Живица, Сергей Григорьевич. Динамика аварийного судна, потерявшего начальную остойчивость, на волнении : диссертация ... кандидата технических наук : 05.08.01.- Санкт-Петербург, 1998.- 195 с.: ил. РГБ ОД, 61 99-5/174-X

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. АКАД. А.Н. КРЫЛОВА

На правах рукописи

Живица Сергей Григорьевич

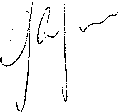
**ДИНАМИКА АВАРИЙНОГО СУДНА, ПОТЕРЯВШЕГО НАЧАЛЬНУЮ ОСТОЙЧИВОСТЬ, НА ВОЛНЕНИИ**

Специальность 05.08.01 - теория корабля

Диссертация На соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Д.т.н., профессор

Н.Н. Рахманин



/

С.-Петербург

1998

**Содержание**

Введение

Глава 1. Математическая модель бортовой качки судна с отрицательной начальной метацентрической высотой и методы ее исследования

1. Обоснование и выбор дифференциального уравнения движения неостойчивого судна на волнении
2. Основные положения базового аналитического метода исследования поведения судна с отрицательной начальной остойчивостью
3. Консервативные и неконсервативные колебания неостойчивого судна
4. Особенности неравнообъемных бортовых колебаний судна

Глава 2. Установившаяся бортовая качка неостойчивого судна на регулярном волнении

1. Гармоническая и субгармоническая бортовая качка
2. Параметрический резонанс
3. Устойчивость форм бортовых колебаний
4. Анализ возмущающего момента, действующего на судно в условиях волнения

Глава 3. Физическое и математическое моделирование бортовой качки неостойчивого судна

1. Экспериментальное исследование поведения судна с отрицательной начальной остойчивостью
2. Численное моделирование бортовой качки в условиях регулярного и нерегулярного волнения

[Глава 4. Прикладные задачи по исследованию динамики судна с отрицательной начальной остойчивостью 159](#bookmark48)

1. Статическое приложение кренящего момента к неостойчивому

судну 159

1. Воздействие шквала в условиях тихой воды и волнения 165

188

Заключение 186

Литература

**Введение**

1. *Актуальность изучения поведения аварийного судна.* В связи с непрекращающимися авариями на море, заканчивающимися опрокидыванием судов, в последние годы все большее внимание специалистов по качке концентрируется на изучении вопросов, касающихся поведения аварийного судна.

Основной целью проводимых научно-исследовательских работ в области мореходности аварийного судна является, с одной стороны, совершенствование критериев аварийной остойчивости, применяемых на стадии проектирования, а с другой, выработка рекомендаций для судоводителей по предотвращению или снижению опасности опрокидывания судна при плавании в аварийном состоянии.

Рассматривая отличительные признаки аварийного судна, влияющие на его качку при воздействии ветра или волнения, как то: наличие статических крена и дифферента; присутствие внутри корпуса значительных масс жидкости; малую остойчивость; отсутствие возможности управления и самостоятельного передвижения при тяжелых последствиях аварии, можно видеть, насколько сложной является задача по изучению его динамики в реальных условиях.

Как следствие, при нормировании аварийной остойчивости в официальных руководствах по непотопляемости гражданских судов как в нашей стране, так и за рубежом был принят и используется по настоящее время главным образом экспертный метод оценки, в котором требования к поврежденному судну определяются из сопоставления характерных параметров остойчивости хорошо зарекомендовавших себя судов и судов, опрокинувшихся в результате аварии. В качестве нормативных критериев выбраны минимально допустимые значения ряда параметров диаграммы статической остойчивости (ДСО): начальной метацентрической высоты, максимального плеча, протяженности диаграммы до угла заката и других.

Проверка обеспечения остойчивости производится по этим критериям при фиксированных условиях нагрузки. Недостаток такого эмпирического подхода известен - с одной стороны, основные физические причины, в первую очередь - волнение и ветер, обуславливающие опасную для судна ситуацию, остаются вне поля зрения, а с другой, исключается возможность рассмотрения конкретных аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации.

В последние годы ситуация стала изменяться. Учесть в процессе проектирования различные кренящие факторы, связанные с характерными элементами корпуса, нагрузкой поврежденного судна и ветро-волновыми условиями, позволяет использование интенсивно развивающегося физического подхода к нормированию. Переход от “статического” к “динамическому” принципу нормирования остойчивости позволяет реально повысить безопасность проектируемого судна.

Для достижения этой цели необходимо иметь решение ряда задач, важнейшей из которых является расчет максимального угла крена и связанных с ним элементов движения судна под действием внешней нагрузки.

Попытки учесть воздействие шквала на корабль в аварийном состоянии предпринимались при оценке непотопляемости военных кораблей, но полученные результаты широкого применения не нашли из-за отсутствия надежной математической модели для описания качки аварийного объекта на волнении. А только при наличии такой модели становятся возможными правильная оценка поведения поврежденного судна и, как следствие, решение одной из центральных задач нормирования - отыскание максимального угла крена при регламентируемом внешнем воздействии.

1. *Современное состояние вопроса по изучению бортовой качки аварийного судна.* К настоящему времени в теории корабля рассмотрены многие вопросы динамики судна в аварийном состоянии. Достаточно полно изучены обстоятельства качки судна при несимметричных нагрузке и форме погруженного объема. Среди работ этого направления следует отметить исследования [5], [20], [50], [63], [74]. В качестве общего результата, характерного для несимметрично загруженного судна, можно указать на усугубление взаимосвязи между различными видами качки за счет гидростатической асимметрии корпуса. При этом соответствующие члены в уравнениях движения имеют первый порядок малости и требуют учета даже при линейном рассмотрении задачи. Среди особенностей динамики судна, накрененного без дифферента можно отметить следующие, наиболее важные с точки зрения безопасности:

* отличие среднего угла крена судна при качке на волнении от крена на тихой воде;
* возрастание вероятности возникновения параметрического резонанса;
* различие в поведении судна в зависимости от того, с какого борта набегают волны - с погруженного (низкого), или со стороны вышедшего из воды (высокого).

