

В.Н.ХРАМУШИН, С.В.АНТОНЕНКО, А.Е.МАЛАШЕНКО

Поисковые исследования штормового мореходства

Дальневосточные морские рубежи России характеризуются высокой штормовой активностью, существенно повышающей требования по мореходности к океанскому кораблю. Актуальность исследований обусловлена широкомасштабным освоением нефтегазовых ресурсов сахалинского шельфа. Отсутствие обустроенных портов-убежищ на северо-восточном побережье о-ва Сахалин повышает востребованность научных исследований в области создания систем оперативного контроля обстановки на море, обеспечения эффективности и безопасности плавания, оптимизации проектных решений для кораблей и судов улучшенной мореходности.

The stormy seakeeping research. V.N.KHRAMUSHIN (Special Design Office of the Means of Marine Research Automation, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), S.V.ANTONENKO (Far Eastern State Technical University, Vladivostok), A.E.MALASHENKO (Special Design Office of the Means of Marine Research Automation, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

The Russian Far East sea domains are characterized by a high stormy activity, which greatly increases the seakeeping requirements for an ocean ship. The research urgency is caused by a large-scale development of oil and gas resources on the Sakhalin shelf. Absence of developed ports-shelters along the north-eastern coast of Sakhalin raises the necessity of formation of the sea phenomena monitoring systems, support of efficiency and safety of navigation, optimization of design solutions for vessels of improved seakeeping.

Не без основания можно полагать, что первые человеческие поселения образовались на берегах рек, озер и морских гаваней, а водные пути стали первыми транспортными магистралями для создания социальной инфраструктуры и организации общественных взаимоотношений между народами. Кораблестроительные технологии и искусство судовождения во многом отражают, а иногда предвосхищают уровень развития человеческой цивилизации.

Достижения науки, естествознания и техники концентрируются в морских технологиях и кораблестроительной практике, обуславливая эффективность мореходства. И все же существует некий водораздел между кораблями и мореплавателями, поднявшись на который можно познать сложности и единство морских наук. Если судостроение характеризует способности концентрации научной мысли и координации технологических возможностей внутри государства, то активное мореходство во многом зависит от стабильности международных отношений, от взаимопонимания народов и межгосударственного сотрудничества по обустройству морского побережья и обеспечению безопасности человеческой жизни на море.

ХРАМУШИН Василий Николаевич — кандидат технических наук, МАЛАШЕНКО Анатолий Емельянович (СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск), АНТОНЕНКО Сергей Владимирович — доктор технических наук (Дальневосточный государственный технический университет, Владивосток).



Интенсивное воздействие морских волн на корпус гидрографического судна при относительно тихой погоде в Охотском море

Любые работы на море, как строительство флота, так и обустройство прибрежной инфраструктуры, требуют огромных капитальных вложений. Именно поэтому комплексное изучение мореходства во взаимосвязи кораблестроительных и навигационных наук; поиск путей сквозной непротиворечивой оптимизации проектирования флота и его практической эксплуатации, с обязательным учетом штормовых условий северных морей; вопросы проектирования портовых сооружений, выбора и обустройства безопасных морских гаваней — все это представляется актуальной научной задачей развития Дальнего Востока России.

На всем побережье о-ва Сахалин нет ни одного надежного порта-убежища. И если, к примеру, на нефтепромысловые акватории северо-восточного шельфа Сахалина требуется привести тяжелую судоподъемную и берегоустроительную технику, то судовладельцы рискуют потерять ее даже в случае поступления своевременных штормовых предупреждений — слишком далеки ближайшие крупные порты-укрытия в Японии и Приморском крае.

Из этого следует, что любые российские корабли и суда, предназначенные для работы в Сахалинской области, да и на всем Дальнем Востоке России, должны обладать достаточной мореходностью и способностью к длительному автономному плаванию в условиях дальневосточных ураганных штормов. Отсутствие малых портов-ковшей и судоходных рек не позволяет воспользоваться дешевыми каботажными перевозками и требует развития наземной транспортной инфраструктуры для доставки тяжеловесных грузов конечным потребителям. Такие условия освоения морских ресурсов существенно удорожают экономику мореходства.

Не рассматривая здесь вопросов строительства новых береговых сооружений, сформулируем актуальные направления морских исследований, соответствующих условиям мореплавания в дальневосточных морях России: 1) построение эффективной системы мониторинга морских акваторий, в том числе обеспечивающей ходовые вахты всех судов достоверной информацией о текущей обстановке на море, о прогнозах динамики изменения состояния моря и атмосферы; 2) создание специальной судовой измерительной и счетно-решающей аппаратуры, оценивающей состояние моря, атмосферы и их взаимодействие с движущимся кораблем и способной выполнять роль бортовой экспертно-аналитической системы, рекомендуемой судоводителю различные варианты решения поставленных перед судном

задач; 3) поиск непротиворечивых методов проектирования новых кораблей и судов, наилучшим образом приспособленных к безопасному плаванию и эффективному выполнению задач в штормовых условиях.

Эффективная работа систем мониторинга морских акваторий и бортовых экспертно-управляющих комплексов судовождения может сделать допустимой эксплуатацию маломореходных судов в штормовом море или, по крайней мере, придаст морякам больше уверенности в том, что штормовые бедствия и аварийные неурядицы на море не обратятся для них морскими катастрофами.

