

Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И.

**БОРТОВЫЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ
КОНТРОЛЯ МОРЕХОДНОСТИ**

Одесса – 2005

Вагущенко Л.Л., Вагущенко А.Л., Заичко С.И. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности. – Одесса, ФЕНИКС, 2005. – 272 с.

УДК 656.61.052.011.56

Приводятся основные сведения о бортовых автоматизированных системах для оценки, прогноза и оптимизации мореходности, предназначенных для обеспечения безопасности судов в процессе эксплуатации. Охарактеризованы функциональные возможности таких средств, особенности отображения информации. Дан анализ используемых датчиков информации, освещены методы прогноза мореходности на будущие моменты времени, принципы выбора решений для обеспечения безопасности в штормовых условиях.

Предназначена для учащихся судоводительской специальности морских академий, может быть полезной для командного состава транспортных и рыбопромысловых судов.

Ил. 72, табл. 12, библиогр. 25 назв.

Рецензенты:

Ю.Л.Воробьев, д.т.н., профессор, заслуженный деятель народного образования Украины;

Л.А.Козырь, к.т.н., профессор, капитан дальнего плавания;

А.П.Радченко, д.т.н., профессор.

Печатается по решению Ученого совета Одесской национальной морской академии (протокол №11 от 30 июня 2005 г.)

ISBN

© – Л.Л.Вагущенко, А.Л.Вагущенко, С.И.Заичко 2005.

© – ФЕНИКС, 2005.

Охраняется законодательством о печати.

Введение

Штормовые условия, несмотря на рост водоизмещения и технического оснащения морских судов, остаются одной из главных причин аварий и гибели судов. Учитывая тяжелые последствия таких аварий (гибель людей, потеря больших материальных ценностей, загрязнение окружающей среды) мировая общественность требует обеспечения все более высокого уровня мореходной безопасности судов. Актуальность этой задачи определяется тем, что доля работы морского судна в условиях ветра и волнения составляет в среднем 65-70% его ходового времени. Кроме конструктивных решений и тщательной подготовки судов к тяжелым погодным условиям, одним из путей повышения безопасности штормового плавания является автоматизация контроля мореходности на судне. Необходимость в этом становится все более ощутимой с уменьшением экипажей и ростом скоростей судов. Современный уровень измерительной техники, математических методов анализа и прогноза мореходности в сочетании с возможностями и высокой производительностью персональных компьютеров сделали возможным решение этой задачи.

В настоящее время для повышения безопасности плавания судов в штормовых условиях созданы специальные информационные средства – *бортовые автоматизированные системы контроля мореходности (АСКМ)*. Главная их задача состоит в определении, является ли мореходным судно в данных условиях плавания при используемом режиме движения, будет ли оно таким в будущем при выполнении перехода, как избежать случаев потери мореходности. Эти системы непрерывно измеряют параметры состояния внешней среды и поведения в ней судна, вырабатывают предупреждения об опасностях в соответствии с установленными операционными критериями, оценивают мореходность будущих состояний судна на оставшемся пути следования, формируют рекомендации по управлению судном. Среди появившихся автоматизированных средств контроля мореходности можно назвать: «Системы контроля движения корпуса судна», «Системы мониторинга и

анализа напряжений корпуса», «Средства прогноза мореходности» и др., а также системы, в комплексе решающие задачи по обеспечению мореходности судна в рейсе и охватывающие функции названных выше средств. Комплексные системы именуют по-разному: «Системами контроля мореходности судна», «Системами мониторинга состояния корпуса», «Системами обеспечения безопасности» или «Системами оценки, прогноза и оптимизации мореходности».

Целесообразность снабжения судов аппаратурой для контроля своего функционального состояния в условиях ветра и волн очевидна. Еще в 1994 г. с целью уменьшения уровня конструктивных повреждений балкеров ИМО представило «Рекомендации по установке систем мониторинга напряжений корпуса для повышения безопасной эксплуатации судов, перевозящих сухие грузы навалом» (Maritime Safety Committee circular, MSC/Circ.646, 1994). На современном этапе системы для контроля мореходности еще не стали бортовым конвенционным оборудованием. Подавляющее большинство судов плавают без них. Однако ситуация довольно быстро меняется. Растет число производителей разных видов систем для контроля мореходности, объем выпускаемой этими производителями продукции и количество судов, оборудованных АСКМ. Уменьшается стоимость этих систем. Ряд национальных классификационных обществ выработали рекомендации по оснащению судов АСКМ, стимулирующих судовладельцев к применению этих средств. Побуждающим фактором к внедрению аппаратуры для контроля мореходности судов стало также ужесточение требований к анализу аварий. При разработке требований к судовому регистратору данных рейса (РДР) ИМО посчитало целесообразным внести в состав подлежащих регистрации данных *ускорения и нагрузки на корпусе*, т.е. параметры, характеризующие мореходность судна. Это требование (резолюция ИМО А.861(20), 1997) влечет за собой необходимость установки приборов или систем для контроля мореходности на судах, которые оборудуются РДР (суда валовой вместимостью свыше 3000 р.т. и пассажирские суда).

Средства контроля мореходности предназначены для снабжения капитана и его помощников информацией, облегчающей принятие решений по обеспечению безопасного и экономичного плавания в сложных погодных условиях. Судоводительский состав должен быть знаком с этими системами, их особенностями, функциональными возможностями, принципами решения задач, видами ввода, отображения и регистрации информации, ограничениями и недостатками. Следует подчеркнуть, что системы контроля мореходности – это вспомогательное средство, не освобождающее капитана от действий по обеспечению безопасности судна в штормовых условиях и от ответственности.

Предлагаемая книга содержит основные сведения о бортовых средствах, предназначенных для контроля мореходности судов. Она является учебным пособием для курсантов судоводительской специальности морских учебных заведений по дисциплине «Автоматизированные комплексы судовождения». Пятая глава книги в основном адресуется магистрантам, желающим получить более глубокие знания об АСКМ.

При написании книги были использованы источники, приведенные в списке литературы, и касающиеся излагаемых вопросов материалы, найденные в Интернете. В книге нашли отражение и ряд из результатов работ авторов.

Авторы глубоко признательны Ю.Л.Воробьеву, Л.А.Козырю, А.П.Радченко за труд по просмотру рукописи книги и за ценные советы, которые способствовали ее улучшению. Все замечания и пожелания по совершенствованию книги, которые возникнут при анализе ее содержания, будут приняты с благодарностью.