Обширные исследования проведены в области динамики и качки аварийного судна с затопленными отсеками различных категорий [48], [84], [90]. Предложенные при этом методы по определению характеристик поперечной качки хорошо согласуются с экспериментом. Определено, что наличие значительных масс жидкости в отсеках судна оказывает существенное влияние на его динамические характеристики. Это влияние проявляется многообразно:

* появляется дополнительный резонанс бортовой качки в более высокой частотной области по сравнению с собственной частотой колебаний внутренней жидкости;
* уменьшается момент инерции массы и остойчивость судна, особенно при затоплении высоко расположенных отсеков;
* увеличивается демпфирование качки в поперечной плоскости, и изменяются возмущающие силы.

Снижение метацентрической высоты, характерное для аварийных судов, нередко приводит к искривлению начального участка диаграммы статической остойчивости. Такое изменение формы ДСО становится причиной проявления признаков нелинейности в динамике качающегося судна, среди которых:

* зависимость частоты собственных колебаний от их амплитуды;
* изгиб амплитудно-частотной кривой бортовой качки;
* возможность существования нескольких режимов колебаний при одних и тех же волновых условиях.

Перечисленные особенности достаточно полно изучены в рамках нелинейной теории качки, развитой в работах [7], [9], [32], [46], [61], [79], в первую очередь, применительно к неповрежденным судам, для которых положительная метацентрическая высота является нормой (согласно требованиям как Регистра России, так и зарубежных классификационных обществ, начальная метацентрическая высота должна быть всегда положительной).

К моделям, используемым для анализа поведения аварийного судна, следует добавить математическую модель, интенсивно разрабатываемую в Англии для определения условий безопасного плавания пассажирских паромов типа Ро-Ро в морских условиях [90]. Модель учитывает нелинейный характер воздействия внешних сил и сил, возникающих при затоплении грузовой палубы через пробоину при взаимодействии судна с набегающими волнами. В связи с учетом большого количества влияющих факторов представленные в [90] уравнения движения интегрируются численными методами при условии, что судно дрейфует лагом к волнению и имеет положительную начальную остойчивость.

К сожалению, многообразие диаграмм статической остойчивости, которые могут встречаться при аварийном затоплении, не ограничивается только случаями затоплений с положительной начальной поперечной метацентрической высотой. В теории непотопляемости рассматривается пять характерных типов ДСО [42], [54], [56]:

1. затопление симметричное относительно ДП, начальная поперечная остойчивость положительна;
2. затопление несимметричное относительно ДП, начальная поперечная остойчивость положительна;
3. затопление симметричное относительно ДП, начальная поперечная остойчивость отрицательна;
4. начальная остойчивость отрицательна, затопление несимметрично относительно ДП так, что статический момент действует в сторону увеличения крена;
5. начальная остойчивость отрицательна, затопление несимметрично относительно ДП так, что статический момент действует в сторону, противоположную крену.

Из этой классификации видно, что три из пяти перечисленных типов затопления характеризуются наличием отрицательной начальной остойчивости, при которой судно имеет два устойчивых положения равновесия (одно при крене на правый борт, другое - на левый). Никаким спрямляющим моментом в прямое положение судно в этом случае не поставить.

Наличие начального участка ДСО с углами крена, характеризуемыми отрицательными значениями плеч остойчивости, чрезвычайно усложняет задачу о бортовых колебаниях судна, как на тихой воде, так и на волнении. Поэтому неслучайно, что до последнего времени в исследованиях, посвященных аварийному судну с такой особенностью ДСО, подробно изучались лишь отдельные вопросы динамики, например [3], [76], не дающие общего представления о движении неостойчивого судна на волнении.

Таким образом, для того, чтобы можно было подойти к выработке эффективных физических критериев, необходимых для установления безопасных параметров аварийной остойчивости судна с любой комбинацией затопления и нагрузки в реальных морских условиях, требуется дальнейшее развитие теории нелинейной качки. При этом в первый ряд нерешенных проблем должны быть поставлены задачи, отражающие особенности поведения аварийного судна с отрицательной начальной метацентрической высотой в условиях тихой воды и волнения.

1. *Аварии, приводящие к отрицательной начальной остойчивости.* Появление отрицательной начальной остойчивости у судна не является исключительным событием. Возможной причиной этого может явиться неправильная погрузка, приводящая к чрезмерно высокому положению центра тяжести судна, что в сочетании с другими факторами значительно ухудшает остойчивость в процессе плавания. В свое время притчей во языцех были лесовозы, полная загрузка которых часто приводила к опасно низкой начальной остойчивости. Но это относится не только к ним. Так, например, западногерманское судно “Ирэн Ольдендорф”, совершавшее рейс с грузом кокса, опрокинулось в Северном море [1]. Наиболее вероятной причиной гибели считается потеря остойчивости в результате заливания палубы водой, которая, смешиваясь с коксом и не успевая сходить за борт, значительно повысила центр тяжести судна.

