

На правах рукописи



Иванов Виталий Витальевич

РАЗРАБОТКА БЕЗОПАСНЫХ СПОСОБОВ МАНЕВРИРОВАНИЯ
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ШВАРТОВНЫХ ОПЕРАЦИЙ К СУДНУ,
СТОЯЩЕМУ НА ЯКОРЕ

Специальность 05.22.19 – эксплуатация водного транспорта, судовождение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мурманск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Мурманский государственный технический университет"

Научный руководитель:

Юдин Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет", начальник морской академии

Официальные оппоненты:

Логиновский Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО "Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова", заведующий кафедрой навигации

Рамков Иван Анатольевич, кандидат технических наук, ФГУП "Полярный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича", второй помощник капитана

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО "Волжская государственная академия водного транспорта"

Защита диссертации состоится 25 декабря 2014 года в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 307.009.03 при ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет" по адресу: 183010, г. Мурманск, ул. Спортивная, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Мурманского государственного технического университета и на сайте МГТУ www.mstu.edu.ru.

Автореферат разослан "___" ноября 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Борисова Л. Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационного исследования определяется возросшим количеством швартовных операций в условиях открытого моря. Это связано с ускорившимся в последнее время изучением и освоением природных ресурсов шельфовой части северных и восточных морей Российской Федерации. Безопасность на море вообще, и безопасность швартовных операций в частности, всегда будет актуальной проблемой, решение которой потребует большого количества научно-исследовательских работ в области судовождения. Если швартовные операции будут выполняться с целью перегрузки нефти или нефтепродуктов, что весьма вероятно при сегодняшнем развитии событий в сфере освоения нефтяных и газовых месторождений морского шельфа, актуальность темы безопасности швартовной операции увеличится на порядок. При этом нельзя забывать, что по-прежнему значима актуальность решения вопроса безопасности швартовных операций в условиях открытого моря для промысловых судов, занятых ловом рыбы и других морепродуктов.

Целью диссертационного исследования является разработка безопасного способа выполнения швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

- проведение подробного анализа характера поведения судна, стоящего на якоре и выявление основных закономерностей в его движении;
- проведение аналитической оценки используемых в современной морской практике способов и методов выполнения швартовных операций к борту судна, стоящего на якоре, с целью определения наиболее оптимальных из них, с точки зрения безопасности;
- разработка инновационного способа управления судном, швартуемым к борту судна, стоящего на якоре, с использованием современных технических средств измерения параметров движения судна, его управления, компьютерных и информационных технологий;

- разработка математической модели движения швартуемого судна при одновременном действии ветра, течения и волнения в условиях вероятного мелководья;

- разработка математической модели движения судна, стоящего на якоре при одновременном действии ветра, течения и волнения в условиях вероятного мелководья и с учетом динамических характеристик якорной системы;

- проведение расчетных исследований с целью оценки адекватности разработанных математических моделей движения судов, участвующих в швартовой операции, идентификация полученных моделей, с использованием имеющихся данных натуральных экспериментов;

- проведение серии модельных экспериментов для определения возможности практического использования разработанного инновационного способа на базе математических моделей движения швартуемого и швартуемого судов.

Объектом исследования является судно, выполняющее швартовую операцию к борту судна, стоящего на якоре.

Предмет исследования – оценка возможности безопасного выполнения швартовой операции к борту судна, стоящего на якоре, в реальных погодных условиях с использованием разработанного способа управления судном.

Научная значимость работы. В диссертационном исследовании получены следующие основные результаты, определяющие ее научную значимость:

- структурированы и идентифицированы математические модели, описывающие движение судна, стоящего на якоре, и швартуемого к нему судна;

- разработаны компьютерные программы для моделирования движения судна, стоящего на якоре, и швартуемого к нему судна;

- разработан способ управления движением швартуемого судна с использованием спутниковых навигационных систем высокой точности;

– проведен модельный эксперимент, подтверждающий эффективность использования разработанного способа управления траекторией движения швартуемого судна;

– произведена оценка эффективности использования разработанного способа управления траекторией движения швартуемым судном.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялся экспериментально-теоретический метод исследования. Для выполнения теоретической части использовался аппарат дифференциальных уравнений, теории оптимального управления, математической статистики, теории аппроксимаций. Экспериментальная часть заключалась в проведении модельных экспериментов по управлению движением швартуемого судна в различных гидрометеорологических условиях с использованием специально созданного с участием автора комплекса программ для ЭВМ в системе программирования VisualBasic (VB6). На всех этапах работы широко использовалась вычислительная техника. Так, при аппроксимации всех аналитических зависимостей применялся математический пакет MathCAD 7.0.

Практическая ценность. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для практической оценки безопасности проведения швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре, с учетом погодных условий в районе проведения швартовной операции.

Разработанный способ управления траекторией движения швартуемого судна рекомендован к использованию на судах, выполняющих швартовные операции в открытом море.

Разработанные в процессе проведения исследований математические модели движения судна, стоящего на якоре, и швартуемого судна могут быть использованы при создании специализированного тренажера по выполнению швартовных операций.

Реализация работы. Результаты, полученные в рамках диссертационного исследования, положены в основу разработки рекомендаций по безопасному управлению траекторией движения судна, швартуемого в сложных

погодных условиях, а также зарегистрированы в виде патента "Способ прогнозирования движения объекта швартовки" в реестре Федеральной службы интеллектуальной собственности РФ (27 августа 2012 г.).

