этого с помощью линейки прокрутки изменяется курс уклонения судна, так чтобы его линия была касательной к безопасной области цели. При этом достигается минимальное приращение курса уклонения $\Delta K_{\text{отyi}}$, равное 20° .

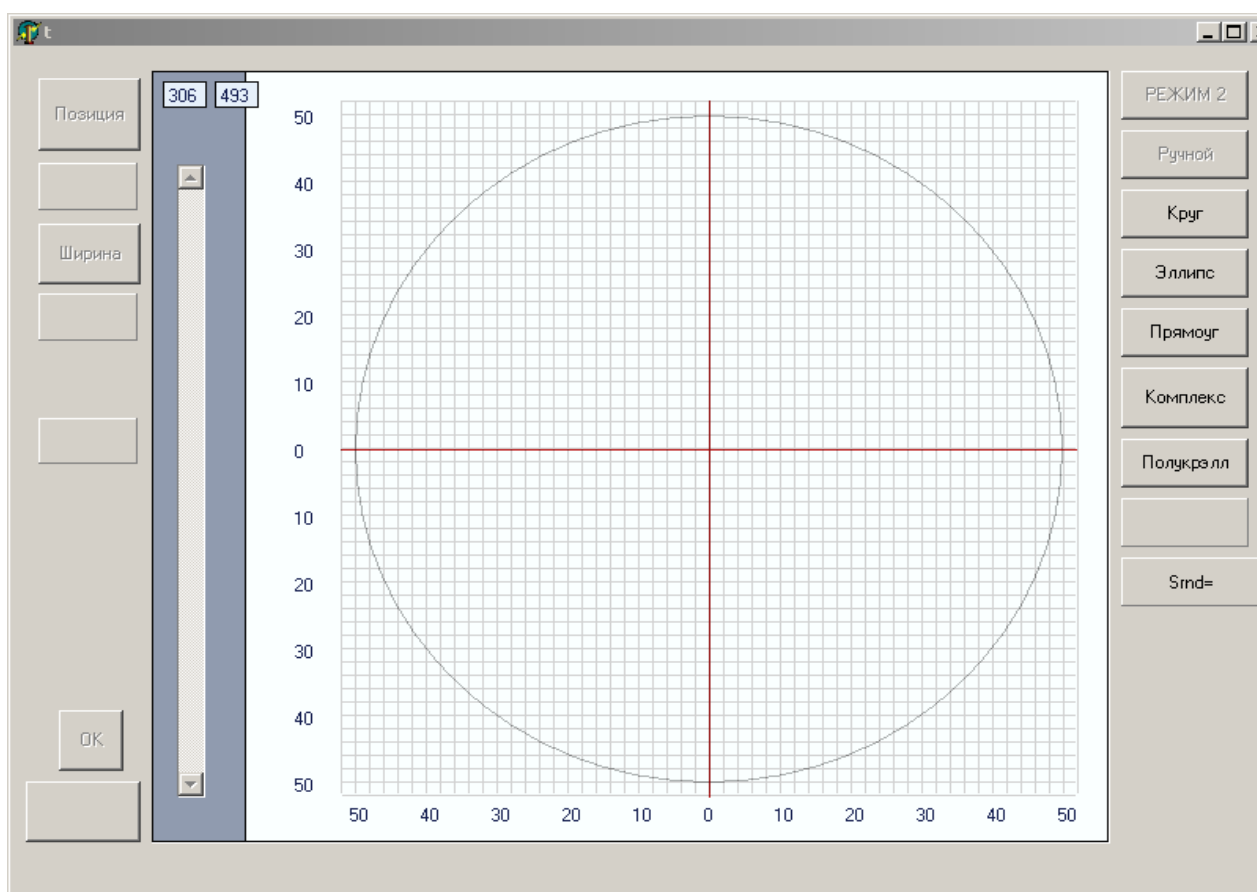


Рис. 5.24. Начальный интерфейс при имитационном моделировании

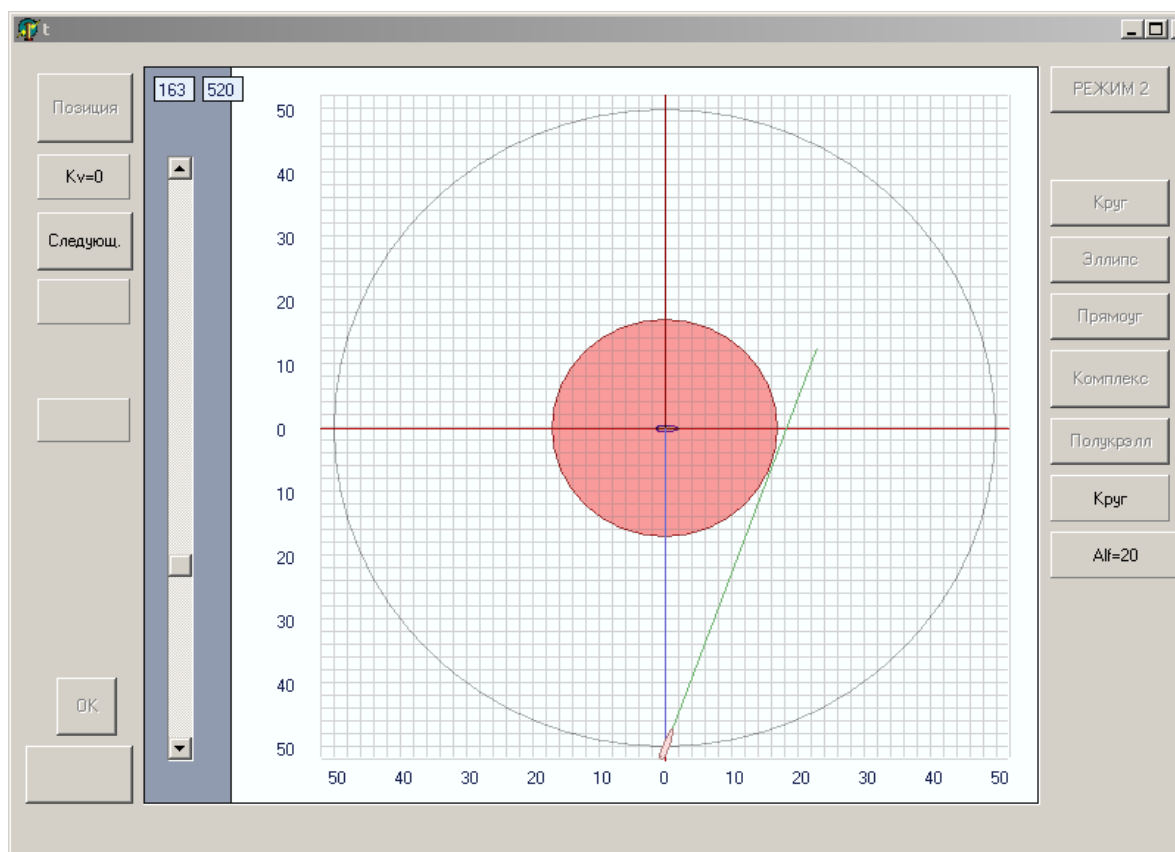


Рис. 5.25. Начальная позиция судна при круглой безопасной области

Так как в случае круглой области минимальное приращение курса уклонения ΔK_{oty_i} не зависит от положения судна относительно цели, то среднее значение ΔK_{oty} равно самому значению ΔK_{oty_i} , т.е. 20° .

В случае, когда выбирается безопасная область эллиптической формы, как показано на рис. 5.26, то при начальной позиции судна с курсом 0° значение ΔK_{oty_i} равно 22° .

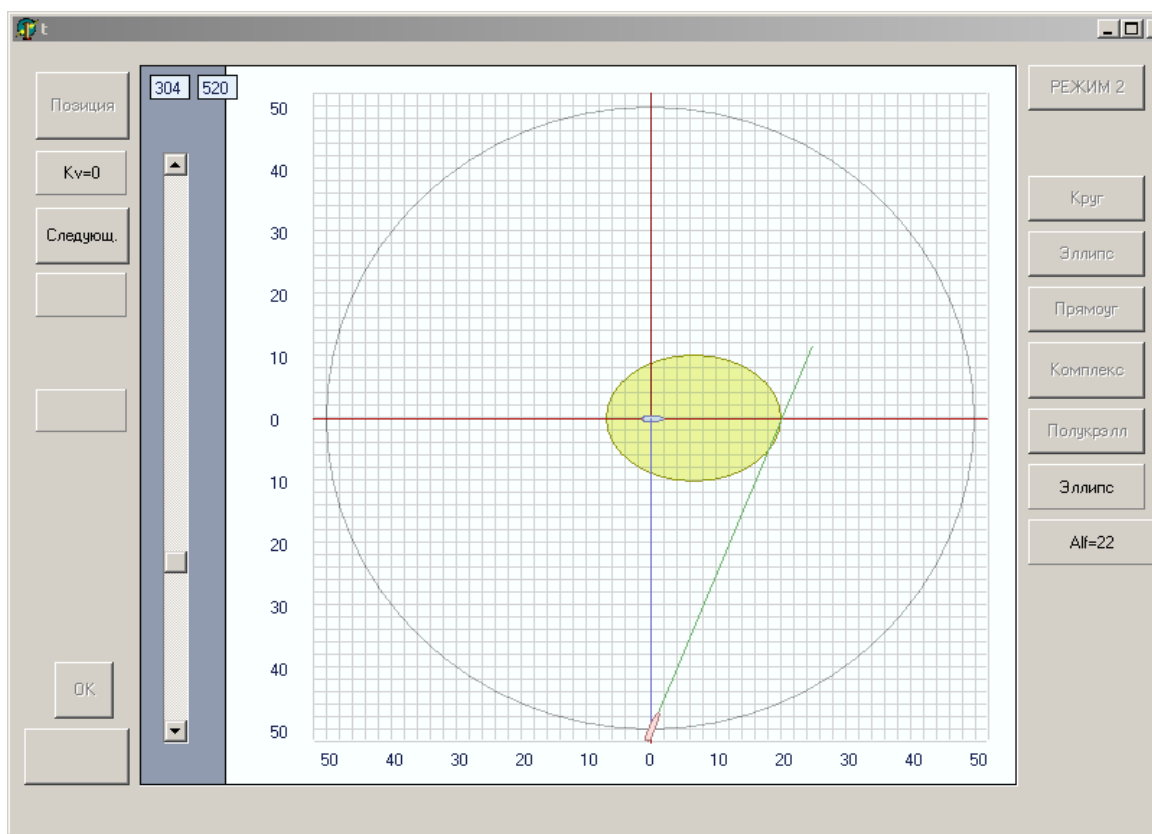


Рис. 5.26. Начальная позиция судна при эллиптической форме области

После применения линейки прокрутки используется клавиша «Следующая», которая активизирует клавишу «Позиция», и появляется возможность ввода очередной позиции судна, отличающейся уменьшением курса судна и пеленга на 20° . В новой позиции опять определяется минимальное приращение курса уклонения ΔK_{oty_i} , которое суммируется с предыдущими уклонениями. Так, на рис. 5.27 показана третья позиция судна, при которой курс судна и пеленг равны 300° , при этом $\Delta K_{oty_i} = 20^\circ$. С изменением позиции изменяется ΔK_{oty_i} и на рис. 5.28 показана 6-я позиция

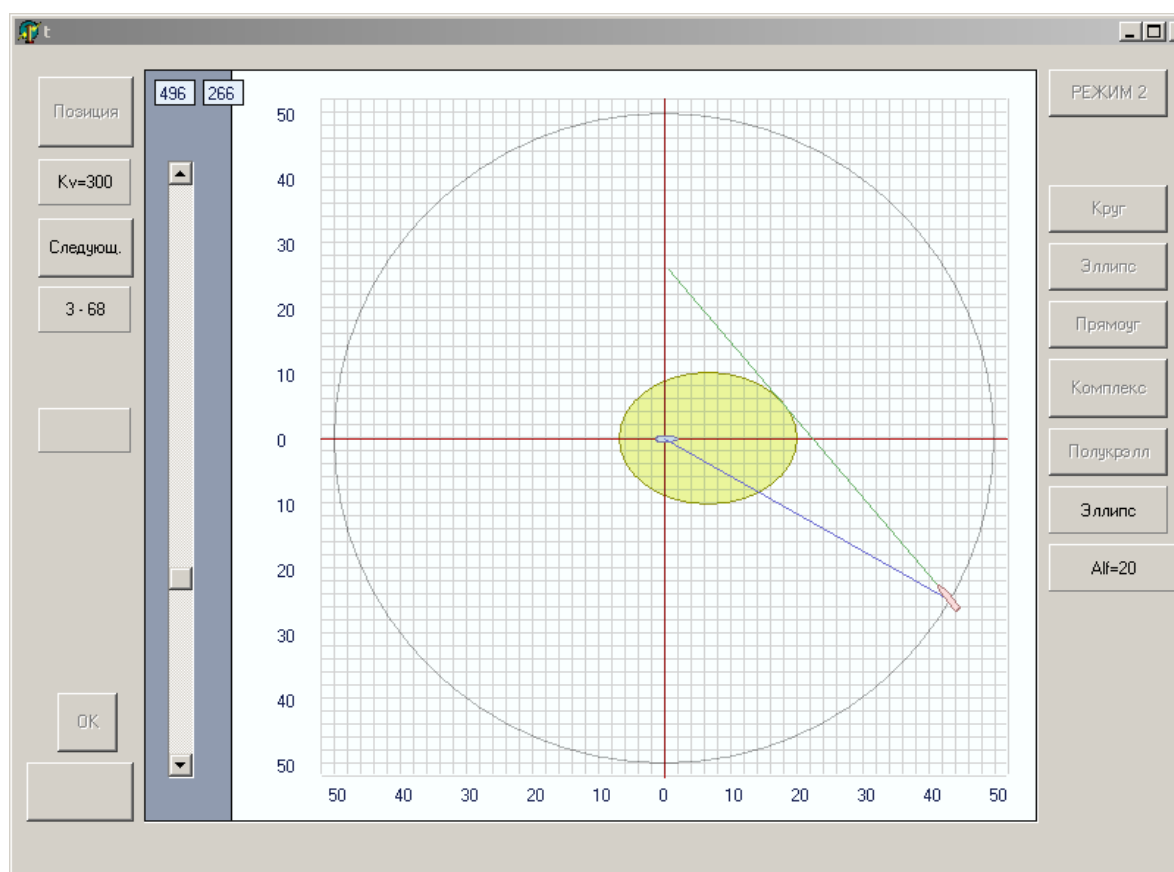


Рис. 5.27. Третья позиция судна относительно эллиптической области

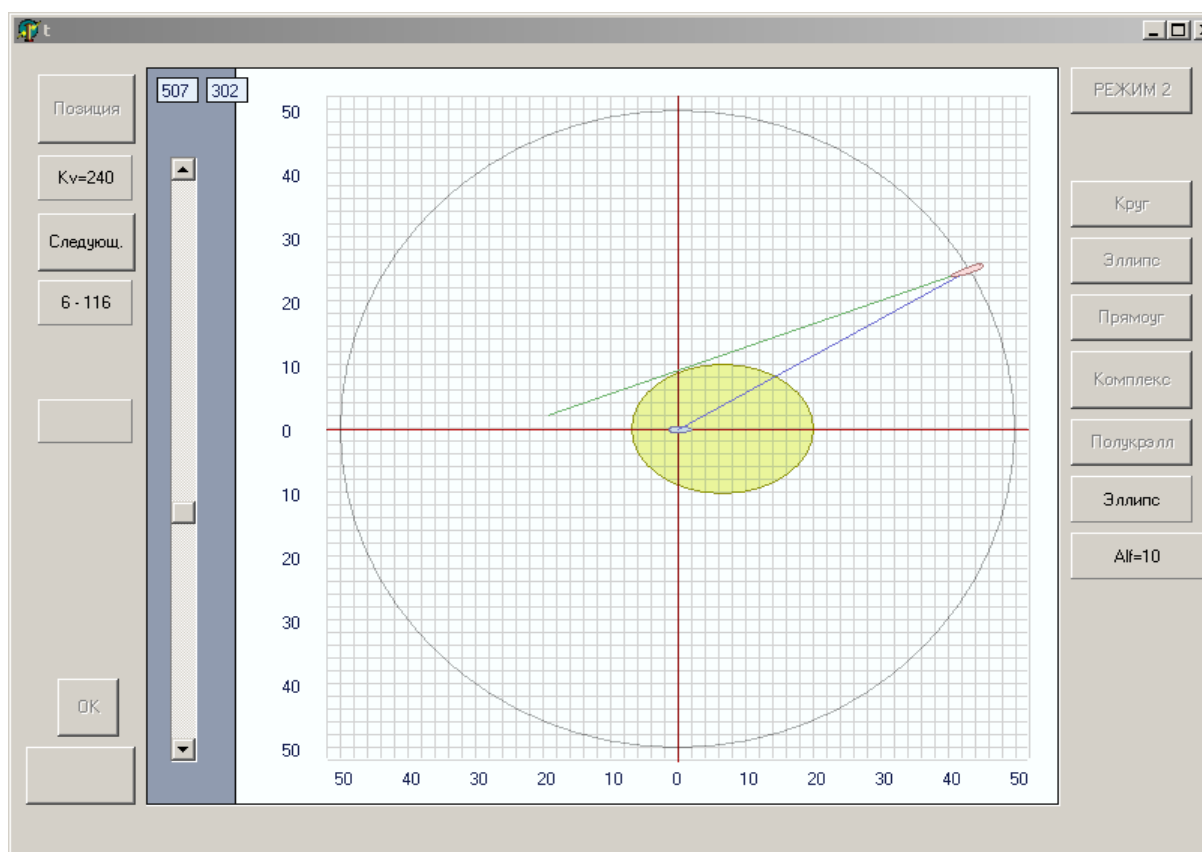


Рис. 5.28. Шестая позиция судна относительно эллиптической области

судна, при которой ΔK_{oty_i} уменьшается до 10° .

Минимального значения, равного 8° , ΔK_{oty_i} достигает при относительной позиции с курсом и пеленгом, равными 180° (рис. 5.29).

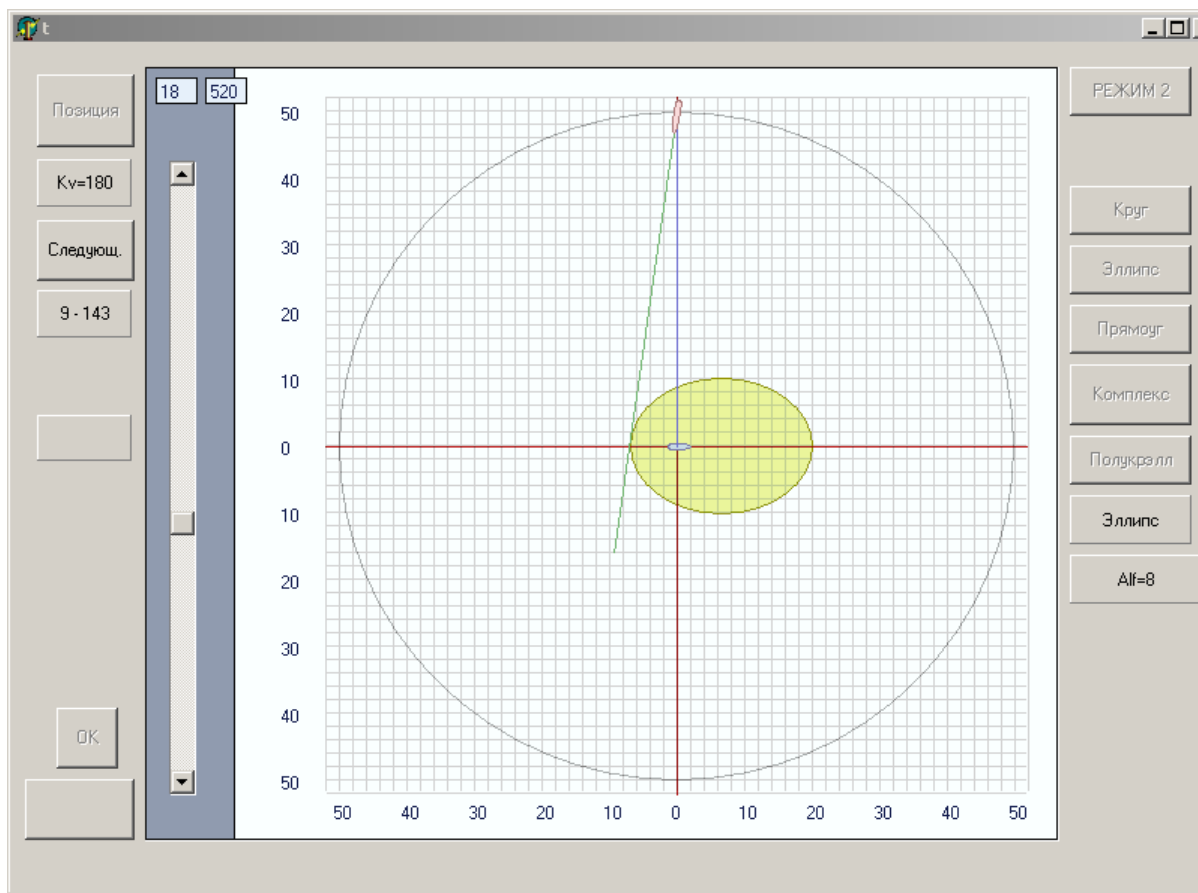


Рис. 5.29. Позиция судна с наименьшим значением ΔK_{oty_i}

После определения ΔK_{oty_i} в 18 позициях судна их общая сумма усредняется и рассчитывается значение ΔK_{oty} , которое для эллиптической безопасной области составляет $13,77^\circ$.

Аналогично для безопасной области прямоугольной формы $D_b^{(Rt)}$ в 18 позициях судна ΔK_{oty_i} достигает наибольшего значения в начальной позиции, равного 23° (рис. 5.30) и наименьшего значения 9° в 9-й позиции (рис. 5.31). Среднее значение минимального приращения курса уклонения ΔK_{oty} для прямоугольной безопасной области составляет $15,28^\circ$.