В мировом флоте очень часто происходят катастрофы крупных пассажирских судов, первопричиной которых являются пожары. Их тушение обычно связано с многоярусным затоплением помещений, и если не принимаются эффективные меры по удалению воды или, по крайней мере, спуску ее в нижние помещения, то наряду с повышением положения центра тяжести судна, возникают большие свободные поверхности, вызывая потерю начальной поперечной остойчивости. На сегодняшний день не существует правил, контролирующих использование воды при тушении пожаров на палубах с точки зрения потери остойчивости. Часто мощность пожарной магистрали не соотносится с необходимым количеством воды для тушения пожара. Например, при тушении пожара и, как следствие, скопления в помещениях верхних палуб больших масс воды, опрокинулся пассажирский лайнер “Скандинавиан Си” [64].

Возможной причиной потери остойчивости может стать тяжелое обледенение. Угроза обледенения существует для судов всех типов, но особенно существенно сказывается обледенение на мореходных качествах судов небольшого водоизмещения, наиболее подверженных забрызгиванию и заливанию морской водой. Характеристики остойчивости при обледенении ухудшаются из-за повышения центра тяжести судна. Например, при массе намерзшего льда на судне, достигшей величины приблизительно 13% от водоизмещения, как показывает практика [2], начальная метацентрическая высота может уменьшиться в 2 раза.

Сопутствующим, а в некоторых случаях, как показано в работах [49], [92], основным фактором, приводящим к потере начальной остойчивости, является также накопление забортной воды в палубном колодце при заливании судна в штормовых условиях. Часто это происходит вследствие того, что шпигаты, минимальные размеры которых регламентированы классификационными обществами, в силу различных причин (обмерзание, неисправность, укладка рядом различных грузов) могут не выполнять своих функций в полной мере.

Но появление отрицательной начальной остойчивости далеко не означает неминуемую гибель судна. Так, в результате правильных действий экипажа теплохода “Украина” при потере начальной остойчивости во время тушения пожара судно удалось удержать от опрокидывания [1]. Грузовые суда “Большевик Каспия ” и “Крейцзее”, получив отрицательную начальную метацентрическую высоту в результате неправильной загрузки, продолжали плавание, первое - в течение тринадцати часов, а второе - в течение суток [1]. К сожалению, из-за неверных действий экипажа оба теплохода в конечном итоге опрокинулись. А вот сухогруз “Григориус”, также имевший отрицательную начальную остойчивость, удалось спасти [1].

Из этих примеров, которые можно продолжить, видно, что благополучный исход при подобных авариях во многом определяется поведением плавсостава, действия которого зависят, во-первых, от понимания им особенностей в реакции неостойчивого судна на действие ветра или волнения и, во-вторых, от наличия возможности быстро оценивать ожидаемые максимальные углы накренения судна для принятия эффективных решений.

Таким образом, всестороннее изучение поведения аварийного судна, потерявшего начальную остойчивость, представляется необходимым не только в рамках развития современных “динамических” критериев остойчивости, но и для выработки соответствующих рекомендаций судоводителям. Для этого важно располагать надежными результатами исследований, дающими общее представление о характере поведения судна при различных уровнях его начальной остойчивости.

1. *Обзор исследований динамики судна с отрицательной начальной остойчивостью.* К сожалению, задача по определению мореходности Судна с Отрицательной Начальной Остойчивостью (в дальнейшем - СОНО) плохо поддается исследованию теоретическими методами, широко используемыми в науке и технике и позволяющими тем или иным образом линеаризировать дифференциальное уравнение качки [28], поскольку линеаризация диаграммы остойчивости СОНО в области, охватывающей малые углы наклонений, из-за наличия “петли” с отрицательными плечами восстанавливающего момента возможна лишь при очень больших амплитудах колебаний, когда влиянием особенности начального участка ДСО на характер качки можно пренебречь.

Эта задача давно уже привлекает внимание исследователей, но полученные результаты пока далеки от окончательного ее решения.

В 1935 году Г.Е. Павленко [45] была предпринята попытка теоретического исследования бортовой качки СОНО на тихой воде в отсутствии демпфирования. В результате для прямостенного судна им была получена простая зависисмость между метацентрической высотой при статическом крене hst, соответствующему углу устойчивого равновесия 0st, и начальной метацентрической высотой h0. При исследовании вопроса о возможности и характере колебаний судна при потере им начальной остойчивости Г.Е. Павленко была определена основная особенность в его

поведении - существование двух режимов колебаний: относительно

устойчивого положения равновесия (малые колебания) и относительно неустойчивого положения равновесия (большие колебания). При этом было определено, что большие колебания могут существовать при условии, если их амплитуда превышает угол устойчивого равновесия 0st не менее, чем в V2 раза.

Влияние демпфирования на бортовые колебания СОНО в условиях тихой воды было экспериментально проверено Г.В. Виленским и Г.Н. Ткачуком [18]. Ими было выявлено различие в скорости затухания при переходе колебаний вокруг неустойчивого к колебаниям вокруг устойчивого положения равновесия.

Несмотря на то, что эти две работы не имели непосредственного практического “выхода”, они показали, что задача поддается анализу, и дали толчок к ее изучению.

Вопрос о теоретическом определении амплитуд бортовой качки СОНО на волнении получил развитие в работе Ю.А. Крайнего и Е.В. Пергаева [30]. Использование для решения изолированного уравнения качки малого судна в относительных координатах метода переменного масштаба дало им возможность получить аналитическое решение по определению амплитудно- частотных характеристик колебаний СОНО с симметричной загрузкой. Внешнее возмущение принималось изменяющимся по гармоническому закону, а демпфирование считалось весьма малым. Требуемую в решении собственную частоту, существенно зависящую в данном случае от размахов качки, предлагалось при этом определять приближенно [47].

