

На правах рукописи



Каян Владислав Витальевич

РАЗРАБОТКА БЕЗОПАСНЫХ СПОСОБОВ  
МАНЕВРИРОВАНИЯ СУДНА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ  
БУКСИРНЫХ ОПЕРАЦИЙ

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:

Тихонов Вадим Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО "Волжская государственная академия водного транспорта", профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства

Слатин Кирилл Вадимович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО "Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова", доцент кафедры судовождения

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО "Калининградский государственный технический университет"

Защита диссертации состоится 25 декабря 2014 года в 18 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](http://www.mstu.edu.ru).

Автореферат разослан "\_\_\_" ноября 2014 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Борисова Л. Ф.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Буксировка судов морем относится к особым случаям морской практики, так как она не входит в их повседневную деятельность. Буксирная операция сопряжена с повышенным риском прежде всего потому, что в ней одновременно участвуют два или несколько судов, управление которыми – весьма сложная и специфическая задача практического судовождения. В данном диссертационном исследовании рассмотрен случай буксировки т/к типа "Астрахань" судном подобного класса. Эта частная ситуация имеет право на рассмотрение, так как практический интерес вызывает движение буксируемого судна при управлении им с помощью отклонений от диаметрали буксирующего судна.

В управлении буксирной системой (буксирующее судно – буксирный трос – буксируемое судно) имеется ряд особенностей, которые обусловлены свойствами управляемости системы двух судов, связанных гибкой связью, и до настоящего времени плохо изучены. При предварительной оценке безопасности выполнения буксирной операции управляемость буксирной системы не рассматривается, в частности, из-за отсутствия хорошо изученной и практически апробированной методики ее расчета. Поэтому разработка такой методики расчета управляемости буксирной системы, особенно в сложных условиях плавания, является очень актуальной. Предварительная оценка управляемости буксирной системы в сочетании с совершенными способами и методами управления движением буксирной системы позволит избежать сложных ситуаций, которые могут возникать в процессе выполнения буксирных операций.

Недостатком современного подхода к управлению буксирной системой является низкий уровень современных средств информационного обеспечения, отсутствие компьютерных технологий и инновационных датчиков информации о кинематических параметрах движения судна. В диссертационной работе ставится задача восполнить этот пробел и разработать соответствующую технологию управления буксируемым

судном в отдельности и буксируемой системой в целом с применением в качестве основных датчиков информации приемников спутниковых навигационных систем. Решение этой задачи актуализирует тему научного исследования.

**Целью работы** является разработка способов безопасного управления буксирной системой для повышения безопасности проведения буксирных операций.

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

- структурировать и идентифицировать математическую модель буксирной системы при воздействии аэродинамических и гидродинамических усилий на объекты буксирной системы, разработать компьютерную программу для моделирования движения буксирной системы;

- разработать способ управления траекторией движения буксируемого судна и провести модельный эксперимент, подтверждающий эффективность использования разработанного способа;

- разработать способ управления движением буксирной системы и провести модельный эксперимент с использованием разработанного способа;

- произвести оценку безопасности управления буксирной системой при использовании разработанных способов управления.

**Объектом исследования** является буксирная система.

**Предмет исследования** – оценка безопасного выполнения буксирной операции в реальных погодных условиях с использованием разработанного способа управления буксирной системой.

В диссертационной работе получены следующие **основные результаты, определяющие ее научную значимость**:

- структурирована и идентифицирована математическая модель буксирной системы при воздействии аэродинамических и гидродинамических усилий на объекты буксирной системы, разработана

компьютерная программа для моделирования движения буксирной системы;

– разработан способ управления траекторией движения буксируемого судна и проведен модельный эксперимент, подтверждающий эффективность использования разработанного способа;

– разработан способ управления движением буксирной системы и проведен модельный эксперимент с использованием разработанного способа;

– произведена оценка безопасности управления буксирной системой при использовании разработанных способов управления.

**Методы исследования.** При выполнении работы применялся экспериментально-теоретический метод исследования. В теоретической части использовался аппарат дифференциальных уравнений, теории оптимального управления, математической статистики, теории аппроксимаций; экспериментальная часть заключалась в обработке модельных экспериментов по управлению движением буксирной системы в различных гидрометеорологических условиях с помощью специально созданного с участием автора комплекса программ для ЭВМ в системе программирования VisualBasic (VB6). На всех этапах работы использовалась вычислительная техника. Так, при аппроксимации аналитических зависимостей применялся математический пакет MathCAD 7.0.

**Научная ценность** состоит в том, что в диссертационной работе решается научная задача повышения безопасности маневрирования судна при выполнении буксирных операций. Теоретические результаты, полученные

в диссертационном исследовании, а именно: математическая модель движения буксирующего и буксируемого судна, способ управления движением буксируемого судна, методика расчета воздействия морского волнения на суда, участвующие в буксировке, способ оценки влияния параметров буксирной системы на ее управляемость, способ управления

буксирной системой, методика оценки эффективности управления буксирной системой при проведении буксирных операций – положены в основу разработки рекомендаций по безопасному управлению траекторией движения судна при выполнении буксирных операций и зарегистрированы в виде патента на изобретение "Способ управления траекторией движения буксируемого судна" в реестре Федеральной службы интеллектуальной собственности РФ (27 декабря 2012 г.).