Навигационный комплекс контроля состояния моря, атмосферы и мореходности корабля

Дальневосточные моря России относятся к наиболее активным геоструктурным элементам земного шара, где непрерывно регистрируются землетрясения, действуют надводные и подводные вулканы, где море угрожает штормовыми волнами зыби и цунами, нагонами и экстремальными течениями вблизи побережья, частыми ураганами и тропическими тайфунами. Отсутствие должной навигационной и гидрометеорологической информации приводит к многочисленным прибрежным разрушениям и гибели судов с человеческими жертвами.

Современные средства телеметрического контроля процессов взаимодействия атмосферы и океана находятся в стадии качественного обновления, обусловленного развитием средств вычислительной техники и электронных коммуникаций. По заданию и при поддержке Сахалинской областной администрации в СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН выполнена конструкторская разработка и изготовлен опытный образец малогабаритной метеостанции (рис. 1, справа), обеспечивающей автоматический сбор информации и доставку ее на береговые метеоцентры по каналам отечественной спутниковой системы связи «Гонец» (рис. 1, слева). Новая автоматическая метеостанция может работать без участия человека на таежных метеопостах Сахалинской области и на судах, находящихся в море.

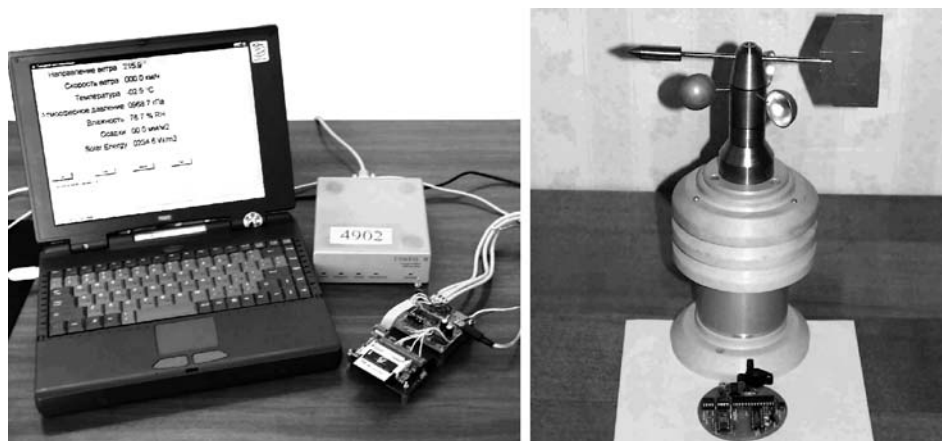


Рис. 1. Компьютер, модем космической связи «Гонец» и электронный блок управления метеостанцией со снятым кожухом — слева; унифицированный комплекс датчиков бортовой метеостанции и ее компактный блок электроники — справа

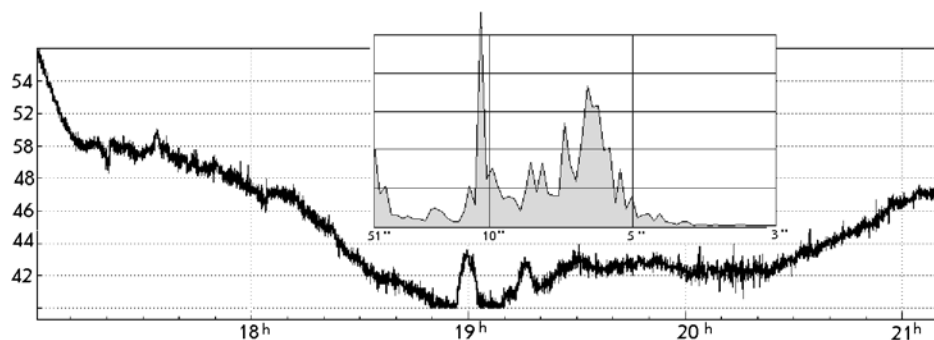


Рис. 2. Пример цифровой записи отсчетов глубины гидрографического эхолота ELAC LAZ-4700 и сильно сглаженный оценочный спектр этой записи в диапазоне периодов вертикальной качки судна от 3 до 51 с. На нижней оси эхограммы указано время суток в часах, на вертикальной шкале — глубина моря в метрах

Корабельный вариант метеостанции может составить основу универсальной бортовой аппаратуры для автоматического определения состояния моря, атмосферы и динамики их взаимодействия с движущимся кораблем. Характер морского волнения косвенно оценивается с помощью безынерционных инклинометров или акселерометров, измеряющих параметры бортовой, килевой и вертикальной качки корабля. Автоматически сформированный пакет гидрометеорологических данных может быть доставлен на береговой центр без участия человека. Этот же пакет информации, дополненный прогнозными оценками условий плавания из береговых морских служб, вместе с данными о текущем состоянии судна может быть востребован судоводителем для решения навигационных задач.

Унифицированная автоматическая гидрометеостанция в зависимости от круга решаемых задач комплектуется следующими функциональными блоками: 1) комплект синоптических датчиков для непрерывной регистрации состояния атмосферы (характеристики ветра, давление, температура и влажность воздуха и др.); 2) прибрежный комплект гидрофизических датчиков (регистраторы уровня моря, температуры воды, волнения и, при необходимости, скорости течения); 3) стандартный судовый комплект (считыватели показаний координат, курса и скорости судна, а также дополнительные датчики углов крена, дифферента и вертикальной качки судна, в том числе получаемых с помощью путевого эхолота) (рис. 2); 4) система передачи телеметрических данных в одном из трех вариантов: российская глобальная спутниковая связь «Гонец», электронная передача данных по протоколам Интернета, УКВ радиосвязь для сбора данных с прибрежной сети станций; 5) автономный шлюпочный комплект, дооснащенный магнитным компасом и приемником Глобальной системы позиционирования (GPS).