Хотя, учитывая приведенные ограничения, полученные теоретические выражения сложно непосредственно применить на практике, эта работа стала весьма полезной в методическом плане.

Аналитически исследовал бортовую качку СОНО также Д.М. Ананьев [3], [4]. Им рассматривалось изолированное уравнение качки в относительных координатах, решение которого искалось в виде ряда с помощью метода

1 з

гармонического баланса. Но, поскольку, его исследование опиралось на предположение о невозможности бортовой качки СОНО относительно неустойчивого положения равновесия, полученные им результаты оказались справедливыми лишь для малых колебаний.

Экспериментальное изучение бортовой качки СОНО предпринималось в ВВМУ им. Ф.Э. Дзержинского. Проанализировав типовые схемы затопления кораблей и показав на примерах, что реальные боевые повреждения могут нередко приводить к появлению отрицательной начальной остойчивости, в 1992 году специалистами Училища были проведены испытания модели, имеющей отрицательную начальную метацентрическую высоту, как на тихой воде с использованием механического раскачивающего устройства, так и на естественном нерегулярном волнении. В ходе экспериментов были получены временные реализации процесса бортовой качки и их спектрограммы. Определив опасные режимы колебаний модели, к сожалению, исследователи из-за отсутствия надежной теоретической базы по оценке бортовой качки неостойчивого судна каких либо обобщающих выводов и рекомендаций предложить не смогли.

Что касается зарубежных исследований динамики СОНО в последние годы, то они, в основном, направлены на качественное изучение фазового портрета движения судна численными методами для выяснения условий либо опрокидывания, либо появления хаотических режимов колебаний при чисто гармоническом внешнем возмущении. Уравнения бортовых колебаний при этом выбираются достаточно условно.

Один из представителей этого направления - японский исследователь М. Кан. В своих работах [72], [73] он рассматривает изолированное уравнение бортовой качки в абсолютных координатах, которое решается численно методом Рунге-Кутта. Решение представляется в виде диаграмм бортовой качки для различных частот волнения при изменении амплитуды возмущающего момента. С помощью того же численного метода на фазовой плоскости для различных амплитуд возмущения определяются области начальных параметров, при которых возможно опрокидывание судна.

Д.М. Фальзарано и А.В. Троеш из США исследовали поведение судна, приобретшего отрицательную начальную метацентрическую высоту из-за появления воды в палубном колодце [68]. Применяя для изучения поведения судна также численные методы, они констатировали существование трех возможных режимов бортовой качки неостойчивого судна на регулярном волнении: гармонический, субгармонический и хаотические колебания.

Рассматривая бортовую качку СОНО на регулярном волнении в присутствии малых возмущений в виде белого шума, X. Лин и С. Иим из США на основе численного решения уравнения движения продемонстрировали, что присутствие дополнительного случайного возмущения расширяет границы области хаотических бортовых колебаний и может приводить к сосуществованию нескольких устойчивых режимов колебаний при одном и том же волновом воздействии [77].

Поведение неостойчивого судна на встречном волнении изучалось англичанами С. Бишопом и М. Томпсоном [76]. Используя ряд численных геометрических методов, они исследовали динамическую устойчивость малых бортовых колебаний в области параметрического резонанса, возникающих из- за взаимосвязи с вертикальной качкой. Ими было установлено, что вне резонансных частот судно с отрицательной начальной остойчивостью всегда испытывает бортовую качку малой амплитуды с частотой набегающих волн. При приближении кажущейся частоты к удвоенной частоте бортовых колебаний характер качки меняется. После прохождения ряда бифуркаций наступает параметрическая раскачка вследствие “пульсации” диаграммы статической остойчивости. Внимание исследователей было сосредоточено на изучении особенностей малых параметрических колебаний вокруг статического угла крена. Большие колебания вокруг неустойчивого положения равновесия ими не рассматривались.

Подводя итоги обзора работ по исследованию поведения СОНО, можно

заключить:

* предложенные математические модели бортовой качки судна с отрицательной начальной остойчивостью теоретически не

обосновывались и не проходили экспериментальную проверку;

* аналитически получено решение только для гармонических колебаний при малом демпфировании, причем область их существования не определена. Задача по определению собственной частоты бортовой качки решена без учета демпфирования и для малых колебаний имеет сугубо приближенный вид;
* явление параметрического резонанса рассмотрено только на продольном волнении и лишь для малых колебаний вокруг устойчивого положения равновесия;
* возмущающий волновой момент с учетом переменности смоченной поверхности и влияние постоянного кренящего момента на динамику неостойчивого судна не исследовались;
* задача о динамической устойчивости СОНО и условия перехода малых колебаний в большие не рассматривалась;
* числено моделировались главным образом переходные режимы от малых колебаний к большим с целью выявления природы возникающего при этом хаоса в детерминированной динамической системе “судно на регулярном волнении”. Общих критериев наступления хаоса и, как следствие, условий смены режимов колебаний при этом не предложено;
* экспериментально особенности бортовой качки СОНО изучались на тихой воде и на волнении лишь для выявления характерных видов колебаний СОНО. Каких либо методик по определению основных параметров бортовой качки на основе проведенных испытаний не разработано.

1. *Цель работы.* Как видно из вышеизложенного, поведение

неостойчивого судна изучено совершенно недостаточно, а проверенные

эффективные методы оценки параметров качки просто отсутствуют, из чего

вытекает необходимость исследования динамики судна, потерявшего начальную остойчивость, значительно более подробно, охватив анализом, по возможности, все основные с точки зрения безопасности особенности качки аварийного судна такого типа.