**Практическая ценность.** Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе при проведении лекционных и практических занятий, что подтверждено соответствующим актом о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс ФГБУ "Мурманский государственный технический университет"; результаты диссертационной работы также могут быть использованы на практике при выполнении буксирных операций, что подтверждено соответствующей справкой о возможности применения результатов диссертационного исследования, выданной ФГБУ "Северный экспедиционный отряд аварийно-спасательных работ"; разработанная в процессе исследований математическая модель, описывающая динамику движения буксирной системой, может быть использована при создании специализированного тренажера по выполнению сложных буксирных операций.

**Реализация работы.** Материалы исследований внедрены в учебный процесс при проведении лекционных и практических занятий курса по дисциплине "Теоретические аспекты управления судном" для аспирантов высшего профессионального образования по специальности 05.22.19 "Эксплуатация водного транспорта, судовождение" и курса по дисциплине "Эксплуатация морского транспорта" для аспирантов высшего профессионального образования по специальности 05.22.19 "Эксплуатация водного транспорта, судовождение", по дисциплине "Автоматизация судовождения" для студентов высшего профессионального образования по специальности 180402.65 "Судовождение", что подтверждается

соответствующим актом внедрения в учебный процесс кафедры судовождения МГТУ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и ее отдельные результаты были доложены на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава МГТУ (2010–2013).

**Достоверность** и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием системного подхода, структурного анализа, комплексным характером исследования и проведением модельного эксперимента.

**Личный вклад автора.** Результаты диссертационной работы опубликованы в девяти печатных изданиях, в том числе в соавторстве с другими специалистами в области управления судном и математического моделирования его движения. Вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве, составляет 50 % и более. Получено свидетельство на программный продукт "Программа моделирования буксировки судна при его управлении с помощью отклонений от линии диаметральной плоскости (ДП) буксира", а также патент на изобретение "Способ управления траекторией движения буксируемого судна".

**Публикации.** Основные результаты работы отражены в девяти научных статьях, три из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Математическая модель движения буксирной системы.
2. Способ управления движением буксируемого судна.
3. Методика расчета воздействия морского волнения на суда, участвующие в буксировке.
4. Оценка влияния параметров буксирной системы на ее управляемость.
5. Методика оценки эффективности управления буксирной системой при проведении буксирных операций.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации – 147 страниц, в том числе 24 таблиц, 57 рисунков. Список литературы включает 52 источника.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность и необходимость решения задач, связанных с обеспечением безопасности выполнения буксирной операции за счет совершенствования способов и методов управления буксирной системой, определены цель и основные задачи исследования для ее достижения.

В **первой главе** проведен анализ связанных с безопасностью выполнения буксирных операций проблем и дана оценка их значимости, описаны виды буксировок, рассмотрен способ расчета управляемости буксирной системы, общие принципы оценки управляемости буксирующего судна, испытывающего дополнительное воздействие силы натяжения буксирного троса, и буксируемого судна.

Сформулированы требования, предъявляемые к способам решения задач, связанных с безопасным управлением буксирной системой в процессе удержания буксируемого судна на заданной траектории. В основу этих способов положены количественные соотношения между параметрами, характеризующими внешние воздействия, и кинематическими параметрами движения буксирной системы, которые требуют использования математического аппарата для обоснования получаемых решений, что, в свою очередь, приводит к необходимости математического моделирования процессов буксировки.

Описан способ управления траекторией движения буксируемого судна, сущность которого заключается в следующем. Для удержания буксируемого судна на заданной траектории движения, в качестве которой предложено рассматривать след диаметральной плоскости буксирующего судна,



необходимо определить отклонения носовой и кормовой точек буксируемого судна от линии ДП буксирующего судна, а затем, используя эти значения, следует сформировать сигнал управления, в соответствии с которым произвести перекладку руля на буксируемом судне (рис. 1).

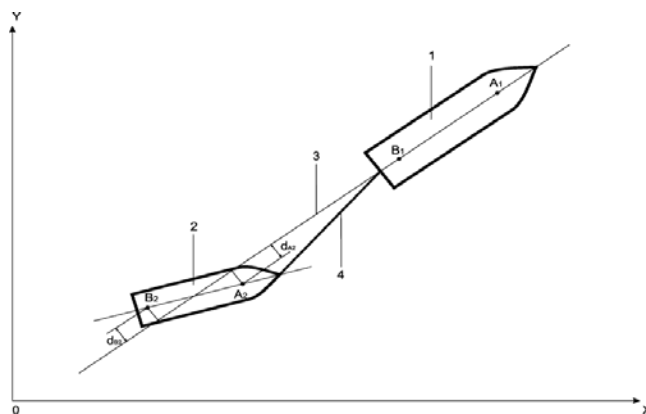


Рис. 1. Принципиальная схема управления траекторией движения буксируемого судна

Во **второй главе** показано построение математической модели буксируемого и буксирующего судов. За основу построения принята модель, предложенная А. П. Тумашиком для моделирования сложных маневров при решении практических задач судовождения в случае, когда судно выполняет движения с большими углами дрейфа.

Модель состоит из трех дифференциальных уравнений первого порядка: два первых уравнения описывают изменения скоростей продольного  $v_x$  и поперечного  $v_y$  перемещений судна, третье уравнение – изменение угловой скорости судна  $\omega$ . Для упрощения построения математической модели буксирной системы в качестве математических моделей буксирующего и буксируемого судов использована модель, параметры которой определены для танкера типа "Астрахань". Тип судна для моделирования выбран не случайно, так как математическая модель танкера идентифицирована по результатам многочисленных натурных экспериментов.