Предполагается, что данный комплект измерительного оборудования и специального математического обеспечения, также разрабатываемое в СКБ САМИ ДВО РАН, позволят оперативно решать следующие задачи:

а) автоматический сбор, обработка и передача оперативной информации о состоянии моря и атмосферы, в соответствии с регламентом работы судовых гидрометеопостов или гидрометеопостов;

б) применение измерительного комплекса и оборудования связи с береговыми метеопостами в качестве автоматизированной экспертной системы для анализа режимов безаварийного плавания и оптимизации хода судна в условиях штормового волнения;

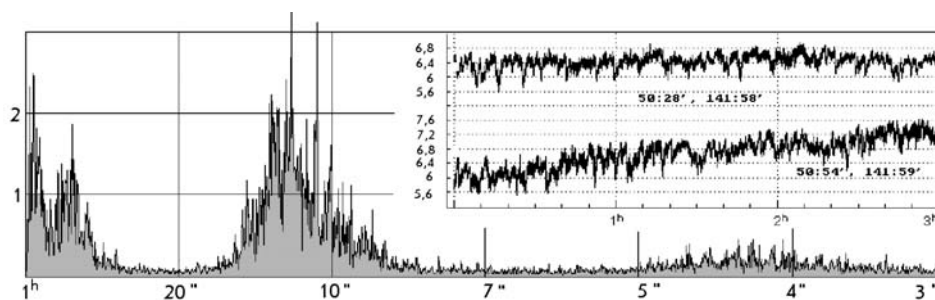


Рис. 3. Спектральная оценка пульсаций абсолютной скорости хода судна по ежесекундным отсчетам приемника GPS и два трехчасовых фрагмента записи этой скорости (справа сверху). На спектрограмме выделяются пульсации скорости с периодом 4—5 с, соответствующие килевой качке, а также 10—15 с — отмечающие наибольшие потери хода при бортовой качке и вызываемые ею рыскания судна на курсе. Изменения скорости с периодами 1 мин и более соответствуют сейшевым колебаниям скоростей поверхностных течений в близбереговой зоне, по которой проходил маршрут судна

в) использование специализированных и адаптированных к местности вычислительных экспериментов по моделированию процессов взаимодействия атмосферы и океана, в том числе для прогноза развития опасных морских явлений;

г) анализ волнового режима вблизи морских портов и на удаленных морских акваториях с использованием сети прибрежных гидрофизических станций, сочетаемых с параллельными наблюдениями с борта экспедиционного судна, курсирующего вблизи побережья.

Первые три задачи могут со временем утверждаться Росгидрометом к регламентному использованию на прибрежных и судовых гидрометеостанциях. Последняя может эффективно применяться в гидрографических изысканиях при проектировании новых портов, при подготовке к проведению дноуглубительных работ и реконструкции морских портов и гаваней. Для морских научных исследований оптимально было бы применять опытные образцы усовершенствованных гидрометеостанций, что позволит испытать новое оборудование в реальных морских условиях и создаст условия для более частого использования в научных изысканиях современной техники, в том числе с целью изучения необычных морских явлений.

К примеру, при изучении волнового режима вблизи сахалинского побережья был использован стандартный навигационный приемник GPS. Приемник, с вынесенной на верхний мостик антенной, позволяет регистрировать бортовую качку как отклонение судна от курса; с высокой точностью замеряет пульсации скорости хода судна (рис. 3).

В практическом судовождении модели волнения традиционно представляются в виде наложения нескольких независимых систем волн: 1) ветрового волнения, совпадающего с направлением действия ветра, при котором высота волн может быть предельно большой; 2) двух–трех систем волн зыби, являющихся отголосками ранее прошедших или отдаленных штормов, при этом длина волн обычно существенно больше, чем у ветровых, а крутизна — меньше.

Волновая картина, показанная на рис. 4, вполне соответствует наблюдениям за реальным штормовым волнением в открытом море. Легко усматриваются короткие и крутые ветровые волны, а для обнаружения фоновых волн зыби судоводителю необходимо подниматься на верхний мостик корабля. В ночное время никаких параметров волнения определить практически невозможно. Вертикальной линией

