

На правах рукописи

**Анищенко Ольга Петровна**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И  
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ  
ДИНАМИКИ СУДНА В РЕЖИМЕ БРОЧИНГ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2006**

Работа выполнена на кафедре вычислительной техники и информационных технологий Санкт-Петербургского Государственного Морского Технического Университета

Научный руководитель: д.т.н., профессор Нечаев Юрий Иванович

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор, засл. деятель науки РФ, И.К.Бородай  
к.ф.-м.н., профессор Б.А.Смольников

Ведущая организация: кафедра компьютерного моделирования и многопроцессорных систем факультета прикладной математики и процессов управления Санкт-Петербургского Государственного Университета

Защита состоится «   » \_\_\_\_\_ 2007 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.229.13 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул.Политехническая, д.29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

А.В.Зинковский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Сложность процесса взаимодействия судна с волнением и ветром, разнообразие физических картин опрокидывания и отсутствие надежных математических описаний динамики судна на волнении подчеркивают актуальность постановки задачи моделирования динамики судна в бортовых интеллектуальных системах поддержки принятия решений по обеспечению безопасности мореплавания и в исследовательском проектировании.

Математические модели динамики судна на волнении основаны на описании процесса взаимодействия судна с внешней средой (волнение, ветер) в различных условиях эксплуатации, в том числе и в экстремальных ситуациях. Анализ результатов моделирования позволяет выяснить физические картины крена и опрокидывания судов на волнении и реализовать процедуры анализа возникающих экстремальных ситуаций. В настоящем исследовании основное внимание уделяется анализу динамики взаимодействия судна с внешней средой при интерпретации одной из наиболее сложных экстремальных ситуаций, связанных с возникновением неуправляемого разворота в режиме «бродчинг».

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных исследованию этого явления, разработанные теоретические модели «бродчинга» описываются с использованием достаточно простой нелинейной функции восстанавливающего момента и не учитывают реальную структуру морского волнения при возникновении этой экстремальной ситуации. В настоящем исследовании динамика «бродчинга» рассмотрена на основе анализа результатов математического моделирования и физических картин крена и опрокидывания с учетом сложной пространственной функции, определяющей восстанавливающую компоненту. Анализ проведен на основе данных математического моделирования поведения судна в условиях нерегулярного волнения для различных сценариев развития шторма и уровней внешних возмущений. Результаты моделирования, полученные на основе рассмотрения нерегулярного волнения в виде последовательности пакетов волн различной формы и интенсивности, позволили выяснить существенные факторы, определяющие условия опрокидывания, и сформулировать требования к безопасности судна в этой экстремальной ситуации. Оценка адекватности математической модели осуществлена с использованием данных испытаний самоходных радиоуправляемых моделей судов на естественном трехмерном морском волнении.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью развития методов математического моделирования при анализе и прогнозе экстремальных ситуаций в бортовых ИС поддержки принятия решений по обеспечению безопасности мореплавания и исследовательском проектировании.

**Цель и задачи работы.** Целью данной работы является разработка и исследование математической модели движения судна в условиях захвата и неуправляемого разворота на попутном волнении, а также разработка критериальных соотношений для обеспечения безопасности судна в этой экстремальной ситуации.

Для достижения этих целей в диссертации решались следующие **основные задачи**:

– разработка и обоснование структуры математической модели в виде системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику судна в экстремальной ситуации «бродчинг»;

- разработка алгоритмов и программного обеспечения моделирования поведения судна в условиях брочинга.
- моделирование динамики крена и опрокидывания судна в условиях «брочинга» для различных сценариев развития шторма и уровне внешних возмущений;
- статистический анализ результатов эксперимента, выделение существенных факторов, построение регрессионных моделей и критериальных соотношений, определяющих безопасность судна в режиме «брочинг»;
- оценка адекватности математической модели и сравнительный анализ эффективности системы нормирования «брочинга»;

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе были использованы методы математического моделирования динамики судна на волнении, методы вычислительной математики, теории вероятностей и математической статистики, а также методы прикладного программирования.

**Объект исследования.** Объектом исследования являются суда небольшого водоизмещения, особенно малые промысловые суда, в наибольшей степени подверженные опасности опрокидывания в режиме «брочинг».

**Научную новизну** работы составляет:

- Более строгая математическая модель динамики «брочинга», содержащая пространственную существенно-нелинейную функцию восстанавливающего момента.
- Алгоритм анализа поведения судна в режиме «брочинг» для различных сценариев развития шторма, основанный на представлении нерегулярного волнения в виде последовательности пакетов волн различной формы и интенсивности. Осуществлена визуализация динамики «брочинга» и предложена новая форма диаграммы, обеспечивающая удобство практической интерпретации этого явления.
- Система критериальных соотношений, обеспечивающих безопасность судна в условиях неуправляемого разворота на попутном волнении. Реализация этих критериев осуществлена при формировании алгоритма принятия решений по управлению судном на попутном волнении.

**Основные научные результаты.**

- Откорректирована математическая модель поведения судна в режиме «брочинг» за счет включения существенно нелинейной пространственной функции восстанавливающего момента.
- Исследованы особенности динамики взаимодействия судна с внешней средой в режиме брочинг для различных сценариев развития шторма и нерегулярного волнения, представленного в виде пакетов волн.
- Откорректирована диаграмма брочинга за счет включения относительного радиуса циркуляции как основной характеристики эволюции судна в рассматриваемой экстремальной ситуации и использования шкалы безразмерного времени.
- Критерии безопасности судна в режиме брочинг.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем:

- Разработаны конкретные модели и алгоритмы анализа динамики взаимодействия судна с внешней средой в условиях брочинга на нерегулярном волнении;
- Разработан программный комплекс, обеспечивающий решение задач анализа и интерпретации физических картин крена и опрокидывания судна в условиях брочинга;

- Практическая значимость диссертационного исследования обеспечена прикладной направленностью и созданием конкретных программных средств, приспособленных к применению в системах поддержки принятия решений по обеспечению безопасности мореплавания, а также в задачах оценки динамики «бродинга» в исследовательском проектировании.