Таким образом, целью работы является разработка практической методики расчета динамических характеристик неостойчивого судна, открывающей для проектантов и судоводителей возможность предсказывать развитие опасных режимов бортовой качки судна, потерявшего начальную остойчивость в различных условиях плавания.

Для этого необходимо:

* сформулировать и решить нелинейную задачу о бортовой качке судна с отрицательной начальной остойчивостью на спокойной воде и на волнении;
* определить условия появления и способы оценки максимальных углов крена неостойчивого судна в характерных ветро-волновых условиях;
* экспериментально проверить полученные расчетные теоретические соотношения.

1. *Краткое содержание работы.* Решение поставленной задачи начинается с установления структуры дифференциального уравнения, описывающего бортовую качку СОНО. В первой главе проведен анализ общей системы уравнений движения судна на волнении и обоснован переход к изолированному уравнению бортовых колебаний аварийного судна. Выбор дифференциального уравнения с членом, описывающим восстанавливающий момент в виде кубического полинома, позволил выбрать рациональный способ его решения - метод переменного масштаба [12], [13]. В начале главы приведены основные положения метода, определены границы его применения и получены принципиальные аналитические зависимости, необходимые для последующего анализа бортовой качки судна. Вторая часть главы посвящена изучению динамики неостойчивого судна в условиях спокойной воды. На основе изучения фазового портрета определены свойства качающегося судна как сугубо нелинейной динамической системы. Получены аналитические формулы по определению частоты собственных колебаний и линеаризированного коэффициента бортовой качки в зависимости от типа ДСО. Показано, что при несовпадении центра тяжести судна с плоскостью ватерлинии бортовая качка будет возбуждать поперечено-гоизонтальные и вертикальные колебания. При этом характеристики остойчивости судна сами становятся функциями сопутствующих видов качки.

Бортовая качка СОНО на волнении всесторонне рассмотрена во второй главе. На базе методов нелинейной механики получены практические формулы по вычислению амплитуд качки при всех опасных для аварийного судна режимах: в области основного резонанса, параметрического, при субгармоническом резонансе 2-го (частота колебаний судна в два раза ниже частоты возмущения) и 3-го рода (частота качки в три раза ниже частоты возмущения). Определены критические значения возмущающего момента, вызывающего большие колебания судна вокруг неустойчивого положения равновесия. Дана оценка возможности качки судна в режиме хаотических колебаний; показаны причины, их возбуждающие. В конце главы на основе работы [32] проанализирована структура возмущающего момента, действующего на СОНО при качке конечной амплитуды в условиях волнения, набегающего на судно с борта.

Третья глава содержит описание эксперимента, проведенного с моделью СОНО на тихой воде *и* регулярном волнении. В процессе его выполнения выявлены все основные особенности динамики неостойчивого судна, предсказанные при теоретическом исследовании. Проведенный сравнительный анализ показал удовлетворительное совпадение результатов аналитического решения с экспериментальными данными. Глава также включает описание методики математического моделирования бортовой качки неостойчивого судна в условиях регулярного и нерегулярного волнения. Продемонстрировано, что результаты численного, аналитического решения и экспериментального исследования качки СОНО коррелируют между собой. Численное моделирование на двухмерном нерегулярном волнении подтвердило возможность возникновения у судна, потерявшего начальную остойчивость, интенсивной бортовой качки при средней частоте волнения, приближающейся к диапазону частот, в котором наблюдается субгармонический резонанс в условиях регулярных волн.

В заключительной четвертой главе представлено решение задачи о динамической устойчивости судна с отрицательной начальной метацентрической высотой к воздействию кренящих моментов. Рассмотрены две ситуации: приложение статического момента при спрямлении аварийного судна на спокойной воде и действие шквала, как в условиях тихой воды, так и на волнении. Обе задачи решены с помощью энергетического метода, использованного С.Н. Благовещенским [10] и В.В. Луговским [33] для неповрежденного судна. В процессе решения изучена реакция СОНО на ударную ветровую нагрузку. Отказ от гармонической аппроксимации траектории наклонения неостойчивого судна под действием шквала позволил получить корректные аналитические выражения по определению минимального момента, приводящего к переваливанию судна на тихой воде и к возбуждению субгармонического или параметрического резонанса на волнении.

Проведенные в диссертационной работе исследования значительно расширили знания о поведении аварийного судна на волнении, что позволило выявить все важные с точки зрения безопасности особенности бортовых колебаний судна с отрицательной начальной метацентрической высотой. При этом использование выбранной математической модели качки СОНО дало возможность вывести достаточно простые теоретические соотношения для определения условий возбуждения и оценки максимальных углов крена судна в характерных опасных ситуациях.