Результаты анализа материалов исследований представлены в соответствующих разделах учебного курса дисциплин "Управление судном" (специальность 180402.65 "Судовождение") и "Теоретические аспекты управления судном" (специальность 05.22.19 "Эксплуатация водного транспорта, судовождение"), разработанного для аспирантов кафедры судовождения Мурманского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее отдельные результаты были представлены в виде докладов и получили положительную оценку на международной научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава МГТУ в 2013 г., на международной научно-практической конференции "Наука и образование" в г. Прага (Чехия) в 2013 г., на международной научно-практической конференции "Ключевые аспекты научной деятельности" в г. Пшемысль (Польша) в 2014 г.

Личный вклад автора. Результаты диссертационной работы опубликованы в десяти научных работах, в том числе в соавторстве с другими специалистами в области управления судном и математического моделирования процессов движения судна. Вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве, составляет 50 %. Получены авторское свидетельство на программный продукт "Математическое моделирование процесса буксировки для буксиров с поворотными рулевыми колонками" и патент на изобретение "Способ прогнозирования движения объекта швартовки".

Публикации. Основные результаты работы отражены в четырех научных статьях, три из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получены патент на изобретение и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, подана заявка на изобретение.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель движения судна, стоящего на якоре, и модель швартуемого к нему судна.
2. Методика расчета воздействия ветра, течения и морского волнения, а также мелководья на суда, участвующие в швартовке.
3. Программные средства реализации разработанных математических моделей.
4. Оценка характера поведения судна, стоящего на якоре по результатам модельных экспериментов.
5. Способ управления траекторией движения швартуемого судна.
6. Оценка качества управления траекторией движения швартуемого судна при выполнении швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре, с использованием разработанного способа управления.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации – 173 страниц, в том числе – 20 таблиц, 89 рисунков. Список литературы включает 52 источника.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность и необходимость решения задач, связанных с обеспечением безопасности выполнения швартовной операции за счет совершенствования способов и методов управления швартуемым судном, определяются цель и основные задачи, которые необходимо решить для ее достижения.

В **первой главе** выполнен анализ основных закономерностей в характере движения судна, стоящего на якоре, и на его основе определено, что судно, стоящее на якоре, при воздействии на него ветра, течения и волнения моря находится в состоянии постоянного движения и непрерывно изменяет свое положение относительно линии отданного якоря. Особенности движения стоящего на якоре судна, другими словами, характер его рыскания зависит

от целого ряда факторов, наиболее значимыми из которых являются следующие:

- главные размерения корпуса судна, его водоизмещение;
- архитектурные особенности надводной части корпуса судна, надстроек и рубок, в частности, место расположения большей надстройки относительно плоскости мидель-шпангоута;
- текущее состояние загрузки судна, определяющее посадку (осадка, дифферент) корпуса в воде;
- координаты точки крепления якорной цепи;
- количество отданной якорной цепи;
- глубина места якорной стоянки и ее соотношение с количеством отданной якорной цепи;
- характер грунта в месте якорной стоянки;
- держащая сила якорной системы (якорь и якорная цепь);
- гидрометеорологические условия в районе места якорной стоянки;
- соотношения между основными параметрами (направление, скорость) ветра, течения и волнения.

Рассмотрены существующие способы управления траекторией движения судна, которое выполняет швартовную операцию к борту судна, стоящего на якоре, в различных условиях плавания, определены основные критерии оценки безопасности выполнения швартовной операции. Установлены основные принципы управления судном, выполняющим швартовную операцию к борту судна, стоящего на якоре, а именно:

- выход к борту судна, стоящего на якоре, осуществляется только с его подветренного борта, при этом швартовующееся судно на протяжении всего маневрирования должно двигаться с минимально возможным курсовым углом к ветру или течению; если в районе выполнения швартовной операции присутствуют оба фактора, влияющих на управляемость, при выборе курса выхода к борту швартовующего судна следует отдавать предпочтение

направлению течения при небольших скоростях ветра или осредненному направлению ветра и течения; когда осредненное направление ветра и течения определить сложно, необходимо ориентироваться на линию, проходящую через место расположения якоря и среднюю точку траектории движения на якоре швартуемого судна;

- судоводителю швартуемого судна необходимо предельно точно прогнозировать не только траекторию движения собственного судна, но и траекторию движения швартуемого судна, постоянно соизмеряя взаимные положения обоих судов в процессе маневрирования с учетом скоростей их перемещения;

- при выходе на швартовку судоводителю необходимо оценить степень защищенности швартуемого судна от волны и ветра как в момент первого контакта швартуемых судов, так и при дальнейшей совместной стоянке с учетом соблюдения условий безопасности выполнения грузовых операций; определять положение швартуемого судна в момент выхода швартуемого судна к борту швартуемого судна и в соответствии с этим выбрать режим маневрирования курсом и скоростью; учитывать направление якорной цепи относительно выбранного борта швартовки, отдавая предпочтение борту, противоположному борту отдачи якоря.