Основные обозначения

В тексте книги, если не оговорено иное, использованы следующие обозначения и сокращения:

АСКМ – автоматизированная система контроля мореходности;
ВРШ – гребной винт регулируемого шага;
ВФШ – гребной винт фиксированного шага;
ДП – диаметральной плоскость;
СКП – средняя квадратичная погрешность;
ЦТ – центр тяжести судна;

$A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика системы;

A_w – направление волнения;

B – ширина судна на миделе;

D – весовое водоизмещение судна;

D_p – диаметр гребного винта;

F – высота надводного борта;

Fr – число Фруда ($Fr = V / \sqrt{gL}$);

f_h – часовой расход топлива главным двигателем;

f_M – расход топлива на милю пути;

G – центр тяжести судна;

g – ускорение силы тяжести;

H – глубина моря;

h – высота волны;

h_θ – поперечная метацентрическая высота;

h_ψ – продольная метацентрическая высота;

$h_{1/3}$ – высота значительных волн;

$h_{3\%}$ – высота волн 3-х процентной обеспеченности;

h/λ – крутизна волны;

L – длина судна;

m_c – масса судна;
 N_e – эффективная мощность главного двигателя;
 n – частота вращения винта;
 P_e – сила тяги винта (полезный упор);
 Pr – вероятность;
 q – курсовой угол волнения;
 q_a – курсовой угол истинного ветра;
 R – буксировочное сопротивление судна;
 r – волновая ордината;
 \hat{r} – амплитуда волн;
 $S_r(\omega)$ – спектр ординаты волнения;
 T – осадка судна;
 T_θ – период свободных бортовых колебаний судна;
 T_ψ – период свободных килевых колебаний судна;
 T_ζ – период свободных вертикальных колебаний судна;
 V – скорость судна;
 V_a – скорость истинного ветра;
 v – фазовая скорость волн;
 $W(i\omega)$ – комплексная передаточная функция системы;
 z_g – высота центра тяжести судна над килем.

α – угол волнового склона;
 $\hat{\alpha}$ – амплитуда угла волнового склона;
 β – угол отклонения направления бега плоской гармоникой от генерального направления распространения волн;
 γ – удельный вес воды;
 δ – коэффициент общей полноты судна;
 δ_T – коэффициент полноты площади ватерлинии;
 ε_θ – показатель резонанса бортовой качки ($\varepsilon_\theta = \omega_e / \omega_\theta$);
 ζ – перемещение при вертикальной качке;

θ – угол бортовой качки;
 $\hat{\theta}$ – амплитуда бортовой качки;
 λ – длина волны;
 μ – относительный коэффициент затухания;
 ρ – плотность воды;
 ρ_X – радиус инерции массы судна относительно центральной продольной оси;
 ρ_Y – радиус инерции массы судна относительно центральной поперечной оси;
 ρ_θ – поперечный метацентрический радиус;
 σ – среднее квадратичное значение;
 σ_r – среднее квадратичное значение волновой ординаты;
 $\bar{\tau}$ – средний период волнения;
 $\bar{\tau}_e$ – кажущийся средний период волнения;
 $\bar{\tau}_p$ – период гармоника, соответствующей максимуму волнового спектра;
 χ – редуцированный коэффициент;
 ψ – угол килевой качки;
 $\hat{\psi}$ – амплитуда килевой качки;
 Ω – частота формы волны (волновое число);
 ω – угловая частота;
 $\bar{\omega}$ – средняя частота волн;
 $\bar{\omega}_e$ – кажущаяся средняя частота волнения;
 ω_θ – частота свободных бортовых колебаний судна;
 ω_ψ – частота свободных килевых колебаний судна;
 ω_ζ – частота свободных вертикальных колебаний судна;
 ω_p – частота максимума спектра волнения;
 ∇ – объемное водоизмещение судна;

1. Общие сведения

1.1. Ветроволновые воздействия и виды реакции судна на них

Управление судном в шторм требует от судоводителей знания и учета всех видов воздействия ветра и волн на судно.

Ветер. Одним из факторов, влияющих на движение судна, является ветер. Он характеризуется скоростью и направлением. Скорость ветра выражается в метрах в секунду, в узлах, или в баллах шкалы Бофорта. Направление представляется в градусах или в румбах. Движение воздуха в атмосфере всегда турбулентно, вследствие чего параметры ветра обладают изменчивостью. Различают средние и мгновенные значения скорости и направления ветра. В практике судовождения используются обычно средние значения элементов ветра, так как мгновенные испытывают сильные колебания. Резкие изменения скорости ветра называются *порывами*, а особенно сильные из них – *шквалами*. При шквале ветер внезапно и кратковременно (до нескольких минут) резко усиливается, часто до штормового, и затем ослабевает. Направление ветра при шквале, как правило, меняется.

Результат действия ветра на судно определить точно затруднительно. При слабом встречном ветре судно мало теряет скорость, и слегка увеличивает ее, когда такой ветер с кормы. При сильном ветре ход судна уменьшается как при встречном, так и при попутном ветре. Причиной этого является действие волнения, которое развивается при ветре и увеличивает сопротивление движению судна. Встречный ветер может снизить ход судна с большой площадью парусности на 40%. В общем случае считается, что сильный ветер с носовых курсовых углов уменьшает скорость среднетоннажных судов на величину от 3 до 13%. При бортовых углах ветра потери в $1,5 \div 2,0$ раза меньше, чем при встречном ветре той же силы.

Ветер вызывает также отклонение судна от линии пути. Величина ветрового дрейфа зависит от скорости судна, боковой

площади его парусности, силы и курсового угла ветра. У судов боковая площадь парусности неодинакова. Большую парусность имеют автомобилевозы, контейнеровозы. У грузеных танкеров и балкеров она значительно меньше, чем у контейнеровозов, имеющих такую же длину корпуса.

Ветер не только изменяет элементы движения судна, но и влияет на его управляемость. Когда на переходе морем суда идут полным ходом, действие ветра мало сказывается на их способности управляться. При швартовке, при движении в узкости и в открытом море малым ходом сильный ветер может стать причиной значительного ухудшения, и даже потери судном управляемости. Для ряда судов порывы ветра и шквалы в условиях шторма сопровождаются значительными динамическими наклонениями, которые, складываясь с бортовой качкой, могут привести к появлению опасных углов крена.

Следует отметить, что с ростом размеров судов влияние ветра на их поведение ослабляется.

Волнение. Морское волнение является главным фактором, влияющим на мореходность судна. Оно вызывает качку, увеличивает гидродинамические нагрузки на корпус, уменьшает упор винта и ухудшает показатели работы главного двигателя, приводит к росту сноса судна с линии пути. Плавание в условиях волн может сопровождаться такими негативными явлениями как заливание палубы, слеминг, оголение лопастей гребного винта, уменьшение остойчивости.