#### **Внедрение результатов работы:**

Работа выполнялась в рамках НИР «Разработка моделей представления и обработки знаний в интеллектуальных системах анализа и прогноза поведения сложных динамических систем в экстремальных ситуациях» (номер государственной регистрации 01200.204458), НИР «Разработка математических моделей взаимодействия человек-компьютер в интеллектуальных тренажерах и управляющих системах», а также при создании интеллектуальной системы «Мореходность» для судов Арктического шельфа, разрабатываемой в НПО «Полярная Звезда» по заказу ФГУП «Адмиралтейские верфи».

Разработанные программные средства и методические материалы использовались в учебном процессе СПбГМТУ при проведении лабораторных и курсовых работ по курсу «Системы искусственного интеллекта» для студентов специальности 220400 «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» (направление подготовки дипломированных специалистов 654600 «Информатика и вычислительная техника»).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на национальных и международных научно-технических конференциях «МОРИНТЕХ-ЮНИОР'2000», «МОРИНТЕХ'2001», «Искусственный интеллект'2001», «Крыловские чтения'2001», «MARIND'2001», «HYDRONAV'2001», «МОРИНТЕХ-ЮНИОР'2002», «Искусственный интеллект'2002», «ISC'2002», «MARIND'2002», «Крыловские чтения'2003», «МОРИНТЕХ'2003», «HYDRONAV'2003», «STAB'2003», «МОРИНТЕХ-ЮНИОР'2004», «МОРИНТЕХ'2005», «HYDMAN'2005», International Ship Stability Work shop (Istanbul, Turkey, 2005).

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- Математическая модель поведения судна в режиме «бродинг», включающая существенно нелинейную пространственную функцию восстанавливающего момента.
- Результаты исследования динамики взаимодействия судна с внешней средой в режиме «бродинг».
- Диаграмма «бродинга», определяющая изменение основных характеристик эволюции судна в рассматриваемой экстремальной ситуации.
- Критерии безопасности судна в режиме «бродинг».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 1 – в российском рецензируемом журнале «Морской Вестник» (Санкт-Петербург, 2004, №1(9)), 12 – в тезисах и материалах конференций.

#### **Объем и структура работы.**

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и 3-х приложений. Объем - 182 страницы, в том числе 12 таблиц, 45 рисунков, графиков и блок-схем. В списке литературы 216 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения работы, выносимые на защиту.

**В первой главе** описаны экстремальные ситуации при движении судна на попутном волнении: полная потеря остойчивости, низкочастотный резонанс и зарыскивание («бродчинг»). Приведена аварийная статистика. Изучение аварий судов на попутном волнении показывает, что возникновение опасных ситуаций в этих условиях объясняется влиянием ряда специфических факторов и в первую очередь – резким ухудшением динамической остойчивости. В результате возникает неблагоприятное сочетание кренящих и восстанавливающих сил и моментов, приводящее к появлению значительных углов крена. Иными словами, попутное волнение часто является первопричиной опрокидывания, а дальнейшее развитие аварии и гибель судна вызываются смещением грузов, интенсивным заливанием палубы, внутренних помещений и другими причинами.

Далее в главе 1 дана общая характеристика физических особенностей явления «бродчинг». В режиме «бродчинг» попутная волна длиной  $\lambda=(1\div 2)L$  ( $L$  – длина судна) может захватить судно и заставить его двигаться из положения на переднем склоне волны. В этом положении давление в кормовой оконечности больше, чем в носовой, из-за чего к судну прилагается дополнительная продольная сила. Складываясь с силой тяги винта, эта сила может уравновесить сопротивление судна, вследствие чего судно может двигаться с увеличенной скоростью. Это условие обеспечивается в случае, когда положение судна относительно волны не изменяется. Находясь на переднем склоне волны в условиях «захвата», судно теряет устойчивость на курсе, вследствие чего под действием волны начинает быстро разворачиваться, стремясь стать лагом к ней. В начале разворота судно остается на переднем склоне волны, затем, при достижении определенного угла крена, волна не может удержать судно на своем переднем склоне и обгоняет его. Это может произойти настолько быстро, что переключкой руля трудно исправить положение. Поэтому приходится говорить не только об отсутствии устойчивости на курсе, но и о потере управляемости вообще. Во время разворота на переднем склоне волны происходит сильное динамическое наклонение судна. Первой причиной его является разворот судна с малым радиусом циркуляции на большой скорости хода (равной скорости волн или близкой к ней). Кренящий момент, вызванный разворотом, наклоняет судно наружу циркуляции, т.е. на борт, обращенный в сторону бега волны. Второй причиной наклонения судна является кренящий момент, создаваемый непосредственно волной. Когда судно расположено на переднем склоне волны под углом к ней, уровень на обращенном в сторону бега волн борту ниже, чем на противоположном борту. Это приводит к появлению кренящего момента, который складывается с моментом от циркуляции. Наклонению судна способствует ветер, обычно дующий в одном направлении с волной. Тогда складываются кренящие моменты от циркуляции, волнения и ветра. Особенно большой крен получается, если при следовании на попутной волне, увлекающей за собой судно, переключивается руль. В этом случае поворот судна происходит более резко, чем при произвольном зарыскивании, и это приводит к большим наклонениям.

Отрицательное воздействие попутного волнения на остойчивость проявляется преимущественно на волнах, длина которых составляет 1-2 длины судна. Поэтому

попутная волна опасна в первую очередь для малых судов, скорость которых близка к скорости волн таких размеров.