Представлен и описан предлагаемый автором способ управления траекторией движения швартуемого судна с использованием следующих судовых технических средств:

- приемников спутниковой навигационной системы (СНС), установленных в двух, разнесенных по длине судна точках, определяющих текущие координаты последних;

- бортового компьютера, обеспечивающего обработку информации, поступающей с приемников СНС, и определяющего параметры сигнала управления;

- судовых средств управления движением швартуемого судна, осуществляющих управление им при движении по заданной траектории.

Во **второй главе** произведено построение математической модели движения судна, стоящего на якоре.

Модель представляет собой три дифференциальных уравнения первого порядка: два первых уравнения для продольной v_x и поперечной v_y составляющих линейной скорости судна v , третье – для угловой скорости ω .

$$(m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} - (m + \lambda_{22}) v_y \omega = X_k + X_a + X_w + X_r + X_{tr} + X_{pr} + T_e;$$

$$(m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} + (m + \lambda_{11}) v_x \omega = Y_k + Y_a + Y_w + Y_r + Y_{tr} + Y_{pr};$$

$$(I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega}{dt} = M_k + M_a + M_w + M_r + M_{tr} + M_{pr}.$$

Присоединенные массы судна λ_{11} , λ_{22} и присоединенный момент инерции λ_{66} определяются известными в теории корабля способами.

Для полного описания модели рассмотрены все усилия и моменты, входящие в правую часть уравнений. В данных уравнениях силы и моменты имеют соответствующие индексы, в частности гидродинамические корпусные "k", аэродинамические "a", от волнения "w", руля "r", якорной цепи "tr", подруливающего устройства "pr"; тяги движителя обозначены как T_e .

Гидродинамические усилия, образующиеся на корпусе судна, выражаются через соответствующие гидродинамические коэффициенты C_{kx} , C_{ky} , C_{km} , C_{m0} , $C_{m\omega}$ и имеют следующий вид:

– продольная составляющая $X_k = C_{kx} 0,5 \rho F_{dp} v^2$;

– поперечная составляющая $Y_k = C_{ky} 0,5 \rho F_{dp} v^2$;

– вращающий момент

$$M_k = 0,5 \rho F_{dp} L [C_{km} v^2 - C_{m0} L^2 / \omega / \omega - C_{m\omega} (1/\pi) \cdot (v^2 + L^2 \omega^2) \sin \pi \Omega],$$

где ρ – массовая плотность воды; F_{dp} – приведенная площадь погруженной части диаметрального батокса судна; L – длина судна по ватерлинии.

Обобщенная скорость вращения Ω введена для описания произвольных движений судна, в том числе чистого движения лагом ($\Omega = 0$) и вращения

на месте ($\Omega = 1$). При этом сами гидродинамические коэффициенты определяются следующими формулами:

$$C_{kx} = -0.27 \cdot \sin[(\pi - \varphi) \cdot (1 - \text{Abs}(\beta^\circ / 90.5))],$$

где $\sin \varphi = (C_{x0}/0.27)$; C_{x0} – коэффициент сопротивления воды движению судна с нулевым углом дрейфа ($\beta = 0$) со скоростью, равной v_0 ;

$$C_{x0} = R(v_0) / [(\rho/2) v_0^2 F_{dp}],$$

где $R(v_0)$ – сопротивление воды движению судна при установившемся значении линейной скорости v_0 на переднем ходу;

$$C_{ky} = 0.5 C_{y\beta}^\beta \sin 2\beta \cos \beta + c_2 |\sin \beta| \sin \beta + c_3 |\sin \beta| \sin^3 2\beta;$$

$$C_{km} = m_1 \sin 2\beta + m_2 \sin \beta + m_3 \sin^3 2\beta + m_4 |\sin 2\beta| \sin^3 2\beta;$$

$$C_{m0} = 0.059 c_2;$$

$$C_{m\omega} = C_{km}^\omega + a_1 |\sin \beta| + a_2 \{1 - \cos[(2\pi - 4|\beta|)\cos \beta + 0.1 |\sin 2\beta|]\};$$

$$C_{km}^\omega = (0.739 + 8.7d/L) \cdot (1.611\sigma_d^2 - 2.873\sigma_d + 1.33),$$

где $C_{y\beta}^\beta$, c_2 , c_3 , m_1 , m_2 , m_3 , m_4 , a_1 , a_2 – гидродинамические коэффициенты, определяемые способами, описанными в справочнике по теории корабля; σ_d – приведенный коэффициент полноты площади диаметрального батокса.

Влияние мелководья учитывается с помощью следующих формул:

$$\lambda_{11H} = \lambda_{11\infty} \cdot k_{11H}; \quad \lambda_{22H} = \lambda_{22\infty} \cdot k_{22H}; \quad \lambda_{66H} = \lambda_{66\infty} \cdot k_{66H},$$

$$k_{11H} = 1.004 - 0.275(d/H) + 2.798(d/H)^2;$$

$$k_{22H} = 0.998 + 0.403(d/H) - 1.586(d/H)^2 + 5.487(d/H)^3;$$

$$k_{66H} = 0.997 + 0.358(d/H) + 0.814(d/H)^2 + 2.271(d/H)^3,$$

где H – глубина места якорной стоянки; d – осадка судна.