В математической модели гидродинамические усилия подводной части корпуса судна рассчитываются с помощью соответствующих

гидродинамических коэффициентов с использованием известных зависимостей:

С продольное усилие  $X_k = C_{kx} 0.5\rho F_{dp} v^2$ ; поперечное усилие  $Y_k = C_{ky} 0.5\rho F_{dp} v^2$ ; вращающий момент  $M_k = 0.5\rho F_{dp} L [C_{km} v^2 - C_{m0} L^2 |\omega| \omega - C_{m\omega} (1/\pi) (v^2 + L^2 \omega^2) \sin \pi \Omega]$ ,

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

Обобщенная скорость вращения  $\Omega$  введена для описания произвольных движений судна, в том числе чистого движения лагом ( $\Omega = 0$ ) и вращения на месте ( $\Omega = \pm 1$ ).

Гидродинамические коэффициенты  $C_{kx}$ ,  $C_{ky}$ ,  $C_{km}$ ,  $C_{m0}$ ,  $C_{m\omega}$  рассчитываются с использованием эмпирических формул, определенных по результатам многочисленных модельных экспериментов, выполненных в отечественных и зарубежных опытовых бассейнах, аэродинамических трубах

и на ротативных установках:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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;  $\sigma_d$  – приведенный коэффициент полноты площади диаметрального батокса.

Влияние мелководья учитывается с помощью формул:

$$\lambda_{11H} = \lambda_{11\infty} \cdot \lambda_{11H}; \lambda_{22H} = \lambda_{22\infty} \cdot \lambda_{22H}; \lambda_{66H} = \lambda_{66\infty} \cdot \lambda_{66H}.$$

Здесь  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{22}$ ,  $\lambda_{66}$  – присоединенные массы и присоединенный момент инерции; индекс  $H$  – значение параметра для мелководья, индекс  $\infty$  – для глубокой воды.

$$\begin{aligned} k_{11H} &= 1.004 - 0.275(d/H) + 2.798(d/H)^2, \\ k_{22H} &= 0.998 + 0.403(d/H) - 1.586(d/H)^2 + 5.487(d/H)^3, \\ k_{66H} &= 0.997 + 0.358(d/H) + 0.814(d/H)^2 + 2.271(d/H)^3, \end{aligned}$$

где  $H$  – глубина в районе буксировки;  $d$  – осадка судна.

Изменения гидродинамических усилий на корпусе судна учитываются с помощью мультипликативных поправок

$$C_{y\beta H}^\beta = C_{y\beta\infty}^\beta k_y^\beta \quad C_{y\omega H}^\omega = C_{y\omega\infty}^\omega k_y^\omega \quad C_{M\beta H}^\beta = C_{M\beta\infty}^\beta k_M^\beta \quad C_{M\omega H}^\omega = C_{M\omega\infty}^\omega k_M^\omega.$$

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

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

$$k_m^\omega = 1 + 0.0181 \cdot ((B/d) - 1.2)^3 \cdot (d/H) + 1.17 \cdot (1 + 0.214 ((B/d) - 3.4)^2) \cdot (d/H)^2,$$

где  $B$  – ширина судна;  $\sigma_a$  – коэффициент полноты площади кормовой части диаметрального батокса.

Пример расчета гидродинамических усилий на корпусе судна представлен на рис. 2.

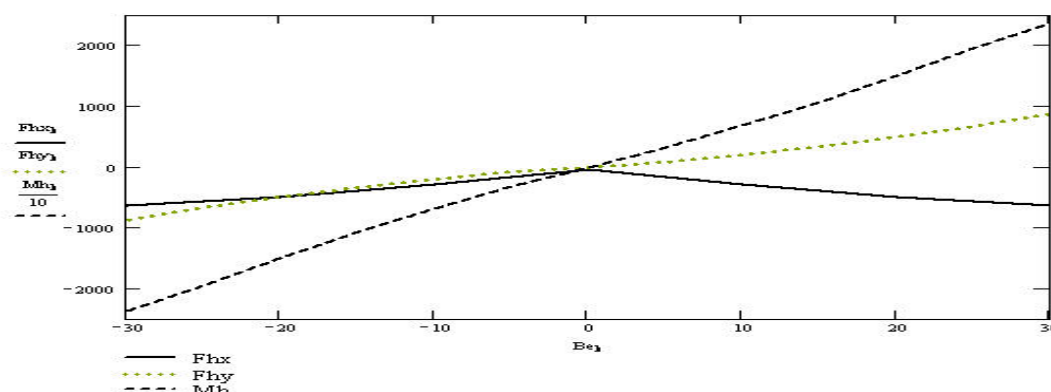


Рис. 2. Гидродинамические усилия как функции угла дрейфа  $\beta$ :

$F_{hx}$  – продольное усилие;  $F_{hy}$  – поперечное усилие;  $M_h$  – вращающий момент

Аэродинамические усилия определяются с использованием известных выражений:

$$X_a = 0,5C_{ax}\rho_a v_R^2 S_m; Y_a = 0,5C_{ay}\rho_a v_R^2 S_{dp}; M_a = 0,5C_{am}\rho_a v_R^2 S_{dp} L,$$

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

На рис. 3 представлены зависимости аэродинамических усилий от курсового угла ветра (танкер в грузу). Силовые воздействия волнения на буксирующее и буксируемое суда 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.