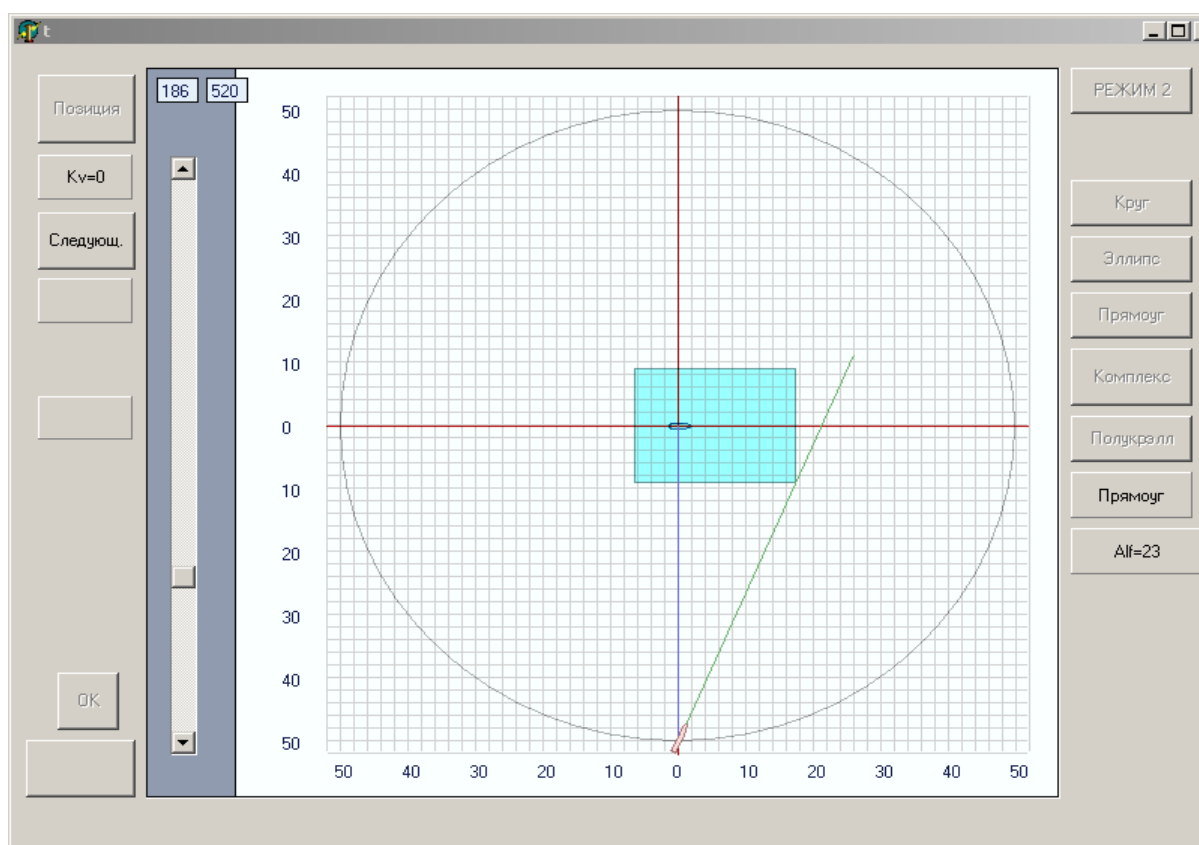


Рис. 5.30. Позиция судна с наибольшим значением ΔK_{oty_i} для области $D_b^{(Rt)}$

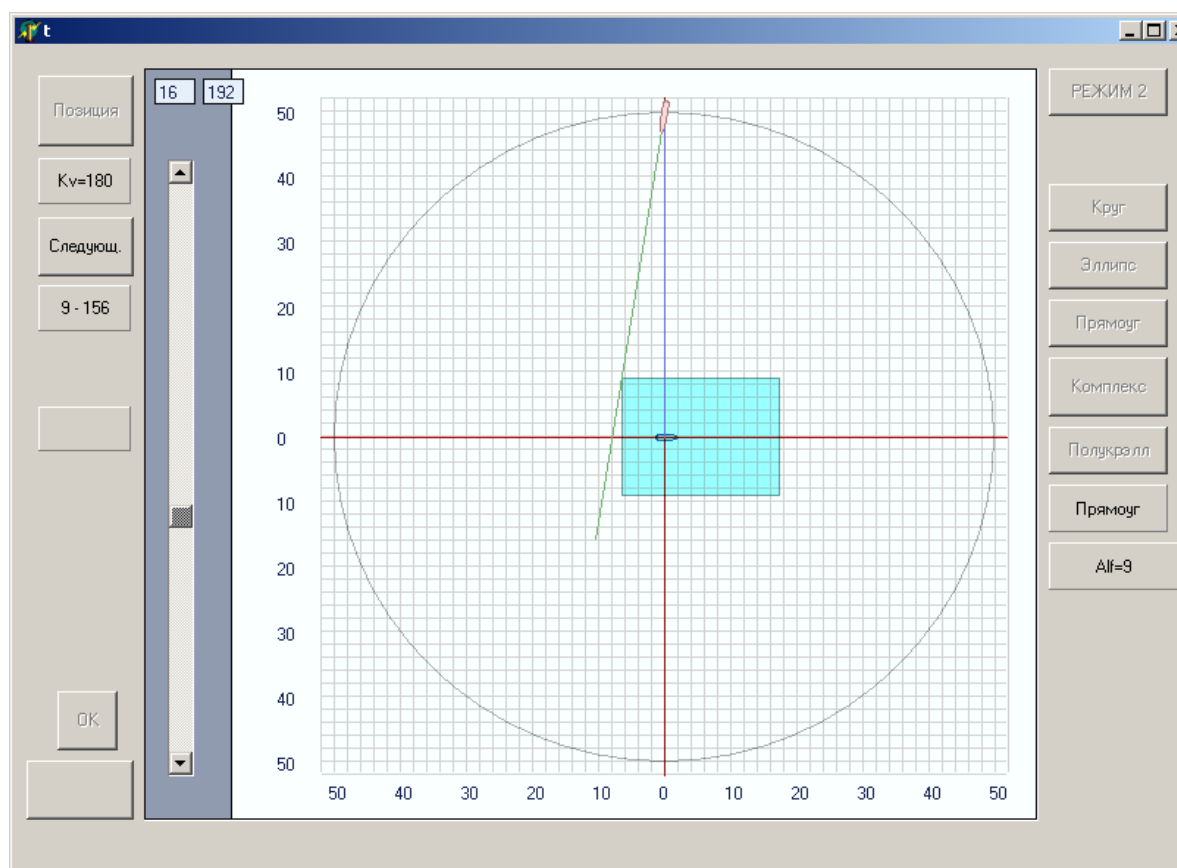


Рис. 5.31. Позиция судна с наименьшим значением ΔK_{oty_i} для области $D_b^{(Rt)}$

При определении среднего значения ΔK_{oty} для безопасной области сложной формы $D_b^{(Com)}$ наибольшее значение ΔK_{oty_i} , равное 23° , достигается во второй позиции судна (рис. 5.32).

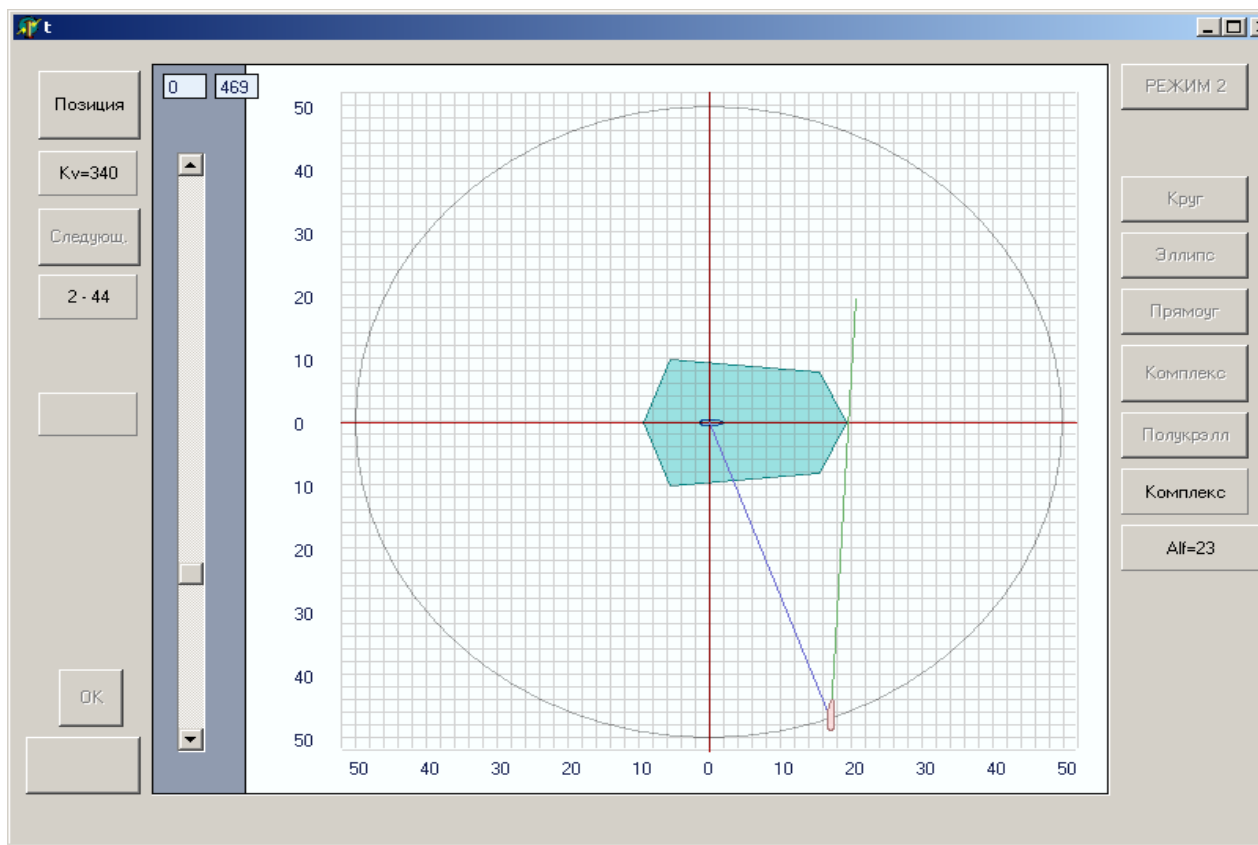


Рис. 5.32. Позиция судна с наибольшим значением ΔK_{oty_i} для области $D_b^{(Com)}$

Наименьшее значение ΔK_{oty_i} , равное 11° , соответствует 9-й позиции судна при курсе судна и пеленге 180° , как показано на рис. 5.33.

На рис. 5.34 и рис. 5. 35 показаны ситуации определения ΔK_{oty_i} для безопасной области $D_b^{(RE)}$, имеющей форму полукруга – полуэллипса, причем на рис. 5.34 показана вторая позиция судна, при которой ΔK_{oty_i} имеет наибольшее значение, равное 25° . На рис. 5.35 приведена 9-я позиция судна, при которой ΔK_{oty_i} равен наименьшему значению 8° . В результате подсчета по 18 позициям судна среднее значение ΔK_{oty} составляет $12,77^\circ$.

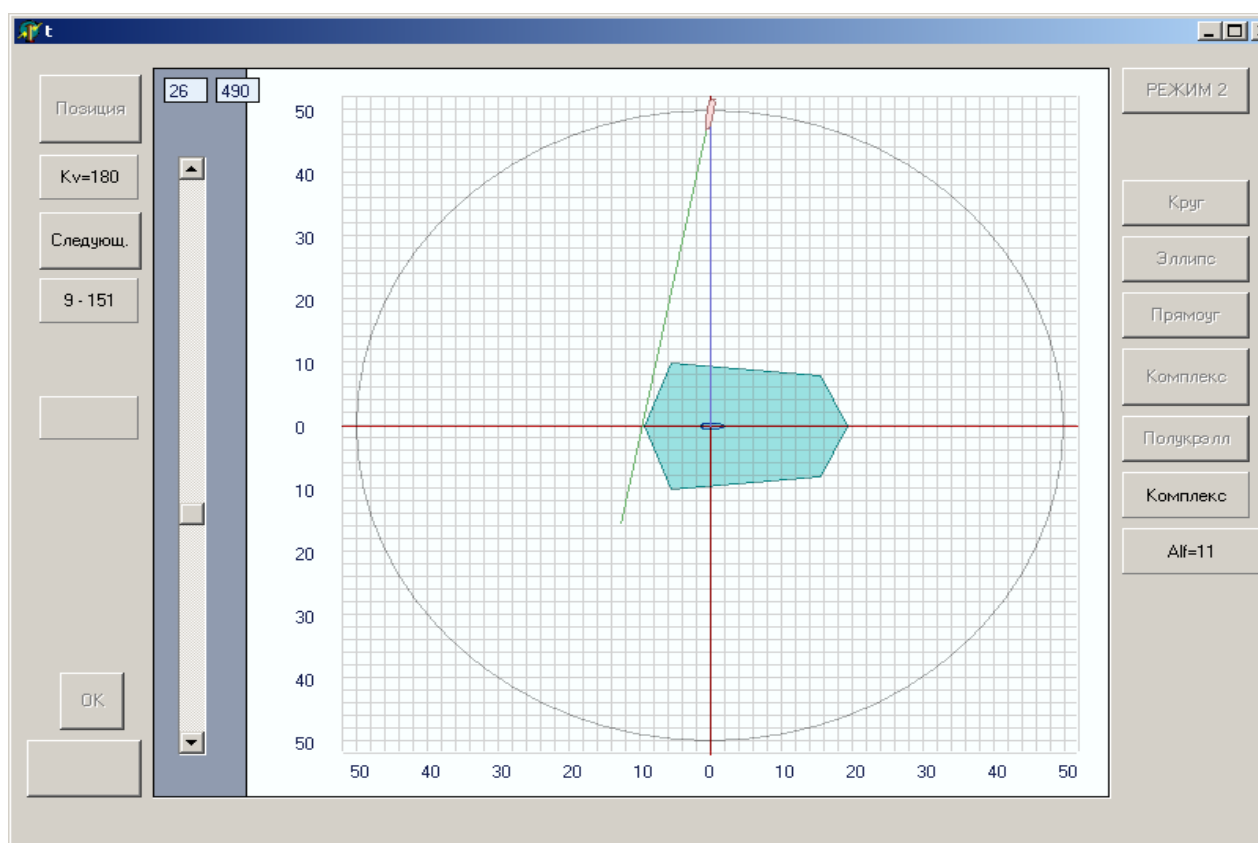


Рис. 5.33. Позиция судна с наименьшим значением ΔK_{oty} для области $D_b^{(Com)}$

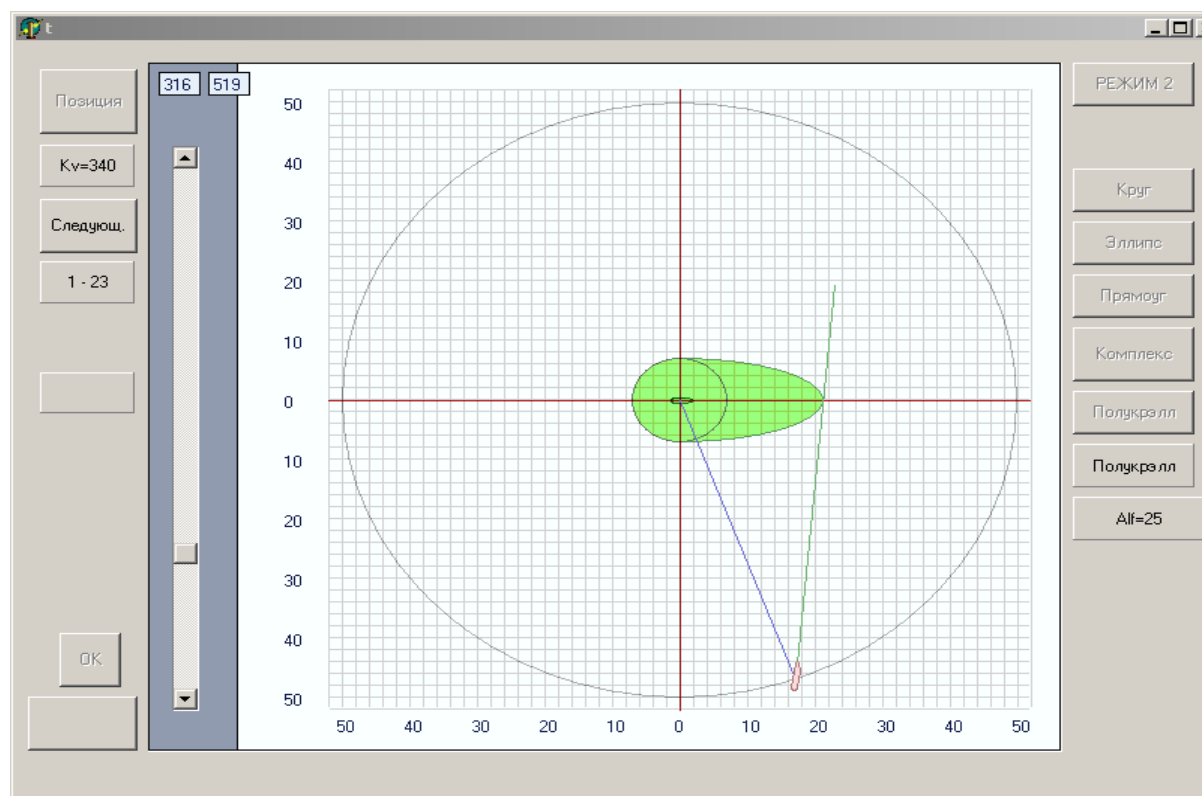


Рис. 5.34. Позиция судна с наибольшим значением ΔK_{oty} для области $D_b^{(RE)}$

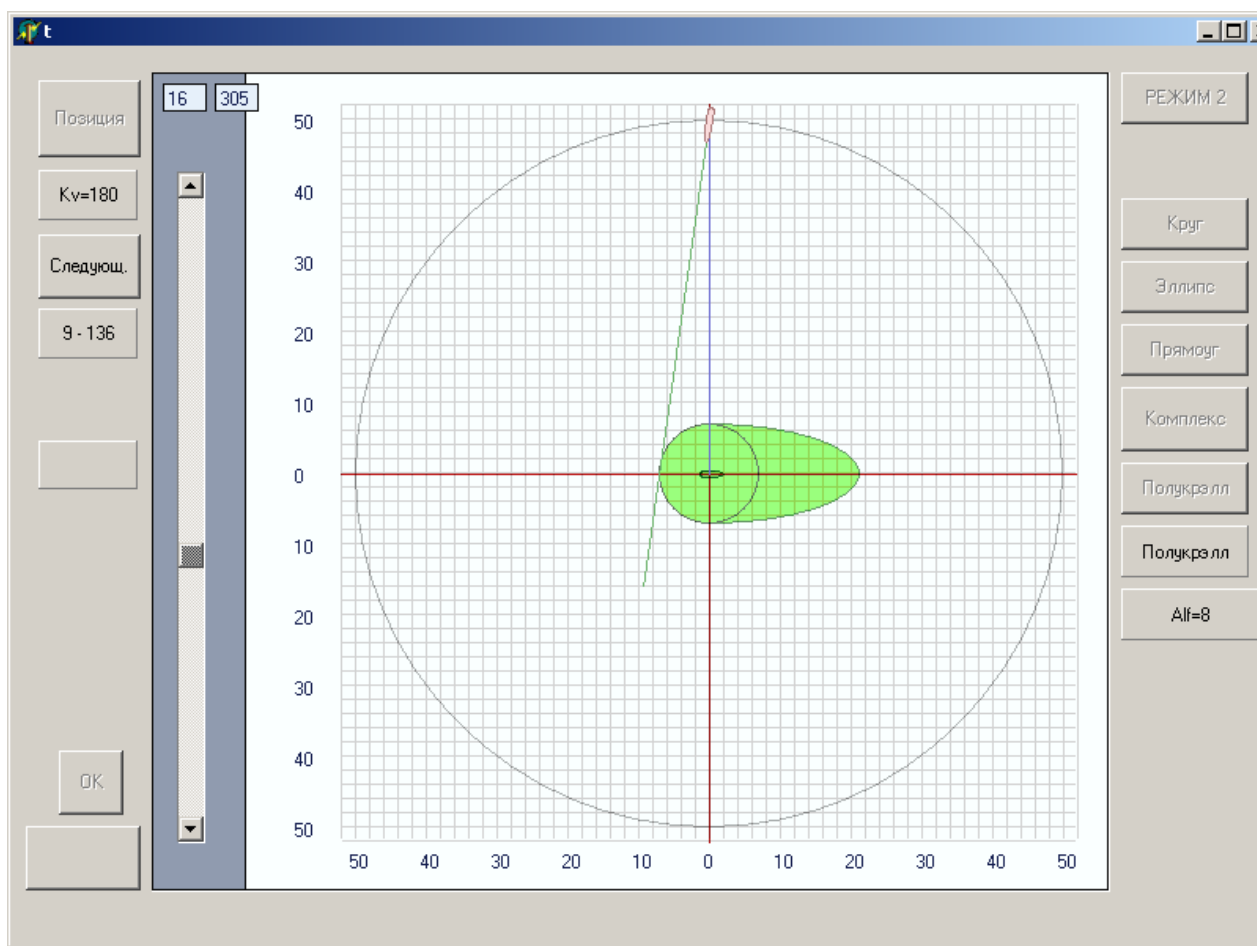


Рис. 5.35. Позиция судна с наименьшим значением ΔK_{oty_i} для области $D_b^{(RE)}$

5.3. Расчет значения среднего угла уклонения.

Для расчета среднего значения ΔK_{oty} с помощью компьютерной программы по полученным в предыдущей главе выражениям следует выбрать вариант расчета «Автомат», как показано на рис. 5.36, а затем выбрать безопасную область определенной формы. На рис. 5.37 произведен выбор эллиптической безопасной области, после чего активизируется клавиша «Timer».

Использование этой клавиши ведет к расчету минимального курса уклонения $\bar{K}_{ymin}$ для позиций судна через 5° , при равенстве курса судна и пеленга. При этом рассчитывается значение ΔK_{oty_i} для каждой из 72-х позиций.