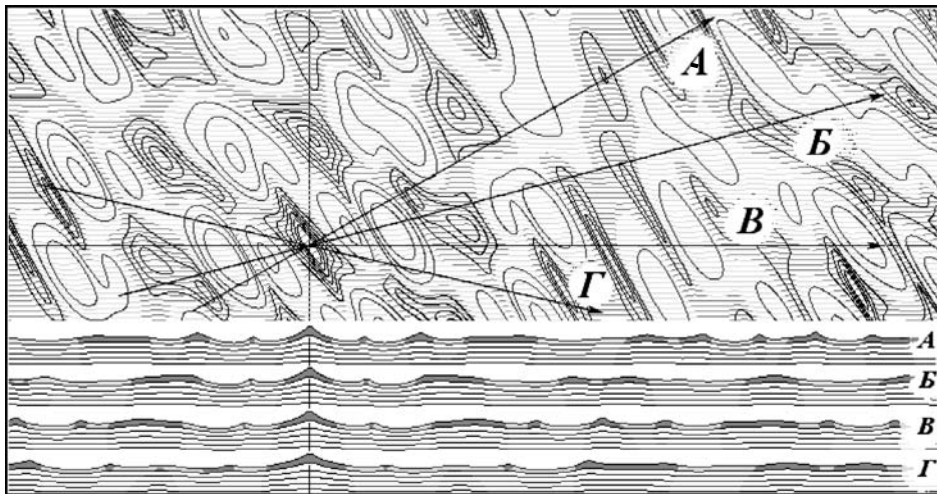


Рис. 4. Модель трехмерного волнового поля для открытого моря, представленная наложением трех независимо существующих ячейисто-групповых систем волн: ветровым волнением: $\alpha = 60$ м, $\tau = 6,2$ с, $h = 7,2$ м, движущимся в направлении $A = 250^\circ$; двумя системами волн зыби: $\alpha = 100$ м, $\tau = 8,0$ с, $h = 5,9$ м, $A = 210^\circ$ и $\alpha = 160$ м, $\tau = 10,1$ с, $h = 5,1$ м, $A = 270^\circ$. Изолинии уровня моря проведены через 2 м. Курс движения судна в направлении А ведет навстречу ветровому волнению, курсы Б, В и Г — на 15° , 30° и 45° вразрез волне. В нижней части рисунка показаны профили волн на отмеченных курсах

на рисунке отмечена теоретически максимальная волна, которая может быть названа «волной-убийцей». Но все же реальное морское волнение не является катастрофичным, судоводителю всегда предоставляются большие участки штормового моря, на которых отсутствуют особо крутые волны и где позволительно активное маневрирование.

В качестве простого и надежного регистратора волнения может выступать сам корпус корабля, активно раскачивающийся на волнении. Параметры собственных вертикальных колебаний, рыскания и качки корабля обычно известны или могут быть оценены по длительным записям непрерывной регистрации этих параметров. Соответственно, текущие параметры волнового поля также могут быть оценены в результате непрерывного решения полных дифференциальных уравнений качки корабля и использованы для автоматического выбора оптимального курса и скорости хода на волнении.

Анализируя принятую модель штормового волнения, можно сделать вывод, что для восстановления реальной картины штормового волнообразования необходимо провести замеры килевой качки корабля в секторе курсов его движения, не превышающем $\pm 30^\circ$. В штормовом плавании в таком же секторе происходит естественное рыскание корабля на курсе, что обычно не представляет дополнительных угроз для безопасности штормования. Сектор оптимальных курсов относительно волнения не превышает $\pm 15^\circ$, и при этом интегральное направление (генеральный курс) может быть произвольным.

На ходу корабля обычно 2—3 «девятого вала» проходят по борту, и лишь после этого происходит прямое столкновение с особо крупной волной (при условии, что рулевой не ведет корабль «по кочкам»). Принимая средний период штормовых волн порядка 8 с, получается, что необходима заблаговременность прогноза «девятого вала» порядка 4—5 мин, что вполне может быть осуществимо с использованием вычислительных мощностей обычных микропроцессоров, используемых, к примеру, в персональных компьютерах.

Путевая регистрация и анализ параметров качки и пульсаций скорости хода судна, сопоставление их с нагрузкой на движителях и динамикой переключений руля необходимы при оптимизации хода судна в условиях умеренного волнения и при выборе безопасных режимов штормового плавания. Накопленные данные о волновой динамике для судов с различными обводами корпуса — ценная информация при поиске оптимальных проектных решений о форме корпуса и общекорабельной архитектуре новых кораблей, особенно важная для специализированных проектов, в которых функциональные требования к оборудованию или к условиям базирования не могут быть в полной мере согласованы с требованиями безопасности в штормовом плавании.

Обоснование проектных решений с учетом морской практики, натурных экспериментов и математической оптимизации

Непротиворечивое, или оптимальное, проектирование может быть разделено на последовательные этапы комплексного изучения проблемы и согласования требований к кораблю как к сложной и единой инженерно-технической системе [6]. Последовательность этапов образует направление исследований, формально определяемых как методы проектирования «сверху—вниз» (от общих требований к кораблю — к частным техническим решениям по его конструкции) или «снизу—вверх» (от доступных технологических возможностей — к оптимальному по назначению проекту корабля в целом). Комплексное решение задачи непротиворечивой оптимизации возможно лишь в том случае, если удовлетворены все требования к кораблю на проходе по логическим этапам в обоих направлениях.

Повышение критериев функциональности имеет особую значимость для научно-исследовательского, спасательного и военного флотов [1], которые обязаны иметь высокий уровень мореходности, в том числе в сложных условиях штормового плавания.

Для решения поставленной задачи могут быть использованы как чисто проектные или эвристические подходы, так и математические методы построения формы корпуса, позволяющие минимизировать интенсивность силового взаимодействия между кораблем, волнением и ветром. Только после глубокой пассивной компенсации широкого спектра штормового волнения, дестабилизирующего движение корабля, возможно эффективное использование активных успокоителей качки.

Методы пассивной стабилизации корпуса путем построения красивых обводов и внешнего облика корабля имеют хорошо известные исторические прототипы [6]: это корабли и суда конца XIX и начала XX в., обладавшие строгим однообразием проектных решений по форме корпуса и схемам общего расположения палубных надстроек.

Для современного корабля, оснащенного сложными комплексами гидроакустической и радиоэлектронной аппаратуры, стабилизация корпуса на волнении становится ключевым требованием, обуславливающим маневренность корабля и эффективность использования его вооружения. В частности, общее снижение интенсивности килевой качки крайне необходимо для обеспечения стабильности потока в районе гидроакустических антенн, установленных в носовом бульбе или в подкильных гондолах. Только пассивное снижение всех видов качки на волнении за счет специальной формы корпуса корабля может позволить эффективно применять

активные средства стабилизации корпуса спасательным судам, которые обязаны уверенно маневрировать в непосредственной близости у борта аварийных судов.

