

УДК 627.728.1347.79

*На правах рукописи*

**БОРИСОВА Людмила Федоровна**

**МОБИЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ  
НА АКВАТОРИИ С ИНТЕНСИВНЫМ СУДОХОДСТВОМ**

Специальность: 05.22.19 – *эксплуатация водного транспорта,  
судовождение*

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Мурманск – 2005



УДК:656.61.052.4:656.61.08.(043.3)

Работа выполнена в Мурманском государственном техническом университете.

**Научный руководитель:**

*доктор технических наук, профессор* Соловьев Андрей Аркадьевич

**Официальные оппоненты:**

*доктор технических наук, профессор* Скороходов Дмитрий Алексеевич  
*кандидат технических наук* Слатин Кирилл Владимирович

**Ведущая организация:**

ФГУ «Государственная администрация Мурманского морского рыбного порта»

Защита диссертации состоится "22" марта 2005 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета КМ 307.009.02 в Мурманском государственном техническом университете по адресу:  
183010, г. Мурманск, ул. Спортивная 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Мурманского государственного технического университета

Автореферат разослан "21" сентября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор химических наук, профессор

 С. Р. Деркач



**ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Столкновения судов являются одним из самых опасных видов аварий в мореплавании. Последствия столкновений могут достигать огромных размеров, вплоть до гибели судов, всех их пассажиров и экипажей, крупных загрязнений окружающей среды, многомиллионных материальных потерь и т.п. Статистика человеческих жертв аварий свидетельствует, что наибольшее число погибших являются жертвами столкновений. Сравнение статистических данных по морским авариям за последнее десятилетие (1995 – 2004 г.) с данными за последнее столетие (1895-1994 г.) показывает, что соотношение основных причин (по группам) аварийности сохраняется. По-прежнему на первом месте – столкновения судов. Среди всех видов навигационных аварий в Мировом морском флоте столкновения судов в наибольшей степени свидетельствуют о проблемах, существующих в подготовке судоводителей и организации движения судов.

Человеческий фактор в принятии решения является одной из основных причин столкновений судов. По данным Российского морского регистра судоходства более 80% аварий, происходящих на море, связаны с человеческими ошибками.

Актуальной задачей повышения безопасности мореплавания является разработка и совершенствование мероприятий, направленных на оказание судоводителю дополнительной помощи, позволяющей уменьшить человеческий фактор за счет большей формализации процедур принятия решения. Особенно актуальна эта задача при движении в районах с большим скоплением судов, где влияние человеческого фактора велико.

При скоплении на ограниченной акватории большого числа промысловых малотоннажных судов, занятых производственной деятельностью, опасность столкновения судов значительно возрастает. Если район промысла дислоцирован на традиционном маршруте интенсивных транспортных перевозок, то дополнительная опасность связана с возможностью возникновения заторов и скопления в районе промысла большого числа транспортных судов. Особенно опасной ситуация может быть при движении в условиях ограниченной видимости и при наличии плохо наблюдаемых объектов, например, судов с малой отражающей способностью.

Решение проблемы безопасного прохождения морского района интенсивного судоходства (промысла биоресурсов) для транспортного судна обходом его стороной может существенно увеличить время пребывания в пути и, как следствие, привести к нарушению графика его движения. Решение об обходе может быть просто бессмысленным или невозможным, например, если скорость движения рыб достаточно высока, и рыбное скопление движется, препятствуя обходу судном морской акватории.

В целях обеспечения безопасности движения судов в районах с интенсивным судоходством используются системы управления движением судов (СУДС). Основными недостатками современных СУДС являются «привязка» к береговым службам конкретного района, громоздкость, сложность применяемых процедур управления, которые требуют дорогостоящего специализированного оборудования. Действие СУДС ограничено береговыми и прибрежными районами и не распространяется на районы удаленных морских промыслов. Подходы и принципы, используемые при построении современных СУДС, не ориентированы на использование в удаленных районах морского промысла.

Таким образом, проблема оказания помощи в судовождении при пересечении удаленных морских районов с интенсивным судоходством (промысловых) является актуальной.

**Объект исследования.** Диссертационная работа посвящена разработке мобильной системы управления движением судов (МСУДС) – Mobil Vessel Traffic Services (MVTSS) в районе интенсивного судоходства в целях обеспечения безопасности мореплавания.

**Цель исследования.** Целью настоящей работы является разработка и обоснование теоретических принципов построения и организации функционирования МСУДС, которую отличают локальность дислокации, задаваемая площадью акватории промысла, оперативность, быстрота развертывания и прекращения действия, формализуемость процедур управления, снижающая долю человеческого фактора в принятии решения, простота реализации, мобильность, позволяющая использовать систему в любом районе с интенсивным судоходством.

**Предметом исследования** является разработка научно обоснованных методов, алгоритмов и практических рекомендаций по организации оптимального безопасного движения судов на акватории с интенсивным судоходством с помощью назначений (имеющих рекомендательный характер) оптимальных траекторий, точек поворота курса, среднего времени движения.

Детализация поставленной цели позволяет сформулировать следующие **основные задачи научного исследования**:

1. Построить базовую модель движения судов на ограниченной морской акватории с интенсивным судоходством, позволяющую принципиально избежать опасного сближения судов, находящихся на обслуживании.

2. Разработать основной математический аппарат теории графов кодовых пересечений (ГКП), являющийся аналитической базой для вывода расчетных формул и вычисления текущих параметров движения судов в МСУДС.

3. Построить аналитическую модель МСУДС, которая учитывает вопросы организации контроля и управления потоками движения судов.

4. Разработать методику оптимизации структуры МСУДС с учетом прогноза безопасности и временных факторов движения.

5. Разработать имитационную модель МСУДС в районе с интенсивным судоходством для постановки эксперимента.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в диссертационной работе использованы методы теории графов, комбинаторного анализа, теории массового обслуживания, математического аппарата аналитической геометрии, теории вероятностей, тензорного анализа, теории кодирования, теории планирования эксперимента, математической статистики, имитационное моделирование и др.