Заключение

По итогам выполненного исследования можно выделить следующие основные результаты:

1. Предложена математическая модель, отражающая качественно и количественно все главные свойства качающегося на волнении неостойчивого судна.
2. Показано, что качка неостойчивого судна качественно отличается от качки судна с положительной начальной метацентрической высотой. С помощью аналитического метода исследования выбранного уравнения бортовой качки аварийного судна выявлены характерные режимы колебаний. В зависимости от частоты и интенсивности набегающего волнения, неостойчивое судно совершает либо малые колебания вокруг устойчивого положения равновесия, либо большие колебания вокруг неустойчивого положения равновесия; при переходе от малых колебаний к большим судно может попадать в режим хаотической качки.
3. Определено, что при плавании на волнении неостойчивое судно может испытывать резонансную качку в широком диапазоне частот. При совпадении частоты набегающих волн и частоты собственных бортовых колебаний судна возбуждается основной резонанс; в случае двукратного превышения частотой возмущения частоты собственных колебаний проявляется либо субгармонический резонанс 2-го рода, либо параметрический резонанс; при частоте волнения, в три раза большей собственной частоты бортовой качки, может возникать субгармонический резонанс 3-го рода.
4. Получены аналитические соотношения для определения максимальных бортовых наклонений судна с отрицательной начальной остойчивостью при качке во всех указанных резонансных режимах, а также условия их возбуждения. Выполненные по упомянутым соотношениям расчеты подтверждены результатами численного моделирования и данными специальных модельных испытаний.
5. Проанализирована реакция судна на воздействие шквала. Предложены аналитические зависимости, позволяющие оценить критические значения внешней нагрузки, приводящей либо, к переваливанию неостойчивого судна с борта на борт на спокойной воде, либо к возбуждению бортовой качки большой амплитуды в условиях регулярного волнения.

Перечисленные результаты означают, что с помощью предложенных в работе математической модели и методов ее решения, проверенных как численно, так и экспериментально, можно осуществлять полный качественный анализ бортовых колебаний по выявлению всех потенциально опасных режимов качки для судна с отрицательной начальной остойчивостью. Решенные примеры на базе принятой математической модели демонстрируют возможность ее использования при дальнейшем изучении поведения неостойчивого судна не только в стационарных режимах качки, но и переходных, включая процесс опрокидывания, что важно при совершенствовании физических критериев остойчивости, а выявленные общие закономерности поведения судна с отрицательной начальной остойчивостью будут полезны при обучении плавсостава по действиям в экстремальных ситуациях.

1. Аксютин Л. Р., Благовещенский С. Н. Аварии судов от потери остойчивости. Л., Судостроение, 1975.
2. А к с ю т и н Л. Р. Обледенение судов. Л., Судостроение, 1979
3. А н а н ь е в Д. М. Бортовая качка судна с отрицательной начальной остойчивостью, в сб.: Мореходные качества и проектирование судов. Труды КТИРПХ, Калининград, 1989.
4. А н а н ь е в Д. М. Некоторые задачи устойчивости бортовой качки. - в сб.: Материалы по обмену опытом вып. 495. Совершенствование ходовых, мореходных, мореходных и маневренных качеств судов. Л., Судостроение,

1991.

1. А н д р е е в Г. Е. К вопросу о бортовой качке на продольном волнении судна, имеющего начальный крен. В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости морских судов. М. - Л., Транспорт, (Регистр СССР), 1968.
2. Б а с и н А. М., Анфимов В. Н., Авдеев Г. К. Теоретические основы расчета и нормирования остойчивости судов внутреннего плавания. Труды ЦНИИРФ, вып.36, 1957.
3. Б а с и н А. М. Качка судов, М., Транспорт, 1969.
4. Бендат Д., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М., Мир, 1974.
5. Благовещенский С. Н. Качка корабля, Л., Судпромгиз, 1954.
6. Благовещенский С. Н. О действии на судно ветровой нагрузки. - в сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости, Л., Транспорт, 1965.
7. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.,Физматгиз, 1958.
8. Б о н д а р ь Н. Г. Некоторые автономные задачи нелинейной механики.

Киев, Наукова Думка, 1969

1. Б о н д а р ь Н. Г. Нелинейные стационарные колебания. Киев, Наукова Думка, 1974
2. Б о р и с о в Р. В., К а й т а н о в Ю. С., Фомина Л. А. Численное решение на ЭВМ системы уравнений, описывающей динамический крен судна под действием ветра и волн. сб. Гидромеханика и теория корабля., Труды ЛКИ,1979
3. Б о р о д а й И. К, Нецветаев Ю. А Качка судов на морском волнении. Л., Судостроение, 1969.
4. Бородай И. К., Мореншильдт В. А., Виленский Г. В., В. М. Дубицкий, Б. Н. Смирнов Прикладные задачи динамики судов на волнении. Л., Судостроение, 1989.
5. Б ы к о в В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М., Советское радио, 1971.
6. Виленский Г. В.,Ткачук Г. Н. Экспериментальное исследование бортовой качки модели судна с начальным креном. - в сб. Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости морских судов. Л., Транспорт, 1968
7. Виленский Г. В. Нелинейные дифференциальные уравнения бортовой качки судна с начальным креном и их приближенное решение. Труды ЦНИИМФ, Л., Транспорт, вып.153, 1972.
8. В и л е н с к и й Г. В. Особенности качки судна с начальным креном. Труды ЦНИИМФ, вып.198, Л., Транспорт, 1975.
9. В о л к о в В. Н. Учет аварийной остойчивости при определении вероятности сохранения поврежденного судна. Материалы советских экспертов в рабочей группе ИМКО по непотопляемости судов, 1966
10. Волков В.Н. Обеспечение положительной начальной остойчивости неповрежденных и поврежденных судов. Научно-технический сборник Регистра СССР, вып. 16, Транспорт, 1988.
11. Г е р а с и м о в А. В. Энергостатистическая теория нелинейной нерегулярной качки судна. Л., Судостроение, 1979
12. Г у р а л ь н и к Б. С. К вопросу об изменении нагрузки судна порожнем во время эксплуатации. Труды КТИРПХ, Калининград, 1989.
13. Ж и в и ц а С. Г. Особенности бортовой качки судна с отрицательной начальной остойчивостью. Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып.6, 1997.
14. Ж и в и ц а С. Г. Теоретическое исследование динамики аварийного судна, потерявшего начальную остойчивость. Тезисы докладов на XXXVIII научно-техническая конференция “Проблемы мореходных качеств судов и корабельной гидромеханики.”, С.Петербург, 1997.
15. К а й т а н о в Ю. С. Способы практического учета нелинейных факторов в расчетах гидромеханических сил и параметров качки при движении судна на регулярном волнении. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук, П., ЯКИ, 1990.
16. Каннингхэм В. Введение в теорию нелинейных систем. М.-П., Госэнергоиздат, 1962.
17. К а у д е р е р Г. Нелинейная механика. М., ИЛ., 1961.
18. К р а й н и й Ю. А., П е р г а е в Е. В. Бортовая качка судна с

отрицательной начальной остойчивостью. Труды ОИИМФ, Судостроение и судоремонт. вып.Х, 1977.

1. Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. М., Мир, 1984.
2. Л у г о в с к и й В. В. Нелинейные задачи мореходности корабля, Л., Судостроение, 1966.
3. Луговский В.В. Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов. Л., Судостроение, 1971.
4. Луговский В. В. Динамика моря. Л., Судостроение, 1976.
5. Л у г о в с к и й В. В. Гидродинамика нелинейной качки судов. Л.,

Судостроение, 1980.

1. М е л ь н и к о в В. К. Устойчивость центра при периодических по времени возмущениях. Труды Московского математического общества, Т. 12, 1963.
2. М о р е н ш и л ь д т В. А. Исследование влияния положения центра тяжести и особенностей формы корабля на бортовую качку. Техническая информация ЦНИИ МСП № 78, 1955.
3. М о р е н ш и л ь д т В. А. Исследование и метод расчета параметрической качки судна на регулярном и нерегулярном волнении. Сб. Вопросы судостроения, серия:Проектирование судов, вып. 41, 1984.
4. М о р е н ш и л ь д т В. А., Смирнов Б. Н. Использование аналоговых электронных машин при изучении субгармонических бортовых колебаний судна на волнении. Конф. по вычислительной технике и научному приборостроению в гидродинамике судна., Варна, Болгария, 1984.
5. М у н Ф. Хаотические колебания. М., Мир, 1990.
6. М у р у Н. П. Обеспечение непотопляемости корабля. М. Воениздат, 1965.
7. М у р у Н. П. Статика корабля. Л. ВМИОЛУ, 1969.
8. М у р у Н. П. Основы непотопляемости корабля. М., Военное издательство, 1990.
9. Н е й м а р к Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М., Наука, 1987.
10. П а в л е н к о Г. Е. Качка судов. Л., Гострансиздат, 1935.
11. П а в л е н к о В. Г. Методы расчета бортовой качки судов. Л., Судпромгиз, 1956.
12. П е р г а е в Е. В., С т р е л я е в Л. Н. О расчете кривой частот нелинейной бортовой качки на тихой воде. Труды ОИИМФ. Судостроение и судоремонт, вып. 8, 1977.
13. Р а х м а н и н Н. Н. Бортовая качка судна, отсеки которого частично заполнены жидкостью. Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, вып. 191, 1962.
14. Р а х м а н и н Н. Н. О динамической остойчивости судна с водой на палубе. - в сб.: Доклады к XIY научно-технической конференции по теории корабля. Л., Судостроение, 1966 (Научно-техн. общество судостроит. пром. Вып. 73)
15. Р а х м а н и н Н. Н. Бортовая качка и остойчивость судна с креном в **условиях свободного дрейфа на волнении. Судостроительная промышленность. Сер. Проектирование судов, вып. 18, 1991.**
16. Р а х м а н и н Н. Н. Стохастическое описание морской поверхности. **С.-** Петербург, ГМТУ, 1994.
17. Р а х м а н и н Н. Н., Живица С. Г. Влияние динамики жидкого груза на остойчивость судна, Научно-Технический сб., вып. 20, т. 2, Российский морской Регистр судоходства, СПб, 1997.
18. Р е м е з Ю. В. Качка корабля. Л., Судостроение, 1983.
19. Р ождественский В. В., Л у г о в с к и й В. В. ид р. Статика корабля., Л., Судостроение, 1986.
20. Семенов-Тя н-Ш анский В. В., Благовещенский С. **Н.,** Холодилин А.Н. Качка корабля. Л., Судостроение, 1969.
21. Семенов-Тя н-Ш анский В. В. Статика и динамика корабля., Л., Судостроение, 1973.
22. С т р е л я е в Л. Н. Об условиях возникновения интенсивной бортовой качки судна на относительно коротких волнах. - Труды ЦНИИМФ, Л., Транспорт, вып. 72, 1966.
23. Ф е д я е в с к и й К. К., Ф и р с о в Г. А. Крен судна под действием ветра. - Судостроение, № 12, 1957.
24. X а с к и н д М. Д. Гидродинамическая теория качки корабля. М., **Наука,** 1973.
25. X а я с и Т. Вынужденные колебания в нелинейных системах. М., Иностранная литература, 1957.
26. Хорошанский Г. М. Бортовая качка корабля с заданной диаграммой остойчивости на волнении. МСП СССР, ЦНИИ им.акад. А.Н.Крылова, Л., 1948.
27. Ц о й Л. Г. Анализ аварии СРТ “Бокситогорск” и аварийного состояния СРТ “Атамань”. - в сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости морских судов. Л., Транспорт, 1968.
28. Э л и с Я. М. Гидродинамические силы при качке накрененного судна. Сборник НТО Судпрома: Мореходность и управляемость судов. Материалы **по** обмену опытом, вып.105, 1968.
29. Balestrieri R., Impagliazzo D., Vassalo С. Fire and Stability. Forth International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Naples, 1990.
30. Cardo A., Francescutto A., Nabergoj R. Ultraharmonics and Subharmonics in the Rolling Motion of a Ship: Steady - State Solution. International Shipbuilding Progress, Vol. 28, No 326, 1981.
31. С о n с e і с а о С. A. L., Price **W.** G., T e m a r e I **P.** The Influence of Heel on the Hydrodynamic Coefficients of Ship like Sections and a Trawler form. International Shipbuilding Progress, Vol. 31, No 355, 1984.
32. D о w e 11 E. N., P e z e n s h к і A. On Necessary and Sufficient Conditions for Chaos to Occur in Duffing’s Equation: an Heuristic Approach. Journal of Sound and Vibration. Vol. 122, No 2, 1988.
33. F a I z a r a n о J. М., Troesh A. V. Application of Modern Geometric Methods for Dynamical Systems to the Problem of Vessel Capsizing with Water-on- Deck. 4-th Int. Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles., Naples, 1990.
34. F I о w e r J. O. The Roll Response of a Ship to a Sudden Gust of Wind. International Shipbuilding Progress, Vol. 36, No 407, 1989.
35. F r a n к W. Oscillation of Cylinders in or below the Free Surface of Deep Fluids. Naval Ship R & D Center, Report 2357, Washington D.C., 1967.
36. H і m e n о Y. Prediction of Ship Roll Damping - State of Art. The University of Michigan, The Department of Naval Architecture and Marine Engineering, No 239, 1981.
37. К a n M. Chaotic Capsizing. Osaka Meeting on Seakeeping Performance, The 20th ITTC Seakeeping Committee, Osaka, 1992.
38. К a n М., T a g u с h і H. Chaos and Fractals in Nonlinear Roll and Capsize of a Damaged Ship. Proc. of the International Conference on Phisical and Mathematical Modelling of Vessel’s Stability in Seaway, Kaliningrad, Russia, 1993.
39. L e e С. М., К і - H a n Kim Prediction of Motion of Ships in Damaged Condition in Waves. Proc. of the 2-nd Int. Conference on Stability of Ships and