Можно обратить также внимание на то, что гидроакустические или радиолокационные волны, используемые в системах поиска целей и наведения морского оружия, по физической сути и математическому определению подобны штормовым волнам, по которым должна проводиться оптимизация формы корпуса. Тогда один из принципов непротиворечивого проектирования корабля может быть сформулирован так: *«Округлая в целом форма корпуса способствует штормовой стабилизации корабля и уменьшает интенсивность гидроакустических и радиолокационных откликов для систем его обнаружения противником».*

Интенсивность гидро- и радиолокационной интерференции волн описывается интегральными уравнениями, определяющей функцией в которых является форма корпуса. Чуть более сложным аналогом этих уравнений является интеграл Мичелла [7] для расчетов волнового сопротивления [5] и корабельного волнообразования:

$$R_X = \frac{\rho g^2}{\pi V_0^2} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left| \int_{\Omega} \frac{df}{dx} \cdot e^{k \cdot (-z + ix \cdot \cos \vartheta)} d\Omega \right|^2 \frac{d\vartheta}{\cos^3 \vartheta},$$

где: $f = f(x, z)$ — ординаты формы корпуса; V_0 — скорость корабля; Ω — элементарная площадка на обшивке корпуса; $\vartheta = \arccos V/V_0$ — фазовый угол Кельвина, задающий направление излучения корабельных волн с частотой формы волны: $k = g / (V_0^2 \cdot \cos^2 \vartheta)$.

В интеграле Мичелла ведется интегрирование по четверти фазового угла $\vartheta \in 0 \div \pi/4$, в то время как недостающая для замыкания интеграла четверть $\vartheta \in \pi/4 \div \pi/2$ определяет падающую на корпус «внешнюю волну». Следовательно, математическая оптимизация подводных обводов и надводной формы корпуса корабля по сути является поиском технических решений, обеспечивающих прохождение штормовой волны через корпус с минимальными искажениями [4]. То есть для недопущения отражения штормовой волны от бортовой обшивки корпуса и для ослабления передачи волновой энергии на опасное усиление рыскания и качки корабля необходимо оптимизировать волновое сопротивление на всех скоростях хода, включая высокоскоростные режимы с числами Фруда: $F_n \geq 0,5$, на которых происходит образование корабельных волн с такими же параметрами, как и внешнее морское волнение.

Аналогичные решения по оптимизации обводов корабля и его надводного облика способствуют скрытности в лучах гидро- и радиолокаторов.

Наука о мореходности и решение проблем прочности корабля. Один из величайших российских ученых-кораблестроителей, академик А.Н.Крылов, в «Очерке развития теории корабля», впервые опубликованном в № 3 «Вестника Академии наук» за 1945 г., пишет о том общем, что всегда требовалось, требуется и будет требоваться от всякого судна: «Это общее — суть мореходные качества корабля: плавучесть, остойчивость, ходкость, плавность и малость размахов качки, поворотливость» (цит. по кн. Крылова «Мои воспоминания» [3, с. 352]). Практика всегда ставила вопросы о том, как обеспечить надлежащие качества корабля, вместе с тем практика веками, как бы естественным подбором, подходила и к решению этих вопросов, часто весьма своеобразному.

Существующая в судостроении методика оценки прочности судового корпуса основана на установлении некоторой расчетной нагрузки и напряжений в связях

корпуса, которые сравниваются с допускаемыми. Если между внешними силами и напряжениями не существует прямой пропорциональности, то расчетная нагрузка умножается на коэффициент запаса и напряжения сравниваются с опасными. В соответствии с такой методикой расчета в строительной механике корабля различают проблему внешних сил, проблему внутренних сил и проблему проверки прочности.

Главной составляющей внешних сил является волновой изгибающий момент, прежде определявшийся как статическая постановка судна на волну. Наиболее опасной является волна, длина которой близка к длине судна, она обычно и выбирается в качестве расчетной. Высота расчетной волны сопоставляется с ее длиной, а вид этой зависимости в истории науки о прочности корабля со временем изменялся. Форма профиля волны всегда считалась трохоидальной, что соответствует теории волн конечной амплитуды, а вершина или подошва ее совмещались с миделем корпуса судна.

Статическая постановка на волну благодаря своей простоте и наглядности многие годы использовалась для оценки общей прочности корпусов, хотя еще в 1883 г. Смит обратил внимание на то, что за счет орбитального движения частиц жидкости в волне распределение давлений по глубине отличается от гидростатического: сложение сил тяжести и центробежной приводит к тому, что на вершине волны давление уменьшается, а на подошве — увеличивается. Этот эффект легко учесть, вводя вместо действительной высоты (или амплитуды) волны эффективную, которая получается путем умножения на «поправку Смита» $k < 1$. Величина этой поправки зависит от отношения осадки судна к длине волны T/λ и коэффициента вертикальной остроты судна корпуса $\chi = \delta/\alpha$ (δ — коэффициент общей полноты; α — коэффициент полноты действующей ватерлинии); ориентировочно можно считать, что для обычного грузового судна при максимальной осадке и длине волны, равной длине судна, эта поправка равна 0,7, т. е. учет динамики волнения частично снижает критерии продольной прочности корпуса судна.

Изучаемые в настоящей работе гипотетические проекты судовых обводов с уменьшенными моментами инерции площади действующей ватерлинии в полной мере соответствуют критериям снижения нагрузки на корпус при статической постановке на волну, и особенно — при учете волновых сил динамической природы.