Действие волнения зависит от его интенсивности, курсового угла, размеров и формы корпуса судна, его скорости. Встречное волнение уменьшает ход судна. При слабом попутном волнении скорость судна может немного повыситься. При умеренном и сильном попутном волнении скорость судна снижается. Следует отметить, что довольно трудно отделить в реакции судна на погодные условия результаты воздействий ветра и волн. Ввиду того, что волнение является основным влияющим на мореходность судна фактором, его подробная характеристика приведена в отдельной главе книги.

Виды реакции судна. Выделяют следующие виды реакции судна на волнение:

- колебательные движения корпуса судна во всех шести степенях свободы (качка);
- меняющиеся с частотой волнения напряжения элементов корпуса, ударные нагрузки;
- вибрации корпуса и его элементов;
- изменения, имеющие постоянный характер (снижение скорости хода, увеличение нагрузки на двигатель, дрейф и т.д.);
- неблагоприятные явления, такие как слеминг, заливаемость, оголение винта, брочинг и т.д.

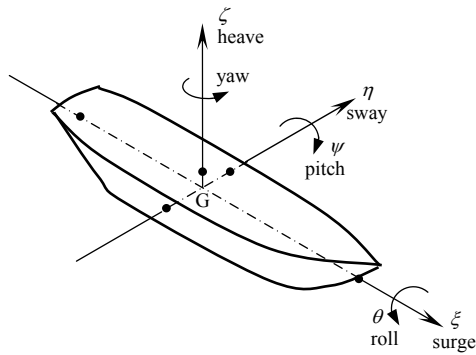


Рис. 1.1. Виды качки

Вызываемая волнением качка судна (рис. 1.1) подразделяется на шесть видов:

- **бортовая (Roll)** – вращательные колебания около продольной оси, лежащей в диаметральной плоскости судна (попеременный крен на правый и левый борт);
- **килевая (Pitch)** – вращательные колебания около поперечной оси судна, параллельной плоскости мидель шпангоута (дифферент судна то на нос, то на корму);
- **вертикальная (Heave)** – колебания вдоль вертикальной оси судна;
- **продольно-горизонтальная (Surge)** – колебания вдоль продольной оси судна;
- **поперечно-горизонтальная (Sway)** – колебания вдоль поперечной оси;
- **рыскание (Yaw)** – вращательные колебания около вертикальной оси.

Ниже угол бортовой качки обозначен θ , а килевой – ψ . Вертикальное, продольно- и поперечно-горизонтальное перемещения представлены соответственно как ζ, ξ, η .

Основными видами качки считают бортовую, килевую и вертикальную. Продольно-горизонтальные, поперечно-горизонтальные колебания и рыскание судна относят к **дополнительным видам качки**.

При анализе поведения судна в условиях волн оно рассматривается как динамическая система (или звено, или фильтр), входным сигналом которой является волновое воздействие, а выходным – тот или иной параметр реакции судна. Вид преобразования сигнала в звене (вид звена) и/или параметры этого преобразования для разных выходных сигналов различны. Например, как преобразователь воздействий волн в основные виды качки судно является устойчивой *колебательной системой*. Если кратковременное возмущение выводит эту систему из равновесия, то после его прекращения в системе возникают затухающие колебания, называемые свободными или *собственными колебаниями системы* (звена). Когда воздействие на колебательную систему производится с частотой, близкой к частоте ее собственных колебаний, то возникает *резонанс* – резкое увеличение амплитуды колебаний.

Как преобразователь воздействий волн в дополнительные виды качки судно представляет собой реальное интегрирующее звено, имеющее безразличный вид равновесия. После прекращения воздействия на такую систему она занимает новое положение равновесия и остается в нем до тех пор, пока не появится очередное воздействие. Собственных колебаний в этой системе нет, и явление резонанса в ней не возникает.

1.2. Опасности штормового плавания

Сильное волнение является серьезным препятствием для плавания судов среднего и особенно малого тоннажа. Оно может стать причиной повреждений этих судов и перевозимого ими груза. На крупнотоннажные морские суда с мощными двигателями штормовая погода влияет гораздо меньше. Однако

и для них в условиях сильного волнения складываются опасные ситуации. При плавании судна в шторм могут наблюдаться уменьшение остойчивости, чрезмерные ускорения, днищевой и бортовой слеминг, заливание носовой части судна и прием больших масс воды на палубу, периодическое оголение лопастей гребного винта, повышенная вибрация, дополнительные напряжения в конструкциях корпуса. Все эти проблемы связаны с волнением моря и качкой судна, в первую очередь с ее основными видами: бортовой, килевой и вертикальной.

1.2.1. Особенности качки.

В судовождении при рассмотрении угловых колебаний судна на волнении выделяют *бортовую*, *килевую* и *бортовую с килевой* (смешанную) качку. Для того чтобы судно обладало хорошей мореходностью, его качка должна быть плавной и умеренной. Кроме того, на мореходность судна влияет и разность фаз колебаний судна и волнения, которая может быть благоприятной или ухудшать ситуации.

Бортовая качка. Формы корпуса судов, соотношения их собственных частот и обычных частот волнения моря, как правило, таковы, что бортовые колебания является самым опасным видом качки. Чрезмерная бортовая качка несет непосредственную опасность возникновения аварийных ситуаций. Чаще всего неблагоприятны в отношении размаха накрений курсовые углы к волне, близкие к 90^0 . Однако необходимо отметить, что у судов с малой метацентрической высотой большая бортовая качка может возникнуть на попутном волнении ($q = 135 \div 225^0$), особенно когда длина судна близка к длине волны. У ряда судов при $q = 90^0$ бортовые колебания при отсутствии резонанса могут быть умеренными (судно легко всходит на волну и опускается к ее подошве без больших углов крена).

Когда судно в шторм располагается лагом к волне, опасен резонанс бортовой качки. В этом случае колебания судна отстают по фазе на 90^0 от волнения. При таком условии на

склоне волны (рис. 1.2, б) к инерционному моменту M_{II} добавляется значительный кренящий момент M_K от смещения центра величины C , что приводит к увеличению скорости и амплитуды качки. В процессе качки, двигаясь по склону волны, судно достигает максимального крена на наветренный борт у подошвы волны (рис. 1.2, в). Следующая волна обрушивается на палубу большую массу воды, резко увеличивает крен, ударяет по палубным объектам, может привести к их повреждению и нарушению водонепроницаемости закрытий трюмов. Прием воды на палубу приводит к повышению центра тяжести G судна и уменьшению его остойчивости. При чрезмерных накренениях судно может перевернуться. Опрокидывание судов при шторме относится к самым тяжелым авариям, так как происходит почти мгновенно и обычно сопровождается гибелью всего экипажа.