Исследованию динамики судна в режиме «брочинг» посвящены работы Д.М.Ананьева, А.Ш.Афремова, А.Д.Гофмана, Г.И.Зильмана, Ю.Л.Макова, Ю.И.Нечаева, В.А.Моренцильдт, зарубежных исследователей К.Davidson, Du Cane, G.Goodrich, O.Grim, S.Kastner, J.Paulling, M.Renilson, K.Spyrou, N.Umeda и других авторов. Наиболее полный теоретический анализ ситуации выполнен в работах Д.М.Ананьева, а экспериментальных исследований – в работах S.Kastner, J.Paulling и Ю.Нечаева, посвященных изучению физических картин опрокидывания на основе самоходных радиоуправляемых моделей на естественном волнении.

При исследовании математической модели брочинга большое внимание специалистов уделялось изучению продольно-горизонтальных колебаний и условий «захвата» судна попутной волной (работы Д.М.Ананьева, Ю.Л.Макова, В.А.Моренцильдт). Авторами этих работ определены области «захвата», а Д.М.Ананьев дополнительно рассмотрел статическую и динамическую границы этих областей. Анализ показал, что результаты работы Д.М.Ананьева в области разработки критериев «захвата» наиболее полно отражают физические особенности явления и их целесообразно использовать в качестве исходной модели, определяющей начальные условия интегрирования системы дифференциальных уравнений. Поэтому в настоящем исследовании на основе результатов Д.М.Ананьева откорректирована математическая модель и диаграмма брочинга, разработана программная реализация оценки явления «захвата», причем основное внимание уделено математическому моделированию динамики брочинга при движении судна из состояния «захвата». В главе 1 также приведен аналитический обзор состояния вопроса, поставлена задача исследования и дана общая характеристика диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена теоретическим основам динамики судна в режиме «брочинг». Поведение судна в условиях «захвата» попутной волной и разворота лагом к набегающему волнению характеризуется чрезвычайно сложной картиной изменения кинематических и гидродинамических параметров. Для описания движения судна из состояния «захвата» Д.М.Ананьев рекомендует использовать систему четырех дифференциальных уравнений, три из которых являются известными уравнениями теории управляемости и описывают траекторию движения судна, т.е. продольно-горизонтальные, поперечно-горизонтальные колебания и рыскание, а четвертое – вращение судна относительно продольной центральной оси.

$$\begin{cases} \left[ \left( \frac{D}{g} \right) + \mu_{\xi\xi} \right] (\dot{v} \cos \beta - \beta v \sin \beta) + \left[ \left( \frac{D}{g} \right) + \mu_{\eta\eta} \right] v \dot{\chi} \sin \beta = X(t) + X_p - R \\ \left[ \left( \frac{D}{g} \right) + \mu_{\eta\eta} \right] (\dot{v} \sin \beta - \beta v \cos \beta) + \left[ \left( \frac{D}{g} \right) + \mu_{\xi\xi} \right] v \dot{\chi} \cos \beta = Y(t) + R_{yB} + R_{yp} \\ (J_z + \mu_{\chi\chi}) \ddot{\chi} = M_z(t) + M_{zB} + M_{zp} \\ (J_x + \mu_{\theta\theta}) \ddot{\theta} + M_R(\dot{\theta}) + M(\theta, \varphi, t) = M_G + M_A \end{cases}$$

где  $D$  – водоизмещение судна;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\mu$  и  $J$  – присоединенные массы и моменты инерции;  $\beta$  – угол дрейфа;  $\theta$  – угол крена;  $\chi$  – угол рыскания;  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $M_z(t)$  – возмущающие силы и моменты;  $M_G$  и  $M_A$  – гидродинамический и ветровой кренящие моменты;  $X_p$  – сила тяги движителей;  $R$  – сопротивление воды

движению судна;  $R_{yp}$  и  $M_{zp}$  – поперечная сила и момент, вызванные дрейфом;  $M(\theta, \varphi, t)$  и  $M_R$  – восстанавливающий и демпфирующий моменты;  $R_{y\delta}$  и  $M_{z\delta}$  – поперечная сила и момент, вызванные действием руля.

Далее рассматривается общая характеристика компонент математической модели. В разделе, посвященном математической модели, описывающей продольно-горизонтальные колебания и условия «захвата», разработан алгоритм и программная реализация модели «захвата» на основе критериев Д.М.Ананьева и выполнены расчеты статической и динамической границ захвата. Алгоритм учитывает физические особенности динамики взаимодействия судна с набегающим волнением в условиях захвата. На судне, захваченном попутной волной, можно снизить тягу гребного винта до предела, который определяется этой границей. Причем оно продолжает удерживаться волной в режиме «захвата», если не выйдет из него из-за неустойчивости на курсе. То же произойдет, если постепенно будет уменьшаться крутизна волны. Поэтому статическая граница рассматривается как граница выхода из режима «захвата». Динамическую область можно трактовать как совокупность условий (элементы волнения, скорость и курс судна), при которых теряется устойчивость режима продольно-горизонтальных колебаний. В конце раздела приведен практический метод расчета границ захвата.

Под действием случайного возмущения судно, двигающееся на попутном волнении в «захваченном» состоянии, приобретает начальную угловую скорость и угол дрейфа, вследствие чего появляется поперечная сила и момент рыскания, обусловленные дрейфом, угловой скоростью и влиянием набегающего волнения. Под действием возмущающих сил и моментов судно начинает поворачиваться и угол курса относительно волн меняется. Кренящий момент от дрейфа совместно с возмущающим моментом от волнения приводят к наклонению судна. Неуправляемый разворот, который происходит после захвата судна волной, носит резкий динамический характер.

Математическая модель, описывающая движение судна в горизонтальной плоскости и неуправляемый разворот описана в следующем разделе второй главы на основе данных работ по теории управляемости судов на волнении. Для вычисления компонентов математической модели разработаны алгоритмы и программы, обеспечивающие вычисление гидроаэродинамических характеристик неуправляемого разворота при интегрировании исходной системы дифференциальных уравнений.