**Научная новизна** диссертационной работы, являющаяся предметом защиты, состоит из следующих результатов.

1. Предложена концепция безопасного движения судов в районе интенсивного судоходства. Разработана базовая модель МСУДС. Достоинством предложенной концептуальной модели МСУДС являются мобильность, отсутствие территориальных ограничений в базировании; оперативность, быстрое, удобное и нетрудоемкое развертывание и прекращение действия; простота реализации, не требующая сложных технологий, специфических знаний и умений от обслуживающего персонала и судоводителя; минимальные технические потребности для реализации на базе стандартного набора судовых информационно-навигационных средств. МСУДС может быть оперативно развернута в любом районе с интенсивным судоходством без дополнительных ресурсных и денежных затрат: портовом, прибрежном или на удаленной морской акватории.

2. Разработана композиция и логическая архитектура взаимодействия модулей МСУДС. МСУДС представляет собой композицию двух разнородных сетей – открытой клиент-серверной эфирной телекоммуникационной сети (ЭТКС) на базе средств судовых информационно-навигационных комплексов (ИНК) и уникальной распределенной виртуальной сети приоритетов движения судов (ВСПД), физической средой которой является вода. ВСПД является базовой схемой для формализованного определения назначаемых оптимальных траекторий движений судов в МСУДС и выработки навигационной информации.

3. Предложено использовать теорию ГКП для реализации в МСУДС формализованного назначения оптимальных траекторий движения обслуживаемых судов на базе бестабильной (кодовой) маршрутизации, обеспечивающей безопасное движение на подконтрольной акватории, при котором исключены опасные сближения судов.

4. Предложена концептуальная модель безопасного движения судов в районе интенсивного судоходства с использованием ВСПД, позволяю-

щая реализовать формализованное управление движением судов в акватории с интенсивным судоходством в целях обеспечения безопасности мореплавания.

5. Развита математический аппарат теории ГКП в приложении к МСУДС, являющийся аналитической базой для разработки расчетных формул для вычисления текущих параметров движения судов в ВСПД.

6. Разработана методика оптимизации структуры ВСПД с топологией на базе ГКП.

7. Разработаны рекомендации по оптимальному географическому позиционированию структуры ВСПД на акватории района с интенсивным судоходством.

8. Определены критерии безопасности движения в МСУДС. Получены аналитические выражения для расчета коэффициентов безопасности для различных вариантов движения судов, необходимые для оперативного прогнозирования количественных оценок безопасности движения обслуживаемого судна по расчетной траектории.

9. Сформулирована и решена задача оптимального распределения скоростей движения судов в МСУДС, минимизирующего среднее время движения обслуживаемых судов с учетом требований безопасного мореплавания.

10. Получены аналитические выражения для определения оптимальных скоростей, интервалов и среднего минимального времени движения судов в МСУДС в зависимости от структурных параметров схем движения, необходимые для прогнозирования и выбора оптимальных параметров обслуживания судов.

11. Сформулированы границы и условия применимости модели, которые позволяют задавать необходимые ограничения на характеристики движения судов.

**Практическая ценность** полученных результатов сводится к следующему.

1. Разработан метод расчета параметров движения судов в районе интенсивного судоходства с использованием ВСПД.

2. Получены аналитические выражения для инженерного расчета характеристик движения судов, позволяющие по заданным требованиям оперативно выбирать текущие параметры движения судна, взятого на обслуживание.

3. Разработана базовая архитектура МСУДС, реализующая типовые протоколы доступа к сетевым информационным ресурсам и учитывающая тип используемых сред (вода, эфир) и особенности объектов управления (суда).

4. Разработано программное обеспечение диспетчерского управления движением судов в районе интенсивного промысла для МСУДС, реализованное в имитационной модели.

Результаты диссертационной работы могут найти практическое применение на судах морского флота при решении задач безопасного прохождения районов с интенсивным судоходством в условиях ограниченной видимости, когда минимальное время в пути является решающим фактором. Полученные результаты соответствуют целям Резолюции ИМО А.849(20) (международный кодекс проведения расследований аварий и инцидентов на море).

**Реализация результатов работы.** Основные практические и теоретические результаты диссертационной работы используются в учебном процессе, разработанные методы, модели и алгоритмы используются при дипломном проектировании и рекомендованы к практическому использованию в производстве, о чем имеются соответствующие документы.

Теоретические разработки по теории графов кодовых пересечений (ГКП) использованы и отражены в отчете по госбюджетной НИР 1.5/00 "Повышение эффективности функционирования локальных вычислительных сетей", номер гос. регистрации № ГР 01200100830, МГТУ (Мурманск).

**Апробация результатов работы.** Основные положения диссертационной работы обсуждались, получили одобрение и рекомендованы к практическому использованию на Международной научно-практической конференции «Информационно-компьютерные технологии в решении проблем промышленности, строительства, коммунального хозяйства и экологии» (Пенза, 2000 г), Международной научной конференции "Инновации в науке и образовании - 2003", посвященной 90-летию высшего рыбохозяйственного образования в России (Калининград, 2003 г.), Международной научной технической конференции «Наука и образование - 2004» (Мурманск, 2004), Международной научно-технической конференции "Наука и образование - 2005" (Мурманск, 2005), I Всероссийской научно-практической конференции "Безопасность - многоуровневый аспект: превентивные меры и методы" (Пенза, 2003 г.), III Всероссийской научно-практической конференции "Инновации в машиностроении", (Пенза, 2003 г), ежегодных научно-технических конференциях Мурманского государственного технического университета (Мурманск).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы нашли отражения в 25 публикациях, получены четыре авторских свидетельства РОСПАТЕНТ на программные продукты по теме диссертации.

Основная часть научных результатов получена лично автором.

**Структура и объем работы.** Общий объем составляет 167 с., 30 иллюстраций, 4 таблицы, и содержит введение, 4 раздела, заключение, список литературы 95 наименований, 1 приложение.