Другой похожий эффект выявляется при несложном анализе уравнений продольной (или только вертикальной) качки судна на регулярном волнении. Он заключается в том, что дифракционные силы инерции, обусловленные отражением волн от корпуса судна, всегда действуют против главной части возмущающей силы, которая носит гидростатический характер и связана с искривлением волновой ватерлинии. Количественно этот критерий близок к эффекту Смита.

Характерно, что эти две поправки, которые совместно уменьшают волновой изгибающий момент примерно в 2 раза, не связаны с качкой. Иначе говоря, если судно будет, не качаясь, двигаться за волной со скоростью волны (именно так принято представлять статическую постановку на волну), то для обычного морского судна возникающий при этом изгибающий момент составит примерно 50—65 % от того, который получается при статической постановке на волну [2, с. 76].

Влияние распределения масс по длине судна на величину волнового изгибающего момента объясняется довольно простыми геометрическими построениями. Так, в положении судна на подошве волны, как показывают расчеты линейной качки на регулярном волнении, центр тяжести (ЦТ) судна несколько погружается. Силы инерции от вертикальной качки, действующие на носовую и кормовую половины судна, направлены вниз (против ускорения, знак которого противоположен знаку перемещения). Эти силы уравниваются дополнительными силами поддер-

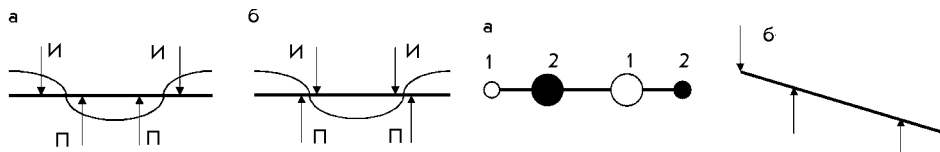


Рис. 5. Схема действия сил при вертикальной качке на подошве волны. а — судно с перегибом на тихой воде; б — судно с прогибом на тихой воде. И — силы инерции, П — дополнительные силы поддержания. Разность плеч сил для нагрузки преувеличена

Рис. 6. Схема действия сил при килевой качке на подошве волны. а — схема изменения нагрузки: 1 — нагрузка уменьшается, 2 — нагрузка увеличивается; б — изменение сил инерции

жания (обратим внимание на то, что здесь не учитывается искривление волновой ватерлинии — оно определяет главную часть возмущающих сил и уже учтенный момент при статической постановке на волну). При разнесении масс к оконечностям (перегибе на тихой воде) равнодействующие сил инерции для половинок судна будут приложены дальше от миделя, чем равнодействующие сил поддержания, а при концентрации вблизи миделя (прогибе) — наоборот. В результате при перегибе дополнительный изгибающий момент от сил инерции действует против основного, обусловленного кривизной поверхности воды в волне, а при прогибе — в том же направлении (рис. 5).

С.В.Антоненко и О.Э.Суровым было обнаружено, что при определенном несимметричном относительно миделя распределении нагрузки можно существенно уменьшить волновой изгибающий момент за счет использования сил инерции при килевой качке. Напомним, у симметричного судна эти силы слабо влияют на волновой момент. Схема такого распределения и дополнительные силы инерции, возникающие при этом, показаны на рис. 6.

Поскольку качка всегда отстает от возмущающей силы, на подошве волны судно имеет дифферент на нос (см. рис. 6). Предлагаемое изменение распределения нагрузки можно представить как встречный перенос двух пар грузов, причем большие по величине грузы переносятся на меньшее расстояние (рис. 6, а). В результате абсцисса ЦТ судна, величина радиуса инерции масс, которая определяет кинематические параметры килевой качки, изгибающий момент в миделевом сечении остаются постоянными. Но при килевой качке такое перераспределение нагрузки создает самоуравновешенную систему сил (рис. 6, б), изгибающий момент от которой по знаку всегда противоположен волновому. Как показали многовариантные расчеты, сравнительно небольшое (3—5 % от водоизмещения) перераспределение масс на судне может снизить волновой изгибающий момент примерно на 10 %. Архитектурно-конструктивный тип судна, реализующий предлагаемое решение, защищен патентом РФ № 2137660, 1999 г. Показанные здесь теоретические результаты реализованы в гипотетических проектах спасательного судна и быстроходного корабля (см. рис. 7, 8).

Как известно, реальное волнение характеризуется не только нерегулярностью в смысле несовпадения элементов отдельных волн, но и трехмерностью, т. е. отклонениями направления распространения отдельных волн от генерального направления. Поведение судна на трехмерном волнении не такое, как на двухмерном, поскольку уже невозможно получить чисто поперечную (судно лагом к волне) или продольную (встречное или попутное волнение) качку. Считается, что энергия трехмерных волн распределена в пределах сектора $\pm 90^\circ$ от генерального направления и пропорциональна $\cos^4 \phi$ или $\cos^2 \phi$, где ϕ — угол между направлением

Морской спасатель
Гидрографическое судно

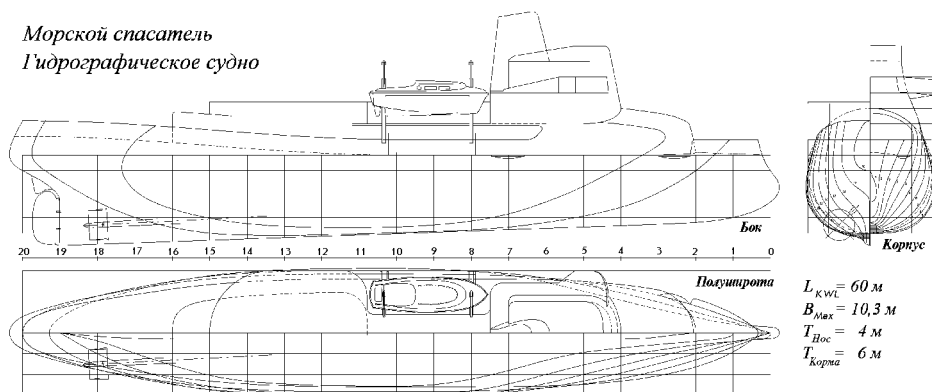


Рис. 7. Форма корпуса и концептуальная схема архитектуры морского спасателя — научно-исследовательского судна, способного к активному позиционированию в условиях интенсивного волнения и ураганного ветра

распространения элементарной волны и генеральным направлением. Для численных расчетов с использованием трехмерной модели волнения необходимо генерировать уже не профиль волны, а волновое поле, имитирующее взволнованную поверхность моря.