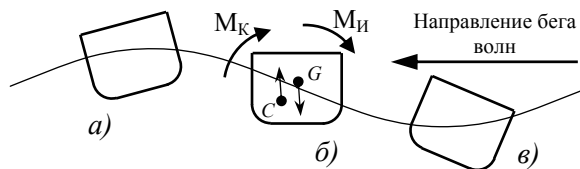


Рис. 1.2. Схема бортовой резонансной качки

Вследствие сдвига фаз между вертикальной качкой и волнением средние за период значения кренящего момента на один и другой борта судна оказываются различными. Это приводит к несимметрии качки, при которой среднее положение судна отклонено от вертикали. В наибольшей мере несимметричной качке подвержены суда с высоким расположением центра тяжести. У них постоянная составляющая накренений наблюдается в сторону бега волн.

Большие ускорения и углы бортовой качки могут быть причиной повреждений грузов и их смещения. С целью уменьшения интенсивности бортовой качки при постройке ряд судов снабжается скуловыми киями, либо другими стабилизирующими устройствами, которые увеличивают демпфирование качки.

У судов с нормальной остойчивостью бортовая качка обычно минимальна при встречном и попутном волнении.

Килевая качка. По отношению к килевой качке влияние курсового угла волн обратное в сравнении с бортовыми колебаниями. На волнении с носа или с кормы килевая качка наиболее интенсивна и мала при бортовых курсовых углах волн. Амплитуда килевой качки возрастает при *резонансе* и *при близости длины волны к длине судна*, однако больших значений она не достигает. Во время резонанса килевая качка отстает по фазе на 90^0 от волнения. На гребне волны судно «задирает» нос, а затем изменяет дифферент на нос, который достигает максимума на подошве волны. В это время следующая волна накатывает большую массу воды на палубу. «Зарываясь» в волну, судно испытывает значительные нагрузки на корпус и теряет скорость. Сама по себе килевая качка не угрожает безопасности судна, опасны сопутствующие ей явления. При встречном волнении существенно возрастает сопротивление движению судна, сильны удары волн, повышены забрызгивание и заливание палубы, могут наблюдаться оголение гребного винта, слеминг, возникают значительные изгибающие моменты и другие проблемы. При курсе по волне возможны опасное понижение остойчивости, ухудшение управляемости судна.

Бортовая с килевой качка возникает при косых курсовых углах волнения. При отсутствии резонанса амплитуда бортовой качки здесь меньше, чем при положении судна лагом к волне. Соответственно уменьшается и амплитуда килевых колебаний по сравнению с качкой на встречных и попутных волнах. Когда судно испытывает чрезмерную бортовую качку при волнении в борт или сильную килевую качку на встречном волнении, то для уменьшения опасности нередко изменяют курс с расчетом направления волны в скулу судна. В условиях смешанной качки появляются динамически изменяющиеся крутящие моменты на корпусе судна, которые при сильном волнении могут вызвать повреждения судов с большим раскрытием палубы. При курсовых углах волнения от 120^0 до 170^0 наблюдается максимальная амплитуда волнового рыскания судна относительно удерживаемого курса.

Резонансные явления. Интенсивность бортовой, килевой, вертикальной качки резко возрастает в условиях резонанса. При продольно-горизонтальной, поперечно-горизонтальной качке и рыскании это явление не возникает. Различают основной и параметрический резонанс качки.

При **основном резонансе** амплитуда качки достигает максимального значения, когда частота ω_K (период T_K) собственных колебаний судна равна кажущейся средней частоте ω_e (кажущемуся среднему периоду $\bar{\tau}_e$) волнения. Отношение $\varepsilon_K = \omega_e / \omega_K = T_K / \bar{\tau}_e$ называют *относительной (по виду качки) кажущейся частотой волнения* или **показателем резонанса**. Для бортовой качки этот показатель будет обозначаться ε_θ , для килевой и вертикальной – ε_ψ , ε_ζ соответственно. Периоды T_θ , T_ψ , T_ζ собственных бортовых, килевых и вертикальных колебаний судна приближенно оцениваются по формулам:

$$T_\theta \approx CB / \sqrt{h_\theta} ; \quad T_\psi \approx 2,4\sqrt{T} ; \quad T_\zeta \approx 2,5\sqrt{T} .$$

Здесь B , T – ширина и осадка судна, h_θ – поперечная метацентрическая высота, $C \approx 0,7 \div 0,9$. Коэффициент C обычно вычисляют при постройке судна и приводят в «Информации об остойчивости для капитана судна». Вследствие близости периодов T_ψ и T_ζ , резонанс килевой качки обычно сопровождается резонансом вертикальных колебаний. Значительное увеличение амплитуды качки возникает не только при равенстве, но и близости ε_K единице. Обычно это наблюдается, когда показатель резонанса лежит в диапазоне от 0,7 до 1,3. Поэтому **условием основного резонанса качки** (бортовой, килевой, вертикальной) является:

$$0,7 < \varepsilon_K < 1,3 .$$

Максимуму резонансных явлений соответствует значение $\varepsilon_K = 1$. Под **резонансной зоной** понимается область значений курса и скорости судна, в которой показатель резонанса

находится в пределах $(0,7 \div 1,3)$. Существует определенная зависимость между отношением периодов (частот) и разностью фаз колебаний судна и волн. При резонансе разность фаз этих колебаний составляет 90^0 . Когда ε_K больше 1,3, смещение между фазами качки и волн меньше 90^0 ; если $\varepsilon_K < 0,7$, то больше 90^0 .

Параметрический резонанс представляет собой явление быстрого возрастания углов бортовой качки. Он появляется, когда кажущийся период волнения близок к половине периода собственных бортовых колебаний судна и центр тяжести (ЦТ) судна достаточно удален от плоскости действующей ватерлинии. Если же ЦТ расположен вблизи этой плоскости, то качка параметрического типа обычно не возникает. Особая опасность параметрического резонанса заключается в том, что на фоне благополучного штормования накренения большой амплитуды могут возникнуть неожиданно при прохождении группы волн с периодом, близким к $0,5T_\theta$. В морской практике известны случаи возрастания при параметрическом резонансе амплитуды качки от 15^0 до 50^0 меньше, чем за 6 минут. Условием параметрического резонанса обычно считается $1,6 < \varepsilon_\theta < 2,4$, а его максимум приходится на значение $\varepsilon_\theta = 2$.