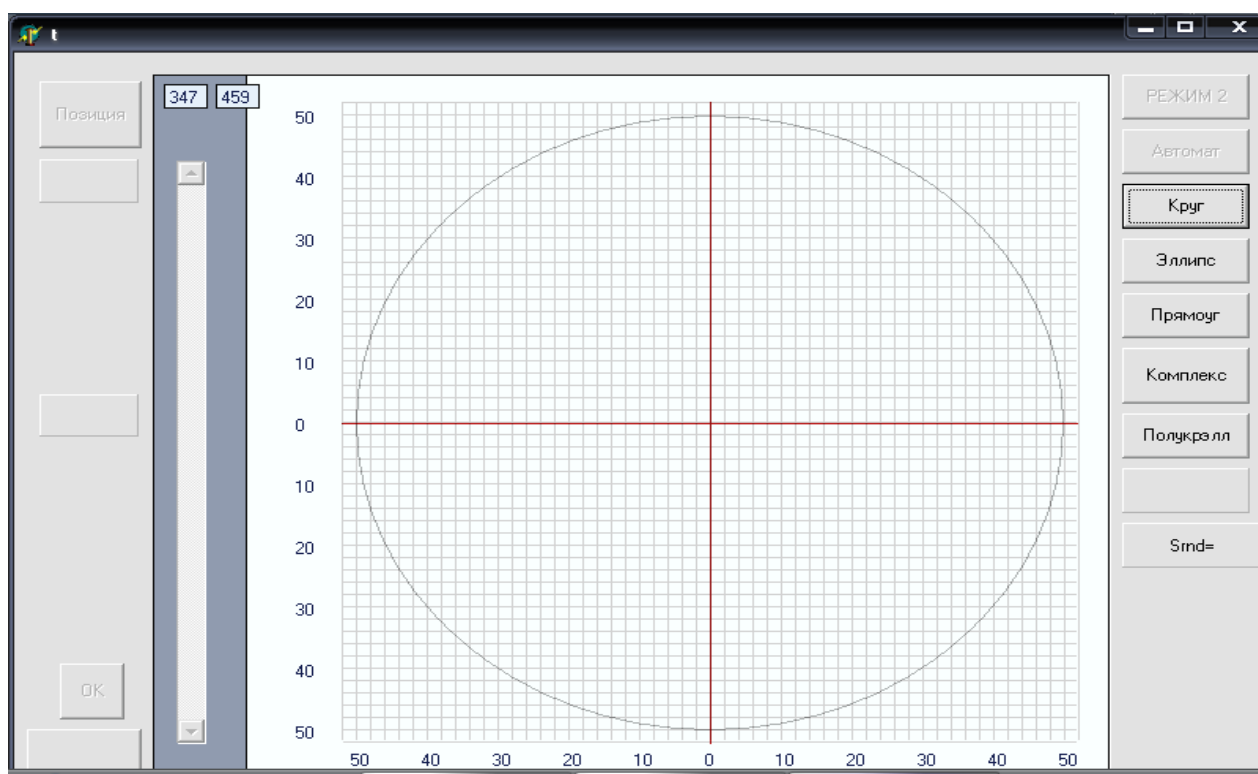


Рис. 5.36. Выбор автоматического режима расчета $\Delta K_{оту}$

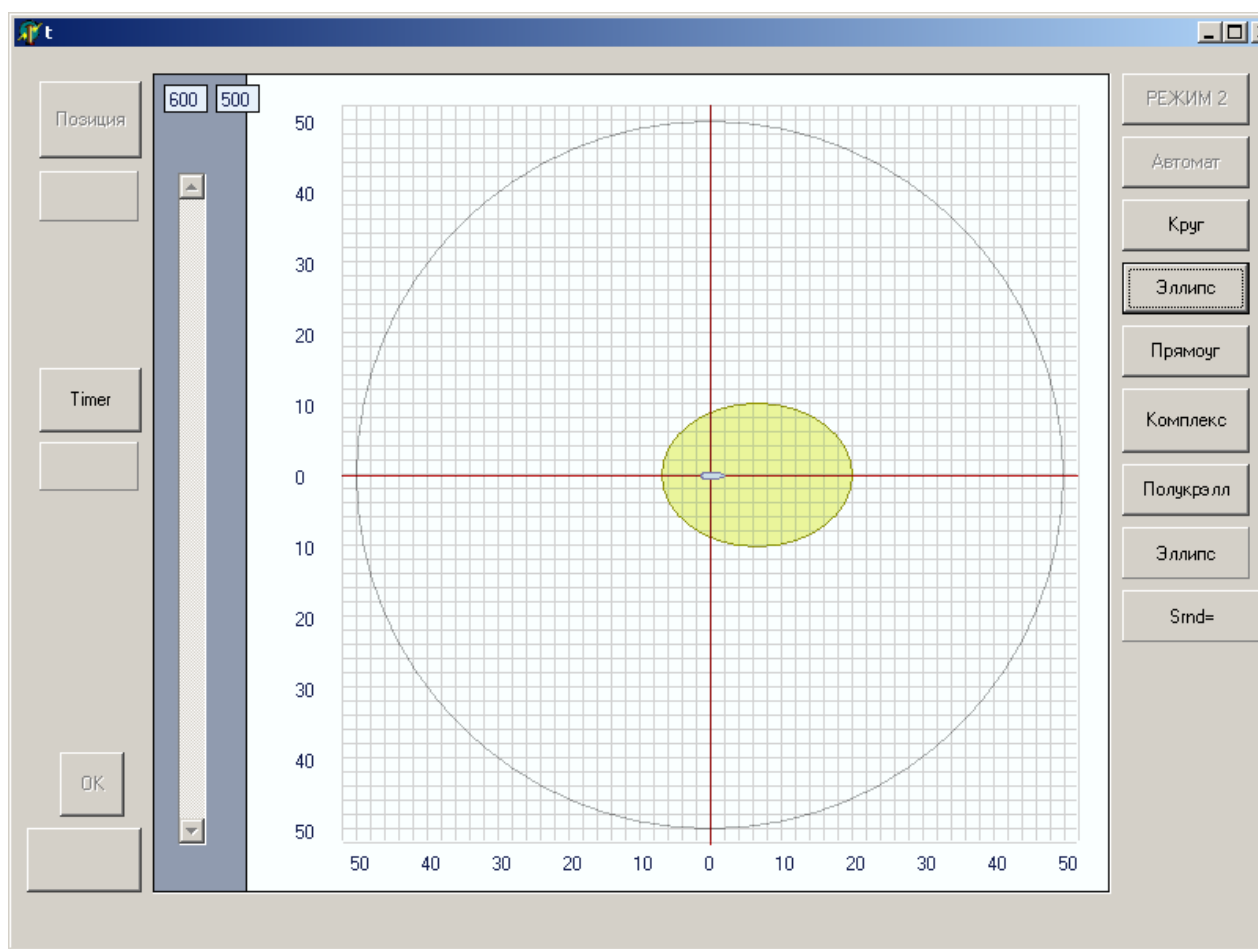


Рис. 5.37. Выбор безопасной области эллиптической формы

Расчет $\bar{K}_{ymin}$ для эллиптической области производится с помощью выражений:

$$\bar{X}_V = D_V \sin \alpha_V; \quad \bar{Y}_V = D_V \cos \alpha_V.$$

$$dL_e = a - l_k.$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\bar{K}_{ymin1} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin2} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin3} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin4} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

где K_c - курс судна.

После расчета значений $\bar{K}_{ymin1}$, $\bar{K}_{ymin2}$, $\bar{K}_{ymin3}$ и $\bar{K}_{ymin4}$ искомая величина относительного минимального курса уклонения судна K_{ymin} при уклонении вправо находится из выражения:

$$\bar{K}_{ymin} = \max \{ \bar{K}_{ymin1}, \bar{K}_{ymin2}, \bar{K}_{ymin3}, \bar{K}_{ymin4} \},$$

при условии, что $\bar{K}_{ymin} - K_c > 0$.

При использовании клавиши «Timer» наносятся позиции судна и соответствующие им касательные минимальные курсы уклонения K_{ymin} , как показано на рис. 5.38. При этом вычисляется минимальный угол ΔK_{oty} , суммирующийся для всех 72 позиций и находится усредненное значение равное $13,87^\circ$.

Для прямоугольной формы безопасной области значения минимального курса уклонения K_{ymin} вычисляется с помощью выражений, полученных в предыдущей главе и имеющих следующий вид:

$$\psi_n = \arctg \frac{b}{2l_n}, \quad \psi_k = \arctg \frac{b}{2l_k},$$

$$D_n = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_n^2}, \quad D_k = \sqrt{\frac{b^2}{4} + l_k^2}.$$

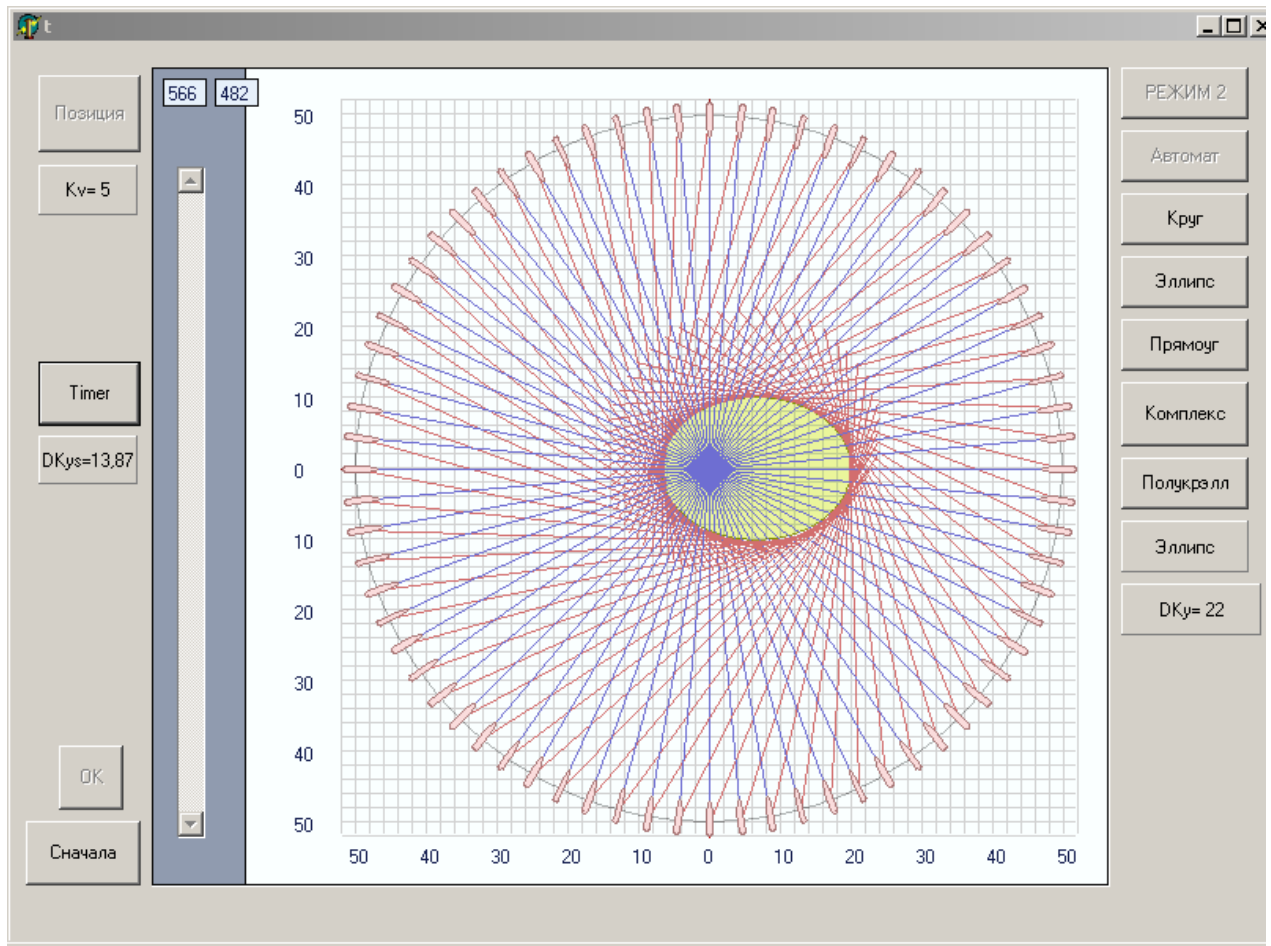


Рис. 5.38. Расчет $\Delta K_{оту}$ для эллиптической безопасной области

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

$$\bar{K}_{yminA} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(\psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(\psi_n + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminB} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi - \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi - \psi_k + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminC} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_k \sin(\pi + \psi_k + K_c)}{\bar{Y}_o + D_k \cos(\pi + \psi_k + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminD} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_n \sin(2\pi - \psi_n + K_c)}{\bar{Y}_o + D_n \cos(2\pi - \psi_n + K_c)}.$$

Используя полученные выражения, находим значение относительных минимального курсов уклонения $\tilde{K}_{yminA}$, $\tilde{K}_{yminB}$, $\tilde{K}_{yminC}$, $\tilde{K}_{yminD}$. Для выбора

относительного минимального курса уклонения $\tilde{K}_{ymin}$ воспользуемся следующим соотношением:

$$\tilde{K}_{ymin} = \max\{\tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD}\},$$

при условии, что $\tilde{K}_{ymin} - K_c > 0$.

На рис. 5.39 показаны позиции судна и соответствующие им касательные минимальные курсы уклонения и рассчитано среднее значение $\Delta K_{oty} = 15,68^\circ$.

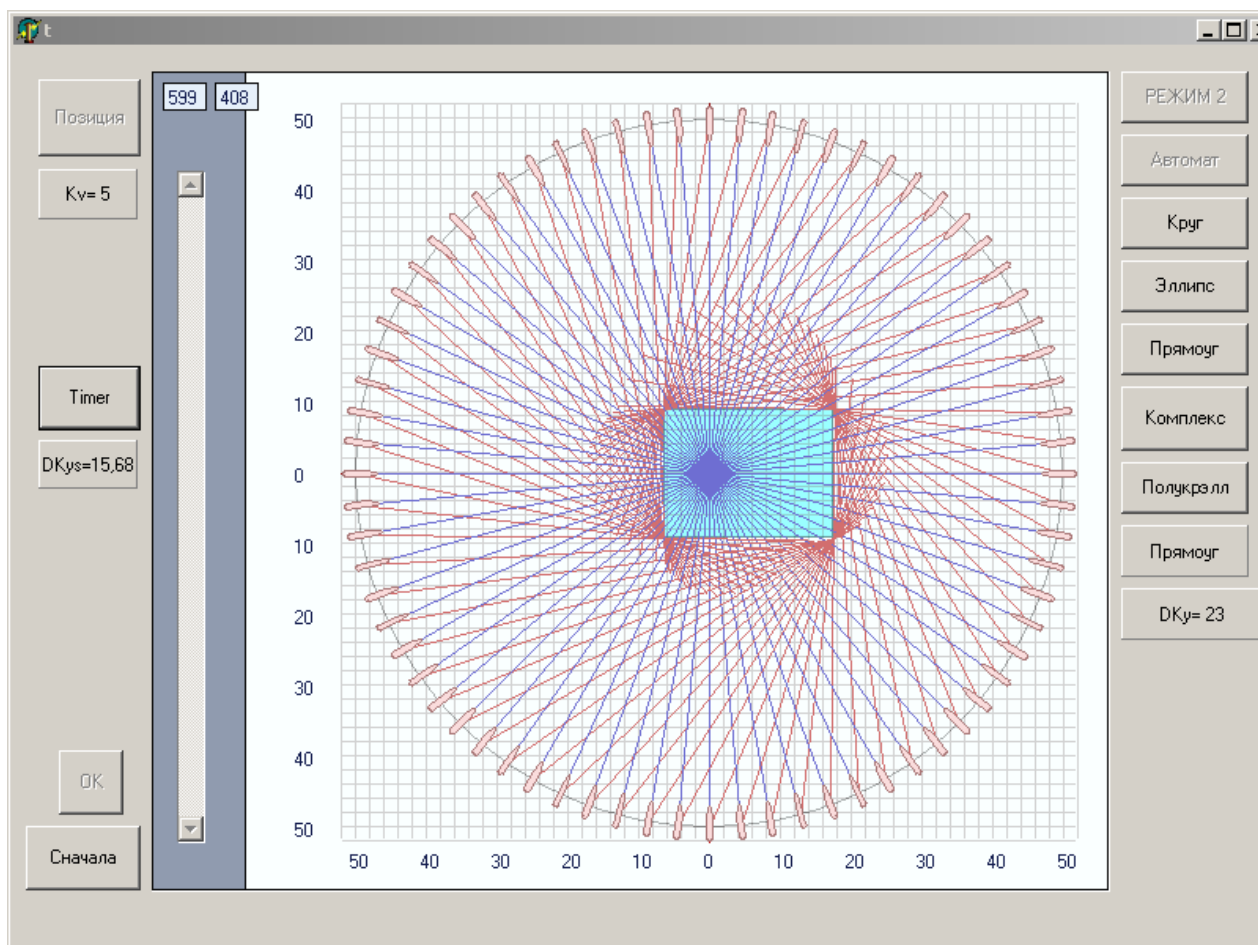


Рис. 5.39. Расчет ΔK_{oty} для прямоугольной безопасной области

Для безопасной области сложной формы значения минимального курса уклонения K_{ymin} рассчитывается с помощью выражений, полученных в предыдущей главе:

$$D_s = [(L_{bn} - L_{bk})^2 + (b_1/2)^2]^{1/2}, \quad \psi = \arctg[(b_1/2)/(L_{bn} - L_{bk})].$$

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

$$\bar{K}_{yminA} = \arctg \frac{\bar{X}_o + L_{bn} \sin K_c}{\bar{Y}_o + L_{bn} \cos K_c},$$

$$\bar{K}_{yminB} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_s \sin(\psi + K_c)}{\bar{Y}_o + D_s \cos(\psi + K_c)},$$

$$\bar{K}_{yminC} = \arctg \frac{\bar{X}_o + (b_2 / 2) \sin K_c}{\bar{Y}_o - (b_2 / 2) \cos K_c},$$

$$\bar{K}_{yminD} = \arctg \frac{\bar{X}_o - L_{bk} \sin K_c}{\bar{Y}_o - L_{bk} \cos K_c},$$

$$\bar{K}_{yminE} = \arctg \frac{\bar{X}_o - (b_2 / 2) \sin K_c}{\bar{Y}_o + (b_2 / 2) \cos K_c},$$

$$\bar{K}_{yminF} = \arctg \frac{\bar{X}_o + D_s \sin(K_c - \psi)}{\bar{Y}_o + D_s \cos(K_c - \psi)}.$$

$$\tilde{K}_{ymin} = \max\{\tilde{K}_{yminA}, \tilde{K}_{yminB}, \tilde{K}_{yminC}, \tilde{K}_{yminD}, \tilde{K}_{yminE}, \tilde{K}_{yminF}\},$$

при этом должно выполняться неравенство $\tilde{K}_{ymin} - K_c > 0$.

Позиции судна и касательные минимальные курсы уклонения для безопасной области сложной формы показаны на рис. 5.40, причем рассчитано среднее значение $\Delta K_{oty} = 15,12^\circ$.

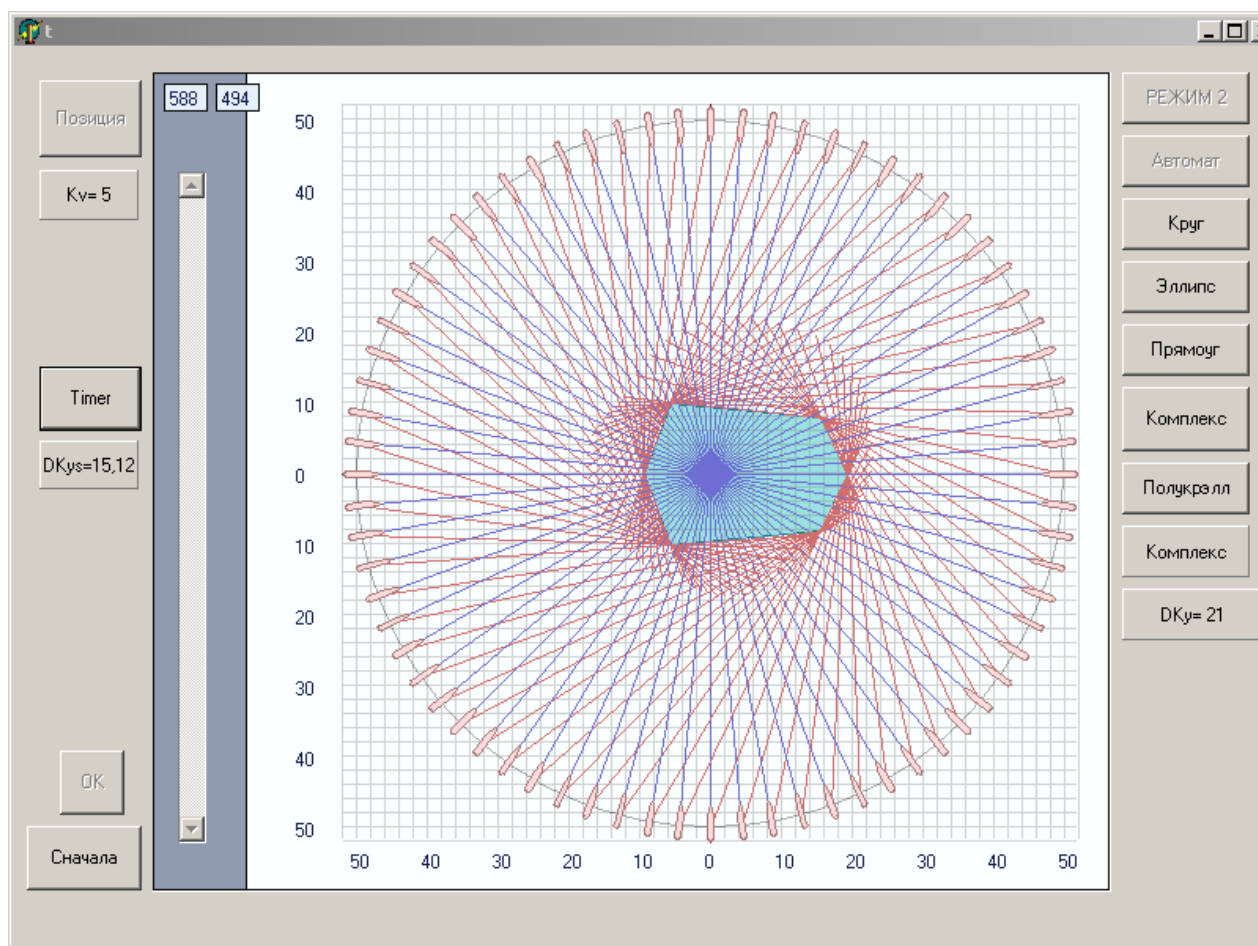


Рис. 5.40. Расчет $\Delta K_{оты}$ для безопасной области сложной формы

Для безопасной области сложной формы значения минимального курса уклонения K_{ymin} рассчитывается с помощью следующих выражений:

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

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

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

$$\bar{K}_{ymin1} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin2} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \sin K_c + x_1 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_1^2}{a^2}} \cos K_c - x_1 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin3} = \arctg \frac{\bar{X}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o + b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c},$$

$$\bar{K}_{ymin4} = \arctg \frac{\bar{X}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \sin K_c + x_2 \cos K_c}{\bar{Y}_o - b \sqrt{1 - \frac{x_2^2}{a^2}} \cos K_c - x_2 \sin K_c}.$$

$$\bar{K}_{ymin} = \begin{cases} K_{otn} + \arcsin \frac{R_b}{D}, & \text{если } \sin \beta < 0, \\ \max\{\bar{K}_{yminA}, \bar{K}_{yminB}, \bar{K}_{yminC}, \bar{K}_{yminD}\}, & \text{если } \sin \beta > 0, \end{cases}$$

где β - курсовой угол.

На рис. 5.41 показаны позиции судна и касательные минимальные курсы уклонения для безопасной области сложной формы, причем рассчитано среднее значение $\Delta K_{oty} = 12,81^\circ$. Сопоставим величины ΔK_{oty} для каждой безопасной области, полученные имитационным моделированием в

предыдущем подразделе, с рассчитанными значения в данном подразделе, приводя их значения в табл. 5.21.