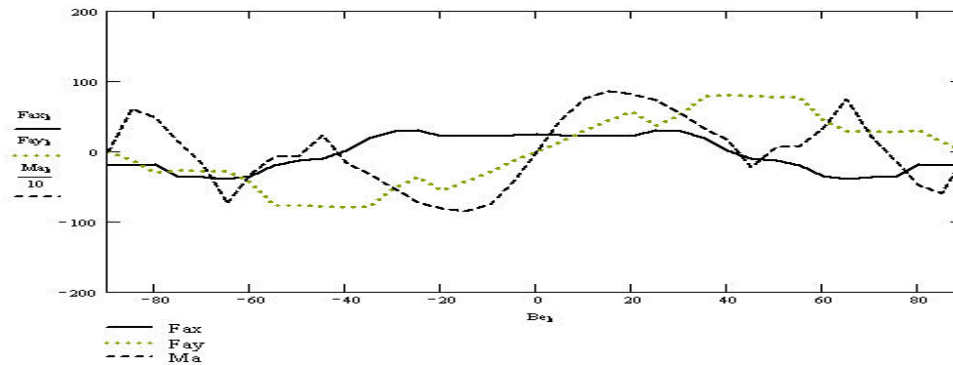


Рис. 3. Аэродинамические усилия в зависимости от курсового угла ветра:

$F_{ax}$  – продольное усилие;  $F_{ay}$  – поперечное усилие;  $M_a$  – аэродинамический момент

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

$$R_{wX} = 0.5C_{wX}\rho g\zeta_w^2 L; \quad R_{wY} = 0.5C_{wY}\rho g\zeta_w^2 L; \quad M_w = 0.5C_{wM}\rho g\zeta_w^2 L^2,$$

где  $\zeta_w$  – амплитуда регулярного волнения;  $C_{wX}$ ,  $C_{wY}$ ,  $C_{wM}$  – коэффициенты продольной и поперечной составляющей гидродинамических воздействий волнения и ее вращающего момента.

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

$$\begin{aligned} C_{wX}(\bar{\lambda}, q_w) &= A(q_w) + B(q_w) \cdot \bar{\lambda} + C(q_w) \cdot \bar{\lambda}^2 + D(q_w) \cdot \bar{\lambda}^3, \\ C_{wY}(\bar{\lambda}, q_w) &= A(q_w) + B(q_w) \cdot \bar{\lambda} + C(q_w) \cdot \bar{\lambda}^2 + D(q_w) \cdot \bar{\lambda}^3, \\ C_{wM}(\bar{\lambda}, q_w) &= A(q_w) + B(q_w) \cdot \bar{\lambda} + C(q_w) \cdot \bar{\lambda}^2 + D(q_w) \cdot \bar{\lambda}^3, \end{aligned}$$

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

Переменные составляющие гидродинамической силы воздействия волнения и ее вращающего момента изменяются во времени по следующему закону:

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

Здесь  $X_{w0}$ ,  $Y_{w0}$ ,  $M_{w0}$  – амплитуды сил и момента;  $\alpha_w$  – угол волнового склона;  $\omega_k$  – кажущаяся частота набегающей волны.

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

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

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

В расчетах для условий мелководья используется спектральная плотность ТМА в виде

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

где  $S_{\zeta}^{\text{JS}}$  – 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** выполнено исследование процесса буксировки с использованием математической модели буксирной системы, рассмотрено влияние различных параметров буксирной системы на устойчивость движения буксируемого судна в случае его неуправляемого движения, например влияние места крепления буксирного троса на буксируемом судне, с использованием формулы для плеч:

$$\text{– позиционных сил } \bar{x}_{\beta} = \frac{C_{M\beta}^{\beta} - \chi \cdot \bar{l}_{RM} C_{YR}^{\alpha} \bar{A}_{RE}}{C_{Y\beta}^{\beta} + \chi \cdot C_{YR}^{\alpha} \bar{A}_{RE}};$$

$$\text{– демпфирующих сил } \bar{x}_{\omega} = \frac{C_{M\omega}^{\omega} + \chi \cdot \bar{l}_{RM}^2 C_{YR}^{\alpha} \bar{A}_{RE}}{2V(1 + k_{11}) / LA_{L\sigma} - (C_{Y\omega}^{\omega} + \chi \cdot \bar{l}_{RM} C_{YR}^{\alpha} \bar{A}_{RE})},$$

а также крайних значений плеча тяги буксирного троса

$$\bar{x}_T^* = 2\bar{x}_{\beta}\bar{x}_{\omega} / (\bar{x}_{\beta} + \bar{x}_{\omega}),$$

$$\bar{x}_T^{**} = \frac{(C_{Y\beta}^{\beta} + \chi \cdot C_{YR}^{\alpha} \bar{A}_{RE}) [2V(1 + k_{11}) / LA_{L\sigma} - (C_{Y\omega}^{\omega} + \chi \cdot \bar{l}_{RM} C_{YR}^{\alpha} \bar{A}_{RE})]}{[2V(1 + k_{22}) / LA_{L\sigma}] C_F} (\bar{x}_{\beta} - \bar{x}_{\omega}),$$

которые определяют область устойчивого движения буксируемого судна.

Установлено, что для рассматриваемого в работе буксируемого судна при двух вариантах его загрузки (в грузу, в балласте) справедливо соотношение  $\bar{x}_\beta > \bar{x}_\omega$ . Исходя из этого, можно сделать следующие выводы:

– если точка крепления троса находится в интервале между координатами  $\bar{x}'_T$  и  $\bar{x}''_T$ , то высока вероятность автоколебаний буксируемого на тросе судна;

– если точка крепления троса выходит за верхний предел этого интервала, то вероятна устойчивая буксировка с нулевым углом дрейфа  $\beta$ ;

– если точка крепления троса выходит за нижний предел указанного интервала, то вероятно устойчивое движение с углом дрейфа  $\beta$ , определяемым формулой

$$\beta = \frac{C_{M\omega} - C_{y\beta}\bar{x}_T}{\bar{x}_T C_T c_2}.$$

Здесь  $C_T$  – коэффициент натяжения троса Т,  $C_T = 2T/\rho v^2 F_{dp}$ .