Изменения гидродинамических усилий на корпусе судна учитываются с помощью мультипликативных поправок следующим образом:

$$C_{y\beta H}^{\beta} = C_{y\beta\infty}^{\beta} k_y^{\beta}; C_{y\omega H}^{\omega} = C_{y\omega\infty}^{\omega} k_y^{\omega}; C_{m\beta H}^{\beta} = C_{m\beta\infty}^{\beta} k_m^{\beta}; C_{m\omega H}^{\omega} = C_{m\omega\infty}^{\omega} k_b^{\omega};$$

$$k_y^{\beta} = 1 + (2.38 - 11 \cdot (d/L)) (d/H)^3; k_y^{\omega} = 1 + 3.4 \cdot (d/H)^{2.25};$$

$$k_m^{\beta} = 1 + [0.55 + 58.1 \cdot (1 - \sigma_a) - 203 \cdot (1 - \sigma_a)^2] \cdot (d/H)^2;$$

$$k_m^{\omega} = 1 + 0.0181 \cdot [(B/d) - 1.2]^3 \cdot (d/H) + 1.17 \times$$

$$\times 9[1 + 0.214 \cdot (B/d) - 3.4]^2 \cdot (d/H)^2,$$

где B – ширина судна; σ_a – коэффициент полноты площади кормовой части диаметрального батокса.

Аэродинамические усилия определяются с использованием известных выражений

$$X_a = 0.5 C_{ax} \rho_a \nu_R^2 S_m;$$

$$Y_a = 0.5 C_{ay} \rho_a \nu_R^2 S_{dp};$$

$$M_a = 0.5 C_{am} \rho_a \nu_R^2 S_{dp} L,$$

где C_{ax} , C_{ay} , C_{am} – аэродинамические коэффициенты, определяемые по методике Ишервуда; ρ_a – массовая плотность воздуха; ν_R – кажущаяся скорость ветра; S_{dp} , S_m – площади проекции надводной части судна на диаметральную плоскость и плоскость мидель-шпангоута соответственно.

Силовые воздействия на судно, стоящее на якорю, разделены на детерминированные и случайные, детерминированные воздействия, в свою очередь, на постоянные и переменные. Случайные воздействия происходят из-за нерегулярного волнения и оцениваются статистически с помощью обычных характеристик – средних значений и дисперсий.

Постоянные составляющие вычисляются с помощью группы формул, по структуре похожих на формулы для гидродинамических или аэродинамических усилий:

$$R_{wx} = 0.5 C_{wx} \rho g \zeta_w^2 L; R_{wy} = 0.5 C_{wy} \rho g \zeta_w^2 L; M_w = 0.5 C_{wm} \rho g \zeta_w^2 L^2,$$

где A – амплитуда регулярного волнения; C_{WX}, C_{WY}, C_{WM} – коэффициенты продольного и поперечного воздействий со стороны волнения и вращающего момента.

Значения коэффициентов определяются с использованием аппроксимирующих функций, полученных на основе данных эксперимента:

$$C_{WX}(\bar{\lambda}, q_w) = A(q_w) + B(q_w) \bar{\lambda} + C(q_w) \bar{\lambda}^2 + D(q_w) \bar{\lambda}^3;$$

$$C_{WY}(\bar{\lambda}, q_w) = A(q_w) + B(q_w) \bar{\lambda} + C(q_w) \bar{\lambda}^2 + D(q_w) \bar{\lambda}^3;$$

$$C_{WM}(\bar{\lambda}, q_w) = A(q_w) + B(q_w) \bar{\lambda} + C(q_w) \bar{\lambda}^2 + D(q_w) \bar{\lambda}^3,$$

где $\bar{\lambda} = \lambda/L$ (λ – длина волны); q_w – курсовой угол волны.

Переменные составляющие воздействия изменяются во времени по следующему закону:

$$X_w = X_{w0} \cdot \sin(\omega_k t); Y_w = Y_{w0} \cdot \alpha_{w0} \cdot \cos(\omega_k t); M_w = M_{w0} \cdot \alpha_{w0} \cdot \sin(\omega_k t).$$

Здесь X_{w0}, Y_{w0}, M_{w0} – амплитуды сил и момента; α_{w0} – угол волнового склона; ω_k – кажущаяся частота набегающей волны.

Для нерегулярного волнения среднее значение и дисперсию усилий на корпусе рассчитывают по интегральным формулам:

$$\bar{X}_w = \int_0^{\infty} \frac{X_w}{\zeta_w^2} S_{\zeta}(\omega) d\omega; D_{X_w} = \int_0^{\infty} \left| \frac{\tilde{X}_w}{\zeta_w} \right|^2 S_{\zeta}(\omega) d\omega,$$

где \tilde{X}_w – центрированное значение усилия, т. е. разность между самым усилием и его средним значением; $S_{\zeta}(\omega)$ – спектральная плотность волнения.

В расчетах для условий мелководья используется спектральная плотность ТМА в следующем виде:

$$S_{\zeta}^{TMA}(\omega, h_{3\%}, H) = \Phi(\omega, H) \cdot S_{\zeta}^{JS}(\omega, h_{3\%}),$$

где S_{ζ}^{JS} – спектральная плотность JONSWAP на глубокой воде ($H = \infty$); $h_{3\%}$ – высота волны 3 %-й обеспеченности; $\Phi(\omega, H)$ – поправочная функция частоты спектра за глубину моря H .

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты моделирования движения судна, стоящего на якоре в реальных условиях плавания, т. е. с учетом всех известных внешних воздействий, возможных в районе якорной стоянки. Для выполнения моделирования траектории движения судна, стоящего на якоре, предварительно разработано математическое описание силового воздействия на судно якорной цепи.