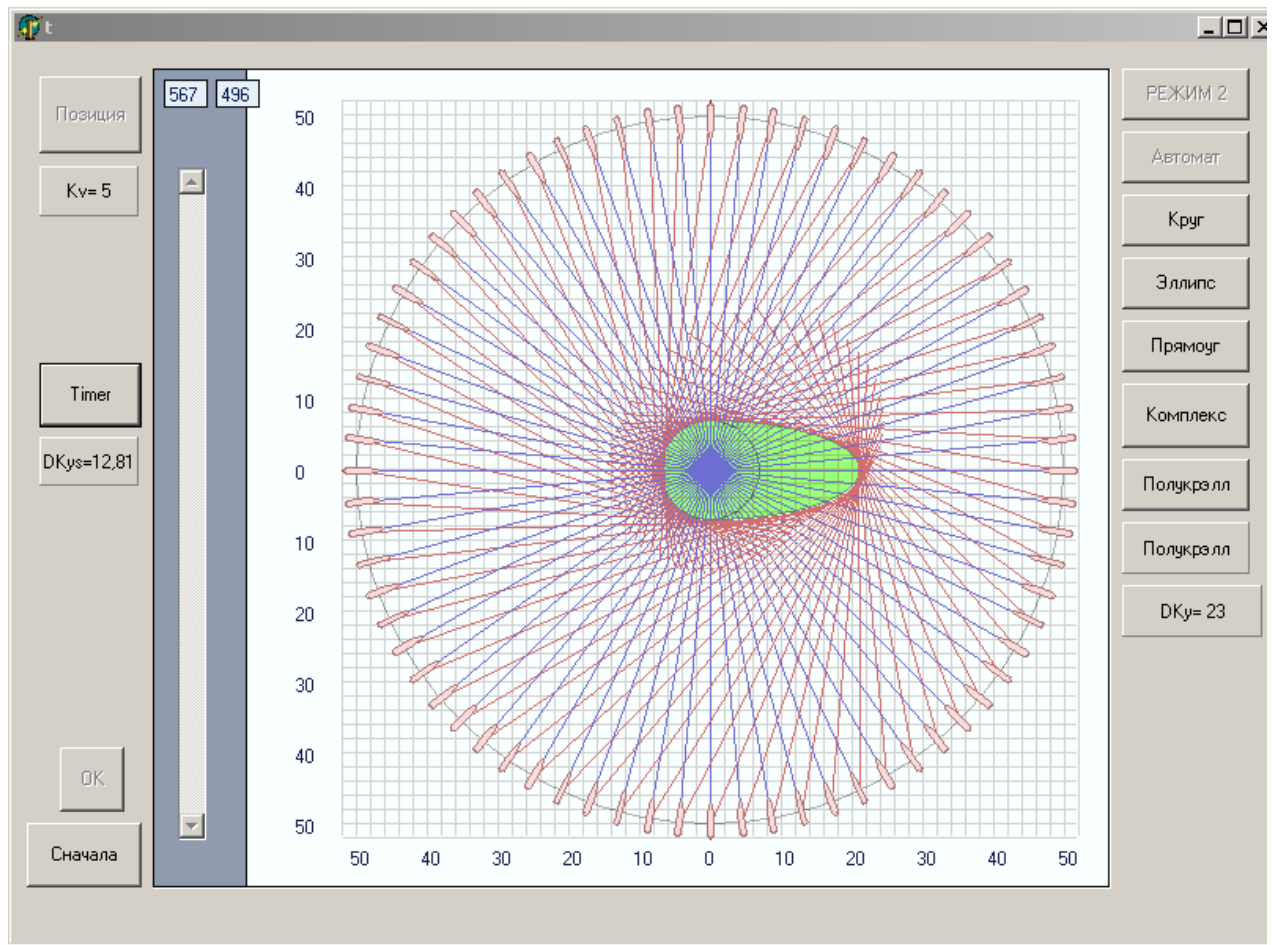


Рис. 5.41. Расчет ΔK_{oty} для области формы полукруга - полуэллипса

Таблица 5.21.

Расчетные и имитационные значения ΔK_{oty}

Форма безопасной области	Расчетное значение ΔK_{oty}	Имитационное значение ΔK_{oty}
Круг	20,0	20,0
Эллипс	13,87	13,77
Прямоугольник	15,68	15,58
Сложная форма	15,12	15,22
Полукруг-эллипс	12,81	12,77

Как показывает анализ приведенной таблицы, расчетные и имитационные значения величины $\Delta K_{\text{оты}}$ для безопасных областей различных форм достаточно близки, что подтверждает корректность процедур расчета среднего значения угла уклонения $\Delta K_{\text{оты}}$ для безопасных областей различных форм. Оптимальной является безопасная область, имеющая форму полукруга-полуэллипса, так как ей соответствует минимальное значение критерия оптимальности $\Delta K_{\text{оты}}$.

5.4. Выводы по пятой главе.

В пятой главе рассмотрены результаты имитационного моделирования, которое реализовано с помощью разработанной компьютерной программы. В процессе имитационного моделирования проверена корректность процедур расчета размеров детерминированных, стохастических и безопасных областей различной формы. Имитационная программа производит расчет безопасных областей в зависимости от габаритов судна и закономерностей векториальной погрешности позиции судна.

При расчете размеров стохастической области учитываются законы распределения погрешности навигационных измерений, причем предусмотрен учет закона распределения Гаусса, а также смешанных законов распределения первого и второго типа. Установлено, что при распределении векториальной погрешности по закону Гаусса безопасные области имеют минимальные размеры. Если векториальная погрешность распределена по смешанному закону первого или второго типа, то ее размеры больше, чем в случае нормального распределения, причем с увеличением существенного параметра размеры безопасной области уменьшаются, приближаясь к размеру области при нормальном распределении векторной погрешности.

В главе произведен сравнительный анализ безопасных областей разной формы для одинаковых габаритов судна и неизменного значения среднего

квадратического отклонения. В качестве критерия оптимальности выбрано среднее значения угла уклонения, расчет которого производился по полученным процедурам, а также с помощью имитационного моделирования.

Средние значения угла уклонения, полученные обоими способами, имеют хорошую сходимость, причем минимальное среднее значения угла уклонения соответствует безопасной области, которая имеет форму полукруга полу-эллипса. Поэтому указанная форма безопасной области является оптимальной, при которой уклонение судна на безопасный курс расхождения обеспечивает минимальные потери пройденного расстояния.

ВЫВОДЫ

1. Оценка состояния вопроса. Интенсивное судоходство и навигационные опасности осложняют судовождение в стесненных водах, создавая повышенные риски возникновения аварийных ситуаций. Маневрирование судов в таких районах затруднено и сопряжено с возможными посадками на мель и столкновениями судов при опасном сближении. Из-за интенсивного судоходства возникают ситуации одновременного опасного сближения нескольких судов. Для разрешения таких ситуаций необходимо использовать аппарат безопасных областей судов.

Следовательно, меры, направленные на улучшение или совершенствование методов судовождения в стесненных районах, в первую очередь в части предупреждения столкновения судов, являются, несомненно, актуальным и перспективным научным направлением

2. Формулировка решенной научной задачи, ее значение для науки и практики. В результате решения главной научной задачи получен новый метод выбора оптимальной формы безопасной области судна и расчета ее размеров, который отличается совместным учетом двумерной плотности распределения позиционной векториальной погрешности, габаритов судна и запаса расстояния на форс-мажорные обстоятельства.

В диссертационной работе впервые получены:

- математическая модель детерминированной составляющей безопасной области судна при расхождении с целью, которая учитывает габариты судов, явления присасывания между судами и запас расстояния на форс-мажорные обстоятельства;
- математическая модель стохастической составляющей безопасной области судна при расхождении с целью, которая учитывает случайную

погрешность навигационных измерений представленной двухмерной плотностью нормального и смешанных законов распределения;

- оптимальная форма и размеры безопасной области судна по критерию минимума угла отклонения курса судна от начального, что обеспечивает повышение эффективности плавания.

3. Практическая значимость работы определяется тем, что ее основные результаты могут быть использованы разработчиками в новых поколениях ЭКДИС и САРП, а также исследования могут быть применены при создании рекомендаций по предупреждению столкновений судов.

4. 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.

5. Качественные и количественные показатели полученных результатов. Качественным показателем результатов диссертационной работы является появившаяся возможность выполнять минимальные уклонения при безопасном расхождении путем использования оптимальной формы безопасной области судна. Как показало имитационное моделирование, предложенный способ имеет высокую эффективность.

6. Обоснование достоверности полученных результатов.

Достоверность результатов работы подтверждается корректным применением математических моделей и результатами имитационного моделирования, выполненного с помощью разработанных компьютерных программ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна/ Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. - Одесса: Латстар, 2002. - 310 с.
2. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере/ Воробьев Ю.Л. – С.Петербург: Судостроение, 1992. – 224 с.
3. 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.
4. Демин С.И. Торможение судна / Демин С.И.– М.: Транспорт, 1975.– 81с.
5. 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.
6. 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.
7. Демин С. И. Вопросы управления морскими судами / Демин С. И. – М.: Рекламинформбюро ММФ, 1975. – 75 с.
8. 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.
9. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1981. - 206 с.
10. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
11. Сизов В.Г. Теория корабля / Сизов В.Г. – Одесса: Феникс, 2003. – 282 с.
12. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
13. Грауэр Л. В. Синтез закона управления морским подвижным объектом для решения задачи динамического позиционирования / Грауэр Л. В., Лопат-

рев 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.

14. Вагущенко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы/ Вагущенко Л.Л. - Одесса: Феникс, 2004. - 302 с.

15. 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.

16. Вагущенко Л.Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности/ Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И - Одесса: Феникс, 2005. -274 с.

17. Laeki Toshio. Ninon kokai dakkar ronbunshu// Jap. Inst. Navig. 2005. 112, p. 301-306.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. Чапчай Е.П. Экспериментальное исследование моделей поворотливости судна / Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 139 – 142.

22. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна/ Чапчай Е.П. // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 110 – 113.

23. Inaishi Masaaki. Nihon kokai gakkai ronbunshu/ Inaishi Masaaki, Kawaguchi Akira //J. Jap. Inst. Navig. - 2003. – 109. – P. 89-96.
24. Саленек В. В. К определению связи между углом дрейфа и безразмерной угловой скоростью на установившейся циркуляции/ Саленек В. В.// Новосибир. гос. акад. вод. трансп. Судовожд.: управляемость, упр., навигация. обуч. - Новосибирск. - 1999, с. 17-18.
25. Стпепахно Р. Г. Разработка способов идентификации математической модели судна с целью решения прикладных задач судовождения: автореф. дис. на со-иск. уч. степ. канд. техн. наук/ Стпепахно Р. Г. - Мурманск, 2005, 22 с.
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. Козлов А. В. Интегрированные системы управления движением судна/ Козлов А. В., Туркин И. И.// Мор. биржа. 2006, № 3, с. 46-49.
30. 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.

31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. Лентарёв А. А. Статистическое моделирование движения судов по фарватеру /Лентарёв А. А., Улюков А. Ю. //Вестн. Мор. гос. ун-та. 2005, № 9, с. 78-83.
35. Foxwell David. VTS takes on new roles in ports of world / Foxwell David. // Ports-strategy. – 2004. - Apr. – P. 40-42.
36. Vessel Traffic System erhdht Schiffssicherheit // Schiff und Hafen: Seewirt., Komman-dobrucke.- 1995.-47, №11. - P. 99-100.
37. 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.
38. VTS-Lieferung nach China. //Schiff und Hafen: Seewirt., Kommandobrucke. - 2000. – 52.- № 9. – P. 6.
39. 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.
40. Кондрашихин В.Т. О погрешностях измерений/ Кондрашихин В.Т. // Геодезия и картография.– 1977. – № 5. – С. 11-16.

41. 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.
42. Кондрашихин В.Т. Зависимость между точностью и надежностью навигации / Кондрашихин В.Т. // Судовождение и связь: Тр. ЦНИИМФ. – 1973. – Вып. 173. – С. 41-49.
43. Кондрашихин В.Т. Теория ошибок и ее применение к задачам судовождения / Кондрашихин В.Т. – М.: Транспорт, 1969. – 256 с.
44. Monteiro Luis. What is the accuracy of DGPS? / Sardinia Monteiro Luis, Moore Terry, Hill Chris. // J. Navig. 2005. 58, № 2, p. 207-225.
45. 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.
46. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. - 230с.
47. 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.
48. Ткаченко А.С. Применение обобщенных пуассоновских распределений для описания навигационных погрешностей / Ткаченко А.С., Алексишин В.Г. // Судовождение. – 2008. - № 15. – С. 93 – 99.
49. 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.
50. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения / Мельник Е.Ф. // Судовождение. - 2002. – № 5. – С. 65 – 73.
51. Куликов А. М., Поддубный В. В. Оптимальное управление расхож-

дением судов // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.

52. Поддубный В. В., Куликов А. А. Метод возможных направлений в задачах безопасного расхождения судов /ВИНИТИ. – М, 1987. – 21 с. – Рус. Деп. // Анот. в ж. «Водный транспорт», №2, 1987.

53. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.

54. Павлов В.В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления/ Павлов В.В. - Киев: Наукова думка, 1971. - 272 с.

55. 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.

56. 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.

57. 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.

58. Положенцев И.А. Эргатическая дифференциально-игровая система предупреждения столкновения судов/ Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1980. - № 50. - С. 38-41.

59. Богачук Ю.П. Эргатическая дифференциально – игровая система предотвращения столкновений судов/ Богачук Ю.П., Положенцев М.А. // Дискретные и эргатические системы управления. - Киев: Ин-т кибернетики, 1983. – С. 98-105.

60. Шепетуха Ю.М. Некоторые вопросы постановки задачи синтеза систем управления движением судна в условиях конфликта/ Шепетуха Ю.М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 44-48.

61. Богачук Ю.П. Эргатическая система управления групповым движением судов/ Богачук Ю.П., Положенцев И.А. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1984. - № 61. - С. 20-23.

62. Павлов В.В. Экспериментальное исследование модели эргатической системы предотвращения столкновений судов / Павлов В.В., Шептуха Ю. М.: Препр. /АН Украины. Ин-т кибернетики; № 52. – К.: 1985. - 24 с.
63. Вычислительная система «Антикон» для предотвращения столкновений судов. А. с. 1136178. СССР. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. - 1985.
64. Шепетуха Ю. М. Применение комбинированного маневра в эргатических системах разрешения навигационного конфликта / Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1985. - №68. - С. 45-48.
65. Положенцев М. А. Применение двухэлементных стратегий расхождения в эргатических системах предупреждения столкновений судов / Положенцев М. А., Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1987. - №76. - С. 19-21.
66. Шепетуха Ю. М. К вопросу синтеза эргатической системы принятия решений о маневре безопасного расхождения судов / Шепетуха Ю. М. // Кибернетика и вычислительная техника. - 1989. - № 84. - С. 43-45.
67. Георгизон Е. Б., Цаллагов Х.-Б. Н. Сравнительный анализ алгоритмов расхождения судов // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. - М.: Наука, 1978. - С. 93-101.
68. Цаллагов Х.- Б.Н. Аналитические методы определения безопасных курсов и скоростей судов // Теоретические вопросы построения АСУ крупнотоннажными транспортными судами. - М.: Наука, 1978. - С. 83-93.
69. Цаллагов Х.-Б. Н. Безопасное расхождение судов при централизованном автоматизированном управлении // Задачи автоматизации управления движением судов в районах интенсивного судоходства. - М.: Ин-т Проблем Управления, 1983. - С. 29-39.
70. Фрейдзон И. Р. Моделирование корабельных систем управления. – Л.: Судостроение, 1975. - 232 с.
71. Иванов В. А. К вопросу построения систем предупреждения столкновений судов в море // Известия ЛЭТИ. – 1975. - № 166. - С. 26-29.

72. Кудряшов В. Е. Математическая модель процесса расхождения нескольких управляемых объектов // Известия ЛЭТИ. - 1976. - № 206. - С. 15-19.
73. Кудряшов В. Е. Разработка и исследование алгоритма управления движением судов для предотвращения столкновений в процессе расхождения с несколькими опасными объектами. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16 /Лен. гос. мор. акад. – Л., 1976. –23 с.
74. Каплин С.И., Леонтьев В.В. О предупреждении столкновения судов // Известия ЛЭТИ. – 1977. - № 215. – С. 45-49.
75. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами // Судостроение. – 1978.- №5. – С. 35-40.
76. Lisovski I. A. Differential Game Model of Ship Control Process //Link. Sei. and Appl. Automat. Contr. – Helsingky. – 1978, - Vol.2.- P.1557-1603.
77. Сазонов А. Е. Автоматизация судовождения / Сазонов А. Е., Родионов А. А. - М.: Транспорт, 1977. 208 с.
78. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А. И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
79. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015.-312 с.
80. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
81. Бинай Кумар Синх. Системная модель процесса судовождения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2000. - №1. - С. 105 – 118.
82. Бинай Кумар Синх. Области взаимных обязанностей судов / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2000. - № 2. - С. 121 – 125.

83. Бинай Кумар Синх. Выбор предельно-допустимой дистанции кратчайшего сближения / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 38 – 42.
84. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения безопасности плавания / Мальцев А. С. // Судостроение и ремонт. - 1989. - №5. – С. 29-31.
85. 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.
86. Мальцев А.С. Выбор оптимального курса для расхождения судов при криволинейном движении / Мальцев А.С., Май Ба Линь // Судовождение. – №7. – 2004. – С. 47-57.
87. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.
88. Бурмака И.А. Учет инерционности судна при расчете момента времени завершения маневра расхождения / Бурмака И.А. // Судовождение. - № 5. - 2002. – С. 13 – 21.
89. Бурмака И.А. Применение численных методов для расчета времени начала уклонения судна при расхождении / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2003. - № 6. – С. 27-31.
90. Бурмака И.А. Расчет длительности поворота судна при расхождении / Бурмака И.А. // Автоматизация судовых технических средств. - 2002. - №7. - С. 3- 6.
91. Бурмака И.А. Расчет характеристик поворотливости судна по экспериментальным данным / Бурмака И.А. // Судовождение. - 2005. - № 9. - С. 7-13.
92. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.

93. 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.
94. Петриченко Е.А. Описание навигационных опасностей в задаче расхождения судов / Петриченко Е.А. // Судовождение. - 2002. - №5. – С. 89- 95.
95. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103-107.
96. Петриченко Е.А. Учет линейной навигационной опасности при расхождении судов / Петриченко Е.А. // Автоматизация судовых технических средств. – 2003. – №8. – С. 72-76.
97. Северин В.В. Постановка задачи расхождения судна с несколькими целями / Северин В.В. // Судовождение. – 2003. – № 6. – С. 130-135.
98. Северин В.В. Выбор маневра расхождения с двумя целями / Северин В.В. // Автоматизация судовых технических средств.- 2005. - № 9. – С. 91 – 95.
99. Сафин И. В. Условия существования безопасных маневров расхождения / Сафин И. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 158 – 163.
100. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения / Сафин И.В. // Судовождение. - №4. - 2002. – С. 95 – 100.
101. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / Сафин И.В. // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
102. Сафин И.В. Анализ результатов имитационного моделирования процесса расхождения судов / Сафин И.В. // Судовождение. - №6 - 2003. – С. 122-129.
103. 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.
104. Степаненко В. В. Эффективность оценки параметров ситуации опасного сближения судов / Степаненко В. В. // Судовождение. - 2000. - № 2. - С. 201 – 209.

105. Степаненко В. В. Формализация контроля текущей ситуации и принятия решений по управлению ею / Степаненко В. В. // Судовождение. - 2001. - № 3. - С. 177– 185.
106. Степаненко В.В. К вопросу отображения ситуации расхождения судов / Степаненко В.В. // Судовождение. - № 4. - 2002. – С. 101 – 106.
107. 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.
108. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/ Liu Yu-hong, Hu Shen-ping // Navig. China. 2005, №4, p. 40-45.
109. Kimura Masafumi. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Kimura Masafumi, Suzuki Saburo // J. Jap. Inst. Navig. 2005. 112, p. 43-48.
110. 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.
111. 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.
112. 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.
113. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С.134 – 138.

114. Liu Yu-hong. Zhongguo hanghai/. Liu Yu-hong //Navig. China. - 2004, № 4, p. 32-37.
115. Ma Li-xin. Dalian haishi daxue xuebao/ Ma Li-xin, Sun Wen-qiang //I. Dalian Marit. Univ. 2006. 32, № 3, p. 123-125.
116. 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.
117. 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.
118. 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.
119. 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.
120. Цымбал Н.Н.. Значение прогноза развития ситуации в задаче безопасного расхождения судов / Н.Н. Цымбал. // Судовождение. - 2001. –№ 3.- С. 193 – 197.
121. Lisowski J. Mathematical modeling of a safe ship optimal control process/ Lisowski J. // Polish Journal of Environmental Studies. – 2005. - Vol. 14. – P. 68-75.
122. 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.
123. Yang Shen-hua. Zhongguo hanghai / Yang Shen-hua, Li Li-па, Suo Yong-feng // Navig. China. 2007, № 3, p. 29-32.

124. Tsuji Keisuke. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Tsuji Keisuke, Ito Takayuki. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, p. 67-73.
125. 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.
126. 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.
127. 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.
128. 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.
129. Inaishi Masaaki. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Inaishi Masaaki, Kondo Hayato, Kondo Masaki, Kawaguchi Akira // J. Jap. Inst. Navig. 2005. 113, с 17-23.
130. 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.
131. 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.
132. Hung Iran Viet. Nihon kokai gakkai ronbunshu / Hung Iran Viet, Hagiwara Hideki, Tamaru Hitoi. // J. Jap. Inst. Navig. 2007. 117, с 35—42.
133. Zhao Yuan-jin. Dalian haishi daxue xuebao /Zhao Yuan-jin, Sun Wen-qiang // J. Dalian Marit. Univ. 2006. 32, № 2, p. 27— 30.

134. 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.
135. Takahashi Hiroko. Nihon коках gakkai ronbunshu/ Takahashi Hiroko, Inoue Kinzo, Sera Wataru. //J. Jap. Inst. Navig. 2008. 118, p. 23-29.
136. Бурмака А.И. Разработка стратегии расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / Бурмака А.И. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 20. – Одесса: «ИздатИнформ», 2012 – С.
137. 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.
138. Погосов С.Г., Москвин Г.И. Береговые системы управления движением судов. – М.: Судовождение и связь, 1976. – 54 с.
139. Taha M.Y., Hafez M.A. Vessel Traffic Services in Egypt. – Egypt, 2002.- 78 p.
140. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения без-опасности плавания// Судостроение и ремонт. – 1989. - №9. – с. 29 – 31.
141. Lamb W. G. P. Colcuiation of the geometry of ship collision zones // The Journal of Navigation. – 1989. – 42, № 2. – P. 298 - 305.
142. Das risiko in begegnungssituationen // Hansa. – 1988. – 125, № 19. - P. I2I9 - I222.
143. Goodwin E. M. A Statistical Study of Ship Domains // The Journal of Navigation. – 1975. - 28, № 3. - P. 328 – 341.
144. Алексишин А.В. Использование зоны безопасности судна для снижения аварийности // Судовождение. – 2005. - № 10. – С. 3 – 8.

145. Алексишин А.В. Учет динамики судна при формировании его безопасной зоны // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 3 – 8.
146. Алексишин В.Г., Алексишин А.В. Зависимость параметров судовой безопасной зоны от стохастических позиционных погрешностей // Судовождение. – 2006. - № 12. – С. 3 – 10.
147. Алексишин А.В. Плавание в стесненных водах с учетом судовой безопасной зоны // Судовождение. – 2007. - № 13. – С. 3 – 8.
148. Алексишин В.Г., Алексишин А.В. Формирование судовой безопасной зоны с учетом поворотливости судна // Судовождение. – 2007. - № 14. – С. 3- 8.
149. Май Ба Линь. Повышение точности процесса безопасного расхождения судов в стесненных условиях. Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.16/ ОНМА. – Одесса, 2004. – 21 с.
150. Якушев А.О. Выбор маневра расхождения судном в условиях щтормования/ Якушев А.О., Алексишин В.Г. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 19. – Одесса: «ИздатИнформ», 2010, – С. 208 - 211.
151. Якушев А.О. Выбор оптимальной формы судовой безопасной безопасной зоны / Якушев А.О. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 23. – Одесса: «ИздатИнформ», 2013, – С. 163 - 167.
152. Якушев А.О. Процедура определения параметров судовой безопасной области в системах предупреждения столкновений судов / Якушев А.О. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2013. № 4 . - С. 183 – 187.
153. Якушев А.О. Предупреждение столкновения судов в системе параметров прямоугольной области/ Якушев А.О. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. № 1 . – С 113 - 117.
154. Якушев А.О. Зависимость размеров судовой безопасной области от плотности распределения вероятностей позиционной погрешностей/ Якушев А.О. // Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 84 – 89.