Для расчета динамических наклонов судна в условиях брочинга в диссертационной работе используется следующая математическая модель:

$$(J_x + \mu_{\theta\theta})\ddot{\theta} + M_R(\dot{\theta}) + M_W = M_G + M_A,$$

где  $J_x$  – момент инерции судна относительно продольной центральной оси;  $\mu_{\theta\theta}$  – присоединенный момент инерции при бортовой качке;  $M_R(\dot{\theta}) = W_\theta \dot{\theta}^2 \text{sign} \dot{\theta}$  – момент демпфирующих сил;  $M_W$  – функция восстанавливающего момента на попутном волнении;  $M_G$  – гидродинамический кренящий момент;  $M_A$  – ветровой кренящий момент.

В отличие от ранее выполненных исследований, в обсуждаемой работе использована более строгая математическая модель наклона судна в условиях «брочинга», учитывающая реальную картину изменения восстанавливающего момента.

Нелинейная пространственная функция восстанавливающего момента на волнении представляется формулой [Нечаев Ю.И., 1989]:

$$M_W = M(\theta, \varphi, t) = D [l(\theta, \varphi) + \Delta l(\theta, \varphi) \cos(\sigma_k t - \varepsilon)];$$



$$l(\theta, \varphi) = 0,5 [l(\theta, \varphi)_{\max} + l(\theta, \varphi)_{\min}], \quad \Delta l(\theta, \varphi) = 0,5 [\Delta l(\theta, \varphi)_{\max} + \Delta l(\theta, \varphi)_{\min}];$$

$$M_W = \Phi(\theta, \varphi_k, t) = D l(\theta, \varphi, t),$$

где  $\Delta l(\theta, \varphi)_{\max}$  и  $\Delta l(\theta, \varphi)_{\min}$  – экстремальные значения приращений плеч остойчивости, соответствующие положению судна на подошве и вершине волны при различных курсовых углах  $\varphi$ ;  $l(\theta, \varphi, t)$  – плечо восстанавливающего момента, определяемого в процессе интерполяции по  $\theta$  и  $\varphi$  для различных моментов времени,  $\varepsilon$  - фаза судна относительно профиля волны.

Геометрическая интерпретация функции  $M(\theta, \varphi, t)$  дана на рис. 1:

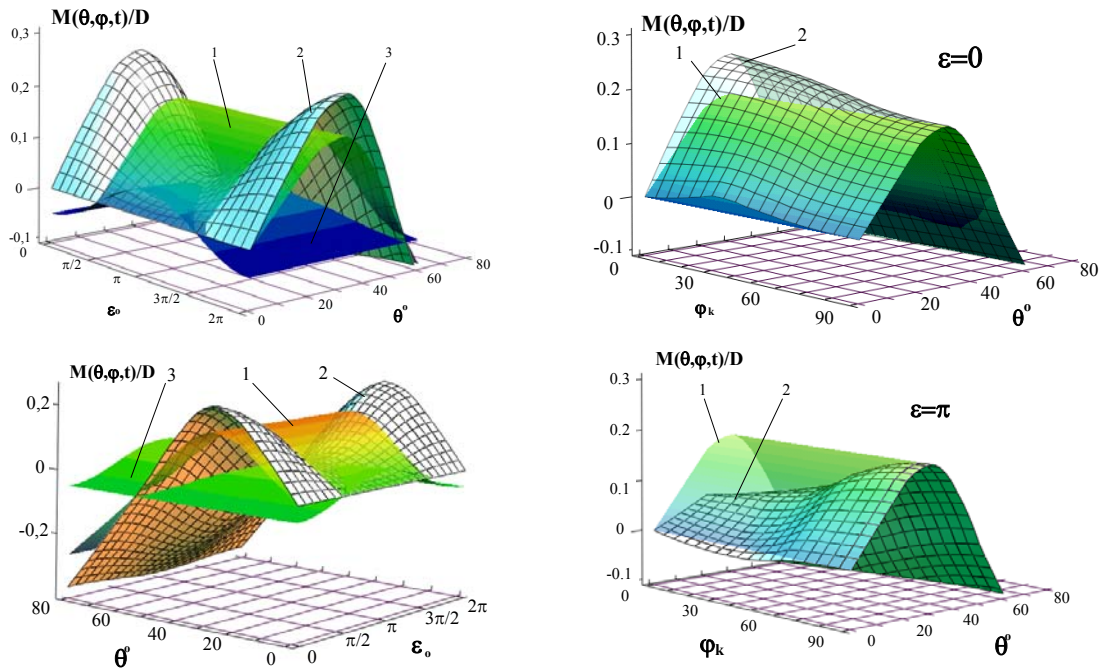


Рис.1. Нелинейная функция, описывающая восстанавливающую компоненту: 1 – исходная функция; 2 – трансформированная функция; 3 – профиль волны

Кроме восстанавливающей компоненты во второй главе разработаны алгоритмы и программное обеспечение расчета инерционно-демпфирующих компонент, а также кренящих сил и моментов на основе математических моделей, предложенных в работах по теории остойчивости судов на волнении.