Морской спасатель — гидрографическое судно

Малые океанские суда вспомогательного флота нередко используются в экстремально сложных штормовых условиях плавания. Спасательные операции, буксировки аварийных судов, срочная доставка небольших грузов, посыльная работа в морских экспедициях, рыбопоисковые работы и океанологические исследования — это далеко не полный перечень морских работ для судов небольшого водоизмещения. Главным достоинством такого судна является относительно высокая

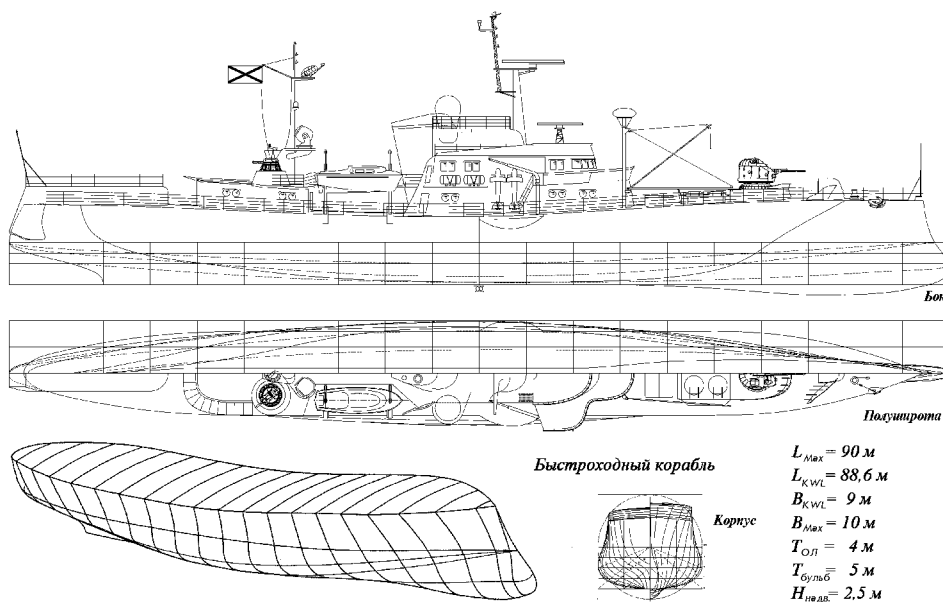


Рис. 8. Компромиссный вариант формы корпуса гипотетического быстроходного корабля, имеющего повышенную высоту борта в оконечностях и широкую непрерывную верхнюю палубу

прочность корпуса, что в сочетании с мощным двигателем позволяет ему активно позиционировать относительно каждого из гребней штормовых волн. Эффективная стабилизация качки, а также динамическое влияние на посадку, крен и дифферент судна принципиально возможны при условии, что исходная форма корпуса и архитектура надстроек не вступают в ударно-активное взаимодействие с морским волнением.

Если следовать концепции непротivления штормовой стихии как *универсальному правилу проектирования кораблей и судов*, хорошая мореходность и пассивность корпуса по отношению к волнению, обусловленные его оптимальными обводами, создадут основу для эффективного применения активных средств стабилизации и динамического удержания заданной посадки корабля в штормовом море. Такие качества необходимы спасательному судну для уверенного маневрирования при спасательных операциях, а гидрографическому судну — для обеспечения стабилизации корпуса и безопасности палубных работ в штормовом море.

При выборе концепции построения обводов корпуса выбрана ориентация на способности водоплавающих птиц, которые уверенно удерживают свое тело горизонтально даже при встрече с крупными гребнями обрушающихся волн. Форма корпуса и надстроек для активно позиционирующего на волнении судна может быть определена следующими конструктивными элементами (рис. 7): 1) корпус в целом подобен круговому цилиндру, что необходимо для минимизации внешних волновых воздействий; 2) полная корма с высоким ютом и глубоко погруженным плавниковым ахтерштевнем обеспечивают управляемость судна в штормовых условиях, позволяя экипажу проводить палубные работы в кормовой части корпуса; 3) зауженные и заостренные носовые ватерлинии исключают резкую всхожесть корпуса на встречную волну, отчего центр всплытия и ось дифференцирующих моментов под ударами встречных волн приводятся к одной вертикали в средней части корпуса; 4) массовая нагрузка сосредотачивается в средней части корпуса, что уменьшает поперечный момент инерции массы судна и позволяет использовать горизонтальные поворотные насадки на движителях для успокоения как бортовой, так и килевой качки.

В качестве активных стабилизаторов качки проектом предусматриваются поворотные насадки на гребных винтах, ось поворота которых должна иметь горизонтальный наклон порядка 45° или менее. Управляемые бортовым компьютером насадки и изменяемая им же нагрузка на винтах позволят создавать активные кренящие и дифференцирующие моменты, что требуется как для обычной ходовой стабилизации корпуса, так и для прицельно точного маневрирования вблизи бедствующего судна в условиях ураганных штормов.