Параметры, характеризующие положение якорной цепи, определяются из двух граничных условий: $z(0) = 0$, $z(x_K) = z_K$ (z_K, x_K – координаты клюза; z – координата клюза в системе координат, связанной с судном), следствием которых является система уравнений:

$$\begin{cases} a \cdot ch\left(\frac{-c_1}{a}\right) - c_2 = 0; \\ a \cdot ch\left(\frac{x_K - c_1}{a}\right) - c_2 = z_K, \end{cases}$$

а также интегральное уравнение, определяющее длину l цепной линии:

$$l = a \cdot sh\left(\frac{\tilde{x} - c_1}{a}\right) \Big|_0^{x_K} = a \cdot \left[sh\left(\frac{x_K - c_1}{a}\right) - sh\left(\frac{-c_1}{a}\right) \right],$$

где c_1, c_2, a – параметры якорной цепи.

К системе трех дифференциальных уравнений динамики добавлено два дифференциальных кинематических уравнения перемещений:

$$\frac{dX}{dt} = v_x \cdot \cos(K - \beta); \quad \frac{dY}{dt} = v_y \cdot \sin(K - \beta),$$

где K – курс судна на якоре; β – угол дрейфа; X, Y – координаты центра тяжести судна в неподвижной координатной системе XOY .

При моделировании поведения судна, стоящего на якоре, в качестве характерного примера представлен случай, когда на объект действует ветер и волнение, вызванное ветром. Начальное положение ЦТ судна в точке $(0; 0)$, его курс 60° . Ветер имеет направление 60° и скорость 10 м/с. Длина якорной

цепи 100 м, сам якорь Холла находится в точке с координатами (144; 82) при длине танкера 147 м.

Перемещения судна в течение 5 600 с (92 мин) показаны на рис. 1, на котором хорошо видно, что происходит характерный автоколебательный процесс вокруг направления 60° , которое на рис. 1 показано начальным направлением якорной связи. При этом длина якорной связи изменяется.

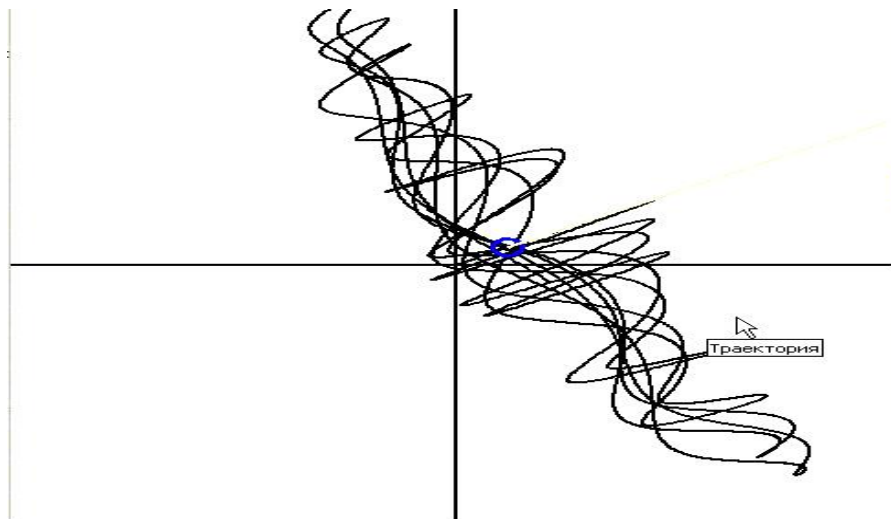


Рис. 1. Перемещения танкера на якорной связи ($v_a = 10$ м/с + вызванное волнение, показано начальное направление якорной цепи 60° , радиус 14 м)

На рис. 2 показаны изменения курса судна, угловой скорости вращения и угла дрейфа судна во времени.

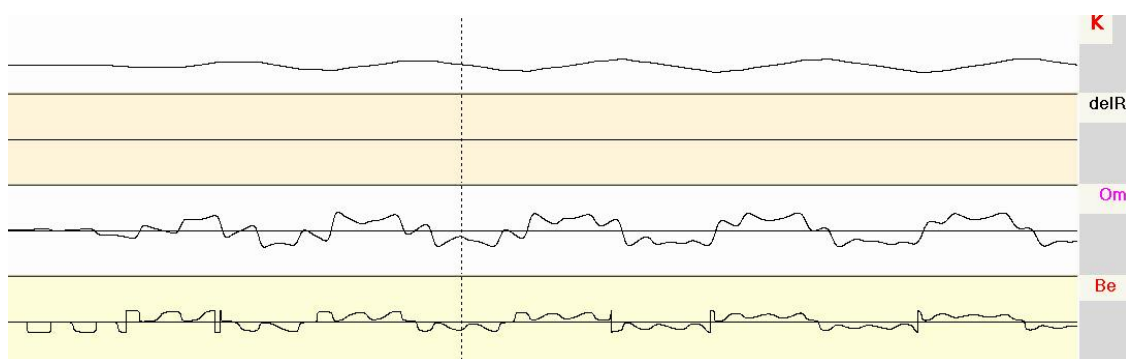


Рис. 2. Графики изменения курса судна, угловой скорости вращения и угла дрейфа

Наиболее сильные изменения претерпевает угол дрейфа, так как кроме смены его при повороте знака происходит смена направления движения

судна. Последнее обстоятельство ведет к изменению угла дрейфа с 0° на 180° .