#### Содержание работы

**Во введении** выполнен анализ АС на море за период с 1995г. по 2003 г. и до настоящего времени на основании ежегодных статистических отчетов Международной морской организации (ИМО), архивных материалов инспекции безопасности мореплавания, публикаций в открытой печати, Интернет-сообщений, материалов Федерального агентства по рыболовству РФ (Госкомрыболовства РФ), государственной администрации Мурманского морского порта, материалов архива РК "Красное знамя" (г. Мурманск), материалов некоммерческой организации "Союз рыбопромышленников севера" (НО "Союз рп. Севера") (г. Мурманск) и других источников. Показано, что на первом месте среди причин АС находятся столкновения судов. На их долю приходится около 21% всех АС, в 3% случаев причина аварии осталась неизвестной. Исследована тенденция роста числа столкновений судов и числа смертельных случаев на море в результате столкновений. Выявлены и классифицированы основные причины столкновений. Показано, что человеческий фактор является одной из главных причин АС на море. Сделан вывод об актуальности разработок по повышению безопасности мореплавания и оказанию судоводителю дополнительной помощи, особенно при движении в районах с большим скоплением судов, где человеческий фактор велик.

**В первом разделе** представлен аналитический обзор научных работ по обеспечению безопасного мореплавания, проведен анализ особенностей судоводительских и управленческих методов обеспечения безопасного мореплавания и предотвращения столкновений судов. Сделан вывод о том, что судоводительские методы не могут обеспечить требуемый уровень безопасности в сложных условиях мореплавания на акватории с большим скоплением судов и принципиально исключить человеческий фактор. Управленческие методы не учитывают детали судоводительских действий, обеспечивающих движение конкретного судна в соответствии с заданными ориентировками. Они рассматривают проблему безопасного движения судов на заданной акватории глобально, на основе системного подхода. Эти методы реализуются в СУДС. Управленческие методы не критичны к условиям ограниченной видимости. Недостатком современных методов УДС является низкий уровень формализации процедур управления, который не позволяет реализовать в полной мере достоинства управленческих методов и исключить человеческий фактор из принятия решения.

Рассмотрены вопросы организационно-правового обеспечения СУДС. Отмечено, что возможность организации мобильной УДС, не имеющей береговых служб, ни в Международных, ни в национальных правовых документах не рассматривается. Сформулированы нормативно-правовые требования к МСУДС – подчиняться национальным правовым требованиям к СУДС в РФ при реализации в национальных территориальных водах (береговые и прибрежные районы); не противоречить международным нормативно-правовым документам, регламентирующим введение и функционирование служб движения судов (VTS) при реализации в международных водах; иметь рекомендательный характер.

Сформулированы цели и задачи оперативного управления. Центральная задача управления в МСУДС формулируется следующим образом: для судна, взятого на обслуживание, обеспечить выработку и доставку управляющих решений по проводке его через акваторию с интенсивным судоходством за минимальный временной интервал с гарантируемой степенью безопасности.

Сформулированы требования к МСУДС в удаленных морских районах с интенсивным судоходством с учетом их специфических особенностей и основные функции: 1) наблюдение за обстановкой на акватории в пределах действия МСУДС; 2) идентификация подвижных объектов (судов); 3) телекоммуникационное взаимодействие Центра МСУДС и судов, находящихся на обслуживании; 4) выработка управляющих решений для обслуживаемых судов.

Выполнен анализ возможностей реализации. Первые три функции технически могут быть реализованы с помощью современных высокоточных технических средств контроля судоходной обстановки (РЛС, АИС, ТВ), средствами комплексной автоматической обработки информации, а также средствами ОВЧ радиосвязи с судами. Четвертая функция МСУДС является уникальной и должна реализовываться программными методами в виде формализованного управления движением всех судов, взятых на обслуживание. Задача оперативного управления в МСУДС сводится к оптимизационной топологической задаче, целью которой является недопущение опасного сближения судов, находящихся на обслуживании.

Анализ подходов, используемых в информационных системах, позволил выявить общность задач и использовать аналогичные принципы организации управления в транспортных задачах. Выбор траектории и приоритета движения судна рассматривается, как сетевая задача выбора оптимального маршрута движения в некоторой сети с заданной топологией, а в качестве математических моделей сетевых топологий используются графы и аппарат теории графов. Использование системы АИС делает принципиально разрешимой задачу автоматического определения оптимального маршрута движения в МСУДС. Учитывая, что задача оптимизации

ции топологии сети является многокритериальной и для произвольных топологий чрезвычайно сложной, на основании проведенного анализа возможных топологических решений в качестве топологической модели МСУДС выбраны ГКП.

Проведенный анализ позволил сформулировать задачи исследования и предмет диссертации.

Во втором разделе проведено аналитическое исследование в приложении к МСУДС структурных свойств  $ГКП(n, k, r)$  с параметрами  $n$  – длина кодовых комбинаций номеров вершин,  $k$  – основание кода,  $r$  – мощность пересечения кодовых комбинаций номеров вершин. Предложен способ аналитического описания блочно-диагональной матрицы смежности ГКП, удобного для хранения и компьютерной обработки. Предложен новый вид матричного представления ГКП – матрица пересечений кодовых комбинаций номеров вершин (МПН), которая является наиболее компактной формой представления связей вершин в ГКП, удобна для компьютерной обработки и хранения и позволяет значительно экономить память компьютера.

Сформулированы и доказаны шесть теорем в области ГКП, являющихся основой для вывода аналитических выражений и зависимостей прикладного характера в применении к МСУДС. Рассмотрены прикладные вопросы теории ГКП в приложении к топологическим задачам построения ВСПД для МСУДС. Выведены алгебраические уравнения и зависимости, позволяющие получать требуемые структурные свойства ВСПД варьированием трех основных параметров ГКП. Исследованы основные структурные характеристики ВСПД для выбора оптимальных топологических параметров. Исследованы вопросы физической реализуемости структуры ВСПД для МСУДС.