155. Волков А.Н. Определение размеров безопасной судовой стохастической области / Волков А.Н., Якушев А.О. // Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. - 2014. №4 . – С 86 - 95.
156. Волков А.Н. Использование безопасной области судна сложной формы для обеспечения безаварийного плавания/ Волков А.Н., Якушев А.О. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 30 – 35.
157. Якушев А.О. Выбор формы безопасной области, обеспечивающей минимальное отклонение судна при расхождении / Якушев А.О., Пятаков Э.Н. // Автоматизация судовых технических средств. – 2015. – № 21. – С. 77 – 81.
158. Якушев А.О. Оценка эффективности судовой безопасной зоны/ Якушев А.О. // Эффективная и безопасная эксплуатация морских судов и сооружений: Материалы VI Всеукраинской научно-технической конференции, 2-4 октября 2013 г.- Севастополь: СевНТУ, 2013.- С. 227-230.
159. Волков А.Н. Определение размеров безопасной области судна заданной формы и использование ее в процессе судовождения / Волков А.Н., Якушев А.О. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 21-23 травня 2014 р. – Миколаїв : МУК, 2014. – С. 42–47.
160. Якушев А.О. Расчет вероятности нахождения судна в области заданной формы / Якушев А.О. // Судноплавство: перевезення, технічні засоби, безпека: Матеріали наук.-техн. конф., 19-20 листоп. 2013 – Одеса : ОНМА, 2013. – С. 106–108.
161. Якушев А.О. Выбор оптимальной формы безопасной области судна / Якушев А.О. // Морські перевезення та інформаційні технології в судноплаванні: Матеріали наук.-техн. конф., 18-19 листоп. 2014 – Одеса : ОНМА, 2014. – С. 58–62.
162. Якушев А.О. Определение размеров судовой безопасной области заданной формы/ Якушев А.О. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на

транспорті (MINTT-2014): Матеріали VI Міжнародної наук.-практ. конф., 27-29 травня. 2014 – Херсон : ХДМА, 2014. – С. 149–153.

163. Якушев А.О. Определение оптимальной формы судовой безопасной области / Якушев А.О. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2015): Матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., 26-28 травня. 2015 – Херсон: ХДМА, 2015. – С. 130–135.

164. Якушев А.О. Определение оптимальной формы безопасной области судна / Якушев А.О. // Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд: Матеріали Всеукраїнської наук.-тех. конф., 20-22 травня 2015 р. – Миколаїв : МУК, 2015. – С. 14–17.

165. A. Volkov. Appraisal of the Coordinability of the Vessels for Collision Avoidance Maneuvers by Course Alternation / A. Volkov, E.Pyatarov & A. Yakushev// Activites in Navigation.-Adam Weintrit/ - 2015, P. 195 – 200.

166. Волков А.Н. Использование безопасной области судна в процессе судовождения / Волков А.Н., Якушев А.О. // Вестник КамчатГТУ. – 2015.- № 31.- С. 7-11.

167. Астайкин Д.В. Идентификация законов распределения навигационных погрешностей смешанными законами двух типов/Астайкин Д.В., Алексейчук Б.М. // Автоматизация судовых технических средств. – 2014. – № 20. – С. 3 – 10.

168. Якушев А.О. Имитационное моделирование процедуры выбора оптимальной формы судовой безопасной области/ Якушев А.О. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 25. – Одесса: «ИздатИнформ», 2015, – С. 172 - 178.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг кода имитационной программы.

```
unit Unit_Gidr;

interface

uses

  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  ExtCtrls, StdCtrls;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Image1: TImage;
    Panel1: TPanel;
    Panel2: TPanel;
    Panel3: TPanel;
    Panel4: TPanel;
    Panel5: TPanel;
    ButtonTyp: TButton;
    ButtonReg: TButton;
    ButtonRnd: TButton;
    ButtonEll: TButton;
    ButtonRect: TButton;
    ButtonCom: TButton;
    ButtonRndEll: TButton;
    ButtonLen: TButton;
    ButtonBrd: TButton;
    ButtonSKO: TButton;
    ButtonGaus: TButton;
    ButtonSm1: TButton;
    ButtonSm2: TButton;
    ButtonOK: TButton;
    ButtonN: TButton;
```

```

ScrollBar1: TScrollBar;
PanelLv: TPanel;
PanelBv: TPanel;
PanelSKO: TPanel;
PanelZ: TPanel;
PanelSh: TPanel;
Timer1: TTimer;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure FormDestroy(Sender: TObject);
procedure Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
procedure ButtonTypClick(Sender: TObject);
procedure ButtonRegClick(Sender: TObject);
procedure ButtonRndClick(Sender: TObject);
procedure ButtonEllClick(Sender: TObject);
procedure ButtonRectClick(Sender: TObject);
procedure ButtonComClick(Sender: TObject);
procedure ButtonRndEllClick(Sender: TObject);
procedure ButtonLenClick(Sender: TObject);
procedure ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
  var ScrollPos: Integer);
procedure ButtonBrdClick(Sender: TObject);
procedure ButtonSKOClick(Sender: TObject);
procedure ButtonGausClick(Sender: TObject);
procedure ButtonSm1Click(Sender: TObject);
procedure ButtonSm2Click(Sender: TObject);
procedure ButtonOKClick(Sender: TObject);
procedure ButtonNClick(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);

```

```
private
```

```
{ Private declarations }
```

```

public
  { Public declarations }
end;

```

```

type

```

```

Pt = array[0..120] of TPoint;

```

```

APt = array[0..30] of TPoint;

```

```

Pt1 = array[1..4] of TPoint;

```

```

Pt2 = array[1..6] of TPoint;

```

```

Pt3 = array[1..10] of TPoint;

```

```

var

```

```

Form1 : TForm1;

```

```

PortsBmp, CopyBmp, ShowBmp : TBitmap;

```

```

Re, ReV : Pt;

```

```

Re1 : APt;

```

```

D, V1, V2, Kot, Vot, Dm, Dmb, Vd, Dk2, Dm0, t, aw, K1, K2, K2o, Ds, Xg, Yg, Xgs, Ygs : real;

```

```

K2b, Kotb, Votb, Kot2, Koty1, Koty2, Voty1, Voty2, Koty, Voty : real;

```

```

Xv1, Yv1, Xc1, Yc1, Br, K11, K21, ton, maxDm, Ddop, 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, Bro, Bron : real;

```

```

texn, tyn, tbn, tkn, texk, tyk, tbk, tkk, tauex, dtex, tauy, dty, taub, dtb, Scl : real;

```

```

Kk, Xc2, Yc2, Xc2o, Yc2o : real;

```

```

Xvm, Yvm, Xcm, Ycm, Delt1, Delt2, Delt3 : Integer;

```

```

Pel, Xv, Yv, Xc, Yc, bet, IndSP, {sig,} Xco, Yco, Xcb, Ycb, Xcon, Ycon, sigo : Integer;

```

```

{Bv, Lv, L1, L2,} IndScroll, IndPos {, IndTimer}, dt, IndMst, IndK2, IndT, IndVs, Mn : byte;

```

```

IndTab, IndC, IndKk, IndDang, IndStr, IndCir, Cirbeg, Indb, Nr, IndTimer : byte;

```

```

Xsto, Ysto, psi, psiex, Rb : Integer;

```

```

Ntr, Xf1, Yf1, Xf2, Yf2, Xf3, Yf3, Xf4, Yf4, Xf5, Yf5, Xf6, Yf6 : word;

```

```

Ntyp, Npos : byte;

```

```

IndTyp,Nreg,IndFig,IndScr,IndZak,IndOK,N : byte;
Lv,Bv,Lv1,Bv1,L1,L2,sigma,Lfn,Lfk,Bf,Rd,Ade,Bde,Adet,Bdet,R,alfv: word;
Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys : Integer;

```

```

Ldn,Bd,Ldk,Lpr,Rdt : real;
Pr,Pr1,Pr2,Prt,sig: real;
Xpos,Ypos,Xpos1,Ypos1,Kv,KU,Alfsum,DKysum : word;
Kys : array[1..6] of real;
Kym : real;

```

```

{Dm :real;}
{Xb,Yb,Xp,Yp,Xm,Ym,Xrn,Yrn,Xrk,Yrk,Xbg,Ybg,dX,dY,Xcur,Ycur : word;
Xo,Yo : Integer;
Nmap,IndClick,IndMove,IndSea : byte;
Xkn,Ykn,Xkk,Ykk,kp,Mst,dXm : real;
Xcopyn,Ycopyn,Xcopyk,Ycopyk,Npt,Xch,Ych : word;

```

```

Pnt : array[1..400] of TPoint;
Pntm : array[1..100] of TPoint;
PntL,PntL1 : array[1..1000] of TPoint;
PntS : array[1..10] of TPoint;}

```

implementation

```
{ $R *.DFM }
```

```
uses Unit_2D;
```

```

procedure BButtn(Bmp : TBitMap; Image : TImage; Xn,Yn,dX,dY : word;
                 R,G,B : byte);

```

```
var i: byte;
```

```

begin
ColorRect(Bmp,Image,Xn,Yn,Xn+dX+1,Yn+dY+1,RGB(10,15,20),0);
ColorRectBor(Bmp,Image,Xn,Yn,Xn+dX,Yn+dY,RGB(R,G,B),RGB(40,40,70),0);

for i:=1 to 5 do
begin
ColorLine(Bmp,Image,Xn+i,Yn+i,Xn+i,Yn+dY-i,
RGB(R+50-10*i,G+50-10*i,B+50-10*i),1,0);
ColorLine(Bmp,Image,Xn+i,Yn+i,Xn+dX-1-i,Yn+i,
RGB(R+50-10*i,G+50-10*i,B+50-10*i),1,0);

ColorLine(Bmp,Image,Xn+dX-1-i,Yn+i,Xn+dX-1-i,Yn+dY-i,
RGB(R-50+10*i,G-50+10*i,B-50+10*i),1,0);
ColorLine(Bmp,Image,Xn+i,Yn+dY-1-i,Xn+dX-1-i,Yn+dY-1-i,
RGB(R-50+10*i,G-50+10*i,B-50+10*i),1,0);
end;
end;

function ArcSin (x:real) :real;
var
Ast :real;

begin
if Abs(x)>=0.9999999 then
begin
if x>0 then Ast:=90
else Ast :=-90;
end
else
Ast :=ArcTan(x/(Sqrt(1-Sqr(x))))*57.3;
ArcSin :=Ast;
end;

```



```

function ArcCos(x:real) :real;
var
  Ac :real;

begin
  if x<>0 then
    begin
      Ac :=ArcTan((Sqrt(1-Sqr(x)))/x)*57.3;
      if x>0 then ArcCos :=Ac
      else ArcCos :=180-Ac;
    end
  else ArcCos:=90;
end;

```

```

function Pelg(x,y:real):real;
var C1,Aor,Aol:real;

begin
  if y<>0 then C1 :=ArcTan(x/y)*57.3
  else
    begin
      if x>0 then C1:=90
      else C1:=270;
    end;
  if y>=0 then Aor :=360 + C1
  else Aor :=180 + C1;
  if Aor >=360 then Aol :=Aor - 360
  else Aol :=Aor;
  Pelg :=Aol;
end;

```

```

function Cour(x : Integer) : {real} Integer;

begin

```

```

if x<0 then Cour:=360+x
else
  begin
    if x>=360 then Cour:=x-360
    else Cour:=x;
  end;
end;

```

```

function Distn(x,y:real):real;
var Ds :real;

begin
  Ds :=Sqrt(Sqr(x)+Sqr(y));
  Distn :=Ds;
end;

```

```

procedure KotVot(Kv,Kb: Integer; Vv,Vb : real; var Kot,Vot : real);
  label 1;
  var
    dVx,dVy,psi : real;

begin
  dVx:=Vv*sin(Kv/57.3)-Vb*sin(Kb/57.3);
  dVy:=Vv*cos(Kv/57.3)-Vb*cos(Kb/57.3);

  Vot:=Sqrt(Sqr(dVx)+Sqr(dVy));
  if Vot=0 then
    begin
      Kot:=0;
      goto 1;
    end;

```

```

psi:=ArcSin(dVx/Vot);
if dVy>0 then
  begin
    if dVx>0 then Kot:=psi
    else Kot:=360+psi;
  end
else
  begin
    Kot:=180-{}psi;
  end;
1 :end;

```

```

procedure Vsl(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndV,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
Xo,Yo,K : Integer; V : real; IndBmp : byte; var Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys: Integer);

```

```

var
i,s,sv : byte;
R,a : Integer;
X,Y : real;

```

```

L,Alf : array[0..120] of real;

```

```

begin
Xn:=Xo; Yn:=Yo-Round((Lv-L1-L2)/2);
Xk:=Xo; Yk:=Yo+Round((Lv-L1-L2)/2);

a:=Round(Bv/2);

for i:=0 to 30 do
  begin
    R:=a;
    Rel[i].x:=Round(Xk+R*cos((6*i)/57.3));
    Rel[i].y:=Round(Yk+R*sin((6*i)/57.3));
  end;

```

```

for i:=0 to 2*a do
  begin
    X:=i-a;
    Y:=(L1*Sqrt(Sqr(a)-Sqr(X)))/a;
    Re[i].x:=Round(Xn+X);
    Re[i].y:=Round(Yn-Y);
    s:=i;
  end;

for i:=0 to s do ReV[i]:=Re[i];
for i:=s+1 to s+31 do ReV[i]:=Re1[i-s-1];
for i:=s+32 to 120 do ReV[i]:=ReV[s+31];
sv:=s+31;

for i:=0 to sv do
  begin
    L[i]:=Distn(Xo-ReV[i].x,Yo-ReV[i].y);
    Alf[i]:=Pelg(ReV[i].x-Xo,Yo-ReV[i].y);
  end;

for i:=0 to sv do
  begin
    ReV[i].x:=Round(Xo+L[i]*sin((Alf[i]+K)/57.3));
    ReV[i].y:=Round(Yo-L[i]*cos((Alf[i]+K)/57.3));
  end;

for i:=sv+1 to 120 do ReV[i]:=ReV[sv];

L[1]:=Distn(Xo-Xn,Yo-Yn);
Alf[1]:=Pelg(Xn-Xo,Yo-Yn);
Xn:=Round(Xo+L[1]*sin((Alf[1]+K)/57.3));
Yn:=Round(Yo-L[1]*cos((Alf[1]+K)/57.3));

```

```

L[2]:=Distn(Xo-Xk,Yo-Yk);
Alf[2]:=Pelg(Xk-Xo,Yo-Yk);
Xk:=Round(Xo+L[2]*sin((Alf[2]+K)/57.3));
Yk:=Round(Yo-L[2]*cos((Alf[2]+K)/57.3));

Xs:=ReV[36].x; Ys:=ReV[36].y;

if IndBmp=0 then
begin
with Image.Canvas do
begin
if IndV=0 then
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(170,120,120));
Brush.Color:=TColor(RGB(250,220,220));
end
else
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(120,120,170));
Brush.Color:=TColor(RGB(200,220,230));
end;

Polygon(ReV);
end;
end;

if IndBmp=1 then
begin
with Bmp.Canvas do
begin
if IndV=0 then
begin
Pen.Color:=TColor(RGB(170,120,120));
Brush.Color:=TColor(RGB(250,220,220));

```

```

    end
else
    begin
        Pen.Color:=TColor(RGB(120,120,170));
        Brush.Color:=TColor(RGB(200,220,230));
        end;

        Polygon(ReV);
        end;
    end;

end;

procedure Ship(Bmp : TBitMap; Image : TImage; IndOk,Lv,Bv,L1,L2 : byte;
Xv,Yv,K1,Xc,Yc,K2 : Integer; V1,V2 : real);

var
    i,s,sv : byte;
    Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2{R,a} : Integer;
    X,Y : real;

    L,Alf : array[0..120] of real;

begin

    if IndOK=2 then
        begin
            with Image.Canvas do
                begin
                    Vsl(Bmp,Image,1,Lv,Bv,L1,L2,Xv,Yv,K1,V1,0,Xn1,Yn1,Xk1,Yk1,Xs1,Ys1);
                    Vsl(Bmp,Image,0,Lv,Bv,L1,L2,Xc,Yc,K2,V2,0,Xn2,Yn2,Xk2,Yk2,Xs2,Ys2);
                end;
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

Image.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;
ColorLine(Bmp,Image,Xv{Xs1},Yv{Ys1},Xv{Xs1}+Round(50*sin(K1/57.3)),
          Yv{Ys1}-Round(50*cos(K1/57.3)),RGB(160,160,200),1,0);

ColorLine(Bmp,Image,Xv,Yv,Xv+Round(2*V1*sin(K1/57.3)),
          Yv-Round(2*V1*cos(K1/57.3)),RGB(50,50,70),2,0);

ColorLine(Bmp,Image,Xc{Xs2},Yc{Ys2},Xc{Xs2}+Round(50*sin(K2/57.3)),
          Yc{Ys2}-Round(50*cos(K2/57.3)),RGB(200,160,160),1,0);

ColorLine(Bmp,Image,Xc,Yc,Xc+Round(2*V2*sin(K2/57.3)),
          Yc-Round(2*V2*cos(K2/57.3)),RGB(150,50,50),2,0);

ColorLine(Bmp,Image,Xc,Yc,Xv,Yv,RGB(150,150,150),1,0);
Image.Canvas.Pen.Width:=1;

end;

procedure DelaT(Ks1,Ks2,Vs1,Vs2,K1,w: real; sgm,Delt :Integer; var tau,dt : real);

var
dx,dy,Kot1,Kot2,Vot1,Vot2,dto,DKo,DKn,DK,asn,acs : real;

begin
dx:=0.016*(Vs2/w)*(cos(Ks1/57.3)-cos(Ks2/57.3));
dY:=0.016*(Vs2/w)*(sin(Ks2/57.3)-sin(Ks1/57.3));
DKo:=arcsin(Abs(sin((Ks2-Ks1)/57.3)));
asn:=sin((Ks2-Ks1)/57.3);
acs:=cos((Ks2-Ks1)/57.3);
if (asn>0) and (acs>0) then DKn:=DKo;
if (asn>0) and (acs<0) then DKn:=180-DKo;
if (asn<0) and (acs<0) then DKn:=180+DKo;
if (asn<0) and (acs>0) then DKn:=360-DKo;

```

DK:=DKn;

if sgm<0 then DK:=360-DKn;

tau:=DK/w;

KotVot(Round(Ks1),Round(K1),Vs2,Vs1,Kot1,Vot1);

KotVot(Round(Ks2),Round(K1),Vs2,Vs1,Kot2,Vot2);

if Delt<0 then

begin

dto:=3600*(dx*cos(Kot2/57.3)-dy*sin(Kot2/57.3)+Vs1*(tau/3600)*sin((Kot2-K1)/57.3))/
(Vot1*sin((Kot1-Kot2)/57.3));

dt:=Abs(dto);

end

else dt:=0;

end;

procedure DeltaCour(Ks1,Ks2 : real; var DelK : real; var sig : Integer);

var

DK,Sn1,Cs1,Sn2,Cs2 : real;

N1,N2 : byte;

begin

Sn1:=sin(Ks1/57.3); Cs1:=cos(Ks1/57.3);

Sn2:=sin(Ks2/57.3); Cs2:=cos(Ks2/57.3);

if Sn1>=0 then

begin

if Cs1>=0 then N1:=1

else N1:=2;

end

else


```

begin
if Cs1>=0 then N1:=4
else N1:=3;
end;

```

```

if Sn2>=0 then
begin
if Cs2>=0 then N2:=1
else N2:=2;
end
else
begin
if Cs2>=0 then N2:=4
else N2:=3;
end;

```

```

if N1=N2 then
begin
DK:=Ks2-Ks1;
if DK>0 then sig:=1
else sig:=-1;
DelK:=Abs(DK);
end;

```

```

if N1=1 then
begin
case N2 of
2: begin
sig:=1;
DelK:=Ks2-Ks1;
end;
3: begin
DK:=Ks2-Ks1;
if DK<180 then
begin

```

```

    sig:=1; DelK:=DK;
  end
else
  begin
    sig:=-1; DelK:=360-DK;
  end;
end;
4: begin
  sig:=-1; DelK:=Ks1+(360-Ks2);
  end;
end;
end;

if N1=2 then
  begin
    case N2 of
      1: begin
        sig:=-1; DelK:=Ks1-Ks2;
        end;
      3: begin
        sig:=1; DelK:=Ks2-Ks1;
        end;
      4: begin
        DK:=Ks2-Ks1;
        if DK<180 then
          begin
            sig:=1; DelK:=DK;
          end
        else
          begin
            sig:=-1; DelK:=360-DK;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;
end;

```

```

if N1=3 then
  begin
    case N2 of
      1: begin
          DK:=Ks1-Ks2;
          if DK<180 then
            begin
              sig:=-1; DelK:=DK;
            end
          else
            begin
              sig:=1; DelK:=360-DK;
            end;
          end;
        2: begin
            sig:=-1; DelK:=Ks1-Ks2;
          end;
        4: begin
            sig:=1; DelK:=Ks2-Ks1;
          end;
        end;
      end;

  if N1=4 then
    begin
      case N2 of
        1: begin
            sig:=1; DelK:=Ks2+(360-Ks1);
          end;
        2: begin
            DK:=Ks1-Ks2;
            if DK<180 then
              begin
                sig:=-1; DelK:=DK;
              end;
            end;
          end;
      end;
    end;
  end;

```

```

    end
  else
    begin
      sig:=1; DelK:=360-DK;
    end;
  end;
3: begin
  sig:=-1; DelK:=Ks1-Ks2;
  end;
end;
end;

end;

procedure DeltaTau(Ks1,Ks2,w: real; var tau : real);
var
  DelK : real;
  sig : Integer;

begin
  DeltaCour(Ks1,Ks2,DelK,sig);
  tau:=DelK/w;
end;

procedure DeltaKb(Ks1,Ks2 : real; var sig : Integer);

var
  DK,Sn1,Cs1,Sn2,Cs2 : real;
  N1,N2 : byte;

begin
  Sn1:=sin(Ks1/57.3); Cs1:=cos(Ks1/57.3);
  Sn2:=sin(Ks2/57.3); Cs2:=cos(Ks2/57.3);

```

```

if Sn1>=0 then
  begin
    if Cs1>=0 then N1:=1
    else N1:=2;
  end
else
  begin
    if Cs1>=0 then N1:=4
    else N1:=3;
  end;

```

```

if Sn2>=0 then
  begin
    if Cs2>=0 then N2:=1
    else N2:=2;
  end
else
  begin
    if Cs2>=0 then N2:=4
    else N2:=3;
  end;