На рис. 3 представлены частотные характеристики перемещений и их скоростей, которые показывают преобладание в процессах второй и десятой гармоник.

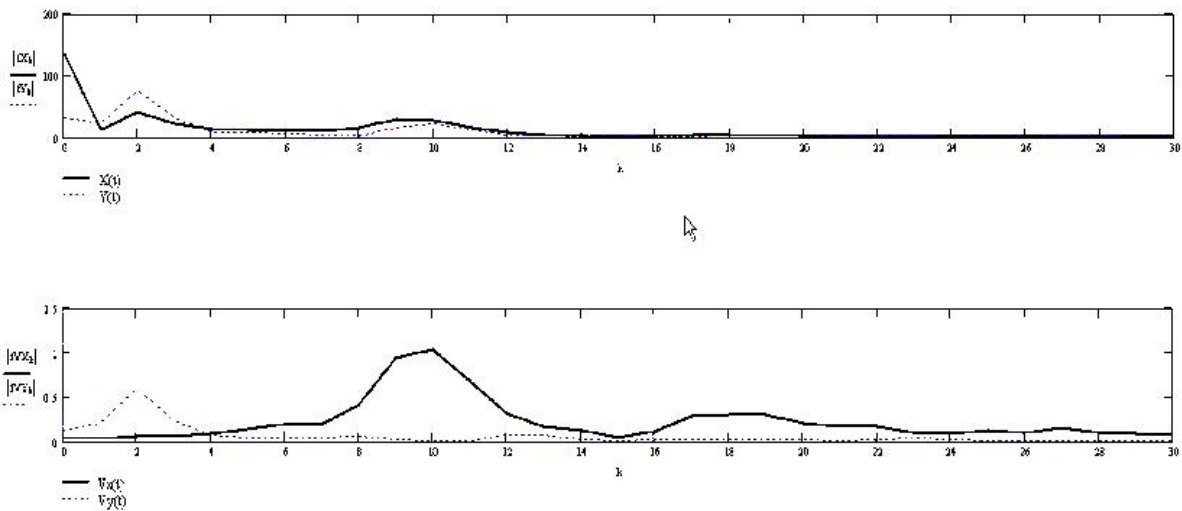


Рис. 3. Частотные характеристики процессов перемещений X, Y и их скоростей v_x, v_y вдоль неподвижных осей координат

Этим гармоникам соответствует периодичность в 205 и 1 025 с. Эти две главные периодичности видны и на рис. 2, особенно на графиках угловой скорости и угла дрейфа. Более скрыты, но, тем не менее, заметны эти периодичности и на рис. 1.

В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты моделирования швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре с использованием способа представленного автором работы в гл. 1 диссертации.

Предложен дополнительный, более совершенный по сравнению с ранее описанным принцип формирования управляющего сигнала на основе закона управления, определяющего скорость перекладки руля (рис. 4):

$$v_\alpha = -k_A d_A + k_B d_B.$$

Этот закон управления достаточно универсален и содержит зону нечувствительности ($\text{sign} < \text{lim1}$), зону насыщения ($\text{sign} > \text{lim2}$) и переходную между ними зону ($\text{lim1} < \text{sign} < \text{lim2}$) линейного изменения скорости перекадки. Закон предполагает асимметричное отображение для отрицательных значений сигнала ($\text{sign} < 0$). В этих зонах скорость перекадки меняется следующим образом (для $\text{sign} > 0$):

$$\begin{aligned} v_{\alpha} &= 0 & \text{sign} & \leq \text{lim1} \\ v_{\alpha} &= v_{\alpha \text{max}} \frac{\text{sign} - \text{lim1}}{\text{lim2} - \text{lim1}} & \text{lim1} & < \text{sign} < \text{lim2} \\ v_{\alpha} &= v_{\alpha \text{max}} & \text{sign} & \geq \text{lim2} \end{aligned}$$

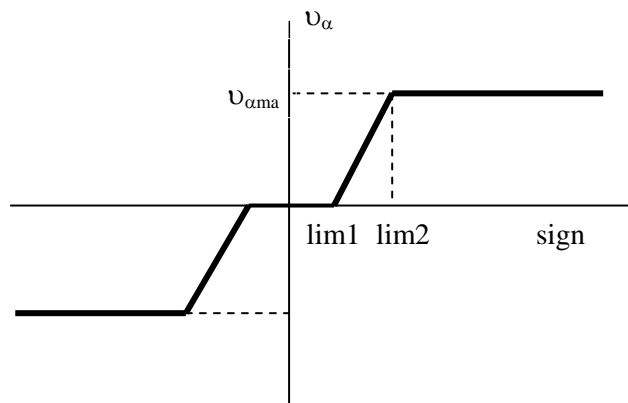


Рис. 4. Зависимость скорости перекадки руля от сигнала управления sign

На первом этапе швартовки необходимо выйти в некоторую точку линии прицеливания (ЛП), удаленную от цели на заданное расстояние. Координаты такой точки легко находятся по заданному расстоянию от цели D и параметрическому уравнению ЛП

$$\begin{aligned} x &= x_z + dd0 \cdot \cos(K_z) + D \cdot \sin(K_z); \\ y &= x_z + dd0 \cdot \sin(K_z) - D \cdot \cos(K_z). \end{aligned}$$

Здесь $dd0$ параллельное смещение ЛП от цели, а параметры с индексом z относятся к самой цели. Управляющий сигнал формируется как пропорциональный отклонению курса швартуемого судна от направления на переменную точку с координатами x, y . Для танкера типа "Астрахань" результаты

такого моделирования показаны на рис. 5, где приведены три траектории, которые отличаются начальным курсом судна.