Чрезмерные ускорения. В условиях килевой качки, особенно при резонансе, могут наблюдаться высокие уровни вертикальных ускорений центра судна, бака и кормы, приводящие к росту амплитуды вертикального изгибающего момента на корпусе и увеличивающие износ его конструкций. При косых и бортовых курсовых углах волнения значительны как вертикальные, так и боковые ускорения в движении судна. Совместно с накренениями они приводят к увеличению напряжений в креплениях грузов и могут явиться причиной смещения сыпучих грузов. Чрезмерные ускорения нарушают нормальный режим работы судового оборудования, способствуют смещению груза, ухудшают условия работы экипажа. Для уменьшения величины ускорений обычно намеренно снижается скорость судна. Необходимость в этом диктуется либо условием смещения груза, или величиной

напряжений в креплениях, либо инерционным воздействием качки на физиологическое и психологическое состояние людей.

1.2.2. Проблемы движения против волн

Заливаемость. Движение судна, испытывающего качку, может сопровождаться дополнительными проблемами, одной из которых является заливание – прием больших масс воды на палубу. При анализе мореходности обычно рассматривается заливание судна встречной волной через бак («зарываемость» в волну). Явление принятия воды на носовую часть палубы судном на встречном волнении, называется в англоязычных источниках «*Green water*». Такая заливаемость считается сильной, когда длина покрываемой водой носовой части судна составляет $0,15L$ и более. Если волны достигают палубной линии в любой точке по длине судна и только некоторые из них превышают ее, заливаемость считается умеренной. Заливания нет, когда вода не попадает на палубу.

Интенсивность заливания зависит от состояния моря, скорости и курса судна, его загрузки, формы корпуса, особенно носовой оконечности. Наибольшее заливание происходит на встречном волнении, когда судно в полном грузу и *длина волн близка к длине судна*. Условие максимальной заливаемости на встречном волнении, согласно исследованиям Р.Н.Ньютона, может быть представлено соотношением:

$$0,8 < (h\lambda / FL) < 1,2 .$$

Здесь h, λ – высота и длина волны; F, L – высота надводного борта и длина судна. Из опыта эксплуатации морских судов установлено, что заливаемость отсутствует при значениях $L/\lambda > 1,7$. Для уменьшения опасного заливания на встречном волнении наиболее рационально снизить скорость судна либо уменьшить осадку носом [3]. Изменением курса можно уйти от ударов носом о волну, но трудно значительно уменьшить заливание, так как при косом волнении может возрасти амплитуда колебаний кромки борта относительно уровня воды.

Заливание палубы появляется не только на встречном волнении, но и при других его курсовых углах, когда большие массы воды могут попадать на палубу со стороны бортов, угрожая выломать фальшборт и нанести повреждения объектам на палубе. На попутном волнении заливание может происходить через корму. Например, при следовании на попутном очень крупном волнении судно может испытывать сильную смешанную качку и принимать через борта и корму слишком много воды на палубу, чем создается угроза вскрытия грузовых люков и различных повреждений. Заливание также наблюдается при движении лагом к волне при режиме движения, близком к резонансной зоне. Особенно сильно оно в условиях резонанса.

Слеминг (от англ. slam – хлопать) – явление удара днищевой части носовой оконечности корпуса о воду в процессе качки при движении судна на встречных волнах. Удар сопровождается содроганием корпуса вследствие внезапного нарастания нагрузки на днище и медленно затухающей вибрации. Такую общую вибрацию корпуса называют *випингом*. Различают еще незатухающую вибрацию (*спрингинг*), обусловленную возбуждением изгибных колебаний корпуса под действием периодически изменяющихся гидродинамических давлений на встречных волнах. Появление слеминга зависит от размеров судна, осадки носом, формы корпуса, состояния моря, курса и скорости судна. Особенности слеминга как физического явления определяются в основном совместным выполнением двух условий: оголением днища и входом его в воду с достаточно большой вертикальной скоростью относительно воды.

Слемингу непременно предшествует оголение днища, возникающее чаще всего при встрече с волнами, близкими по длине к судну. Гидродинамические удары по днищу и общая вибрация корпуса могут быть причинами нарушений местной и общей прочности судна. Повреждения обычно развиваются медленно в виде накопления пластической деформации обшивки и элементов набора корпуса. Внешним проявлением ударов служит образование мощных всплесков воды вдоль борта у форштевня, обрушивающихся на палубу в виде струйно-брызговых потоков.

Условие возникновения слеминга. Слеминг появляется при сильном волнении с носовых курсовых углов, когда:

- осадка носом меньше $0,04 \div 0,05$ длины судна;
- кажущийся период волнения близок к периоду собственных килевых колебаний судна;
- крутизна волны составляет не менее $1:30$;
- вход днища в воду происходит с вертикальной скоростью, превышающей $(3 \div 4)\sqrt{L}$ м/с.

Слеминг обычно возникает у судов с малой осадкой носом (при плавании в балласте или с неполным грузом на встречном волнении). Вероятность опасных ударов тем выше, чем больше высота волн и скорость судна. Наблюдаются они на встречном волнении в широком диапазоне курсовых углов. Поэтому отклонение по курсу от чисто встречного движения не всегда является эффективным средством против слеминга. Исключить опасные удары волн легче снижением скорости или увеличением осадки судна носом [3]. Чтобы избежать неприятных последствий слеминга, капитаны обычно снижают скорость судна. Выбор режима хода носит субъективный характер. Он зависит от опыта судоводителя, а также от психологического воздействия на экипаж сотрясений корпуса. Чем интенсивнее волны и ветер, тем меньшую скорость можно допустить при постоянной осадке носом или тем большая осадка носом требуется для сохранения прежней скорости судна.

В штормовых условиях на встречных и косых относительно волн курсах, особенно когда судно имеет большой развал бортов, наблюдаются также удары волн в борт носовой оконечности судна. Такое явление называется **бортовым слемингом**.

Випинг (от англ. whip — хлестать) представляет собой упругие неустановившиеся колебания корпуса судна, вызываемые ударами его днища и бортов о воду и накатом воды на открытые участки палуб при движении на волнении. Випинг появляется через случайные интервалы времени, имеет характер затухающих колебаний с частотой первого тона свободной вибрации корпуса. Напряжения в продольных связях,

вызванные випингом, накладываются на напряжения от волновых изгибающих моментов. При неблагоприятных условиях плавания они могут быть причиной усталостных деформаций и повреждений конструкций корпуса.

Явления заливания и випинга вызывают повреждения бака, наружной обшивки, люковых закрытий, палубного оборудования и т.д.

1.2.3. Опасности плавания по волне

Уменьшение остойчивости. В условиях шторма на попутном волнении или на волнении с кормовых курсовых углов характеристики остойчивости и управляемости существенно изменяются. Опасным для судна с метацентрической высотой, близкой к нижнему допустимому пределу, является движение на сильном попутном волнении, когда длина и скорость бега волн близки к длине и скорости судна. В этом случае при прохождении вершины волны около миделя высота надводного борта в средней части судна, поперечная метацентрическая высота h_{θ} и, как следствие, остойчивость судна, уменьшаются. Снижение h_{θ} происходит из-за оголения оконечностей судна, где существует развал бортов. В результате при накренениях уменьшается боковое смещение центра величины и понижается положение метацентра. Так как скорость бега волн близка к скорости хода, то неустойчивое состояние судна при движении на гребне волны сохраняется продолжительное время, которое может оказаться достаточным для появления чрезмерного накренения.