```

```

if N1=N2 then
  begin
    DK:=Ks2-Ks1;
    if DK>0 then sig:=-1
    else sig:=1;
  end;

```

```

if N1=1 then
  begin
    case N2 of
      2: sig:=-1;
      3: begin
          DK:=Ks2-Ks1;

```

```

    if DK<180 then sig:=-1
    else sig:=1;
    end;
4: sig:=1;
    end;
end;

```

```

if N1=2 then
    begin
    case N2 of
    1: sig:=1;
    3: sig:=-1;
    4: begin
        DK:=Ks2-Ks1;
        if DK<180 then sig:=-1
        else sig:=1;
        end;
        end;
    end;
end;

```

```

if N1=3 then
    begin
    case N2 of
    1: begin
        DK:=Ks2+(360-Ks1);
        if DK<180 then sig:=-1
        else sig:=1;
        end;
    2: sig:=1;
    4: sig:=-1;
        end;
    end;
end;

```

```

if N1=4 then
    begin

```

```

case N2 of
1: sig:=-1;
2: begin
    DK:=Ks2+(360-Ks1);
    if DK<180 then sig:=-1
    else sig:=1;
    end;
3: sig:=1;
    end;
end;

end;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);    {CREATE}
var
i,j,R,y,a,b,a1,b1 : word;
{sig,}sigx,sigy,{Pr,Prt,}gam : real;
StC : string[3];
StB : string[7];
Grs : Pt1;
Srnd,Sell,Srec,Sell1,Srec1 :real;

{V1,V2,Ko,Vo : real;
K1,K2 : Integer;

begin
PortsBmp := TBitmap.Create;
PortsBmp.Width:=640;
PortsBmp.Height:=530;

{PortsBmp.LoadFromFile('3201.BMP');}

CopyBmp := TBitmap.Create;
CopyBmp.Width:=640;
CopyBmp.Height:=530;

```

ShowBmp := TBitmap.Create;

showBmp.Width:=640;

showBmp.Height:=530;

Form1.Top:=0;

Form1.Left:=0;

Ntyp:=3;

IndTyp:=2; Nreg:=0; Lv:=250; Bv:=40; sigma:=100; IndFig:=1; IndZak:=1;

IndOK:=0; N:=1; Npos:=0; KU:=50; Nr:=0; IndTimer:=0; DKysum:=0;

{sigx:=20; sigy:=25;}

sig:=2*pi*sigma*sigma;

gam:=0.7;

Lpr:=200; Lfn:=10*Lv; Lfk:=3*Lv; Bf:=5*Lv;

Ldn:=0.7*Lv+0.5*Bv+Lpr+Lfn;

Ldk:=0.3*Lv+0.5*Bv+Lpr+Lfk;

Bd:=2*(Bv+Lpr+Bf);

{K1:=290; K2:=270; V1:=25; V2:=15;

KotVot(K1,K2,V1,V2,Ko,Vo);

Dm:=5*sin((Ko-45)/57.3);

PanelZ.Caption:=' ';

(*for Ntyp:=1 to 3 do

begin

case Ntyp of

1: begin


```

R:=Round(2.5*sigx);

repeat
begin
R:=R+1;
Pr:=0;
for i:=0 to R do
begin
y:=Round(sqrt(sqr(R)-sqr(i)));
for j:=0 to y do
begin
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigx)+0.5*sqr(j/sigy)));
end;
end;
Prt:=4*Pr
end;
until Prt>0.995;
Prt:=Prt;
end;
2: begin
a:=Round(2.5*sigx);

repeat
begin
a:=a+1;
Pr:=0;
for i:=0 to a do
begin
y:=Round(gam*sqrt(sqr(a)-sqr(i)));
for j:=0 to y do
begin
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigx)+0.5*sqr(j/sigy)));
end;
end;
Prt:=4*Pr;

```

```

end;
until Prt>0.995;
b:=Round(a*gam);
end;
3: begin
a1:=Round(2.5*sigx);

repeat
begin
a1:=a1+1;
Pr:=0;
for i:=0 to a do
begin
y:=Round(gam*a1);
for j:=0 to y do
begin
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigx)+0.5*sqr(j/sigy)));
end;
end;
Prt:=4*Pr;
end;
until Prt>0.995;
b1:=Round(a1*gam);
end;

end;
end;*)

ColorRect(PortsBmp,Image1,0,0,608,520,RGB(130,170,185),0);
ColorRect(PortsBmp,Image1,90,0,608,520,RGB(255,255,255),0);

(*for i:=0 to 78 do
ColorLine(PortsBmp,Image1,121,20+6*i,587,20+6*i,RGB(210,210,210),1,0);
for i:=0 to 77 do
ColorLine(PortsBmp,Image1,120+6*(i+1),20,120+6*(i+1),487,RGB(210,210,210),1,0);

```

```

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
Font.Size:=10;
Font.Style:=[];
Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));

for i:=0 to 12 do
begin
Str(0+40*i,StC);
TextOut(110+39*i,495,StC)
end;

for i:=0 to 12 do
begin
Str(0+40*i,StC);
TextOut(95,480-39*i,StC);
end;

Pen.Mode:=pmMask;

Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,95,95));
Ellipse(198-R,100-R,198+R,100+R);
Ellipse(500-R,240-R,500+R,240+R);
Srnd:=pi*sqr(R);

Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(195,155,125));
Ellipse(354-a,100-b,354+a,100+b);

```

```
Ellipse(500-a,240-b,500+a,240+b);
```

```
Sell:=pi*a*b;
```

```
Grs[1].x:=510-a1; Grs[1].y:=100-b1;
```

```
Grs[2].x:=510+a1; Grs[2].y:=100-b1;
```

```
Grs[3].x:=510+a1; Grs[3].y:=100+b1;
```

```
Grs[4].x:=510-a1; Grs[4].y:=100+b1;
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,255));
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));
```

```
Polygon(Grs);
```

```
Grs[1].x:=500-a1; Grs[1].y:=240-b1;
```

```
Grs[2].x:=500+a1; Grs[2].y:=240-b1;
```

```
Grs[3].x:=500+a1; Grs[3].y:=240+b1;
```

```
Grs[4].x:=500-a1; Grs[4].y:=240+b1;
```

```
Polygon(Grs);
```

```
Srec:=4*a1*b1;
```

```
Pen.Mode:=pmCopy;
```

```
a:=Round(2.5*sigx);
```

```
repeat
```

```
begin
```

```
a:=a+1;
```

```
Pr:=0;
```

```
for i:=0 to 2*a do
```

```
begin
```

```
y:=Round(gam*sqrt(sqrt(a)-sqrt(i-a)));
```

```
for j:=0 to y do
```

```
begin
```

```
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqrt((i-a/2)/sigx)+0.5*sqrt(j/sigy)));
```

```
end;
```

```

    end;
    Prt:=2*Pr;
  end;
  until Prt>0.995;
  b:=Round(a*gam);

  a1:=Round(2.5*sigx);

  repeat
  begin
    a1:=a1+1;
    Pr:=0;
    for i:=0 to 2*a do
      begin
        y:=Round(gam*a1);
        for j:=0 to y do
          begin
            Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i-a1/2)/sigx)+0.5*sqr(j/sigy)));
          end;
        end;
      end;
    Prt:=2*Pr;
  end;
  until Prt>0.995;
  b1:=Round(a1*gam);

```

```

Pen.Mode:=pmMask;

```

```

Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,95,95));
Ellipse(276-35-R,240-R,276-35+R,240+R);

```

```

Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(195,155,125));
Ellipse(276-35-a,400-b,276-35+a,400+b);

```

```
Ellipse(276-35-a,240-b,276-35+a,240+b);
Sell1:=pi*a*b;
```

```
Grs[1].x:=432+45-a1; Grs[1].y:=400-b1;
Grs[2].x:=432+45+a1; Grs[2].y:=400-b1;
Grs[3].x:=432+45+a1; Grs[3].y:=400+b1;
Grs[4].x:=432+45-a1; Grs[4].y:=400+b1;
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,255));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));
Polygon(Grs);
```

```
Grs[1].x:=276-35-a1; Grs[1].y:=240-b1;
Grs[2].x:=276-35+a1; Grs[2].y:=240-b1;
Grs[3].x:=276-35+a1; Grs[3].y:=240+b1;
Grs[4].x:=276-35-a1; Grs[4].y:=240+b1;
Polygon(Grs);
Srec1:=4*a1*b1;
Pen.Mode:=pmCopy;
```

```
end; *)
```

```
{StB:=FloatToStr(Srnd);
Panel1.Caption:='Srd = '+StB;
StB:=FloatToStr(Sell);
Panel2.Caption:='Sell = '+StB;
StB:=FloatToStr(Srec);
Panel3.Caption:='Srec = '+StB;
StB:=FloatToStr(Sell1);
Panel4.Caption:='Sell1 = '+StB;
StB:=FloatToStr(Srec1);
Panel5.Caption:='Srec1 = '+StB;}
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.FormDestroy(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```
PortsBmp.Free;
```

```
CopyBmp.Free;
```

```
ShowBmp.Free;
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.Image1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
```

```
Y: Integer);
```

```
var Str1 : string[4];
```

```
begin
```

```
with Image1.Canvas do
```

```
begin
```

```
ColorRect(PortsBmp,Image1,7,7,35,25,
```

```
RGB(230,240,250),0);
```

```
Str(X,Str1);
```

```
TextOut(10,10,Str1);
```

```
ColorRect(PortsBmp,Image1,40,7,68,25,
```

```
RGB(230,240,250),0);
```

```
Str(Y,Str1);
```

```
TextOut(43,10,Str1);
```

```
{Xcn:=X; Ycn:=Y;}
```

```
end;
```

```
end;
```

```
procedure TForm1.ButtonTypClick(Sender: TObject);
```

```
begin
```

```

if IndTyp=1 then
begin
IndTyp:=2;
ButtonType.Caption:='ÐÅÆÈÌ 2';
ButtonOK.Enabled:=True;
ButtonReg.Caption:='Ðó÷íé';
end
else
begin
IndTyp:=1;
ButtonType.Caption:='ÐÅÆÈÌ 1';
ButtonOK.Enabled:=False;
ButtonReg.Caption:='ÎÁËÀÑÒÛ';
ButtonReg.Enabled:=True;
end;
end;

procedure TForm1.ButtonRegClick(Sender: TObject);
begin
ButtonType.Enabled:=False;
if IndTyp=1 then
begin
if Nreg<3 then Nreg:=Nreg+1
else Nreg:=1;

IndFig:=1;
PanelSh.Caption:='Êðóã';
ButtonOK.Enabled:=True;

case Nreg of
1: begin
ButtonType.Caption:='Ãðððì.';
ButtonLen.Enabled:=True;
ButtonBrd.Enabled:=True;
PanelLv.Caption:='Lv= 100';

```



```

    PanelBv.Caption:='Bv= 20';
    ButtonSKO.Enabled:=False;;
    PanelSKO.Caption:='';
    end;
2: begin
    ButtonReg.Caption:='Ñòîðàñò.';
    ButtonSKO.Enabled:=True;
    ButtonLen.Enabled:=False;
    ButtonBrd.Enabled:=False;
    PanelSKO.Caption:='cig= 100';
    PanelLv.Caption:='';
    PanelBv.Caption:='';
    PanelZ.Caption:='Ãàóññ';
    end;
3: begin
    ButtonReg.Caption:='Áâçîàñ.';
    ButtonLen.Enabled:=True;
    ButtonBrd.Enabled:=True;
    ButtonSKO.Enabled:=True;
    PanelLv.Caption:='Lv= 100';
    PanelBv.Caption:='Bv= 20';
    PanelSKO.Caption:='cig= 100';
    end;
end;
ButtonRnd.Enabled:=True;
ButtonEll.Enabled:=True;
ButtonRect.Enabled:=True;
ButtonCom.Enabled:=True;
ButtonRndEll.Enabled:=True;
end
else
begin
if Nreg=0 then
begin
    ButtonReg.Caption:='Àâðîàò';

```

```

{ButtonLen.Enabled:=True;
ButtonBrd.Enabled:=True;
ButtonSKO.Enabled:=True;
PanelZ.Caption:='Ãàóññ';}
Nreg:=1;
end
else
begin
Nreg:=0;
ButtonReg.Caption:='Đó÷îê';
end;
end;

end;

procedure TForm1.ButtonRndClick(Sender: TObject);
var
i,j,y : word;
Rst: Integer;
x1,y1,y2,Pr : real;
begin
PanelSh.Caption:='Êđóã';
IndFig:=1;

if IndTyp=1 then
begin
ButtonReg.Enabled:=False;
ColorRect(PortsBmp,Image1,370,20,590,170,RGB(235,255,255),0);
with Image1.Canvas do
begin
Brush.Color:=TColor(RGB(255,185,185));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,95,95));
Ellipse(480-65,95-65,480+65,95+65);

```

```

ColorLine(PortsBmp,Image1,400,95,560,95,RGB(110,110,110),1,0);
ColorLine(PortsBmp,Image1,480,25,480,165,RGB(110,110,110),1,0);
end;
end
else
begin
ButtonLen.Enabled:=True;

Rdt:=0.7*Lv+0.5*Bv+Lpr+Lfn;

Rst:=Round(2.5*sigma);

repeat
begin
Rst:=Rst+1;
Pr:=0;
for i:=0 to Rst do
begin
y:=Round(sqrt(sqr(Rst)-sqr(i)));
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
{if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;}
end;}

```

```

        end;
    end;
    Prt:=4*Pr;
    end;
until Prt>0.995;
Rb:=Round((Rdt+Rst)*0.0243);
Image1.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
CopyBmp.Canvas,Rect(120,10,590,490));
with Image1.Canvas do
begin
    Pen.Mode:=pmMask;
    Brush.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
    Pen.Color:=TColor(RGB(155,95,95));
    Ellipse(354-Rb,255-Rb,354+Rb,255+Rb);
    Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
    Pen.Mode:=pmCopy;
    end;
if Nreg=0 then
begin
    ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
    Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));
    ButtonLen.Enabled:=True;
    end
else
begin
    ButtonSKO.Visible:=True;
    ButtonSKO.Enabled:=True;
    ButtonSKO.Caption:='Timer';
    end;
end;
end;

procedure TForm1.ButtonEllClick(Sender: TObject);
var
    Ast,Bst,i,j,y,Asum,Bsum : Integer;

```

```

gam : real;

begin
PanelSh.Caption:='Ýëëëĩñ';
IndFig:=2;
if IndTyp=1 then
begin
ButtonReg.Enabled:=False;
ColorRect(PortsBmp,Image1,370,20,590,170,RGB(235,255,255),0);
with Image1.Canvas do
begin
Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,155,45));
Ellipse(480-90,95-65,480+90,95+65);
ColorLine(PortsBmp,Image1,380,95,580,95,RGB(110,110,110),1,0);
ColorLine(PortsBmp,Image1,480,25,480,165,RGB(110,110,110),1,0);
end;
end
else
begin

Adet:=Round(0.5*(Ldn+Ldk)); Bdet:=Round(0.5*Bd);

Ast:=Round(2.5*sigma);
gam:=Bd/(Ldn+Ldk);

repeat
begin
Ast:=Ast+5;
Pr:=0; Pr1:=0;
for i:=0 to Ast do
begin
y:=Round(gam*sqrt(sqrt(Ast)-sqrt(i)));
for j:=0 to y do
begin

```

```

if IndZak=1 then
begin
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i-Ast/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i+Ast/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
end;
  {if IndZak=2 then
  begin
    x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
    y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i-Ast/2)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
    Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
    y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf1));
    Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
  end;
  if IndZak=3 then
  begin
    x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
    y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i-Ast/2)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
    Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
    y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf2));
    Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
  end;
  end;
end;
Prt:=2*(Pr+Pr1);
end;
until Prt>0.995;
Bst:=Round(Ast*gam);
Asum:=Adet+Ast; Bsum:=Bdet+Bst;

Ade:=Round(0.0243*Asum); Bde:=Round(0.0243*Bsum); {Ade:=Round(0.0243*Asum);}
Image1.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
CopyBmp.Canvas,Rect(120,10,590,490));
with Image1.Canvas do
begin
  Pen.Mode:=pmMask;

```

```

Brush.Color:=TColor(RGB(235,245,155));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,155,45));
Ellipse(354+Round(0.5*Ade)-Ade,255-Bde,354+Round(0.5*Ade)+Ade,255+Bde);
Pen.Mode:=pmCopy;
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
if Nreg=0 then
begin
ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));
ButtonLen.Enabled:=True;
end
else
begin
ButtonSKO.Visible:=True;
ButtonSKO.Enabled:=True;
ButtonSKO.Caption:='Timer';
end;
{ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));
ButtonLen.Enabled:=True;}
end;
end;

procedure TForm1.ButtonRectClick(Sender: TObject);
var
a1,i,j,y,b1 : Integer;
gam,Asum,Bsum : real;

begin
PanelSh.Caption:='İöÿîóâ';
IndFig:=3;

if IndTyp=1 then
begin

```

```

ButtonReg.Enabled:=False;
ColorRect(PortsBmp,Image1,370,20,590,170,RGB(235,255,255),0);
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,390,30,570,160,RGB(155,255,255),
              RGB(105,155,155),0);
ColorLine(PortsBmp,Image1,380,95,580,95,RGB(110,110,110),1,0);
ColorLine(PortsBmp,Image1,480,25,480,165,RGB(110,110,110),1,0);
end
else
begin
a1:=Round(2.5*sigma);
gam:=Bd/(Ldn+Ldk);
repeat
begin
a1:=a1+5;
Pr:=0; Pr1:=0;
for i:=0 to 2*a1 do
begin
y:=Round(gam*a1);
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i-a1/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
{if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i-a1/2)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i-a1/2)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;}
end;
end;
end;

```



```

    end;
    Prt:=2*Pr{(Pr+Pr1)};
    end;
until Prt>0.995;
b1:=Round(a1*gam);

Asum:=a1+Ldn+Ldk; Bsum:=b1+Bd;
Image1.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
CopyBmp.Canvas,Rect(120,10,590,490));

Image1.Canvas.Pen.Mode:=pmMask;
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Round(0.0243*(Ldk+0.3*a1)),
255-Round(0.0243*0.5*Bsum),354+Round(0.0243*(Ldn+0.7*a1)),
255+Round(0.0243*0.5*Bsum),RGB(155,255,255),RGB(105,155,155),0);
Xf1:=354-Round(0.0243*(Ldk+0.3*a1)); Yf1:=255-Round(0.0243*0.5*Bsum);
Xf2:=354+Round(0.0243*(Ldn+0.7*a1)); Yf2:=255-Round(0.0243*0.5*Bsum);
Xf3:=354+Round(0.0243*(Ldn+0.7*a1)); Yf3:=255+Round(0.0243*0.5*Bsum);
Xf4:=Xf1; Yf4:=Yf3;

    {Ade:=Round(0.0653*a1); Bde:=Round(0.5*0.0653*b1);
    Grs[1].x:=354-Round(0.23*Ade); Grs[1].y:=255-Bde;
    Grs[2].x:=354+Round(0.77*Ade); Grs[2].y:=255-Bde;
    Grs[3].x:=354+Round(0.77*Ade); Grs[3].y:=255+Bde;
    Grs[4].x:=354-Round(0.23*Ade); Grs[4].y:=255+Bde;

    Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,205));
    Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));
    Polygon(Grs);}
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
Image1.Canvas.Pen.Mode:=pmCopy;
if Nreg=0 then
    begin
        ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
        Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));
        ButtonLen.Enabled:=True;
    end;
end;

```

```

    end
else
    begin
        ButtonSKO.Visible:=True;
        ButtonSKO.Enabled:=True;
        ButtonSKO.Caption:='Timer';
    end;

    {ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
    Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));
    ButtonLen.Enabled:=True;}
end;
end;

procedure TForm1.ButtonComClick(Sender: TObject);
var
    Grs : Pt2;
    s,i,j,y,Sde : word;
    alf1,alf2,As1,As2,x1,x2,y1,y2 : real;

    Grs1 : Pt2;
    Grs10 : Pt3;

begin
    PanelSh.Caption:='ÊÏËÄ';
    IndFig:=4;

    if IndTyp=1 then
        begin
            ButtonReg.Enabled:=False;
            ColorRect(PortsBmp,Image1,370,20,590,170,RGB(235,255,255),0);
            Grs[1].x:=390; Grs[1].y:=95;
            Grs[2].x:=430; Grs[2].y:=55;

```

```
Grs[3].x:=530; Grs[3].y:=30;
Grs[4].x:=570; Grs[4].y:=95;
Grs[5].x:=530; Grs[5].y:=160;
Grs[6].x:=430; Grs[6].y:=135;
```

```
with Image1.Canvas do
```

```
begin
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,255));
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));
```

```
Polygon(Grs);
```

```
end;
```

```
ColorLine(PortsBmp,Image1,380,95,580,95,RGB(110,110,110),1,0);
```

```
ColorLine(PortsBmp,Image1,430,25,430,165,RGB(110,110,110),1,0);
```

```
ColorLine(PortsBmp,Image1,530,25,530,165,RGB(110,110,110),1,0);
```

```
end
```

```
else
```

```
begin
```

```
s:=Round(2.5*sigma);
```

```
repeat
```

```
begin
```

```
s:=s+5;
```

```
Pr:=0; Pr1:=0; Pr2:=0;
```

```
for i:=0 to Round(0.5*(s+Bd)) do
```

```
begin
```

```
y:=Round(s*i/(0.5*(s+Bd)));
```

```
for j:=0 to y do
```

```
begin
```

```
if IndZak=1 then
```

```
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j-s-Ldk)/sigma)));
```

```
if IndZak=2 then
```

```
begin
```

```
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
```

```
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j-s-Ldk)/2+alf1));
```

```

Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j-s-Ldk)/2+alf2));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
end;
end;

for i:=0 to Round(0.5*s) do
begin
y:=Round(Ldn+Ldk-(Ldn+Ldk)*i/(0.5*s));
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j-Ldk)/sigma)));
if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j-Ldk)/2+alf1));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j-Ldk)/2+alf2));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
end;
end;
end;

for i:=0 to Round(0.5*Bd) do
begin

```

```

y:=Round(s*i/(0.5*Bd));
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
Pr2:=Pr2+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j+Ldk)/sigma)));
if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j+Ldk)/2+alf1));
Pr2:=Pr2+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j+Ldk)/2+alf2));
Pr2:=Pr2+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
end;
end;
Prt:=2*(Pr+Pr1+Pr2);
end;
until Prt>0.995;

Sde:=Round(0.0243*s);

Grs1[1].x:=354+Round(0.0243*Ldn+Sde); Grs1[1].y:=255;
Grs1[2].x:=354+Round(0.0243*Ldn); Grs1[2].y:=255-Round(0.5*0.0243*Bd);
Grs1[3].x:=354-Round(0.0243*Ldk); Grs1[3].y:=255-Round(0.5*(0.0243*Bd+Sde));
Grs1[4].x:=354-Round(0.0243*Ldk+Sde); Grs1[4].y:=255;
Grs1[5].x:=354-Round(0.0243*Ldk); Grs1[5].y:=255+Round(0.5*(0.0243*Bd+Sde));
Grs1[6].x:=354+Round(0.0243*Ldn); Grs1[6].y:=255+Round(0.5*0.0243*Bd);

Xf1:=Grs1[1].x; Yf1:=Grs1[1].y;
Xf2:=Grs1[2].x; Yf2:=Grs1[2].y;
Xf3:=Grs1[3].x; Yf3:=Grs1[3].y;