Разработана концепция виртуальной сети приоритетов движения судов – ВСПД, являющейся структурной компонентой МСУДС. Под ВСПД понимается сеть, состоящая из приоритетных направлений движения судов, соединенных в поворотных точках, которая назначается программным путем, когда в ней возникает необходимость, и аннулируется, когда она больше не требуется. ВСПД является базовой схемой для формализованного определения назначаемых оптимальных по числу поворотных точек траекторий движений судов, обслуживаемых в МСУДС, на базе бесстационарной (кодовой) маршрутизации в ГКП.

Сформулирована концепция построения МСУДС в районах с интенсивным судоходством для обеспечения безопасности мореплавания.

Композиционно архитектура МСУДС включает два разнородных сетевых модуля – открытую клиент-серверную ЭТКС и распределенную ВСПД обслуживаемых судов. Взаимодействие служб в МСУДС реализуется с помощью системы протоколов и стандартов, регламентирующих

нормализованные процедуры обеспечения безопасного мореплавания, а также взаимодействие элементов системы при установлении связи и передаче управляющих решений (рекомендаций). Логическая система взаимодействия служб в МСУДС архитектурно базируется на семиуровневой эталонной модели взаимодействия открытых систем (OSI) Международной организации по стандартизации (ISO). Благодаря этому МСУДС доступна для взаимодействия с другими системами в соответствии с действующими стандартами (рис. 1).

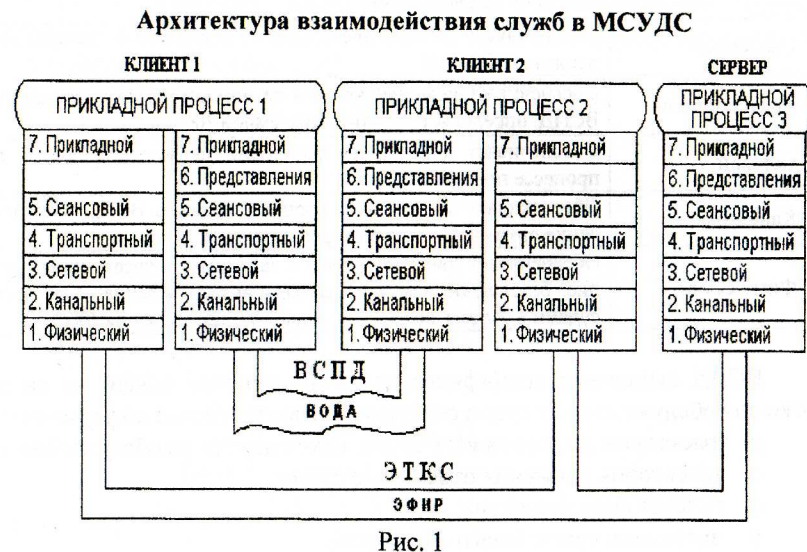


Рис. 1

Разработанная архитектура взаимодействия служб в МСУДС открыта для взаимодействия с другими системами в соответствии с действующими стандартами, гибкая в отношении используемых решений, процедур, стандартов и протоколов, лишенная основных недостатков традиционных СУДС. Специфические функции уникальной сети ВСПД в соответствии с логикой построения архитектуры МСУДС разделены на 7 уровней (табл. 1).

ЭТКС представляет собой клиент-серверную радиосеть, клиентами которой являются ЭВМ в составе судовых ИНК, сервер входит в состав судового ИНК флагманского судна или расположен в помещении береговой диспетчерской службы (Центр МСУДС). ЭТКС осуществляет связь сервера с клиентами в режиме диалога. ЭТКС выполняет функции наблюдения за надводной обстановкой посредством АИС и РЛС и связь оператора Центра МСУДС с судами, находящимися на обслуживании средствами ГМССБ.

Таблица 1.

## Функциональные уровни ВСПД в логической архитектуре МСУДС

Уровни	Функции ВСПД
7. Прикладной	Обеспечивает интерфейс пользователя, интерпретацию и преобразование запросов и данных к виду, понятному и удобному для судоводителя
6. Представления	Определяет преобразование электронной информации в команды по судовождению
5. Сеансовый	Обеспечивает соблюдение заданных скоростей и интервалов движения в ВСПД
4. Транспортный	Обеспечивает заданный уровень безопасного движения судов в ВСПД, определяет величину системной ДКС
3. Сетевой	Обеспечивает коррекцию траекторий движения в ВСПД в процессе проводки судов
2. Канальный	Обеспечивает статическую маршрутизацию в ВСПД- определение оптимальных траекторий движения судов
1. Физический	Обеспечивает движение судна с заданными курсом, наблюдение, безопасное маневрирование или расхождение с другими судами с учетом заданного судоводителем значения ДКС

ВСПД выполняет специфические навигационные задачи по обработке для обслуживаемых судов следующей навигационной информации:

- траектории движения всех судов, находящихся на обслуживании;
- траектория движения отдельного судна;
- путевая скорость судна;
- дистанция кратчайшего сближения;
- время в пути;
- координаты путевых точек поворота;
- позиция по отношению к фарватеру и путевым точкам;
- позиции и намерения окружающих судов.

Оператор Центра МСУДС реализует функции оперативной (динамической) коррекции управляющих решений.

Архитектура МСУДС допускает возможность постепенной («мягкой») модернизации, легкую расширяемость в процессе развития.

**В третьем разделе** обоснованы принципы практической реализации МСУДС. Сформулирована и решена задача оптимального распределения скоростей движения судов в МСУДС, минимизирующего среднее время движения судов на ограниченной акватории с учетом требований безопасного мореплавания.

Получены аналитические выражения для определения скоростей, интервалов и среднего минимального времени движения судов в МСУДС в зависимости от средней минимальной длины траекторий движения, ин-

вариантных к топологии ВСПД и принятой стратегии маршрутизации в ней. Они могут быть использованы для решения широкого класса задач оптимизации структур систем управления движением судов.