Для приближенной оценки влияния длины буксирного троса и его натяжения, а также скорости буксировки на характер неуправляемого движения буксируемого судна использована следующая система дифференциальных уравнений движения буксируемого судна:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1+k_{11}}{1+k_{22}}\omega - \frac{N_p}{\rho V(1+k_{22})v} (C_{y\beta}\beta + c_2|\beta|\beta) - \frac{T \sin \theta}{\rho V(1+k_{22})v},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{N_p C_{m\omega} L}{I_z(1+k_{66})v}\omega + \frac{N_p C_{m\beta} L}{I_z(1+k_{66})}\beta - \frac{T\bar{x}_T L \sin \theta}{I_z(1+k_{66})}, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{\varphi - \beta}{l} + \left(1 + \frac{\bar{x}_T}{l}\right) \frac{d\varphi}{dt},$$

где  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{66}$  – коэффициенты присоединенных масс и момента инерции;  $Nv = \rho^2 F_{dp}/2$ ;  $I_z$  – момент инерции массы судна;  $\theta$  – угол отклонения буксирного троса от ДП буксируемого судна;  $l$  – относительная длина буксирного троса ( $l = l/L$ ).

Результаты расчетов значений угла дрейфа буксируемого судна даны в табличной форме. Это значения амплитуды (числитель) и частоты изменения угла дрейфа буксируемого судна (танкера). В качестве примера в табл. 1 представлены данные таких расчетов для танкера в грузу.

Таблица 1

| Танкер типа "Астрахань" в грузу, $\bar{x}_T = 0.5, v = 2$ м/с |                    |                     |                    |                     |                    |                    |
|---|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Т, кН   | $\bar{l}$          | 100                 | 200                | 300                 | 400                | 500                |
|   |                    | 1                   | $\frac{16.8}{2.6}$ | $\frac{16.7}{3.7}$  | $\frac{16.6}{4.5}$ | $\frac{16.5}{5.2}$ |
| 2   | $\frac{16.9}{1.9}$ | $\frac{16.85}{2.6}$ | $\frac{16.8}{3.2}$ | $\frac{16.75}{3.7}$ | $\frac{16.7}{4.1}$ |                    |
| 3   | $\frac{16.9}{1.5}$ | $\frac{16.9}{2.1}$  | $\frac{16.8}{2.6}$ | $\frac{16.8}{3.0}$  | $\frac{16.7}{3.4}$ |                    |
| 4   | $\frac{16.9}{1.3}$ | $\frac{16.9}{1.8}$  | $\frac{16.9}{2.3}$ | $\frac{16.8}{2.6}$  | $\frac{16.8}{2.9}$ |                    |
| 5   | $\frac{16.9}{1.2}$ | $\frac{16.9}{1.7}$  | $\frac{16.9}{2.0}$ | $\frac{16.9}{2.3}$  | $\frac{16.8}{2.6}$ |                    |

Анализ полученных таким образом данных позволяет судить о характере неуправляемого движения буксируемого судна в зависимости от длины буксирного троса и его натяжения, от скорости буксировки. Было установлено, что при увеличении длины буксирного троса амплитуда автоколебаний по углу дрейфа незначительно растет, при увеличении натяжения троса она незначительно падает. Частота колебаний уменьшается при увеличении длины троса и повышается при увеличении натяжения.

Далее выполнено моделирование автоколебаний буксируемого судна, его результаты представлены в графической форме. Так, на рис. 4 в качестве примера приведены данные расчета автоколебаний в определенном временном интервале. В результате анализа данных модельных экспериментов установлено, что автоколебания неуправляемого буксируемого судна практически неустранимы методами регулирования основных параметров буксирной системы, что приводит к большим динамическим нагрузкам в буксирном тросе и, как следствие, к повышению вероятности его обрыва в процессе буксировки.

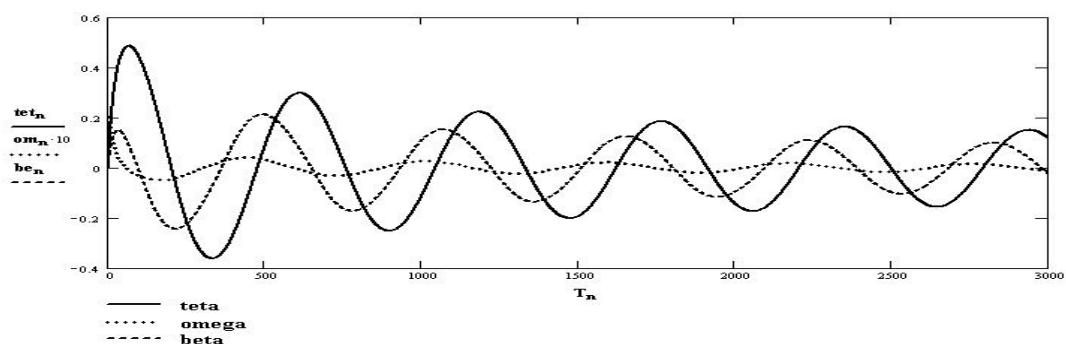


Рис. 4. Изменение кинематических параметров неуправляемого буксируемого судна в процессе буксировки ( $T = 300$  кН;  $\bar{x}_T = 0.5$ ;  $v = 2$  м/с;  $\bar{l} = 3$  ( $teta - \theta$ ;  $omega - \omega$ ;  $beta - \beta$ ))