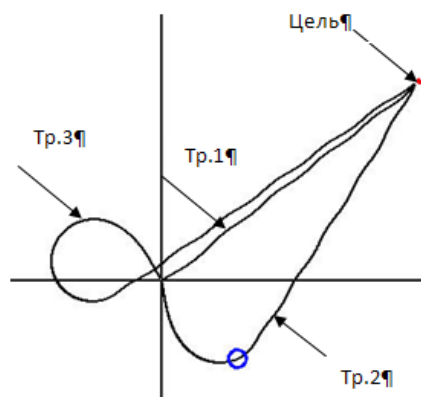


Рис. 5. Траектории подхода к цели танкера типа "Астрахань" с управлением по отклонению курса от направления на цель

Подчеркнем, что система управления даже в этом случае работает правильно и движение к цели завершается нужным образом. На рис. 6 показаны изменения курса судна и угла перекадки руля при движении вдоль траектории № 1.

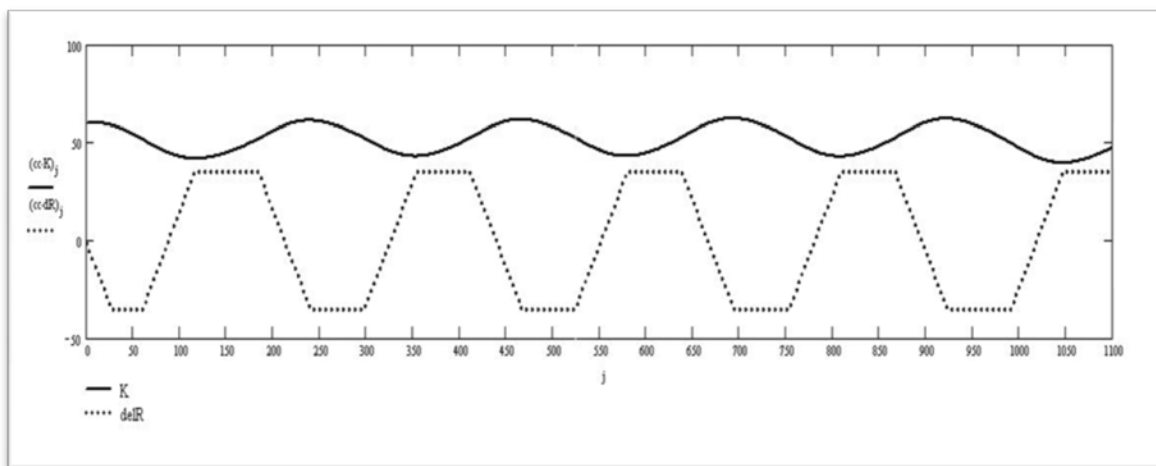


Рис. 6. Изменение курса судна и угла перекадки руля на траектории № 1 (танкер типа "Астрахань")

В процессе моделирования установлено, что для повышения качества управления швартующимся судном закон управления должен быть более сложным и включать, например, скорость изменения направления на целе-

вую точку. В этом случае управляющий сигнал формируется следующим образом:

$$\text{sign} = a_1 \cdot (K - \psi_z) + a_2 \cdot (\psi_z'),$$

где a_1, a_2 – коэффициенты усиления по отклонению курса и скорости изменения угла визирования цели; ψ_z – текущее значение курса швартуемого судна.

Сам закон управления скоростью перекладки руля формально содержит зону нечувствительности ($\text{sign} < \text{lim1}$), зону насыщения ($\text{sign} > \text{lim2}$) и зону линейного изменения скорости ($\text{lim1} < \text{sign} < \text{lim2}$):

$$\begin{aligned} v_\alpha &= 0 & \text{sign} & \leq \text{lim1} \\ v_\alpha &= v_{\alpha \text{max}} \frac{\text{sign} - \text{lim1}}{\text{lim2} - \text{lim1}} & \text{lim1} & < \text{sign} < \text{lim2} \\ v_\alpha &= v_{\alpha \text{max}} & \text{sign} & \geq \text{lim2} \end{aligned}$$

Поведение системы управления и ее качество зависят от выбора параметров $a_1, a_2, \text{lim1}, \text{lim2}$. На рис. 7 для сравнения показаны три траектории с различными наборами параметров.