Получены аналитические выражения для определения скоростей, интервалов и среднего минимального времени движения судов в ВСПД с топологией на базе ГКП в зависимости от диаметра сети, которые учитывают особенности топологии сети и принятую стратегию маршрутизации в ней. Эти выражения могут быть использованы для определения оптимальных значений параметров ГКП по критерию среднего минимального времени движения судов в ВСПД и прогнозирования времени обслуживания в МСУДС:

$$v_i^s = \frac{\lambda_i}{\mu} + V^s \left( 1 - 0,5 \left[ \frac{n}{r} \right] \rho \right) \frac{\sqrt{\lambda_i}}{\sum_{j=1}^M \sqrt{\lambda_j}}, \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

$$T = \frac{2 \cdot \overline{D_{кр}^c} \cdot \bar{t}}{V^s \left( 1 - 0,5 \left[ \frac{n}{r} \right] \rho \right) \left[ \sum_{j=1}^M \sqrt{\lambda_j} \right]^2},$$

$$t_i^s = \frac{2 \cdot D_{кр}^s \cdot \left( 1 - 0,5 \cdot \left[ \frac{n}{r} \right] \cdot \rho \right) \cdot \sqrt{\lambda_i}}{\left( v_i^s - \frac{\lambda_i}{\mu} \right) \sum_{j=1}^M \sqrt{\lambda_j}}, \quad i = 1, 2, \dots, M,$$

где  $v_i^s$  – средняя собственная скорость движения судов при их поступлении в  $b_i$  канал (узлов);  $2D_{кр}^c$  – дистанция кратчайшего сближения (ДКС)

$i$ -того судна (миль);  $2\overline{D_{кр}^c}$  – среднее значение ДКС судов, поступающих в  $b_i$  канал (миль);  $\lambda_i$  – интенсивность поступления судов в  $b_i$  канал, час<sup>-1</sup>

(среднее число судов в час, входящих в  $b_i$  канал);  $\bar{t}_i = \frac{1}{\lambda_i} = \frac{2\overline{D_{кр}^c}}{v_i^c}$  – средний

минимальный промежуток времени (час) между двумя соседними поступлениями судов, равный среднему времени, затрачиваемому судном на прохо-

ждение своей ДКС в  $b_i$  канале;  $2D_{кр}^s$  – системная ДКС, равная средней

длине интервала обслуживания (миль);  $v_i^s$  – предельная системная скорость движения в  $b_i$  канале, равная сумме ДКС судов, которые  $b_i$  канал

способен пропустить за час (узлов);  $2D_{крj,k}^c = \frac{1}{\mu_{j,k}}$  – средняя ДКС судов, входящих в вершину  $a_j$  графа и направляющихся в вершину  $a_k$  (миль);  $\gamma_{j,k}$  – среднее число судов в час, входящих в ВСПД в вершину  $a_j$  и имеющих направление в вершину  $a_k$  (час<sup>-1</sup>);  $\gamma = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \gamma_{j,k}$  – суммарная интенсивность вхождения судов в граф (час<sup>-1</sup>);  $\gamma = \sum_{i=1}^M \lambda_i$  – суммарная интенсивность потока судов в ветвях графа (час<sup>-1</sup>), по смыслу ясно, что она равна суммарной интенсивности вхождения судов в граф;  $V^s = \sum_{i=1}^M v_i^s$  – суммарная пропускная способность графа, равная суммарной системной скорости в сети (узлов);  $T_i$  – среднее время движения судов, проходящих ветвь  $b_i$  (задержка в ветви  $b_i$ ) (час);  $T$  – среднее время движения судов, поступающих в вершины графа (среднее время пребывания в системе) (час),  $\rho = \left( \sum_{i=1}^M \lambda_i / \mu_i \right) / V^s$  – загрузка всей сети.

Эти выражения могут быть использованы для прогнозированного определения оптимальных параметров движения в ГКП по критерию минимального среднего значения времени движения судов по путям минимальной длины.

Проведен анализ полученных расчетных формул с целью определения границ и условий применимости модели МСУДС, а также направления дальнейшей разработки. Сформулированы условия применимости модели, которые позволяют задавать необходимые ограничения на характеристики движения судов.

Определены понятия и критерии безопасности движения судов в ВСПД. При этом под безопасностью движения в МСУДС понимается безопасность пути (траектории движения), предназначенного для пересечения судном с механическим двигателем некоторого района с интенсивным судоходством из одной точки в другую. Безопасность (надежность) сети  $\bar{\rho}_{st}^k$  определяется вероятностью того, что в сети имеется хотя бы один безопасный путь из точки  $a_s$  в точку  $a_t$  из выбранного множества, или вероятностью того, что в сети существует хотя бы один набор приоритетов движения в выбранном множестве, составляющих безопасный путь из точки  $a_s$  в точку  $a_t$ .

Разработана математическая модель безопасности движения судов в МСУДС, отвечающая задачам исследования, а именно: исследованию характеристик безопасности движения судов в районе с интенсивным судоходством; разработке рекомендаций по оптимальному безопасному

движению судов в районе интенсивного судоходства; разработке рекомендаций по оптимальной географической привязке структуры ВСПД к акватории района с интенсивным судоходством.