На основании этого сделан вывод о том, что управление движением буксируемого судна является необходимым условием безопасной буксировки. Была предпринята попытка регулирования процесса автоколебаний по величине угла отклонения буксирного троса от ДП буксируемого судна. Для моделирования процесса регулирования в ранее использованную систему дифференциальных уравнений были внесены дополнительные члены, характеризующие работу рулевого устройства буксируемого судна:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1+k_{11}}{1+k_{22}}\omega - \frac{Nv}{\rho V(1+k_{22})v}(C_{y\beta}\beta + c_2|\beta|\beta) - \frac{T \sin \theta_1}{\rho V(1+k_{22})v} + \frac{NvF_r / F_{dp} \theta_1}{\rho V(1+k_{22})v} K_r,$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{NvC_{m\omega}L}{I_z(1+k_{66})v}\omega + \frac{NvC_{m\beta}L}{I_z(1+k_{66})}\beta - \frac{T\bar{x}_T L \sin \theta_1}{I_z(1+k_{66})} - \frac{NvF_r / F_{dp} \theta_1}{I_z(1+k_{66})} K_r.$$

Здесь использованы новые параметры:  $F_r$  – площадь пера руля,  $K_r$  – коэффициент усиления по углу отклонения троса.

Результаты решения этой системы дифференциальных уравнений представлены на рис. 5.

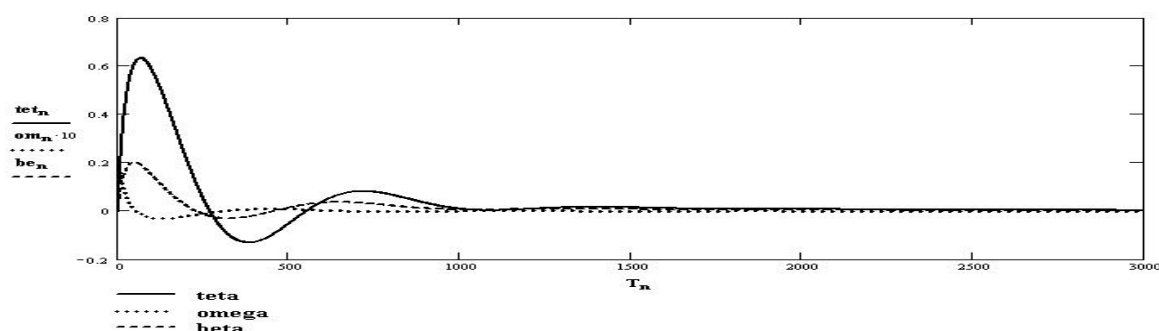


Рис. 5. Развитие колебаний параметров танкера в грузу ( $T = 300$  кН,  $\bar{x}_T = 0.5$ ,  $v = 2$  м/с,  $l = L$  при действии управления рулем по отклонению направления троса; коэффициент усиления  $K_r = 5$ )

В результате проведенных исследований было установлено, что такая система регулирования не обладает важным качеством астатичности. Для улучшения ее свойств, придания ей астатичности по управляемому параметру следует усложнить систему управления, а именно добавить к ней член с интегралом управляемого параметра, например  $K_{ii} \int \theta d\theta$ .

Упрощенная система дифференциальных уравнений движения, представленная выше, имеет ряд особенностей:

- в них входит только одна нелинейность вида  $\beta/\beta$ , остальные нелинейности вида  $\omega\beta$  и  $\omega^2$  или  $\beta^3$  не учтены;
- скорость буксировки считается постоянной, так как уравнение продольного движения буксируемого судна не рассматривается;
- буксирующее судно считается движущимся прямолинейно, т. е. движение буксируемого судна на нем не сказывается;
- трос рассматривается как прямолинейный нерастяжимый стержень, не обладающий упругими свойствами.

Разумеется, при таких особенностях все предыдущие результаты носили приближенный характер и требовали уточнений в ходе дальнейших исследований. С этой целью и была использована математическая модель в перемещениях (см. гл. 2). В соответствии с этой моделью оба судна буксирной системы движутся с переменными скоростями, при этом снимаются три первых недостатка простейшей модели, указанные выше. Известно, что буксирный трос является сложным элементом буксирной системы. В предлагаемой модели буксирной системы трос принят в виде гибкой связи, частично погруженной в воду. Это значит, что длина троса изменяется в процессе движения, и от этой длины зависит сила его натяжения, влияющая на движение обоих судов буксирной системы.

При моделировании использован следующий алгоритм учета действия буксирного троса:

- рассчитывается расстояние  $\Delta x$  между точками крепления троса;
- расстояние  $\Delta x$  сравнивается с первоначальной длиной троса  $l$ ;
- если  $\Delta x > l$  (трос не провисает), сила натяжения троса рассчитывается по формуле  $T_{tr} = E_{tr} (\pi d^2 / 4) ((\Delta l / l))$  (где  $E_{tr}$  – модуль упругости троса);
- если  $\Delta x < l$  (трос провисает), рассчитывается провес троса  $\Delta z$ ;
- если  $\Delta z < h_w$  ( $h_w$  – высота крепления троса над водой) (трос полностью в воздухе), рассчитывается натяжение троса по формуле  $T_{tr} = a q g$  (где  $a$  – параметр цепной линии,  $q$  – вес погонного метра буксирного троса,  $g$  – ускорение свободного падения);

– если  $\Delta z > h_w$  (трос частично в воде), рассчитывается натяжение троса по формуле  $T_r = a q g$  и полученный результат умножается на множитель 0.875 для учета изменения веса 1 пог. м буксирного троса в воде;

– рассчитывается дополнительное усилие за счет гидродинамического воздействия на трос по формуле  $T_{tr} = E_{tr} (\pi d^2 / 4) (\Delta l / l)$  и суммируется со значением основного натяжения;

– полученный результат учитывается при моделировании в уравнениях продольного равновесия участвующих в буксировке судов.