Ocean Vehicles, Tokyo, 1982.

1. L і G. X., Moon F. C. Criteria for Chaos of Three-well Potential Oscillator with Homoclinic and Heteroclinic Orbits. Journal of Sound and Vibration. Vol. 136, No1, 1990.
2. L і a w C. Y., Bishop S. R., Thompson J. М. T. Heave-Excited Rolling Motion of a Rectangular Vessel in Head Seas. Proc. of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, USA,

1992.

1. L і n H., Y і m S.C.S., Chaotic Roll motion and Capsize of Ships under Periodic Excitation with Random Noise. Applied Ocean Research, 17, 1995.
2. N a у f e h A. H., К h d e і r A. A. Non-linear Rolling of Ships in Regular Beam Seas. International Shipbuilding Progress, Vol. 33, No 379, 1986.
3. N a у f e h A. H, S a n с h e z N. E. Stability and Complicated Rolling Responses of Ships in Regular Beam Seas. International Shipbuilding Progress, Vol. 37, No 410, 1990.
4. M о о n F. C. Experiments on Chaotic Motions of a Forced Non-linear Oscillator: Strange Attractors. ASME Journal Applied Mechanic, No 47,1980.
5. О d a b a s і A. Y. Roll Response of a Ship under the Action of a Sudden Excitation. International Shipbuilding Progress, Vol. 29, No 340, 1982.
6. P a w I о w s к і J. S., Bass D. W. A Theoretical and Numerical Model of Ship Motion and Sea Loads. Trans SNAME, Vol.99, 1991.
7. R a h e j a L. R. On the Problem of Peak-Roll-Response of a Ship under a Wind-Gust. Third International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Gdansk, 1986.
8. R a к h m a n і n N., Z h і v і t s a S. Prediction of Motion of Ships with Flooded Compartments in a Seaway. The Fifth International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Melbourne, USA, 1994.
9. S a I v a s s e n N., Tuck E. O., F a 11 і n s e n O. Ship Motion and Sea Loads. Trans. SNAME, Vol. 78, 1970.
10. S a n с h e z N. E., N a у f e h A. H. Nonlinear Rolling Motions of Ships in

Longitudinal Waves, international Shipbuilding Progress, Vol. 37, No 411, 1990.

1. Szemplinska-Stupnicka W., I о о s s G., Moon F. C. Chaotic Motion in Nonlinear Dynamical Systems. Springer Verlag, New York, 1988.
2. T a n і z a w a K., N a t і о S. A Study on Parametric Roll Motions by Fully Nonlinear Numerical Wave Tank. Proc. of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Co nference, Honolulu, USA, 1997.
3. T h о m p s о n J., Stewart H. Nonlinear Dynamics and Chaos. Geometrical Methods for Engineers and Scientists. John Wiley and Sons, New York, 1986.
4. V a s s a I о s D., L e t і z і a L. Characterisation of the Flooding Process of a Damaged Ro-Ro Vessel. Proc. Of the Seventh Int. Offshore and Polar Engineering Conference, Honollulu, USA, 1997.
5. V u g t s I. J. H. The Hydrodynamic Forces and Ship Motions in Oblique Waves. Technical Report N150 S of Netherlands Ship Research Centre, Delft, 1971
6. Z h і v і t s a S., A r m e n і о V. Two Approaches for Calculating Rolling of a Damaged Ship. Technical report No 34, University of Trieste, Italy, 1997.