Получены аналитические выражения для количественной оценки безопасности движения в районе с интенсивным судоходством:

о выражение для вероятности наличия промыслового судна в окрестности точки с координатами  $(x_0, y_0)$ , размеры которой ограничены величиной ДКС промыслового судна  $D_{кр}^{np}$ , на расстоянии  $R$  от центра плотности рыбного скопления:

$$\hat{q}((x_0, y_0) \in \text{Re } g\{G\}) = 0,5 (\hat{D}_{кр}^{np})^2 e^{-0,5 \hat{R}^2}, \quad \hat{D}_{кр}^{np} = \frac{D_{кр}^{np}}{\sigma}, \quad \hat{R} = \frac{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}{\sigma},$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение положения судна относительно центра рассеивания в точке  $(x_0, y_0)$ ; оно может быть использовано при самостоятельном выборе траектории движения в районе с интенсивным судоходством;

о выражение для вероятности наличия промыслового судна в окрестности  $k$ -той точки траектории движения, ширина которой ограничена ДКС  $D_{кр}^{mo}$ :

$$\hat{q}((x_k, y_k) \in \text{Re } g\{G_k\}) = 0,5 \lambda (\hat{D}_{кр}^{np})^2 e^{-0,5 \hat{R}_k^2} = 0,5 \hat{D}_{кр}^{np} \hat{D}_{кр}^{mo} e^{-0,5 \hat{R}_k^2}, \quad k \in [1, \Lambda],$$

где  $\Lambda$  – максимально возможное число судов в полосе движения, зависящее от ее длины  $\eta$  и от величины ДКС  $D_{кр}^{np}$ :  $\Lambda = \left\lceil \frac{\eta}{D_{кр}^{np}} + 1 \right\rceil$ ,  $\lceil x \rceil$  – наибольшее целое, не большее  $x$ ;

о при движении под управлением МСУДС с учетом наличия альтернативных приоритетов движения в ВСПД выражение для определения коэффициента безопасности имеет вид:

$$\bar{\rho}_{st} = \sum_{i=1}^M \rho_{st}^i - \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} \varphi_{i,j} + \sum_{\substack{i,j,k \\ i \neq j \neq k}} \varphi_{i,j,k} - \dots \pm \varphi_{1,2,\dots,M},$$

где  $\varphi_{i,j} = E(\rho_{st}^i \rho_{st}^j)$  – произведения безопасности полос, входящих в объединение путей по два;  $\varphi_{i,j,k} = E(\rho_{st}^i \rho_{st}^j \rho_{st}^k)$  – то же по три и т.д.;  $\varphi_{1,2,\dots,M}$  – произведения безопасности полос, входящих во все пути множества  $m_{st}^*$ ; знак «+» ставится перед суммой при объединении нечетного числа путей, а знак «-» – при объединении четного числа путей;

о при движении под управлением МСУДС с учетом возможности корректировки траектории движения на любом этапе продвижения безо-



пасность движения по сети из точки  $a_s$  в точку  $a_t$  определяется в соответствии с выражением:

$$\rho_{st} = 1 + \sum_{m=1}^k (-1)^m \sum_{1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_m \leq k} E \left\{ \prod_{r=1}^m (1 - p_{ij_r}) \right\},$$

иначе

$$\rho_{st} = 1 - \sum_{i_1=1}^k E \left\{ \prod_{j \in \mu_{i_1}^s} (1 - p_{ij}) \right\} + \sum_{i_1=1}^k \sum_{i_2=i_1+1}^k E \left\{ \prod_{j \in \bigcup_{r=1}^2 \mu_{i_r}^s} (1 - p_{ij}) \right\} - \sum_{i_1=1}^k \sum_{i_2=i_1+1}^k \sum_{i_3=i_2+1}^k E \left\{ \prod_{j \in \bigcup_{r=1}^3 \mu_{i_r}^s} (1 - p_{ij}) \right\} + \dots$$

$$\dots \pm \sum_{i_1=1}^k \sum_{i_2=i_1+1}^k \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^k E \left\{ \prod_{j \in \bigcup_{r=1}^k \mu_{i_r}^s} (1 - p_{ij}) \right\}.$$

Получено аналитическое выражение для определения величины оптимальной ДКС обслуживаемого судна, которое может быть использовано для задания средней (системной) скорости движения судов и для получения оптимального распределения скоростей движения судов в МСУДС в качестве ограничения по безопасности движения в оптимизационной модели:

$$D_{кр\ opt}^{md} = \sigma \sqrt{2eQ}$$

где  $q_{max} = (D_{кр}^{md})^2 / 2e\sigma^2 = Q$  максимальная вероятность встречи с промысловым судном.

Распределение плотности вероятности наличия промыслового судна в окрестности точки с координатами  $(x_G, y_G)$ , размеры которой ограничены величиной дистанции кратчайшего сближения судна  $D_{кр}^{md}$ , определено с помощью выражения:

$$Q = \left\{ q(\sigma) \mid q(\sigma) = \frac{(D_{кр}^{md})^2}{2\sigma^2} e^{-(x_G^2 + y_G^2) / 2\sigma^2}, \right.$$

$$\left. \text{где } (x_G, y_G) = \left[ (K\sigma \sin(\varphi), K\sigma \cos(\varphi)) \mid \varphi = 0 \right], K = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, \dots, 6 \right\},$$

где параметр  $\sigma$  пропорционален численности судов в районе промысла  $P$ .

Выполнено исследование и анализ характеристик безопасности движения с целью выработки рекомендаций по движению судов в районе интенсивного судоходства.

В четвертом разделе исследованы вопросы адекватности теоретических выводов и расчетных формул практическим результатам на основе имитационно-статистического моделирования движения судов в различных условиях интенсивности.

Разработана архитектура прикладной системы МСУДС. Прикладные программы в соответствии с функциональными границами разделяются на три части: логику (алгоритмы) представления, бизнес-логику (расчетные алгоритмы и правила) и логику (алгоритмы) доступа к данным. Специфика реализации взаимодействия прикладных процессов в МСУДС определила выбор трехзвенной распределенной клиент-серверной системы, в которой сервер приложений обеспечивает совместное использование общих для всего приложения бизнес-правил и процедур (рис. 2). Помимо «утонышения» клиента, эта стратегия упрощает процесс модификаций, т.к. будущие обновления прикладного ПО будут производиться, главным образом, на сервере приложений.