В процессе моделирования выяснялось, устойчивость поведения буксируемого судна при действии возмущений. В качестве возмущений генерировалось возмущение по угловой скорости буксируемого судна порядка  $0.02 \cong 1.1^\circ/\text{с}$ . Результаты моделирования представлены преимущественно в графической форме (см. рис.6) с комментариями к полученным траекториям движения судов.

Установлено, что последствия возмущений могут быть таковы, что возникает необходимость управления буксируемым судном с перекладкой руля до  $20\text{--}15^\circ$ . Результаты такого моделирования показаны на рис. 7.

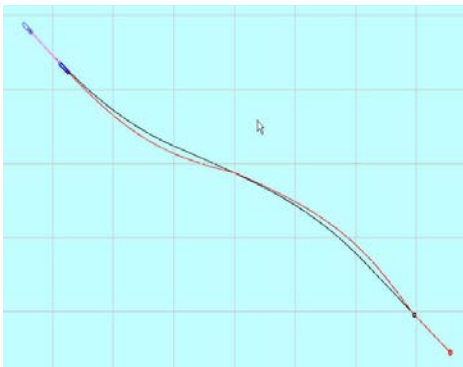


Рис. 6. Траектории судов, участвующих в буксировке ( $v = 2.8$  м/с,  $l = 3L$ ,  $\bar{x}_T = 0.5$ ) при двух имеющих разные знаки возмущениях угловой скорости

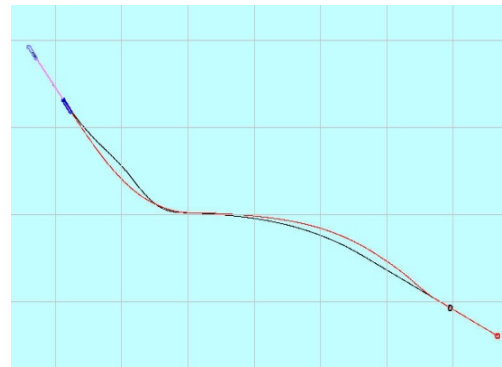


Рис. 7. Траектории судов, участвующих в буксировке ( $v = 2.8$  м/с,  $l = 3L$ ,  $\bar{x}_T = 0.5$ ) при однократном возмущении угловой скорости и последующей перекладке руля буксирующего судна на  $15^\circ$  п/б

Результаты моделирования отражают всю сложность такой буксировки в стесненных условиях плавания, в первую очередь в узкостях, когда

необходимо использование еще одного буксирующего судна. Ситуация более осложняется, если точка крепления буксирного конца на буксируемом судне смещается в сторону миделя.

На основании проведенных модельных испытаний был сделан основной вывод: для безопасной и эффективной буксировки необходимо управлять не только буксирующим, но и буксируемым судном, используя, например, способ управления, предложенный автором диссертационной работы (см. гл. 1).

В качестве примера такого способа управления на рис. 8 приведена траектория буксирной системы.

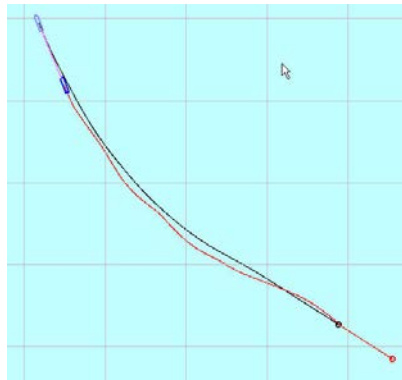


Рис. 8. Траектория движения судов при использовании управления по отклонениям от ДП буксирующего судна и многократном возмущении по угловой скорости буксируемого судна (скорость ветра 15 м/с, курсовой угол  $46^\circ$ )

Было произведено пятикратное возмущение по угловой скорости буксируемого судна и введено действие ветра скоростью 15 м/с с направления  $46^\circ$ . В результате этого изменение курса следования буксирной системы оказалось существенно меньше, чем при однократном возмущении и при отсутствии управления буксируемым судном. Однако даже такое изменение курса следует отнести скорее за счет действия ветра указанного направления. Поскольку надстройка буксируемого танкера смещена в корму, ветер будет вызывать поворот буксирующего судна именно вправо.

Для относительной оценки качества управления буксируемым судном с помощью разработанного способа управления использован критерий качества

$$Q = \sqrt{\sum_k [K_k - K_0]^2 + \rho_w \alpha_r^2},$$

где  $K_k$  – текущее значение курса буксируемого судна;  $K_0$  – заданное значение курса;  $\rho_w$  – весовой множитель (принят равным 0,05);  $\alpha_r$  – угол перекладки руля.