В последнем разделе второй главы проводится оценка адекватности математической модели. Полученные в диссертационной работе данные позволяют считать, что используемые математические модели и критериальные оценки опасности «бручинга» достаточно хорошо описывают особенности рассматриваемой экстремальной ситуации. Корректность используемых статистических процедур на этапе валидации модели подтверждается результатами физического моделирования.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию динамики бручинга. Для общей характеристики динамики судна в режиме «бручинг» рассмотрены закономерности этого быстро протекающего процесса совместно с данными физического моделирования в условиях нерегулярного волнения, полученными Ю.И.Нечаевым, S.Kastner, J.Paulling, S.Schaffran и др. Выделяют три периода движения судна в режиме «бручинг». Первый период – эволюционный, в котором судно движется в условиях

захвата при незначительном изменении фазы. Второй период – установившийся, в котором судно постепенно разворачивается и выходит из состояния захвата. Эксперименты показывают, что начальные условия по углу дрейфа и угловой скорости действительно не оказывают сильного влияния на движение судна в этом периоде. Однако, в зависимости от курсового угла волны, ситуация резко меняется. С ростом курсового угла сокращается время движения судна в «захваченном» состоянии и значительно интенсивнее развивается неуправляемый разворот. Эти закономерности можно объяснить увеличением гидродинамического сопротивления «захваченного» судна, движущегося в направлении бега волн. В результате сокращается время эволюционной и установившейся стадий. Заключительная стадия «бродчинга» - динамическая. Скорость судна здесь заметно отличается от скорости бега волн, угловая скорость и угол дрейфа испытывают колебания. Резкий разворот приводит к возникновению сильной бортовой качки, а в отдельных случаях – к опрокидыванию судна при положении лагом к набегающему волнению.

Используемые при построении траектории судна (рис.2) данные экспериментальных исследований свидетельствуют о резком характере возникающих неуправляемых эволюций судна на попутном волнении. Эти эволюции определяются многими факторами, в том числе и ориентацией судна относительно направления движения волновых систем.

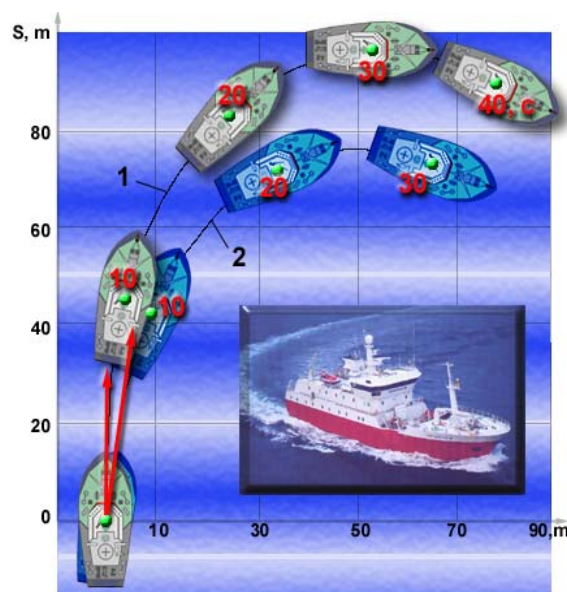


Рис.2. Неуправляемый разворот судна в режиме «бродчинг» для различных значений курсового угла волны: 1)  $\varphi_0 = 0$ ; 2)  $\varphi_0 = 15^\circ$

В следующем разделе третьей главы рассмотрены особенности крена и опрокидывания судна в режиме «бродчинг» на нерегулярном двумерном волнении. Для моделирования волнения используется традиционная спектральная модель, рассматривающая пространственно-волновое поле в виде ортогонального разложения по гармоническому базису [Лонге–Хиггинс М.С., 1962]

$$\zeta_W(x, t) = \sum_k a_k \cos(\omega_k t + k_k x) + \sum_k b_k \sin(\omega_k t + k_k x).$$

Здесь  $\{a_k, b_k\}$  – независимые случайные величины, волновое число  $k = \omega^2/g$ . Использование аналитического пространственно-временного базиса позволяет существенно

упростить процедуру вычисления возмущающих сил и моментов путем численного интегрирования.

Исследование поведения судна в условиях нерегулярного волнения проведено для различных значений интенсивности волнения. В качестве объекта исследования использовано малое промысловое судно – сейнер РС–708 ( $L=25\text{м}$ ,  $L/B=4,03$ ,  $B/T=2,95$ ,  $H/T=1,43$ ,  $\delta=0,54$ ), опрокинувшийся в условиях попутного волнения [Нечаев Ю.И., 1989]. Математическая модель, описывающая динамику судна в рассматриваемой экстремальной ситуации, принята в виде системы дифференциальных уравнений. Нелинейная функция в уравнении бортовой качки учитывает реальное изменение восстанавливающего момента, вызванное влиянием волнения.

Результаты моделирования представлены на рис.3. Также на рис.3 показаны фрагменты опасных пакетов волн, при воздействии которых возникал режим «захвата» и последующего динамического наклонения в процессе неуправляемого разворота.

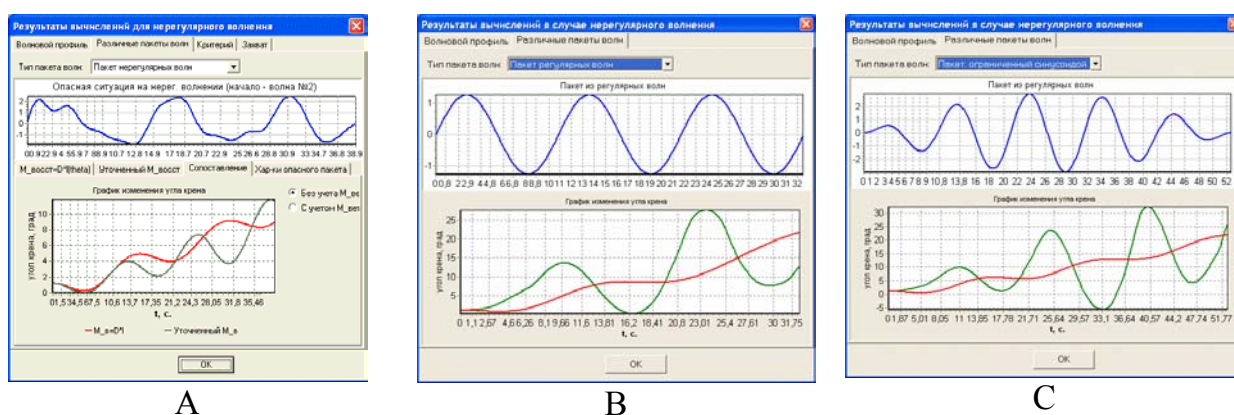


Рис.3. Результаты расчетов угла бортовой качки для разных типов волнения:  
 А - пакет из нерегулярных волн; В - пакет из регулярных волн;  
 С - пакет волн, ограниченных синусоидой

Статистическая обработка результатов математического моделирования позволила установить вероятности возникновения режима «захвата» судна попутной волной и вероятность опрокидывания судна в процессе неуправляемого разворота (рис.4).