```

```

Xf4:=Grs1[4].x; Yf4:=Grs1[4].y;
Xf5:=Grs1[5].x; Yf5:=Grs1[5].y;
Xf6:=Grs1[6].x; Yf6:=Grs1[6].y;

```

```

Image1.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
CopyBmp.Canvas,Rect(120,10,590,490));

```

```

with Image1.Canvas do

```

```

begin

```

```

Pen.Mode:=pmMask;

```

```

Brush.Color:=TColor(RGB(155,225,225));

```

```

Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));

```

```

Polygon(Grs1);

```

```

Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);

```

```

Pen.Mode:=pmCopy;

```

```

end;

```

```

if Nreg=0 then

```

```

begin

```

```

ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),

```

```

Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));

```

```

ButtonLen.Enabled:=True;

```

```

end

```

```

else

```

```

begin

```

```

ButtonSKO.Visible:=True;

```

```

ButtonSKO.Enabled:=True;

```

```

ButtonSKO.Caption:='Timer';

```

```

end;

```

```

{if Nreg=0 then

```

```

begin

```

```

ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),

```

```

Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));

```

```

ButtonLen.Enabled:=True;

```

```

    end
else
    begin
        ColorRect(PortsBmp,Image1,370,20,590,170,RGB(255,255,155),0);
    end;}
end;
end;

procedure TForm1.ButtonRndEllClick(Sender: TObject);
var
    Ast,i,j,y,Bst : Integer;
    gam,Asum,Bsum : real;
    StC : string[3];

begin
    IndFig:=5;
    PanelSh.Caption:='İïöóêðýëë';

    if IndTyp=1 then
        begin
            ButtonReg.Enabled:=False;
            ColorRect(PortsBmp,Image1,370,20,590,170,RGB(235,255,255),0);
            with Image1.Canvas do
                begin
                    Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,155));
                    Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,105));
                    Ellipse(480-90,95-35,480+90,95+35);
                    ColorRectBor(PortsBmp,Image1,390,30,480,160,RGB(235,255,255),
                                RGB(235,255,255),0);
                    Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,155));
                    Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,105));
                    Ellipse(480-35,95-35,480+35,95+35);
                end;
            ColorLine(PortsBmp,Image1,380,95,580,95,RGB(110,110,110),1,0);
            ColorLine(PortsBmp,Image1,480,25,480,165,RGB(110,110,110),1,0);

```

```

end
else
begin
Adet:=Round(Ldn); Bdet:=Round(Ldk);

Ast:=Round(2.5*sigma);
gam:=Ldk/(Ldn+Ldk);

repeat
begin
Ast:=Ast+5;
Pr:=0; Pr1:=0;
for i:=0 to Ast do
begin
y:=Round(gam*sqrt(sqr(Ast)-sqr(i)));
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
begin
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
end;
{if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;}
end;
end;
end;

```



```

Bst:=Round(Ast*gam);
for i:=0 to Bst do
begin
y:=Round(sqrt(sqr(Bst)-sqr(i)));
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
begin
Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
end;
{if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;}}
end;
end;
Prt:=2*(Pr+Pr1);
end;
until Prt>0.995;

Asum:=Adet+Ast; Bsum:=Bdet+Bst;

Image1.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
CopyBmp.Canvas,Rect(120,10,590,490));
with Image1.Canvas do
begin

```

```

Pen.Mode:=pmCopy;
ColorRect(PortsBmp,Image1,59,0,608,520,RGB(250,255,255),0);

Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,105));
Ade:=Round(0.0243*Asum); Bde:=Round(0.0243*Bsum);
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Ade,255-Bde,354,255+Bde,RGB(250,255,255),
              RGB(250,255,255),0);
Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,125,105));
Ellipse(354-Bde,255-Bde,354+Bde,255+Bde);

{Ade:=Round(0.0653*Ast); Bde:=Round(0.0653*Bst);

Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(75,125,75));

Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Ade,255-Bde,354,255+Bde,RGB(155,255,155),
              RGB(155,255,155),0);
Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(75,125,75));
Ellipse(354-Bde,255-Bde,354+Bde,255+Bde);}

Pen.Mode:=pmMask;

for i:=0 to 52 do
ColorLine(PortsBmp,Image1,121,20+9*i,587,20+9*i,RGB(210,210,210),1,0);
for i:=0 to 52 do
ColorLine(PortsBmp,Image1,120+9*(i{+1}),20,120+9*(i{+1}),487,RGB(210,210,210),1,0);

Brush.Color:=TColor(RGB(250,255,255));
for i:=0 to 10 do

```

```

begin
  Str(Abs(50-10*i),StC);
  TextOut(125+45*i,495,StC)
end;

for i:=0 to 10 do
  begin
    Str(Abs(50-10*i),StC);
    TextOut(90,475-45*i,StC);
  end;

  Pen.Color:=TColor(RGB(175,175,175));
  Ellipse(354-225,255-225,354+225,255+225);
  ColorLine(PortsBmp,Image1,120,255,588,255,RGB(190,20,20),1,0);
  ColorLine(PortsBmp,Image1,354,20,354,490,RGB(190,20,20),1,0);
  Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
  Pen.Mode:=pmCopy;
  {ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
  Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));
  ButtonLen.Enabled:=True;}

end;

if Nreg=0 then
  begin
    ShowBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
    Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));
    ButtonLen.Enabled:=True;
  end
else
  begin
    ButtonSKO.Visible:=True;
    ButtonSKO.Enabled:=True;
    ButtonSKO.Caption:='Timer';
  end;
end;

```

```

end;
end;

procedure TForm1.ScrollBar1Scroll(Sender: TObject; ScrollCode: TScrollCode;
  var ScrollPos: Integer);
var
  StC : string[3];

begin
  if IndTyp=1 then
    begin
      if IndScr=1 then
        begin
          Lv:=ScrollBar1.Position;
          Str(Lv,StC);
          PanelLv.Caption:='Lv =' + StC;
        end;
      if IndScr=2 then
        begin
          Bv:=ScrollBar1.Position;
          Str(Bv,StC);
          PanelBv.Caption:='Bv =' + StC;
        end;
      if IndScr<3 then
        begin
          ColorRect(PortsBmp,Image1,100,20,600,120,RGB(235,255,255),0);
          Lv1:=Lv; Bv1:=Round(1.7*Bv); L1:=Round(0.3*Lv); L2:=Round(0.1*Lv);
          Vsl(PortsBmp,Image1,0,Lv1,Bv1,L1,L2,350,70,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
        end;
      if IndScr=3 then
        begin
          sigma:=ScrollBar1.Position;
          Str(sigma,StC);

```

```

    PanelSKO.Caption:='sig '+StC;
end;
end
else
begin
    KU:=ScrollBar1.Position;
    Str(Abs(KU-50),stC);
    Panel1.Caption:='Alf='+StC;
    alfv:=Cour(Kv+(KU-50));

    Image1.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
    ShowBmp.Canvas,Rect(120,10,590,490));
    Xpos:=Round(354+225*sin((Kv+180)/57.3)); Ypos:=Round(255-225*cos((Kv+180)/57.3));
    ColorLine(PortsBmp,Image1,354,255,Xpos,Ypos,RGB(110,110,210),1,0);
    Xpos1:=Round(Xpos+300*sin(alfv/57.3)); Ypos1:=Round(Ypos-300*cos(alfv/57.3));
    if Abs(KU-50)<50 then
    ColorLine(PortsBmp,Image1,Xpos,Ypos,Xpos1,Ypos1,RGB(110,180,110),1,0);
    Vsl(PortsBmp,Image1,0,Round(1.5*Lv1),Round(1.5*Bv1),Round(1.5*L1),
    Round(1.5*L2),Xpos,Ypos,alfv,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
    ButtonBrd.Enabled:=True;
    ButtonBrd.Caption:='Ñěääópù.';
    end;
end;

procedure TForm1.ButtonLenClick(Sender: TObject);
var
    {Xpos,Ypos,Kv : word;}
    StC : string[3];

begin
    if IndTyp=1 then
    begin
        IndScr:=1;
        ColorRect(PortsBmp,Image1,90,0,608,520,RGB(255,255,255),0);
        ColorRect(PortsBmp,Image1,100,20,600,120,RGB(235,255,255),0);
    end;
end;

```

```

Lv1:=Lv; Bv1:=Round(1.7*Bv); L1:=Round(0.3*Lv); L2:=Round(0.1*Lv);
Vsl(PortsBmp,Image1,0,Lv1,Bv1,L1,L2,350,70,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
ScrollBar1.Enabled:=True;
ScrollBar1.Max:=250;
ScrollBar1.Position:=Lv;
ButtonRnd.Enabled:=False;
ButtonEll.Enabled:=False;
ButtonRect.Enabled:=False;
ButtonCom.Enabled:=False;
ButtonRndEll.Enabled:=False;
ButtonReg.Enabled:=False;
end
else
begin
Image1.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
ShowBmp.Canvas,Rect(120,10,590,490));
Kv:=360-Npos*20;
Xpos:=Round(354+225*sin((Kv+180)/57.3)); Ypos:=Round(255-225*cos((Kv+180)/57.3));
ColorLine(PortsBmp,Image1,354,255,Xpos,Ypos,RGB(110,110,210),1,0);
{Kv:=360-Kv;}
if Kv=360 then Kv:=0;
Str(Kv,StC);
PanelLv.Caption:='Kv='+StC;
Vsl(PortsBmp,Image1,0,Round(1.5*Lv1),Round(1.5*Bv1),Round(1.5*L1),
Round(1.5*L2),Xpos,Ypos,Kv,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
alfv:=Kv;
if Npos<18 then Npos:=Npos+1
else Npos:=1;
ScrollBar1.Enabled:=True;
ScrollBar1.Max:=100;
ScrollBar1.Position:=KU;
{ButtonBrd.Enabled:=False;}
ButtonLen.Enabled:=False;
ButtonRnd.Enabled:=False;
ButtonEll.Enabled:=False;

```

```

    ButtonRect.Enabled:=False;
    ButtonCom.Enabled:=False;
    ButtonRndEll.Enabled:=False;
end;
end;

procedure TForm1.ButtonBrdClick(Sender: TObject);
var
    StB: string[2];
    StC: string[5];

begin
    if IndTyp=1 then
        begin
            IndScr:=2;

            ColorRect(PortsBmp,Image1,90,0,608,520,RGB(255,255,255),0);
            ColorRect(PortsBmp,Image1,100,20,600,120,RGB(235,255,255),0);
            Lv1:=Lv; Bv1:=Round(1.7*Bv); L1:=Round(0.3*Lv); L2:=Round(0.1*Lv);
            Vsl(PortsBmp,Image1,0,Lv1,Bv1,L1,L2,350,70,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
            ScrollBar1.Enabled:=True;
            ScrollBar1.Max:=40;
            ScrollBar1.Position:=Bv;
            ButtonRnd.Enabled:=False;
            ButtonEll.Enabled:=False;
            ButtonRect.Enabled:=False;
            ButtonCom.Enabled:=False;
            ButtonRndEll.Enabled:=False;
            ButtonReg.Enabled:=False;
        end
    else
        begin
            Str(Npos,StB);
            Alfsum:=Alfsum+(KU-50);
            Str(Alfsum,StC);

```

```

PanelBv.Caption:=StB+' - '+StC;
ButtonLen.Enabled:=True;
ButtonBrd.Enabled:=False;
if Npos=18 then ButtonOK.Enabled:=True;
end;
end;

procedure TForm1.ButtonSKOClick(Sender: TObject);
begin
if IndTyp=1 then
begin
IndScr:=3;
ScrollBar1.Enabled:=True;
ScrollBar1.Max:=500;
ScrollBar1.Position:=sigma;
ButtonGaus.Enabled:=True;
ButtonSm1.Enabled:=True;
ButtonSm2.Enabled:=True;
ScrollBar1.Position:=Lv;
ButtonRnd.Enabled:=False;
ButtonEll.Enabled:=False;
ButtonRect.Enabled:=False;
ButtonCom.Enabled:=False;
ButtonRndEll.Enabled:=False;
ButtonReg.Enabled:=False;
IndZak:=1;
PanelZ.Caption:='Ãàóññ';
end
else
begin
if IndTimer=0 then
begin
IndTimer:=1;
Timer1.Enabled:=True;
end

```



```

else
begin
IndTimer:=0;
Timer1.Enabled:=False;
end
end;
end;

procedure TForm1.ButtonGausClick(Sender: TObject);
begin
IndZak:=1;
PanelZ.Caption:='Ãàóññ';
end;

procedure TForm1.ButtonSm1Click(Sender: TObject);
begin
IndZak:=2;
PanelZ.Caption:='Ñiåøàí. 1';
ButtonN.Enabled:=True;
ButtonN.Caption:='N=1';
end;

procedure TForm1.ButtonSm2Click(Sender: TObject);
begin
IndZak:=3;
PanelZ.Caption:='Ñiåøàí. 2';
ButtonN.Enabled:=True;
ButtonN.Caption:='N=1';
end;

procedure TForm1.ButtonOKClick(Sender: TObject);
var
i,j,y,Rst,Ast,Bst : Integer;
StC : string[4];
StSz : string[9];

```

```

StR1 : string[5];
Srnd,Sell,Srec,Scom,Srdel,gam,alf1,alf2,As1,As2,x1,x2,y1,y2,Rsum : real;
Asum,Bsum : real;
Grs : Pt1;
Grs1 : Pt2;
Grs10 : Pt3;
a1,b1,s,Sde : word;

begin
ColorRect(PortsBmp,Image1,0,0,608,520,RGB(255,255,255),0);

ColorLine(PortsBmp,Image1,120,255,588,255,RGB(190,20,20),1,0);
ColorLine(PortsBmp,Image1,354,20,354,490,RGB(190,20,20),1,0);
IndOK:=1;

with Image1.Canvas do
begin
Font.Color:=TColor(RGB(20,30,80));
Font.Size:=8;
Font.Style:=[];
Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));

Lpr:=200; Lfn:=10*Lv; Lfk:=3*Lv; Bf:=5*Lv;
Lv1:=Round(0.0653*Lv);      Bv1:=Round(0.0653*Bv);      L1:=Round(0.0653*0.3*Lv);
L2:=Round(0.0653*0.1*Lv);
Pen.Mode:=pmMask;

if IndTyp=1 then
begin
for i:=0 to 78 do
ColorLine(PortsBmp,Image1,121,20+6*i,587,20+6*i,RGB(210,210,210),1,0);
for i:=0 to 78 do

```

```
ColorLine(PortsBmp,Image1,120+6*(i{+1}),20,120+6*(i{+1}),487,RGB(210,210,210),1,0);
```

```
for i:=0 to 12 do
begin
  Str(Abs(3600-600*i),StC);
  TextOut(110+39*i,495,StC)
end;
```

```
for i:=0 to 12 do
begin
  Str(Abs(3600-600*i),StC);
  TextOut(80,480-39*i,StC);
end;
```

```
ButtonN.Caption:='Ñíà÷àëà'; IndOK:=1;
ButtonN.Enabled:=True;
```

```
Ldn:=0.7*Lv+0.5*Bv+Lpr+Lfn;
Ldk:=0.3*Lv+0.5*Bv+Lpr+Lfk;
Bd:=2*(Bv+Lpr+Bf);
ScrollBar1.Visible:=False;
alf1:=Sqr(sigma)*(2*N-1)/2;
```

```
case N of
1: As1:=0.4503;
2: As1:=0.6005;
3: As1:=0.72064;
4: As1:=0.8236;
5: As1:=0.915;
6: As1:=0.9982;
end;
alf2:=Sqr(sigma)*N;
```

```

case N of
1: As2:=0.5303;
2: As2:=0.663;
3: As2:=0.7734;
4: As2:=0.8701;
5: As2:=0.9571;
end;

if Nreg=1 then
begin
case IndFig of
1 : begin
Rdt:=0.7*Lv+0.5*Bv+Lpr+Lfn;
Rd:=Round(0.5*0.1306*(0.7*Lv+0.5*Bv+Lpr+Lfn));
Srnd:=pi*sqr(Rdt);
Str(Round(Srnd),StSz);
Panel1.Caption:='Srd='+StSz;
Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,95,95));
Ellipse(354-Rd,255-Rd,354+Rd,255+Rd);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
2 : begin
Adet:=Round(0.5*(Ldn+Ldk)); Bdet:=Round(0.5*Bd);
Sell:=pi*Adet*Bdet;
Str(Round(Sell),StSz);
Panel2.Caption:='Sell='+StSz;
Ade:=Round(0.0653*0.5*(Ldn+Ldk)); Bde:=Round(0.0653*0.5*Bd);
Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,155,45));
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354-
Ade+Round(0.0653*Ldk),255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
3 : begin

```

```

Srec:=Bd*(Ldn+Ldk);
Str(Round(Srec),StSz);
Panel3.Caption:='Srec='+StSz;
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Round(0.0653*Ldk),255-Round(0.0653*0.5*Bd),
354+Round(0.0653*Ldn),255+Round(0.0653*0.5*Bd),RGB(155,255,255),RGB(105,155,155),0
);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
4 : begin
Scom:=Bd*(Ldn+Ldk);
Str(Round(Scom),StSz);
Panel4.Caption:='Scom='+StSz;
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Round(0.0653*Ldk),255-Round(0.0653*0.5*Bd),
354+Round(0.0653*Ldn),255+Round(0.0653*0.5*Bd),RGB(155,255,255),RGB(105,155,155),0
);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
5: begin
Adet:=Round(Ldn); Bdet:=Round(Ldk);
Srdel:=0.5*pi*Adet*Bdet+0.5*pi*sqr(Bdet);
Str(Round(Srdel),StSz);
Panel5.Caption:='Srdel='+StSz;
Pen.Mode:=pmCopy;
ColorRect(PortsBmp,Image1,0,0,608,520,RGB(255,255,255),0);

Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,155));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,105));
Ade:=Round(0.0653*Ldn); Bde:=Round(0.0653*Ldk);
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Ade,255-Bde,354,255+Bde,RGB(255,255,255),
RGB(255,255,255),0);
Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,155));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,105));

```

```

Ellipse(354-Bde,255-Bde,354+Bde,255+Bde);
Pen.Mode:=pmMask;

for i:=0 to 78 do
  ColorLine(PortsBmp,Image1,121,20+6*i,587,20+6*i,RGB(210,210,210),1,0);
  for i:=0 to 78 do
    Col-
orLine(PortsBmp,Image1,120+6*(i{+1}),20,120+6*(i{+1}),487,RGB(210,210,210),1,0);

    ColorLine(PortsBmp,Image1,120,255,588,255,RGB(190,20,20),1,0);
    ColorLine(PortsBmp,Image1,354,20,354,490,RGB(190,20,20),1,0);

    Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
    Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));

    for i:=0 to 12 do
      begin
        Str(Abs(3600-600*i),StC);
        TextOut(110+39*i,495,StC)
      end;

    for i:=0 to 12 do
      begin
        Str(Abs(3600-600*i),StC);
        TextOut(80,480-39*i,StC);
      end;
    Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
    end;
  end;
end;

if Nreg=2 then
  begin

```

```

case IndFig of
1 : begin

    Rst:=Round(2.5*sigma);

    repeat
    begin
        Rst:=Rst+1;
        Pr:=0;
        for i:=0 to Rst do
            begin
                y:=Round(sqrt(sqrt(Rst)-sqrt(i)));
                for j:=0 to y do
                    begin
                        if IndZak=1 then
                            Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqrt(i/sigma)+0.5*sqrt(j/sigma)));
                        if IndZak=2 then
                            begin
                                x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
                                y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
                                Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
                            end;
                        if IndZak=3 then
                            begin
                                x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
                                y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
                                Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
                            end;
                        end;
                    end;
                end;
            end;
        until Prt>0.995;
        Prt:=Prt;

```

```

Srnd:=pi*sqr(Rst);
Str(Round(Srnd),StSz);
Panel1.Caption:='Srd='+StSz;
Brush.Color:=TColor(RGB(255,135,135));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,95,95));
Rd:=Round(0.0653*Rst);
Ellipse(354-Rd,255-Rd,354+Rd,255+Rd);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
2 : begin

Ast:=Round(2.5*sigma);
gam:=Bd/(Ldn+Ldk);

repeat
begin
Ast:=Ast+5;
Pr:=0; Pr1:=0;
for i:=0 to Ast do
begin
y:=Round(gam*sqr(sqr(Ast)-sqr(i)));
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
begin
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i-Ast/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i+Ast/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
end;
if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i-Ast/2)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf1));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);

```



```

    end;
  if IndZak=3 then
    begin
      x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
      y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i-Ast/2)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
      Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
      y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf2));
      Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
    end;
  end;
end;
Prt:=2*(Pr+Pr1);
end;
until Prt>0.995;
Bst:=Round(Ast*gam);

```

```

Sell:=pi*Ast*Bst;
Str(Round(Sell),StSz);
Panel2.Caption:='Sell='+StSz;
Ade:=Round(0.0653*Ast); Bde:=Round(0.0653*Bst);
Brush.Color:=TColor(RGB(205,205,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,155,45));
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354-Round(0.5*Ade),255,
      90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;

```

```

3 : begin
  a1:=Round(2.5*sigma);
  gam:=Bd/(Ldn+Ldk);
  repeat
    begin
      a1:=a1+5;
      Pr:=0; Pr1:=0;
      {for i:=0 to 2*a1 do

```

```

begin
y:=Round(gam*a1);
for j:=0 to y do
begin
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i-a1/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
end;
end;
Prt:=2*Pr;
end;
until Prt>0.995;
b1:=Round(a1*gam);}

for i:=0 to 2*a1 do
begin
y:=Round(gam*a1);
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i-a1/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
{Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i+a1/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));}
if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i-a1/2)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
{y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i+a1/2)/2+alf1));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);}
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i-a1/2)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
{y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i+a1/2)/2+alf2));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);}

```

```

        end;
    end;
end;
Prt:=2*Pr{(Pr+Pr1)};
end;
until Prt>0.995;
b1:=Round(a1*gam);

Ade:=Round(0.0653*a1); Bde:=Round(0.5*0.0653*b1);

Grs[1].x:=354-Round(0.23*Ade); Grs[1].y:=255-Bde;
Grs[2].x:=354+Round(0.77*Ade); Grs[2].y:=255-Bde;
Grs[3].x:=354+Round(0.77*Ade); Grs[3].y:=255+Bde;
Grs[4].x:=354-Round(0.23*Ade); Grs[4].y:=255+Bde;

Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,205));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));
Polygon(Grs);

Srec:=a1*b1;
Str(Round(Srec),StSz);
Panel3.Caption:='Srec='+StSz;
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
4 : begin
    s:=Round(2.5*sigma);
    repeat
        begin
            s:=s+5;
            Pr:=0; Pr1:=0; Pr2:=0;

            for i:=0 to Round(0.5*(s+Bd)) do
                begin
                    y:=Round(s*i/(0.5*(s+Bd)));

```

```

for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j-s-Ldk)/sigma)));

if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j-s-Ldk)/2+alf1));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j-s-Ldk)/2+alf2));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
end;
end;

for i:=0 to Round(0.5*s) do
begin
y:=Round(Ldn+Ldk-(Ldn+Ldk)*i/(0.5*s));
for j:=0 to y do
begin
if IndZak=1 then
Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j-Ldk)/sigma)));
if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j-Ldk)/2+alf1));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin

```

```

    x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
    y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j-Ldk)/2+alf2));
    Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
    end;
  end;
end;

for i:=0 to Round(0.5*Bd) do
  begin
    y:=Round(s*i/(0.5*Bd));
    for j:=0 to y do
      begin
        if IndZak=1 then
          Pr2:=Pr2+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j+Ldk)/sigma)));
        if IndZak=2 then
          begin
            x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
            y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j+Ldk)/2+alf1));
            Pr2:=Pr2+Sqr(x1)/(y1*y2);
          end;
        if IndZak=3 then
          begin
            x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
            y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j+Ldk)/2+alf2));
            Pr2:=Pr2+Sqr(x1)/(y1*y2);
          end;
        end;
      end;
    end;
    Prt:=2*(Pr+Pr1+Pr2);
  end;
until Prt>0.995;

Sde:=Round(0.0653*s);

Grs10[1].x:=354+Round(0.0653*Ldn+Sde); Grs10[1].y:=255;

```

```

Grs10[2].x:=354+Round(0.0653*Ldn); Grs10[2].y:=255-Round(0.5*0.0653*Bd);
Grs10[3].x:=354+Round(0.0653*Ldn); Grs10[3].y:=255;
Grs10[4].x:=354-Round(0.0653*Ldk); Grs10[4].y:=255-Round(0.5*Sde);
Grs10[5].x:=354-Round(0.0653*Ldk); Grs10[5].y:=255-Round(0.5*(0.0653*Bd+Sde));
Grs10[6].x:=354-Round(0.0653*Ldk+Sde); Grs10[6].y:=255;
Grs10[7].x:=354-Round(0.0653*Ldk); Grs10[7].y:=255+Round(0.5*(0.0653*Bd+Sde));
Grs10[8].x:=354-Round(0.0653*Ldk); Grs10[8].y:=255+Round(0.5*Sde);
Grs10[9].x:=354+Round(0.0653*Ldn); Grs10[9].y:=255;
Grs10[10].x:=354+Round(0.0653*Ldn); Grs10[10].y:=255+Round(0.5*0.0653*Bd);

```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,205));
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));
```

```
Polygon(Grs10);
```

```
Srec:=0.5*(Bd*s+(Ldn+Ldk)*s+(s+Bd)*s);
```

```
Str(Round(Srec),StSz);
```

```
Panel4.Caption:='Srec='+StSz;
```

```
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
```

```
end;
```

```
5 : begin
```

```
Ast:=Round(2.5*sigma);
```

```
gam:=Ldk/(Ldn+Ldk);
```

```
repeat
```

```
begin
```

```
Ast:=Ast+5;
```

```
Pr:=0; Pr1:=0;
```

```
for i:=0 to Ast do
```

```
begin
```

```
y:=Round(gam*sqrt(sqr(Ast)-sqr(i)));
```

```
for j:=0 to y do
```

```
begin
```

```
if IndZak=1 then
```

```
begin
```

```
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
```

```

    {Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i+Ast/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)))};
  end;
if IndZak=2 then
  begin
    x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
    y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
    Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
    {y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf1));
    Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);}
  end;
if IndZak=3 then
  begin
    x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
    y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
    Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
    {y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf2));
    Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);}
  end;
end;
end;
Bst:=Round(Ast*gam);
for i:=0 to Bst do
  begin
    y:=Round(sqrt(sqr(Bst)-sqr(i)));
    for j:=0 to y do
      begin
        if IndZak=1 then
          begin
            Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
            {Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i+Ast/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)))};
          end;
        if IndZak=2 then
          begin
            x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
            y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));

```

```

Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
{y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf1));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);}
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
{y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf2));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);}
end;
end;
end;
Prt:=2*(Pr+Pr1);
end;
until Prt>0.995;
{Bst:=Round(Ast*gam);}

Sell:=0.5*pi*(Ast*Bst+Bst*Bst);
Str(Round(Sell),StSz);
Panel2.Caption:='Sell='+StSz;
Ade:=Round(0.0653*Ast); Bde:=Round(0.0653*Bst);

Pen.Mode:=pmCopy;
ColorRect(PortsBmp,Image1,0,0,608,520,RGB(255,255,255),0);

Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,105));
{Ade:=Round(0.0653*Ldn); Bde:=Round(0.0653*Ldk);}
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Ade,255-Bde,354,255+Bde,RGB(255,255,255),
RGB(255,255,255),0);
Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,105));

```



```

Ellipse(354-Bde,255-Bde,354+Bde,255+Bde);
Pen.Mode:=pmMask;

for i:=0 to 78 do
  ColorLine(PortsBmp,Image1,121,20+6*i,587,20+6*i,RGB(210,210,210),1,0);
for i:=0 to 78 do
  Col-
orLine(PortsBmp,Image1,120+6*(i{+1}),20,120+6*(i{+1}),487,RGB(210,210,210),1,0);

  ColorLine(PortsBmp,Image1,120,255,588,255,RGB(190,20,20),1,0);
  ColorLine(PortsBmp,Image1,354,20,354,490,RGB(190,20,20),1,0);

  Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
  Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));

  for i:=0 to 12 do
    begin
      Str(Abs(3600-600*i),StC);
      TextOut(110+39*i,495,StC)
    end;

  for i:=0 to 12 do
    begin
      Str(Abs(3600-600*i),StC);
      TextOut(80,480-39*i,StC);
    end;
  Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
  Pen.Mode:=pmCopy;
  end;
  end;

end;

if Nreg=3 then

```

```

begin
case IndFig of
1 : begin
  Rdt:=0.7*Lv+0.5*Bv+Lpr+Lfn;
  Rst:=Round(2.5*sigma);

  repeat
    begin
      Rst:=Rst+1;
      Pr:=0;
      for i:=0 to Rst do
        begin
          y:=Round(sqrt(sqr(Rst)-sqr(i)));
          for j:=0 to y do
            begin
              if IndZak=1 then
                Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
              if IndZak=2 then
                begin
                  x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
                  y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
                  Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
                end;
              if IndZak=3 then
                begin
                  x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
                  y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
                  Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
                end;
            end;
          end;
        end;
      Prt:=4*Pr;
    end;
  until Prt>0.995;

```

```

Rsum:=Rdt+Rst;

Rd:=Round(0.5*0.1306*Rsum);
Srnd:=pi*sqr(Rsum);
Str(Round(Srnd),StSz);
Panell.Caption:='Srd='+StSz;
Brush.Color:=TColor(RGB(255,225,225));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,95,95));
Ellipse(354-Rd,255-Rd,354+Rd,255+Rd);
Brush.Color:=TColor(RGB(255,135,135));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,55,55));
Rd:=Round(0.0653*Rst);
Ellipse(354-Rd,255-Rd,354+Rd,255+Rd);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;

```

2 : begin

```
Adet:=Round(0.5*(Ldn+Ldk)); Bdet:=Round(0.5*Bd);
```

```
Ast:=Round(2.5*sigma);
```

```
gam:=Bd/(Ldn+Ldk);
```

repeat

begin

```
Ast:=Ast+5;
```

```
Pr:=0; Pr1:=0;
```

```
for i:=0 to Ast do
```

begin

```
y:=Round(gam*sqr(sqr(Ast)-sqr(i)));
```

```
for j:=0 to y do
```

begin

```
if IndZak=1 then
```

begin

```
Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i-Ast/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
```

```
Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i+Ast/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
```

```

end;
if IndZak=2 then
begin
x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i-Ast/2)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf1));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i-Ast/2)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i+Ast/2)/2+alf2));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
end;
end;
Prt:=2*(Pr+Pr1);
end;
until Prt>0.995;
Bst:=Round(Ast*gam);
Asum:=Adet+Ast; Bsum:=Bdet+Bst;

Sell:=pi*Asum*Bsum;
Str(Round(Sell),StSz);
Panel2.Caption:='Sell='+StSz;
Ade:=Round(0.0653*Asum); Bde:=Round(0.0653*Bsum);
Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,155,45));
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);

Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354-
Ade+Round(0.0653*Ldk),255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);

```

```

Ade:=Round(0.0653*Ast); Bde:=Round(0.0653*Bst);
Brush.Color:=TColor(RGB(205,205,125));
Pen.Color:=TColor(RGB(155,155,45));
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
end;
3 : begin
  a1:=Round(2.5*sigma);
  gam:=Bd/(Ldn+Ldk);
  repeat
    begin
      a1:=a1+5;
      Pr:=0; Pr1:=0;
      for i:=0 to 2*a1 do
        begin
          y:=Round(gam*a1);
          for j:=0 to y do
            begin
              if IndZak=1 then
                Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i-a1/2)/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
              if IndZak=2 then
                begin
                  x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
                  y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i-a1/2)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
                  Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
                end;
              if IndZak=3 then
                begin
                  x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
                  y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i-a1/2)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
                  Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
                end;
            end;
          end;
        end;
      end;
      Prt:=2*Pr{(Pr+Pr1)};
    end;
  end;
end;

```

```

until Prt>0.995;
b1:=Round(a1*gam);

Asum:=a1+Ldn+Ldk; Bsum:=b1+Bd;
Srec:=Bsum*Asum;
Str(Round(Srec),StSz);
Panel3.Caption:='Srec='+StSz;
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Round(0.0653*(Ldk+0.3*a1)),
255-Round(0.0653*0.5*Bsum),354+Round(0.0653*(Ldn+0.7*a1)),
255+Round(0.0653*0.5*Bsum),RGB(155,255,255),RGB(105,155,155),0);

Ade:=Round(0.0653*a1); Bde:=Round(0.5*0.0653*b1);
Grs[1].x:=354-Round(0.23*Ade); Grs[1].y:=255-Bde;
Grs[2].x:=354+Round(0.77*Ade); Grs[2].y:=255-Bde;
Grs[3].x:=354+Round(0.77*Ade); Grs[3].y:=255+Bde;
Grs[4].x:=354-Round(0.23*Ade); Grs[4].y:=255+Bde;

Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,205));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));
Polygon(Grs);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
4 : begin
s:=Round(2.5*sigma);
repeat
begin
s:=s+5;
Pr:=0; Pr1:=0; Pr2:=0;

for i:=0 to Round(0.5*(s+Bd)) do
begin
y:=Round(s*i/(0.5*(s+Bd)));
for j:=0 to y do
begin

```

if IndZak=1 then

Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j-s-Ldk)/sigma)));

if IndZak=2 then

begin

x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));

y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j-s-Ldk)/2+alf1));

Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);

end;

if IndZak=3 then

begin

x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));

y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j-s-Ldk)/2+alf2));

Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);

end;

end;

end;

for i:=0 to Round(0.5*s) do

begin

y:=Round(Ldn+Ldk-(Ldn+Ldk)*i/(0.5*s));

for j:=0 to y do

begin

if IndZak=1 then

Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j-Ldk)/sigma)));

if IndZak=2 then

begin

x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));

y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j-Ldk)/2+alf1));

Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);

end;

if IndZak=3 then

begin

x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));

y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j-Ldk)/2+alf2));

```

    Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
  end;
end;
end;

for i:=0 to Round(0.5*Bd) do
  begin
    y:=Round(s*i/(0.5*Bd));
    for j:=0 to y do
      begin
        if IndZak=1 then
          Pr2:=Pr2+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr((i)/sigma)+0.5*sqr((j+Ldk)/sigma)));
        if IndZak=2 then
          begin
            x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
            y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j+Ldk)/2+alf1));
            Pr2:=Pr2+Sqr(x1)/(y1*y2);
          end;
        if IndZak=3 then
          begin
            x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
            y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j+Ldk)/2+alf2));
            Pr2:=Pr2+Sqr(x1)/(y1*y2);
          end;
        end;
      end;
    end;
    Prt:=2*(Pr+Pr1+Pr2);
  end;
until Prt>0.995;

Sde:=Round(0.0653*s);

Grs1[1].x:=354+Round(0.0653*Ldn+Sde); Grs1[1].y:=255;
Grs1[2].x:=354+Round(0.0653*Ldn); Grs1[2].y:=255-Round(0.5*0.0653*Bd);
Grs1[3].x:=354-Round(0.0653*Ldk); Grs1[3].y:=255-Round(0.5*(0.0653*Bd+Sde));

```



```

Grs1[4].x:=354-Round(0.0653*Ldk+Sde); Grs1[4].y:=255;
Grs1[5].x:=354-Round(0.0653*Ldk); Grs1[5].y:=255+Round(0.5*(0.0653*Bd+Sde));
Grs1[6].x:=354+Round(0.0653*Ldn); Grs1[6].y:=255+Round(0.5*0.0653*Bd);

Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,255));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,155));
Polygon(Grs1);

{Srec:=0.5*(Bd*s+(Ldn+Ldk)*s+(s+Bd)*s);
Str(Round(Srec),StSz);
Panel4.Caption:='Srec='+StSz;}

Scom:=0.5*(Bd*s+(Ldn+Ldk)*s+(s+Bd)*s)+Bd*(Ldn+Ldk);
Str(Round(Scom),StSz);
Panel4.Caption:='Scom='+StSz;
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Round(0.0653*Ldk),255-Round(0.0653*0.5*Bd),
354+Round(0.0653*Ldn),255+Round(0.0653*0.5*Bd),RGB(125,205,205),RGB(105,155,155),0
);
Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
end;
5: begin
Adet:=Round(Ldn); Bdet:=Round(Ldk);

Ast:=Round(2.5*sigma);
gam:=Ldk/(Ldn+Ldk);

repeat
begin
Ast:=Ast+5;
Pr:=0; Pr1:=0;
for i:=0 to Ast do
begin
y:=Round(gam*sqrt(sqr(Ast)-sqr(i)));
for j:=0 to y do

```

```

begin
if IndZak=1 then
  begin
    Pr:=Pr+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
  end;
if IndZak=2 then
  begin
    x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
    y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
    Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
  end;
if IndZak=3 then
  begin
    x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
    y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
    Pr:=Pr+Sqr(x1)/(y1*y2);
  end;
end;
end;

Bst:=Round(Ast*gam);
for i:=0 to Bst do
  begin
    y:=Round(sqrt(sqr(Bst)-sqr(i)));
    for j:=0 to y do
      begin
        if IndZak=1 then
          begin
            Pr1:=Pr1+(1/sig)*exp(-(0.5*sqr(i/sigma)+0.5*sqr(j/sigma)));
          end;
        if IndZak=2 then
          begin
            x1:=As1*exp((N+0.5)*ln(alf1));
            y1:=exp((N+1)*ln(Sqr(i)/2+alf1)); y2:=exp((N+1)*ln(Sqr(j)/2+alf1));
            Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);

```

```

end;
if IndZak=3 then
begin
x1:=As2*exp((N+1)*ln(alf2));
y1:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(i)/2+alf2)); y2:=exp((N+1.5)*ln(Sqr(j)/2+alf2));
Pr1:=Pr1+Sqr(x1)/(y1*y2);
end;
end;
end;
Prt:=2*(Pr+Pr1);
end;
until Prt>0.995;

Asum:=Adet+Ast; Bsum:=Bdet+Bst;
Srdel:=0.5*pi*Asum*Bsum+0.5*pi*sqr(Bsum);
Str(Round(Srdel),StSz);
Panel5.Caption:='Srdel='+StSz;

Pen.Mode:=pmCopy;
ColorRect(PortsBmp,Image1,0,0,608,520,RGB(255,255,255),0);

Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,155));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,155,105));
Ade:=Round(0.0653*Asum); Bde:=Round(0.0653*Bsum);
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Ade,255-Bde,354,255+Bde,RGB(255,255,255),
            RGB(255,255,255),0);

Brush.Color:=TColor(RGB(155,255,155));
Pen.Color:=TColor(RGB(105,125,105));
Ellipse(354-Bde,255-Bde,354+Bde,255+Bde);

Ade:=Round(0.0653*Ast); Bde:=Round(0.0653*Bst);

```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,125));
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(75,125,75));
```

```
Ellipse(354-Ade,255-Bde,354+Ade,255+Bde);
```

```
ColorRectBor(PortsBmp,Image1,354-Ade,255-Bde,354,255+Bde,RGB(155,255,155),  
             RGB(155,255,155),0);
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(125,205,125));
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(75,125,75));
```

```
Ellipse(354-Bde,255-Bde,354+Bde,255+Bde);
```

```
Pen.Mode:=pmMask;
```

```
for i:=0 to 78 do
```

```
ColorLine(PortsBmp,Image1,121,20+6*i,587,20+6*i,RGB(210,210,210),1,0);
```

```
for i:=0 to 78 do
```

```
Col-
```

```
orLine(PortsBmp,Image1,120+6*(i{+1}),20,120+6*(i{+1}),487,RGB(210,210,210),1,0);
```

```
ColorLine(PortsBmp,Image1,120,255,588,255,RGB(190,20,20),1,0);
```

```
ColorLine(PortsBmp,Image1,354,20,354,490,RGB(190,20,20),1,0);
```

```
Pen.Color:=TColor(RGB(255,155,155));
```

```
Brush.Color:=TColor(RGB(255,255,255));
```

```
for i:=0 to 12 do
```

```
begin
```

```
Str(Abs(3600-600*i),StC);
```

```
TextOut(110+39*i,495,StC)
```

```
end;
```

```
for i:=0 to 12 do
```

```
begin
```

```

        Str(Abs(3600-600*i),StC);
        TextOut(80,480-39*i,StC);
        end;
        Vsl(PortsBmp,Image1,1,Lv1,Bv1,L1,L2,354,255,90,0,0,Xn,Yn,Xk,Yk,Xs,Ys);
        end;
        end;
        end;
        end
    else
        begin
            ColorRect(PortsBmp,Image1,0,0,608,520,RGB(250,255,255),0);

            for i:=0 to 52 do
                ColorLine(PortsBmp,Image1,121,20+9*i,587,20+9*i,RGB(210,210,210),1,0);
            for i:=0 to 52 do
                ColorLine(PortsBmp,Image1,120+9*(i{+1}),20,120+9*(i{+1}),487,RGB(210,210,210),1,0);
            for i:=0 to 10 do
                begin
                    Str(Abs(50-10*i),StC);
                    TextOut(125+45*i,495,StC)
                end;

            for i:=0 to 10 do
                begin
                    Str(Abs(50-10*i),StC);
                    TextOut(90,475-45*i,StC);
                end;

            Pen.Color:=TColor(RGB(175,175,175));
            Ellipse(354-225,255-225,354+225,255+225);

            CopyBmp.Canvas.CopyRect(Rect(120,10,590,490),
            Image1.Canvas,Rect(120,10,590,490));

            ButtonRnd.Enabled:=True;

```

```

ButtonEll.Enabled:=True;
ButtonRect.Enabled:=True;
ButtonCom.Enabled:=True;
ButtonRndEll.Enabled:=True;
ButtonReg.Enabled:=False;
ButtonOk.Enabled:=False;
ButtonType.Enabled:=False;
{ButtonReg.Enabled:=True;}

```

```

Panel2.Visible:=False;
Panel3.Visible:=False;
Panel4.Visible:=False;
Panel5.Visible:=False;
PanelZ.Visible:=False;
ButtonSKO.Visible:=False;
ButtonGaus.Visible:=False;
ButtonSm1.Visible:=False;
ButtonSm2.Visible:=False;
ButtonLen.Caption:='Îçèöèÿ';
ColorRect(PortsBmp,Image1,0,0,60,520,RGB(145,155,175),0);
if Nreg=0 then
begin
if Npos=18 then
begin
StRl:=FloatToStr(Alfsum/18);
PanelSKO.Caption:='Dalf='+StRl;
ButtonN.Enabled:=True;
ButtonN.Caption:='Ñía÷àëà';
end;
end;
if Nreg=1 then
begin
ButtonBrd.Visible:=False;
PanelBv.Visible:=False;
end;

```

```
    end;  
    Pen.Mode:=pmCopy;  
    end;  
end;  
end.
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения результатов диссертации

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор ОНМА

професор Шемякін О.М. 

«__»_____ 2015 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача Якушева Олександра Олеговича на тему „Розробка методу вибору оптимальної форми безпечної області судна і визначення її розмірів” у навчальному процесі академії

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М. М., декан факультету морського судноводіння д. т. н., професор Цимбал М. М. і завідуючий кафедрою Судноводіння к. т. н., професор Алексішин В. Г. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Якушева Олександра Олеговича на тему „Розробка методу вибору оптимальної форми безпечної області судна і визначення її розмірів” впроваджені у навчальний процес на кафедрі Судноводіння в розділах забезпечення морехідної безпеки судна.

Начальник навчального
відділу



Пархоменко М. М.

Декан факультету морського
судноводіння, д. т. н., професор



Цимбал М. М.

Завідуючий кафедрою Судноводіння,
к. т. н., професор



Алексішин В. Г.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор Одеської національної морської
академії по науковій роботі
д.т.н., професор



В.А. Голіков

« _____ » _____ 2015 р.

А К Т

про використання результатів дисертаційної роботи Якушева О.О.
на тему «Розробка методу вибору оптимальної форми безпечної області
судна і визначення її розмірів» в наукових дослідженнях, що виконуються в
академії

Ми, що нижче підписались: начальник науково-дослідної частини академії Савчук В.Д. та провідний фахівець НДЧ Фірсанова О.О. склали цей акт у тому, що розділ дисертаційної роботи Якушева О.О. «Розробка методу вибору оптимальної форми безпечної області судна і визначення її розмірів» увійшов складовою частиною в звіт по науково-дослідній роботі, яка виконана в академії «Совершенствование деятельности операторов в судовой эргатической системе», ОНМА, Одеса – 2015 р. (№ ДР 0113U000636, науковий керівник – к.т.н., доцент Бобир В.О.).

В розділі запропоновано спосіб розрахунку розмірів безпечної області судна заданої форми на електронну карту для вибору маневру ухилення від небезпечної цілі (судна).

Начальник науково-дослідної
частини ОНМА,
к.т.н., с.н.с., професор



В.Д. Савчук

Провідний фахівець
НДЧ



О.О. Фірсанова

DAPHNE SHIPPING AGENCY LLC
19, Leitenanta Shmidta Str.
65012 Odessa Ukraine
phone: + 38 048 7281030 / 40
fax: + 38 048 7281050
e-mail: office@daphne.od.ua



ТОВ „ДАФНІ ШІППІНГ ЕЙДЖЕНСІ”
Україна 65012 Одеса
вул. Лейтенанта Шмідта 19
тел.: +38 048 7281030 / 40
факс: + 38 048 7281050
e-mail: office@daphne.od.ua

25.11.2015 № 2289

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в компании «Daphne Shipping Agency, LLC» получил внедрение метод построения безопасной области судна, который разработан в диссертационной работе Якушева Александра Олеговича «Разработка метода выбора оптимальной формы безопасной области судна и определение ее размеров».

Метод используется при переподготовке судоводителей компании.

Директор



С. А. Мытник-Гонта

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом удостоверяется, что в частном высшем учебном заведении «Институт последипломного образования» «Одесский морской тренажерный центр» получили внедрение в учебный процесс следующие результаты диссертационной работы Якушева Александра Олеговича „Разработка метода выбора оптимальной формы безопасной области судна и определение ее размеров ”:

- процедура построения безопасной области судна разной формы;
- использование безопасной области судна для выбора маневра расхождения.

Директор

Института последипломного образования

«Одесский морской тренажерный центр»,

к.т.н., профессор

23.11.2015 г.



Пашенко Ю.В.