Результаты выполненного моделирования позволили сделать некоторые важные выводы:

- модели судов, участвующих в буксировке, рассчитаны таким образом, что позволяют адекватно реализовывать движение судов в различных условиях плавания;

- расчет натяжения буксирного троса с учетом его формы и части, находящейся в воде, достаточно точно отражает его воздействие на суда;

- управление буксируемым судном по отклонениям двух его точек от линии пути оказывается модельно реализуемым и при этом эффективным, условно снижая показатель качества управления (в отдельных случаях показатель качества снижается на 30 %);

- предложенный способ управления буксируемым судном имеет все основания для применения в реальных условиях буксировки.

### **Заключение**

В рамках диссертационной работы подводятся итог проделанной работы, выделяются основные теоретические и практические результаты, а также направления их использования и решены следующие задачи:

- структурирована и идентифицирована математическая модель буксирной системы, при воздействии аэродинамических и гидродинамических усилий на объекты буксирной системы, разработана компьютерная программа для моделирования движения буксирной системы;

- разработан способ управления траекторией движения буксируемого судна и проведен модельный эксперимент, подтверждающий эффективность использования разработанного способа;

– разработан способ управления движением буксирной системы и проведен модельный эксперимент с использованием разработанного способа;

– произведена оценка безопасности управления буксирной системой при использовании разработанных способов управления.

Результаты исследований, проведенных в рамках диссертационной работы, могут использоваться в реальных условиях плавания. Внедрение современных средств информационного обеспечения, компьютерных технологий и инновационных датчиков информации о кинематических параметрах движения судна сегодня не только целесообразно, но и является необходимой мерой. Использование разработанного в данной работе способа управления буксируемым судном в отдельности и буксирной системой в целом с применением в качестве основных датчиков информации приемников спутниковых навигационных систем повысит безопасность проводимых буксирных операций.

Исследования и результаты диссертационной работы сопровождаются таблицами и графиками, что позволяет использовать данный материал в рамках учебных занятий при подготовке судоводителей по соответствующим дисциплинам.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:**

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

1. Каян, В. В. Численное моделирование автоколебаний буксируемого судна / Ю. И. Юдин, В. В. Каян // Вестн. МГТУ : Труды Мурман. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 197–201.

2. Каян, В. В. Регулирование процесса автоколебаний буксируемого судна / Ю. И. Юдин, С. О. Петров, В. В. Каян // Эксплуатация морского транспорта. – 2013. – № 2 (72). – С. 38–40.

3. Каян, В.В. Расчет усилий, действующих на объекты буксировки со стороны буксирной связи / Ю.И. Юдин, С.В. Пашенцев, В.В. Каян // Вестн. МГТУ : Труды Мурман. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 193–196.

*Статьи в сборниках научных трудов*

4. Пат. 2470828 Российская Федерация МПК<sup>9</sup> В 63 Н 25/04. Способы управления траектории движения буксируемого судна/ Ю.И. Юдин, В.В. Каян ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Мурман. гос. тех. ун-т". – № 2011115725/11 ; заявл. 20.04.2011 ; опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

5. Св-во гос.рег.прогр. для ЭВМ 2012618107, Российская Федерация. Моделирование буксировки судна при его управлении с помощью отклонений от линии диаметральной плоскости буксира / С.В. Пашенцев, В.В. Каян, Ю.И. Юдин. ; правообладатель ФГБОУ ВПО "Мурман. гос. тех. ун-т". – № 2012615768 ; дата поступл. 10.07.2012 ; дата регистр. 07.09.2012.

6. Каян, В.В. Математическое моделирование буксирной операции/ Ю.И. Юдин, В.В. Каян // Наука и образование – 2010. [Электронный ресурс] : юбил. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию МГТУ, Мурманск, 5–9 апреля 2010 г. / Мурман. гос. техн. ун-т. – Электрон. текст. дан. (60 Мб). – Мурманск : МГТУ. – С. 1180–1183. Гос. рег. НТЦ "Информрегистр" № 0321000362 от 12.08.2010.

7. Каян, В.В. Оценка управляемости буксируемого судна в неблагоприятных погодных условиях / В.В. Каян // Наука и образование – 2012. [Электронный ресурс] : междунар. науч.-техн. конф., 02–06 апреля 2012 г. / Мурман. гос. техн. ун-т. – Электрон. текст. дан. (68 Мб). – Мурманск : МГТУ. – С. 755–757. Гос. рег. НТЦ "Информрегистр" № 0321201102.

8. Каян, В.В. Регулирование процесса автоколебаний буксируемого судна / Ю.И. Юдин, В.В. Каян, С.О. Петров // Наука и образование – 2013.

[Электронный ресурс] : междунар. науч.-техн. конф., 04–11 марта 2013 г. / Мурман. гос. техн. ун-т. – Электрон. текст. дан. (32 Мб) – Мурманск : МГТУ. – С. 102–105. Гос. рег. НТЦ "Информрегистр" № 0321201102.

9. Каян, В.В. Расчет усилий, действующих на объекты буксировки со стороны буксирной связи / Ю.И. Юдин, С.В. Пашенцев, В.В. Каян // Наука и образование – 2013. [Электронный ресурс] : междунар. науч.-техн. конф., 04–11 марта 2013 г. / Мурман. гос. техн. ун-т. – Электрон. текст. дан. (32 Мб) – Мурманск : МГТУ. – С. 106–111. Гос. рег. НТЦ "Информрегистр" № 0321201102.



---

Отпечатано в издательстве МГТУ. 183010, Мурманск, Спортивная, 13.  
Сдано в набор 29.10.2014. Подписано в печать 06.11.2014. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бум. типографская. Усл. печ. л. 1,00. Уч.-изд. л. 0,83. Заказ 202. Тираж 100 экз.