Обычно в шторм попутные волны обгоняют судно. Даже при умеренном волнении, если, например, длина волны $\lambda \approx 100$ м., то скорость v бега волн уже составляет 25 узлов ($v \approx 1,25\sqrt{\lambda}$ м/с $\approx 2,5\sqrt{\lambda}$ узл.). Так как скорость бега штормовых волн обычно превышает ход судна, то на попутном волнении возможно заливание палубы через корму, или появление, особенно у судов с транцевой формой кормы, гидродинамических ударов в корму (кормовой слеминг). При заливании дополнительный вес воды на палубе повышает ЦТ

судна и создает кренящую силу от ее свободной поверхности. В результате остойчивость судна снижается.

Опасным на волнении с кормовых курсовых углов для судна с недостаточной остойчивостью может также быть основной и параметрический резонанс бортовых колебаний, приводящий к резкому увеличению их амплитуды.

Основными признаками опасности для идущего по волне судна в случае его малой остойчивости являются:

- *неожиданное появление у судна на гребне волны накренения, существенно превышающего наблюдавшиеся ранее;*
- *длительное по сравнению с четвертью периода собственных колебаний судна наклонение на борт, задержка в положении максимального крена и медленное возвращение в исходное состояние.*

При движении на попутной волне у судов длиной менее 60 м может возникнуть явление брочинга. **Брочинг** – это захват судна волной, сопровождающийся потерей управляемости, самопроизвольным разворотом лагом к волне, появлением большого крена и опасности опрокидывания. Наиболее неблагоприятным является захват судна на переднем склоне волны, имеющей длину $\lambda = (0,8 \div 1,3)L$ и скорость бега несколько выше, чем скорость хода судна. Предвестниками брочинга являются значительные колебания скорости хода за время прохождения попутной волны относительно судна, разгон на ее переднем склоне, увеличение рыскания, частоты и амплитуды переключений руля для удержания судна на курсе.

Ухудшение управляемости. В шторм управлять судном сложнее, чем при спокойной погоде. Движение судна в этих условиях сопровождается волновым рысканием относительно курса. Управляемость судна значительно ухудшается, а рыскание сильно возрастает при курсовых углах волнения $120\text{--}170^\circ$, особенно если скорости судна и волн близки между собой. В таких условиях иногда угол рыскания может достигать 40° . Ухудшение управляемости при плавании на попутных волнах объясняется тем, что при близости скоростей судна и волны из-за естественного движения частиц воды в волне резко ухудшается обтекание пера руля набегающим потоком воды, а

когда судно захватывается волной, остается только действие струи гребного винта. В таком состоянии движущееся судно находится практически на границе устойчивости на курсе. Получая случайное возмущение, оно резко уходит от курса, разворачиваясь иногда лагом к волне. Когда на попутном волнении средняя часть судна находится на вершине волны, то причиной ухудшения управляемости может быть также уменьшение погружения руля и его оголение.

1.2.4. Нагрузки на движительную установку и корпус

Ухудшение работы главной движительной установки.

При штормовой погоде повышаются динамические нагрузки на лопасти гребного винта, на валопровод и на главный двигатель. Значительное увеличение сопротивления движению судна в условиях волнения приводит к перегрузке движительной установки и к необходимости снижения ее мощности. Изменение погружения и оголение гребного винта сопровождается снижением эффективности его действия, попеременным разгоном и торможением, значительными колебаниями нагрузки на гребном валу. Это оказывает отрицательное влияние на главный двигатель, приводит к периодическому срабатыванию его защиты, требует ограничения его мощности.

Переменные гидродинамические нагрузки, действующие на винт при качке, могут вызвать вибрацию гребного вала и кормы, привести к поломке лопастей винта, конструкций гребного валопровода. Разгон и торможение винта при его периодическом оголении и погружении неблагоприятны для гребных установок, особенно для широко распространенных дизельных двигателей.

Скорость судна на переходе в штормовых условиях меньше скорости на тихой воде из-за двух обстоятельств: добавочного сопротивления от волн, ветра и снижения эффективности двигателя (*естественная потеря скорости*); уменьшения режима хода самим судоводителем при возникновении опасных для судна и груза явлений (*вынужденная или намеренная*

потеря скорости). Для избежания перегрузки двигателя в условиях волнения снижают его мощность и, соответственно, скорость хода. Нередко эту операцию выполняют, когда получаемое от приемоиндикатора GPS значение скорости приближается к 80% скорости на тихой воде при таком же режиме хода.

Деформации корпуса. Под воздействием внешних сил всякое твердое тело изменяет свою форму – деформируется. Деформация, исчезающая с прекращением действия вызвавших ее внешних сил, называется *упругой*. При такой деформации внутри тела возникают силы упругости, стремящиеся вернуть телу первоначальную форму. Величина этих сил пропорциональна деформации тела. Упругая сила, приходящаяся на единицу площади сечения тела, называется **напряжением** (механическим). Деформация является упругой, когда вызванные внешней силой напряжения не превышают предел упругости и/или длительность ее воздействия невелика. Если эти условия не соблюдены, то после прекращения действия на тело внешних сил, оно не восстановит полностью свою форму. Неисчезнувшая после снятия нагрузки деформация тела называется *остаточной*.

Упругие деформации могут быть весьма разнообразны. Однако достаточно много из них можно свести к одному виду – растяжению (или сжатию). *При растяжении тела напряжения считаются положительными, а при сжатии – отрицательными.*

Общие деформации корпуса. Под действием внешних сил изменяется форма судового корпуса. Деформации судна, рассматриваемого как балка переменного по длине сечения, называются *общими*. Наиболее значительными и опасными видами этих деформаций являются продольный изгиб и кручение. Способность корпуса противостоять им, не разрушаясь, называется *общей прочностью* судна.

Общий изгиб – это деформация корпуса, при которой на палубе и на днище судна возникают продольные напряжения, причем на палубе знак этих напряжений противоположен знаку на днище. Общий изгиб особенно опасен для крупнотоннажных судов. Различают два вида такой деформации: прогиб (*sagging*)

и перегиб (hogging). При *перегибе* палуба растянута, а днище сжато, при *прогибе* – наоборот.