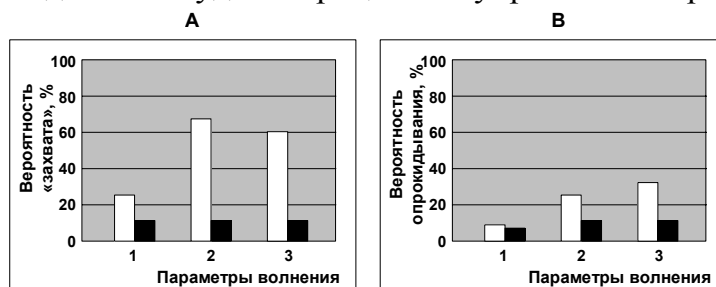


Рис.4. Экспериментальные данные по оценке вероятностных характеристик: математического ожидания – светлые столбики и коэффициента вариации – темные столбики для условий «захвата» (А) и опрокидывания (В) при различных значениях параметров набегающего волнения (высоты волны 3%-ой обеспеченности  $h_{3\%}$  и среднего периода  $\tau^*$ ):

- 1)  $h_{3\%}=1.5$ ,  $\tau^*=5.7$ ; 2)  $h_{3\%}=2.5$ ,  $\tau^*=7.6$ ; 3)  $h_{3\%}=3.5$ ,  $\tau^*=8.8$ .

Далее в главе 3 рассматриваются особенности представления эволюции судна в исследуемой экстремальной ситуации в виде универсальной диаграммы «бродинга». В отличие от диаграммы «бродинга», рассмотренной в работах [Ананьев Д.М., Горбачева Л.М., 1993], [Ананьев Д.М., 1979], [Нечаев Ю.И., 1978, 1989] на основе анализа результатов физического и математического моделирования, в диссертационной работе предлагается новая интерпретация диаграммы (рис.5).

В качестве основной характеристики диаграммы в работах Д.М.Ананьева используется безразмерный путь, элемент которого  $ds$  вычисляется по формуле  $ds = v dt/L$ . Применение такой характеристики затрудняет практическое использование диаграммы при анализе картины поведения судна в рассматриваемой экстремальной ситуации. Гораздо удобнее представлять картину «бродинга» в зависимости от безразмерного времени  $t/\tau_\theta$  (где  $\tau_\theta$  - период бортовых колебаний), которое отсутствует на диаграмме в работах Д.М.Ананьева, и для его установления требуются дополнительные вычисления. Кроме того, диаграмма «бродинга», предлагаемая в диссертационной работе, дополнена таким важным показателем, как изменение относительного радиуса кривизны траектории центра тяжести судна в процессе неуправляемого разворота.

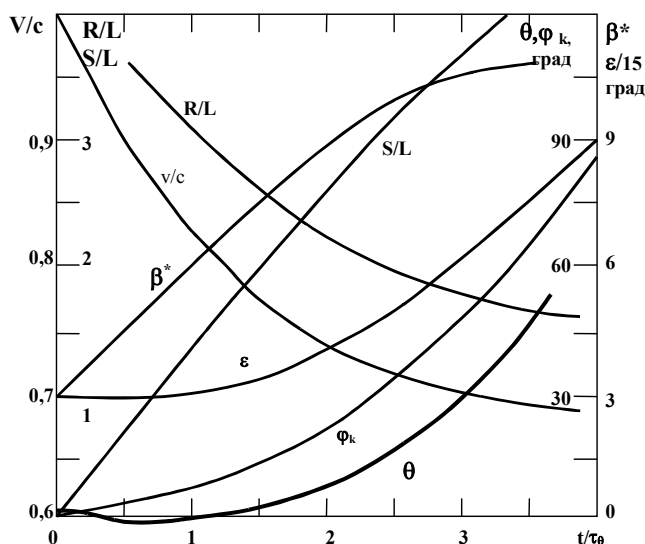


Рис.5. Универсальная диаграмма «бродинга» для случая  $\phi_0=0$ .

В четвертой главе описан разработанный в диссертации критериальный базис безопасности судна в режиме бродинг. Результаты исследований Д.М.Ананьева нашли отражение в действующих нормативах остойчивости в виде ограничения скорости судна на попутном волнении  $V_s \leq 1.4\sqrt{L}$  (уз). Очевидно, что это требование ставит в равные условия суда, отличающиеся фактическими характеристиками остойчивости, и не отражает реальной картины действующих сил и моментов. Кроме того, само по себе снижение скорости без предварительной оценки ситуации может привести к возникновению сильной качки судна в режиме основного или параметрического резонанса [Бородай И.К., Нецветаев Ю.А., 1982].

Результаты моделирования [Nechaev Yu., Anischenko O., 2001-2006], выполненные на основе рассмотрения нерегулярного волнения в виде последовательности пакетов волн различной формы и интенсивности, позволили выяснить существенные факторы, определяющие условия опрокидывания, и сформулировать критерии безопасности судна в этой экстремальной ситуации. Эти критерии определяются физиче-

скими закономерностями крена и опрокидывания судна, установленными на основе экспериментальных исследований.