Таким образом, на примере морского спасателя (или научно-исследовательского судна) наиболее ярко иллюстрируются непротиворечивые подходы к проектированию многоцелевого корабля, для которого активная стабилизация корпуса согласована с требованием минимальности воздействия на него со стороны интенсивного штормового волнения. Предложенный в проекте метод активной стабилизации качки с помощью кормовых горизонтальных рулей или поворотных насадок, действующих в потоке главных движителей, может быть эффективным средством стабилизации корпуса и его активного позиционирования, особенно на малых или реверсивных ходах. Боевому кораблю округлые формы корпуса и надстроек позволят существенно расширить возможности использования систем внешнего наблюдения и вооружений. Отсутствие спрямленных и вогнутых участков в обшивке корпуса и надстройках, так же как и отсутствие излишних выступающих частей, приведут к минимальности гидро- и радиолокационного проявления корабля в

системах обнаружения противника, обеспечив его полную невидимость в условиях интенсивного морского волнения.

Гипотетический быстроходный корабль

Назначением гипотетического корабля может быть контроль и охрана морских рубежей России, а главной задачей — непрерывный контроль надводной и подводной обстановки в штормовых акваториях северо-западной части Тихого океана. При необходимом минимуме вооружений корабль может быть оснащен современным гидрофизическим и гидрометеорологическим измерительным оборудованием, обеспечивающим комплексное освещение обстановки на море, в первую очередь в целях повышения эффективности и безопасности гражданского судоходства. Проект формы корпуса корабля может быть назван компромиссным, удовлетворяющим современным требованиям по размещению корабельных устройств и вооружений, что отразилось в широкой и протяженной верхней палубе и наличии развитого носового бульба (рис. 8).

Внешний облик корабля определяется следующими ключевыми проектными решениями: 1) обводы и палубные надстройки корабля в поперечных сечениях средней части корпуса образуют контуры, близкие к окружности, что важно для общей стабилизации корабля при ходе произвольным курсом относительно интенсивного волнения и зыби; 2) внутренний завал борта в средней части корпуса достигает максимальной величины на уровне действующей ватерлинии; 3) оконечности корпуса заострены, но при этом центр подводного объема (центр величины) смещен в носовую часть корпуса, а надводного — в кормовую.

Развитый и глубоко посаженный носовой бульб предусмотрен для установки громоздких гидроакустических комплексов, что сделано отчасти в ущерб мореходным качествам этого корабля на волнении (возможно, для сохранения мореходности антенны гидроакустических станций необходимо располагать в выдвижных гондолах в средней части под днищем корпуса). Килевая линия бульба выполнена с «подрезом», чтобы по крайней мере на умеренном волнении он находился в стабилизированном потоке.

Носовой бульб, кормовой буксируемый аппарат и бортовые параваны совместно создают большое пространственно-разнесенное антенное поле, способное эффективно использоваться в любых погодных условиях для оценки физических полей в океане, активного гидролокационного поиска подводных объектов и для пассивного контроля удаленных сейсмогидроакустических процессов в водной толще и на морском дне.

Палуба корабля в оконечностях, ют и бак — довольно высокие, что позволит работать на верхней палубе (с кормовой аппарелью и носовыми палубными устройствами) в свежую погоду. Расширенная и довольно высокая палуба в оконечностях несколько снизит стабилизацию корпуса на косых штормовых курсах относительно волнения, но частично защитит палубные устройства от забрызгивания на больших скоростях хода в тихую погоду.

Эффективных успокоителей килевой качки на таком компромиссном корпусе сделать нельзя, но если предусмотреть возможность продольной перекачки балласта для изменения дифферента и инерционных характеристик корпуса, то при малой инерции площади действующей ватерлинии можно существенно расширить способности корабля по пассивной стабилизации корпуса путем выбора наиболее эффективного курса и скорости хода.

Мировая практика морских исследований, связанных с оптимизацией морских работ и повышением эффективности мореходства, уже давно опирается



Рис. 9. Испытания крупномасштабной модели корабля проекта DD(X) в США в океанских условиях

на научные исследования, натурные и модельные эксперименты непосредственно в тех морских акваториях, для которых выполняются проектирование и строительство нового флота (рис. 9).

Опытно-экспериментальный и научный потенциал дальневосточной науки, наличие удобных озер и множества морских причалов, особые гидрометеорологические условия в Приморье и в Сахалинской области, изобилующие ветрами и прибрежным волнением в любые сезоны года, — все это служит серьезными предпосылками решения актуальнейших задач освоения дальневосточных морских акваторий наиболее оптимальными и эффективными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джилмер Т.С. Проектирование современного корабля. Л.: Судостроение, 1984. 280 с.
2. Короткин Я.И. Вопросы прочности морских транспортных судов. Л.: Судостроение, 1965. 388 с.
3. Крылов А.Н. Мои воспоминания. Л.: Судостроение, 1979. 480 с.
4. Ньюмен Дж. Морская гидродинамика. Л.: Судостроение, 1985. 368 с.
5. Павленко Г.Е. Сопротивление воды движению судов. М.: Водтрансиздат, 1953. 507 с.
6. Храмушин В.Н. Исследования по оптимизации формы корпуса корабля // Вестн. ДВО РАН. 2003. № 1(107). С. 50—65.
7. Michell J.H. The wave resistance of a ship // Philos. Mag. Ser. 5. 1898. Vol. 45. P. 106—123.