В условиях качки на курсах вразрез волне и по волне периодически изменяется величина и форма погруженной части судна, а также скорости и ускорения движения корпуса. Вызванные этими обстоятельствами знакопеременные динамические нагрузки вызывают изгиб корпуса в вертикальной плоскости, а на косом волнении, кроме того, изгиб в горизонтальной плоскости и скручивание. Главной составляющей внешних сил считается волновой изгибающий момент. От его действия общий изгиб, присущий судну при тихой погоде, увеличивается, особенно при попадании судна с начальным прогибом на подошву волны (или судна с перегибом на ее вершину). При определенных условиях такие деформации выходят за пределы упругих. В результате в конструкциях корпуса могут появиться остаточные деформации и повреждения.

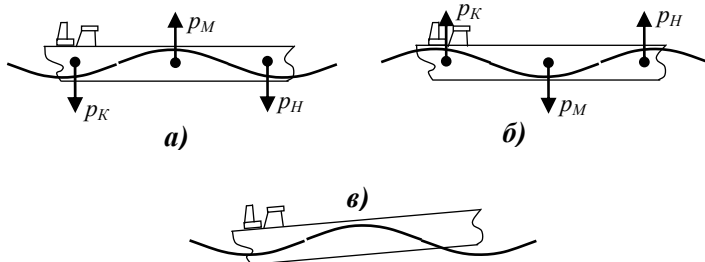


Рис. 1.3. Положения судна при продольной качке

Для крупнотоннажных судов (длина больше 150 метров) сильное встречное волнение может стать причиной потери общей прочности. На тихой воде напряжения в продольных связях крупнотоннажного судна обычно невелики, так как вес его поперечных секций уравновешен силами поддержания воды. При сильном волнении длина морских волн составляет 130 ... 300 м. и часто близка к длине крупнотоннажного судна. В этом случае при нахождении миделя судна на вершине или на подошве волны в средней части и в оконечностях судна появляется разность между силами веса и силами поддержания

(рис. 1.3,а,б). Суммарные силы на корпус в оконечностях по направлению противоположны силе в средней части. В результате корпус судна находится под действием значительного волнового изгибающего момента, который при движении судна относительно волн изменяется с большой амплитудой. Эта ситуация усугубляется при оголении оконечностей судна (рис. 1.3,в), при залипании носовой части палубы. На величину волнового изгибающего момента влияют также инерционные силы, обусловленные вертикальными ускорениями движения корпуса. В зависимости от разности фаз колебаний судна и волн они могут увеличивать либо уменьшать величину изгибающего момента. Изменяющийся с большой амплитудой динамический изгибающий момент приводит к значительным колебаниям напряжений в продольных связях, в обшивке палубы и днища в центральной части судна, к появлению в этих элементах остаточных деформаций. Следствием может быть их повреждение, и даже разрывы, приводящие иногда к перелому корпуса.

Кручением называется деформация корпуса под действием двух противоположно направленных поперечных моментов, приложенных к оконечностям судна. Кручение корпуса достигает максимальных значений при плавании на косом волнении. Такого вида деформация может оказаться опасной для судов с большим раскрытием палуб (контейнеровозов, балкеров).

Местные деформации. Кроме подверженности общим деформациям конструкции корпуса (набор, палуба, днище, борта, переборки) и их отдельные части участвуют в местном изгибе под воздействием локальных усилий, таких как давление груза, удары волн, и т.д. Следует отметить, что сила давления воды на корпус при ударах волн может достигать 38 т/м^2 . На волнении местные напряжения в определенных частях корпуса возрастают. Например, из-за вертикальных ускорений при качке растет давление груза на палубы трюмов и твиндеков. При слеминге значительно увеличиваются гидродинамические силы на обшивке носовой части днища, и т.д. Свойство элементов корпуса противостоять действию на них локальных нагрузок, не разрушаясь, называется *местной прочностью* судна.

В конструкциях, участвующих в общих и локальных деформациях, вызванные ими напряжения суммируются.

1.2.5. Основные факторы, влияющие на интенсивность качки

Интенсивность колебаний судна, возбуждаемых волнением, зависит главным образом от следующих факторов:

- *высоты морских волн (чем крупнее волны, тем интенсивнее качка);*
- *размеров и демпфирующих свойств судна (чем больше размеры судна и выше его демпфирующие свойства, тем меньше интенсивность колебаний);*
- *разности фаз между колебаниями судна и поверхности моря (наихудший вариант – разность фаз 90°);*
- *соотношения между периодами собственных колебаний судна и волнового воздействия на него (состояние резонанса при $0,7 < \varepsilon_K < 1,3$);*
- *соотношения между длиной судна L и преобладающей длиной морской волны λ (наиболее неблагоприятно, когда $\lambda = L$).*

Следует также отметить, что с ростом скорости судна ускорения, скорости, угловые и линейные перемещения корпуса, сила ударов волн и интенсивность других неблагоприятных явлений в общем случае увеличиваются.

1.3. Мореходность судна и ее обеспечение

Понятие мореходности. Одним из условий безопасной и эффективной перевозки грузов морем является хорошая мореходность судов. **Мореходностью** обычно называется способность судна к безопасному плаванию в условиях интенсивного морского волнения и ветра с возможностью эффективного использования всех бортовых систем и механизмов. Иначе говоря, мореходность – это комплекс свойств, обеспечивающих судну выполнение своего назначения в заданных гидрометеорологических условиях. Она зависит от

размеров, архитектуры, формы обводов, нагрузки судна, соотношения его размерений и параметров морских волн, от интенсивности и курсового угла волнения, скорости судна и ряда других факторов. Мореходность определяется плавучестью, остойчивостью, ходкостью, управляемостью, непотопляемостью, плавностью качки судна. Однако понятие «мореходность» имеет более узкий смысл, чем термин «мореходные качества». Оно объединяет только свойства судна, существенные при плавании в условиях ветра и волнения. К ним относятся:

- качка на волнении;
- обусловленные волнением и качкой напряжения элементов корпуса, перегрузки главного двигателя, устройств, механизмов;
- заливание и забрызгивание палубы и надстроек;
- оголение носовой части днища и подверженность слемингу;
- потеря скорости из-за возрастания сопротивления движению судна и ухудшения условий работы гребного винта;
- снижение остойчивости и ухудшение управляемости;
- приспособленность к пребыванию людей в морских условиях.

Последнее свойство определяется герметичностью помещений, возможностью беспрепятственного сообщения между надстройками и отсеками в штормовую погоду, степенью защищенности экипажа на открытых местах работы от ветра, дождя и брызг, физиологической и психологической способностью экипажа выполнять свои функции.