Система нормирования безопасности судна в режиме «бродчинг» сводится к проверке динамического критерия и предельного числа Фруда:

$$(M_c)_W \geq M_R, Fr \leq (Fr)_{CR},$$

где  $(M_c)_W$  – опрокидывающий момент на попутном волнении;  $M_R$  – кренящий момент, возникающий в процессе разворота судна;  $(Fr)_{CR}$  – критические число Фруда.

На основе этих критериев был разработан программный комплекс и выполнены систематические расчеты по оценке остойчивости судов в режиме «бродчинг». В расчетах были использованы данные аварийной статистики по опрокидыванию малых промысловых судов на попутном волнении.

Анализ результатов расчетов свидетельствует о работоспособности разработанной системы нормирования и возможности ее использования при обеспечении безопасности мореплавания (рис.6).

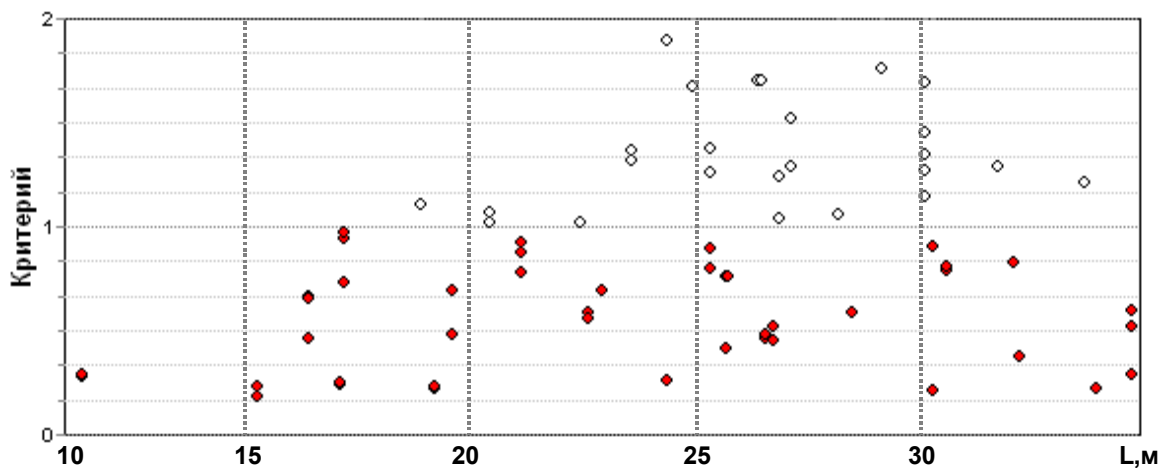


Рис.6. Результаты расчетов критерия  $(M_c)_W/M_R$  (серым отмечены аварийные суда, белым – неаварийные).

Результаты проведенного исследования позволили откорректировать диаграмму областей «захвата», предложенную в Межправительственной Морской Организации ИМО. Корректировка проведена в соответствии с алгоритмом [Ананьев Д.М., Горбачева Л.М., 1993]. Границы «захвата» определены в зависимости от начальных условий (судно на переднем или заднем склоне волны) на основе анализа устойчивости продольно-горизонтальных колебаний. Разработанная программа позволяет оперативно решать задачи, связанные с оценкой возможности «захвата» при анализе остойчивости судна на попутном волнении.

В последнем разделе четвертой главы дается приложение полученных в диссертационной работе результатов в бортовых системах поддержки принятия решений. Рассмотрено поведение судна в ситуации «бродчинг» для различных сценариев развития волнения. Дается сравнительная характеристика экстремальных ситуаций, возникающих при движении судна на попутном волнении (полная потеря остойчивости, резонансные режимы, бродчинг). Показано, что в зависимости от интенсивности набегающего волнения и характера развития шторма для малых судов основную опасность представляют ситуации, связанные с возникновением бродчинга и полной потерей остойчивости. Причем, ситуация бродчинг особенно опасна для судов длиной до 30 метров. Результаты этого исследования имеют важное значение при анализе и прогнозе

явления «бродчинг» в зависимости от ветро-волнового режима в заданном районе эксплуатации судна. На основании разработанной системы нормирования и результатов моделирования экстремальных ситуаций сформулирован подход к созданию алгоритмов и программного обеспечения, а также к организации интерфейса «Оператор – компьютер» при оперативном контроле ситуации «бродчинг» в условиях эксплуатации.

**В заключении** обобщаются полученные результаты и рассматриваются перспективы их применения в бортовых интеллектуальных системах и в задачах оценки опасности «бродчинга» при исследовательском проектировании.

**Приложения** содержат вспомогательные данные и листинги программ, обеспечивающих анализ и прогноз развития экстремальной ситуации «бродчинг».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования позволили установить следующие факты и закономерности:

- При моделировании режима «бродчинг» в задачах анализа и нормировании устойчивости необходимо учитывать взаимосвязь явления «захвата» и последующего неуправляемого разворота судна на попутном волнении. Нормирование только условия возникновения режима «захвата» не дает объективной оценки фактической безопасности судна в рассматриваемой экстремальной ситуации.
- Возникновение явления «захвата» наблюдается сразу же после выполнения критериальных соотношений, определяющих условие движения судна со скоростью бега волны. Вероятность такого явления на крутых волнах опасной длины достаточно высока.
- Динамика судна в режиме «бродчинг» характеризуется многими факторами и далеко не всегда завершается процессом опрокидывания судна. Вероятность опрокидывания в режиме «бродчинг» – практически на порядок меньше, чем вероятность возникновения «захвата». Поэтому действующие в ряде классификационных обществ нормы, связанные с ограничением числа Фруда на попутном волнении, лишь односторонне отражают сущность явления и подлежат корректировке на базе новых экспериментальных данных.
- Откорректирована математическая модель динамики бродчинга, предложенная в работах Д.М.Ананьева. Используемая система дифференциальных уравнений включает нелинейную пространственную функцию восстанавливающего момента [Нечаев Ю.И., 1989], непрерывно изменяющегося на волнении в зависимости от особенностей формы корпуса, динамических и кинематических характеристик неуправляемого разворота. Не учет этой функции и замена ее простейшей нелинейной характеристикой – диаграммой устойчивости судна на тихой воде при интегрировании дифференциального уравнения крена приводит к недооценке устойчивости и ошибкам в опасную сторону. Анализ результатов моделирования позволил выделить существенные факторы и определить систему критериальных соотношений, характеризующих безопасность судна в рассматриваемой экстремальной ситуации.
- Построена универсальная диаграмма бродчинга, определяющая характеристики неуправляемого разворота в зависимости от безразмерного времени и включающая в качестве важной характеристики эволюции относительный радиус циркуляции. Такое представление позволило существенно упростить использование диаграммы в прак-

тических задачах оценки геометрических и кинематических параметров неуправляемого разворота судна на попутном волнении.