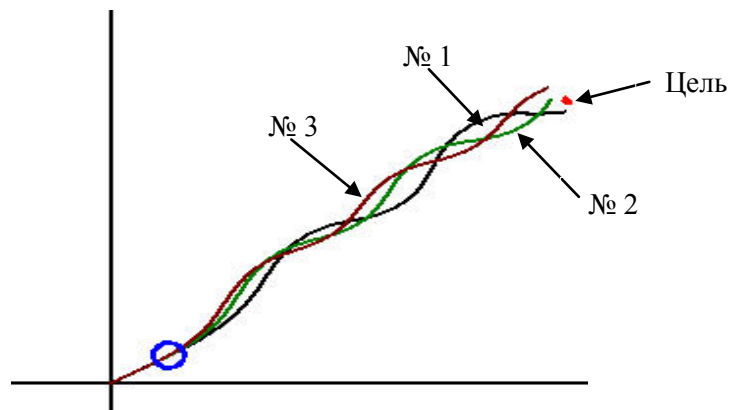


Рис. 7. Траектории танкера типа "Астрахань" при различных параметрах закона управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных модельных испытаний с двумя различными типами судов (танкер типа "Астрахань" и РТ типа "Б. Зайцев") в разных условиях плавания можно сделать несколько принципиальных выводов.

Подход швартуемого судна к объекту швартовки, находящемуся на якорной стоянке, разделяется естественным образом на три этапа с разными способами управления судном.

Этап 1. Движение на переменную точку, которая определяется как точка на линии прицеливания, удаленная от цели на заданное расстояние. Его величина определяется из расстояния тормозного пути при сбросе скорости судна от ходовой до скорости швартовки. Движение на этом этапе происходит на ходовой скорости. Управление происходит по отклонению курса судна от направления на целевую точку.

Этап 2. Движение вдоль линии прицеливания, которая определяется как линия, параллельная курсу цели и удаленная от цели на заданное расстояние. Скорость на этом этапе уменьшается до скорости швартовки. Управление происходит при формировании управляющего сигнала по отклонениям носовой и кормовой точек ДП судна от линии прицеливания.

Этап 3. Подход к борту объекта швартовки. На этом этапе управление судном ведется вручную исходя из конкретных обстоятельств швартовки. Автоматизированная швартовка на этом этапе возможна только при наличии специальной техники, которая определяет расстояния и скорости точек швартуемого судна от объекта швартовки и индицирует эти данные на мониторе. Кроме того, такая автоматизация требует оборудования судна дополнительными движителями, например подруливающими устройствами или поворотными винтовыми колонками.

Три этапа предполагают движение вдоль прямых линий или близких к ним траекторий. Однако показано, что управление судном с формированием управляющего сигнала с помощью двух отклонений позволяет производить движение по сложным траекториям. При этом усложняется только вычис-

лительная часть алгоритма при определении этих самых отклонений, а самая суть управления остается неизменной. Это открывает перспективы применения данного метода управления для автоматического движения судна по заданной произвольной траектории.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

**Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах,
рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ**

1. Иванов, В. В. Определение параметров силового воздействия нерегулярного волнения на корпус судна / В. В. Иванов // Вестник МГТУ : труды Мурман. гос. техн. ун-та. – Мурманск, 2011. – Т. 14, № 3. – С. 477–480.

2. Иванов, В. В. Усилия, действующие на объект швартовки со стороны одиночной якорной связи / В. В. Иванов // Вестник МГТУ : труды Мурман. гос. техн. ун-та. – Мурманск, 2011. – Т. 14, № 4. – С. 724–727.

3. Юдин, Ю. И. Переменные составляющие воздействия регулярного волнения на корпус судна / Ю. И. Юдин, В. В. Иванов // Вестник МГТУ: труды Мурма. гос. техн. ун-та. – Мурманск, 2011. – Т. 14, № 3. – С. 471–476).

Статьи в сборниках научных трудов

4. Юдин, Ю. И. Компьютерное моделирование процесса движения судна, стоящего на якоре / Ю. И. Юдин, В. В. Иванов ; Мурман. гос. техн. ун-т. – Мурманск, 2011. – 43 с. : ил. + библиография : 12 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 22.09.2011, № 408-В2011.

5. Математическое моделирование процесса буксировки для буксиров с поворотными рулевыми колонками : Св-во офиц. рег. прогр. для ЭВМ 2011615003. Российская Федерация / Пашенцев С. В., Иванов В. В., Юдин Ю. И. ; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО "Мурман. гос. техн. ун-т". – 2011612969 ; заявл. 26.04.2011, дата рег. 24.06.2011.

6. Способ прогнозирования движения объекта швартовки : Пат. 2459742 Российская Федерация, МПК⁹ В 63 Н 25/42, В 63 В 43/20, В 63 В 39/14 / Юдин Ю. И., Иванов В. В., Глущенко Н. А. ; заявитель и патенто-

обладатель ФГБОУ ВПО "Мурман. гос. техн. ун-т". – № 2011108200/11 ;
заявл. 02.03.2011 ; опубл. 27.08.2012, бюл. № 24.

7. Способ управления судном при выполнении им швартовной операции к борту судна, стоящего на якоре : Заявка 2012143196. Российская Федерация, МПК⁹ В63Н25/00 / Юдин Ю. И., Иванов В. В., Холичев С. Н., Петров С. О. ; заявитель ФГБОУ ВПО "Мурман. гос. техн. ун-т". – № 012143196/11 ; заявл. 09.10.2012.

Отпечатано в издательстве МГТУ. 183010, Мурманск, Спортивная, 13.
Сдано в набор 29.10.2014. Подписано в печать 10.11.2014. Формат 60×84¹/₁₆.
Бум. типографская. Усл. печ. л. 1,00. Уч.-изд. л. 0,71. Заказ 203. Тираж 100 экз.