### Архитектура прикладной системы программного комплекса МСУДС

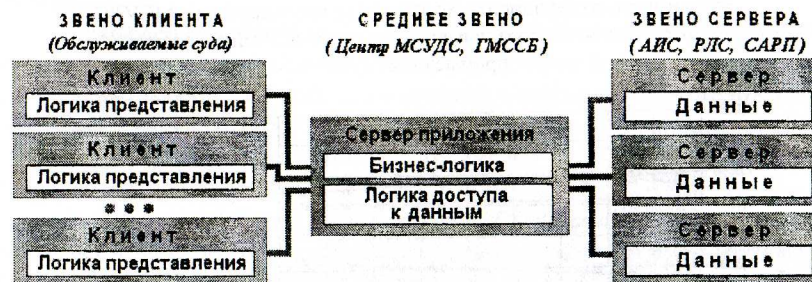


Рис. 2

Сервер приложений поддерживает пул ограниченного числа открытых подключений к базам данных от АИС, ЛРС, САРП и других навигационных систем контроля обстановки на акватории. Подключения многократно используются для выполнения запросов различных клиентов.

Экспериментальная проверка адекватности разработанной аналитической модели МСУДС, принципов, алгоритмов, методов и технологий, лежащих в ее основе, а также справедливость аналитических выражений, определяющих характеристики системы, учитывая масштабность, сложность и дороговизну натурных испытаний, проведена методом имитационно-статистического моделирования. Исследование проведено с использованием исследовательского модуля, входящего в состав разработанного программного комплекса взаимодействия сетевых служб управления безопасным движением судов по траекториям путей.

Для оценки адекватности имитационной модели реальным условиям эксперимента и подтверждения пригодности математической модели к решению задач имитационного моделирования и прогнозирования вероятностно-временных характеристик движений судов в МСУДС проведена серия экспериментов в условиях отсутствия мешающих объектов (промысловых судов) на акватории промысла. Условие отсутствия промысловых судов обеспечило чистоту оценки разработанных аналитических моделей. Экспериментальное исследование показало, что результаты имитационного моделирования движения судов в МСУДС можно считать адекватными реальным условиям, а аналитические выражения для расчета вероятностно-временных характеристик движения судов в МСУДС являются пригодными для прогнозирования времени движения обслуживаемых судов.

Для оценки эффективности МСУДС проведена серия экспериментов в условиях различной плотности движения мешающих объектов (промысловых судов), соответствующей трем зонам риска: максимального риска (зона 1), умеренной и хорошей степени безопасности (зона 2), практически безопасной (зона 3) для мореплавания (рис.3).

Зависимость коэффициента безопасности мореплавания в МСУДС от величины загрузки для различных плотностей скопления промысловых судов

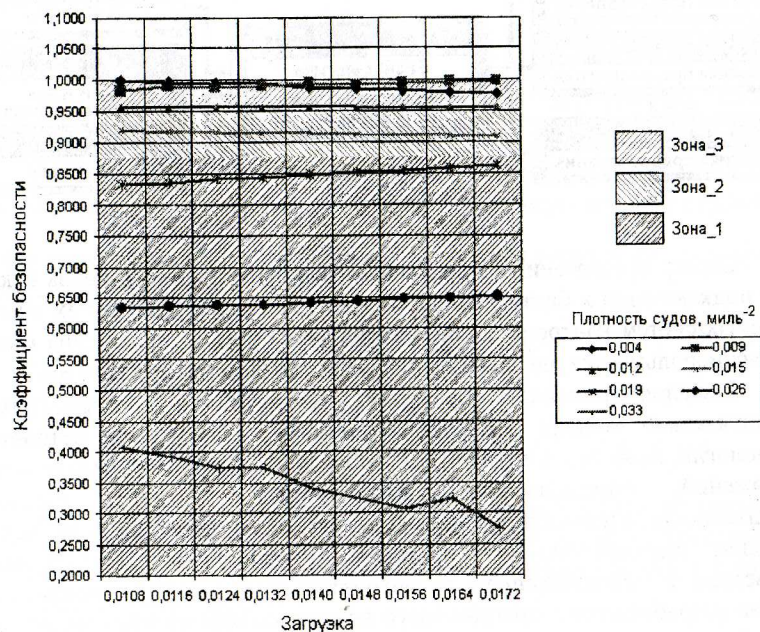


Рис. 3

Коэффициент эффективности использования МСУДС по времени определен выигрышем во времени, который получает обслуживаемое судно при пересечении акватории промысла, по сравнению со временем, необходимым для обхода этой акватории стороной. Экспериментально исследованы зависимость коэффициента эффективности МСУДС по времени и коэффициента безопасности движения судна в МСУДС от величины загрузки системы при различных параметрах ГКП и при различных плотностях скопления промысловых судов на акватории. В зоне допустимого риска ( $0 < q < 0,05$ ) коэффициент эффективности не ниже 78%.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило основные теоретические выводы, полученные в диссертационной работе. Подтверждена пригодность разработанной математической модели к решению задач имитационного моделирования и прогнозирования вероятностно-временных характеристик движений судов в МСУДС. Подтверждена эффективность использования МСУДС по времени с учетом гарантируемой безопасности. На основании анализа полученных зависимостей выработаны рекомендации по практическому использованию и оптимизации МСУДС.

В заключении представлены основные научные результаты выполненных в диссертации исследований, сформулированы практические положения, вытекающие из этих исследований, содержатся положения, определяющие научную новизну и практическую ценность работы и являющаяся предметом защиты. Укрупненно заключение может быть сформулировано следующим образом:

1. Впервые предложена концепция безопасного движения судов в морском районе интенсивного судоходства с использованием мобильной СУДС. Разработана логическая архитектура МСУДС, доступная для взаимодействия с другими системами, открытая для стандартов, протоколов взаимодействия, технических и программных решений, гибкая, обеспечивающая возможность постепенной («мягкой») модернизации и дальнейшего развития. МСУДС не имеет «привязки» к береговым службам какого-то конкретного района, благодаря чему является мобильной и не имеет территориальных ограничений в реализации. Разработанная базовая модель позволяет оперативно развернуть МСУДС в любом районе с интенсивным судоходством без дополнительных ресурсных и денежных затрат: портовом, прибрежном или на удаленной морской акватории.

2. Впервые предложен метод формализованного определения траекторий движения судов на ограниченной акватории с интенсивным судоходством, принципиально обеспечивающий движение без их опасного сближения. Реализация метода в МСУДС требует минимальный набор информационно-технических средств, входящих в состав ИНК современного судна без привлечения дополнительных ресурсов.