- Сформулирована задача поддержки принятия решений по управлению судном при движении на попутном волнении на основе разработанной системы критериев. Предлагаемый алгоритм позволяет осуществлять изменение скорости судна в зависимости от уровня действующих возмущений и динамических данных измерений, получаемых от системы датчиков колебательного движения при рыскании судна на волнении.

В результате проведенного исследования разработаны математические модели, критериальный базис, алгоритмы и программное обеспечение оценки безопасности судна в режиме «бродинг», которые могут быть использованы в системах обеспечения безопасности мореплавания и в исследовательском проектировании при оценке риска возникновения неуправляемого разворота и опрокидывания судна на попутном волнении. Установленные в процессе анализа результатов моделирования новые факты и закономерности позволяют откорректировать накопленные ранее сведения о взаимодействии судна с внешней средой и сформулировать критериальный базис для разработки обоснованной системы нормирования остойчивости судов в рассматриваемой экстремальной ситуации.

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

1. Завьялова, О.П. Интерфейс «оператор-компьютер» в динамических системах поддержки принятия решений [Текст] / О.П.Завьялова // Сб. трудов конференции молодых ученых и специалистов по морским интеллектуальным технологиям «МОРИНТЕХ-ЮНИОР-2000». – СПб, 2000. – С.118-121.
2. Завьялова, О.П. Методы моделирования при анализе динамических сцен в интеллектуальных системах обучения и принятия решений [Текст] / О.П.Завьялова, Ю.И.Нечаев // Сб. тезисов докл. 4-й Международной конференции по морским интеллектуальным технологиям «МОРИНТЕХ-2001». – СПб, 2001. – С.269-270.
3. Нечаев, Ю.И. Оценка остойчивости в условиях неуправляемого разворота судна в режиме «бродинг» [Текст] / Ю.И.Нечаев, О.П.Завьялова // Сб. тезисов докладов научно-техн. конференции по проблемам мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики «Крыловские чтения». – СПб, 2001. – С.114-116.
4. Zavyalova, O.P. The broaching interpretation in learning intelligence systems / O.P.Zavyalova, Yu.I.Nechaev // Proceedings of 14th International Conference On Hydrodynamics in Ship Design «HYDRONAV-2001». – Szczecin-Miedzyzdroje, Poland, 2001. – p.253-263.
5. Завьялова, О.П. Интерпретация сложных ситуаций в интеллектуальных системах обеспечения безопасности мореплавания [Текст] / О.П.Завьялова // Сб. трудов конференции молодых ученых и специалистов по морским интеллектуальным технологиям «МОРИНТЕХ-ЮНИОР-2002». – СПб, 2002. – С.83-84.
6. Zavyalova, O. Mathematical modeling of conditions of imitation and development of extreme situation on irregular waves / O. Zavyalova // Proceedings of third international ship-building conference «ISC'2002». – St.Petersburg, 2002. – Section B, p.224-228.
7. Zavyalova, O. Maneuverability loss in a broaching regime: the analysis and control of extreme situation / O.Zavyalova, Yu.Nechaev // Proceedings of 15th International Conference

On Hydrodynamics in Ship Design, Safety and Operation «HYDRONAV'2003». – Gdansk, Poland, 2003. – p.201-208.

8. Нечаев, Ю.И. Критерии оценки опрокидывания судна в режиме «бродинг» [Текст] / Ю.И.Нечаев, О.П.Завьялова // Сб. тезисов докладов научно-техн. конференции по проблемам мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики «ХЛІ Крыловские чтения». – СПб, 2003. – С.60-62.

9. Zavyalova, O.P. Criteria basis for estimation of capsizing danger in broaching extreme situation for irregular following waves / O.P.Zavyalova, Yu.I.Nechaev // Proc. of 8th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles «STAB'2003». – Madrid, Spain, 2003. – p.25-34.

10. Анищенко, О.П. Анализ сценариев развития экстремальных ситуаций в бортовых интеллектуальных системах [Текст] / О.П.Анищенко // Труды 6-й Международной конференции по морским интеллектуальным технологиям «МОРИНТЕХ-2005». – СПб, 2005. – С.363-366.

11. Завьялова, О.П. Экстремальная ситуация «бродинг»: анализ и критериальные оценки условий «захвата» и опрокидывания судна [Текст] / О.П.Завьялова, Ю.И.Нечаев // Морской вестник. – 2004. – №1(9). – С.87-92.

12. Anischenko, O.P. Modeling of ship dynamics in following waves for various storm scenarios / O.P.Anischenko, Yu.I.Nechaev // Proceedings of 16th International conference on hydrodynamics in ship design, 3rd International symposium on ship maneuvering «HYDMAN». – Gdansk, Poland, 2005. – p.208 – 218.

13. Nechaev, Yu.I. Modeling of ship dynamic on wave use «Kastner – Paulling» conception / Yu.I.Nechaev, O.P.Anischenko // Proceedings of International Ship Stability Work shop. – Istanbul, Turkey, 2005. – p.1 – 8.