3. Разработана базовая модель ВСПД, реализующая бестабличную (кодovou на базе ГКП) маршрутизацию судов с целью определения траекторий их движения в районе интенсивного судоходства. Применение ВСПД в МСУДС, позволяет исключить оператора из процедуры принятия решений по оптимальному судоходству на подконтрольной акватории.

4. Определены критерии безопасности движения в МСУДС. Получены аналитические выражения для расчета коэффициентов безопасности для различных вариантов движения судов. Использование расчетных коэффициентов позволяет оперативно получать прогнозируемые количественные оценки безопасности движения обслуживаемых судов по расчетным траекториям.

5. Разработана методика оптимизации структуры ВСПД с топологией на базе ГКП, позволяющая определять оптимальные координаты поворотных точек траекторий движений судов на подконтрольной акватории. Применение методики позволяет позиционировать ВСПД на акватории с учетом ее особенностей и изменений.

6. Впервые сформулирована и решена задача оптимального распределения скоростей движения судов в МСУДС, минимизирующего среднее время движения судов в системе с учетом требований безопасности мореплавания. Получены аналитические выражения для определения скоростей, интервалов и среднего минимального времени движения судов. Сформулированы границы и условия применимости модели. Использование расчетных формул позволяет прогнозировать и выбирать оптимальные временные параметры движения обслуживаемых судов в МСУДС.

7. Развита математический аппарат теории графов кодовых пересечений в приложении к МСУДС, являющийся аналитической базой для разработки расчетных формул для вычисления текущих параметров движения судов в ВСПД.

#### Список основных научных трудов по теме диссертации

1. Борисова, Л. Ф. Метод повышения безопасности маневрирования и движения судов в районе промысла / Л. Ф. Борисова // Инновации в науке и образовании -2003 г.: Материалы Междунар. науч. конф., посвящ. 90-летию высш. рыбохоз. образования в России (Калининград, 13-15 октября 2003 г.). - Калининград, 2003. - С. 195-196.

2. Борисова, Л. Ф. К расчету показателей безопасности движения судов в районе рыбного промысла / Л. Ф. Борисова // Безопасность – многоуровневый аспект : превентивные меры и методы (Пенза, 27-28 ноября 2003 г.) : I Всерос. науч.-практ. конф. - Пенза, 2003. - С. 19-21.

3. Борисова, Л. Ф. К вопросу организации движения судов на базе графов кодовых множеств / Л. Ф. Борисова // Электрооборудование и электроэнергетика : сб. науч. трудов / КГТУ. - Калининград, 2003. - С. 53-63.

4. Борисова, Л. Ф. Виртуальная сеть полос движения судов для повышения безопасности мореплавания в районе рыбного промысла / Л. Ф. Борисова // Инновации в машиностроении : сб. статей III Всерос. науч.-практ. конф. (Пенза, 27-29 ноября 2003 г.). - Пенза, 2003. - С.118-120.

5. Борисова, Л. Ф. Анализ причин столкновения судов и проблемы безопасности мореплавания / Л. Ф. Борисова // Наука и образование : Материалы Междунар. научно-техн. конф. (Мурманск, 7-15 апреля 2004 г.) : в 6 ч. / Мурман. гос. техн. ун-т. - Мурманск, 2004. - Ч. 5. - С. 245- 249.

6. Борисова, Л. Ф. Безопасность движения в виртуальной сети полос движения судов / Л. Ф. Борисова // Вестник МГТУ : Труды Мурманского гос. техн. ун-та. - Мурманск, 2004. - Т. 7, № 1. - С. 6-13.

7. Борисова, Л. Ф. Определение вероятностно-временных характеристик движения судов в районе промысла при расхождении / Л. Ф. Борисова // Вестник МГТУ : Труды Мурманского гос. техн. ун-та. - 2004. - Т. 7, № 1. - С. 14-20.

8. Борисова, Л. Ф. Мобильная система управления движением судов / Л. Ф. Борисова // Наука и образование -2005 : Материалы Междунар. научно-техн. конф.(Мурманск, 6-14 апреля 2005 г.) : в 7 ч. / Мурман. гос. техн. ун-т. - Мурманск, 2005. - Ч. 7. - С. 81-84.

9. Борисова, Л. Ф. Архитектура взаимодействия служб в мобильной системе управления движением судов / Л. Ф. Борисова // Вестник МГТУ : Труды Мурманского гос. техн. ун-та. - 2005. - Т. 8, № 1. - С. 75-81.

10. Программа диспетчеризации движения судов в районе промысла в условиях ограниченной видимости для береговой диспетчерской службы : свидетельство об официальной регистр. программы для ЭВМ № 2004610851 / Л. Ф. Борисова, К. А. Орлов ; заявитель МГТУ ; заявл. 12.02.04; зарег. 07.04.04.

11. Программный интеллектуальный коммутатор для спутниковой радионавигационной системы в составе программного комплекса по обслуживанию виртуальной сети полос движения судов : свидетельство об официальной регистр. программы для ЭВМ № 2004610852 / Л. Ф. Борисова, К. А. Орлов ; заявитель МГТУ ; заявл. 12.02.04; зарег. 07.04.04.

12. Программный комплекс взаимодействия сетевых служб управления безопасным движением судов в условиях ограниченной видимости : свидетельство об официальной регистр. программы для ЭВМ № 2004610853, Россия / Л. Ф. Борисова, К. А. Орлов ; заявитель МГТУ ; заявл. 12.02.04; зарег. 07.04.04.

13. Программный координатор движения судна по траектории пути в условиях ограниченной видимости для судового навигационного комплекса : свидетельство об официальной регистр. программы для ЭВМ № 2004610854 / Л. Ф. Борисова, К. А. Орлов ; заявитель МГТУ ; заявл. 12.02.04; зарег. 07.04.04. 12.02.04; зарег. 07.04.04.