Обеспечение мореходности. Мореходность судна обеспечивается:

- конструктивно (формой корпуса; достаточной его общей, местной прочностью и герметичностью; достаточной высотой надводного борта; отсутствием выступающих частей за бортом; удалением механизмов, люков трюмов, надстроек от форштевня; установкой на баке волновых отбойников для защиты объектов на палубе от волн и водяных струй и для предотвращения принятия на нее большой массы воды; и т.д.);

- правильной загрузкой (достаточной для плавания в штормовых условиях остойчивостью, прочностью корпуса и др.);
- действиями судоводителей и экипажа перед рейсом и на переходе (планированием перехода и его коррекцией в рейсе, подготовкой судна к штормовым условиям, выбором режима движения, балластировкой и др.).

Подготовка к штормовым условиям. Для избежания неблагоприятных последствий плохой погоды экипажем проводятся мероприятия по своевременной подготовке судна к плаванию в штормовых условиях. *Перед выходом в море*, независимо от водоизмещения, района и продолжительности рейса, преобладающих условий погоды, судно с находящимся на нем грузом, судовым снаряжением и инвентарем должно быть полностью подготовлено к плаванию в штормовую погоду.

В пути при получении сведений или наличии признаков надвигающегося шторма проверяются: рулевое устройство; закрытия грузовых люков; надлежащее крепление грузового устройства, вооружения, а также крепление палубного груза (если таковой имеется) и всех предметов, которые при качке могут прийти в движение; исправность действия клинкетных дверей водонепроницаемых переборок, надежность закрытия воздушных и мерительных трубок на открытых палубах; надежность крепления и закрытия спасательных шлюпок и т.д. Устраняется статический крен (если он имеется), опробываются водоотливные средства. В целях предотвращения попадания забортной воды в корпус судна: закрываются клюзы якорных цепей, а также выходящие на открытую палубу световые люки, горловины; задраиваются глухарями бортовые иллюминаторы, особенно находящиеся вблизи ватерлинии; раструбы наружных вентиляторов закрываются чехлами и поворачиваются по ветру. Водонепроницаемые двери, которые не мешают сообщению внутри судна, закрываются, остальные подготавливаются к закрытию. По возможности ликвидируются свободные поверхности в танках, если необходимо, то заполняются балластные отсеки, а те, которые не подлежат заполнению, держат пустыми. При необходимости используются дополнительные крепления палубных грузов. Все эти действия проводятся в кратчайшие сроки до ухудшения погоды,

поскольку в дальнейшем выполнение многих из них может быть затруднено.

Меры обеспечения мореходности подготовленного к плаванию в шторм судна включают в себя:

- *решения перед выходом в рейс* (задержка в порту из-за плохой погоды);
- *заблаговременные решения в рейсе до встречи со штормом* (изменение маршрута для избежания тяжелых условий, изменение балластного состояния);
- *решения в процессе плавания в штормовых условиях* (изменение скорости или скорости и курса судна для уменьшения интенсивности неблагоприятных явлений).

Очевидно, **чем раньше и надежнее можно предсказать поведение судна в ожидаемых погодных условиях, тем безопаснее и эффективнее можно осуществлять эксплуатацию судна.**

Анализ мореходности судна обычно включает три частные задачи:

- *определение параметров, характеризующих внешние условия (главными из них являются характеристики волнения);*
- *получение характеристик реакции судна на внешние воздействия;*
- *установление критериев, позволяющих делать заключение о мореходности судна.*

Параметры волнения могут определяться самим судоводителем; выбираться из поступаемых от служб погоды метеорологических бюллетеней, факсимильных карт, сеточных данных; рассчитываться по измерениям параметров качки; приниматься со спутников. В будущем требуемые данные о волнении, включая его спектр, для всех районов Мирового океана будут получаться практически в реальном времени на основе информации спутников, с высокой точностью осуществляющих мониторинг земной поверхности.

Характеристики реакции судна на волнение получаются путем прямых и косвенных измерений с использованием

специальных приборов или рассчитываются по параметрам волнения.

Выбор критериев мореходности, их допустимых границ или методик расчета этих пределов производится с учетом возраста судна на основе изучения поведения в условиях волнения конкретных судов с разной загрузкой с использованием экспертных оценок и моделирования реакции судна на волнение.

1.4. Критерии мореходности и режимы штормового плавания

Критерии мореходности. В условиях ветра и волн судно считается мореходным, когда оно может нормально функционировать длительное время без повреждений. Признаками мореходности служат плавная качка, отсутствие заливания, слеминга, разгона гребного винта, опасности опрокидывания, легкость управления и ряд других признаков. Величины, по которым судят о нормальности функционального состояния судна в условиях ветра и волнения, называют **критериями мореходности**. Их также именуют *показателями* либо *характеристиками мореходности*, *функциональными* или *операционными критериями безопасности*. В качестве показателей мореходности могут использоваться многие из параметров реакции судна на волнение:

- *амплитуды, скорости и ускорения основных видов качки;*
- *скорости, ускорения, перемещения определенных частей корпуса;*
- *вероятности заливания, слеминга, разгона винта;*
- *напряжения элементов корпуса;*
- *показатели работы движительной установки, рулевого устройства и другие величины.*

Минимальная совокупность показателей, полностью отражающих свойства мореходности судна в условиях ветра и волнения, называется **вектором критериев мореходности** (конвертом критериев). Безопасному состоянию судна соответствует область значений показателей мореходности,

очерченная определенными границами. Эти границы называют *допустимыми значениями, уровнями риска, операционными ограничениями, нормами мореходности*. Состояние судна в условиях ветра и волнения является **мореходным**, когда компоненты вектора критериев не выходят за операционные границы. Следует отметить, что критерии мореходности характеризуют риск появления обстоятельств, приводящих к повреждению судна, груза и к другим нежелательным последствиям, не отражая непосредственную опасность аварии, поломки механизмов, или порчи грузов. Кроме допустимых пределов у показателей мореходности в АСКМ обычно выделяется и граница для предупреждений о том, что уровень значений высокий и приближается к допустимому пределу.

К сожалению, невозможно отобрать небольшой постоянный состав критериев, пригодных для анализа мореходности всех судов. Для разных типов судов эти определяющие мореходность показатели различны. Больше того, для одного судна при разной загрузке они также могут быть неодинаковыми. В общем случае состав вектора критериев мореходности и допустимые его границы зависят от типа судна, его загрузки, возраста и других особенностей. Например, для **крупнотоннажных танкеров и балкеров** чрезмерные нагрузки на корпус являются наиболее опасным следствием воздействия волнения. Поэтому для них основной критерий – *вертикальный изгибающий момент (VBM – vertical bending moment)* в разных сечениях корпуса по длине судна. У **больших контейнеровозов** кроме общего продольного изгиба в вертикальной плоскости из-за большого раскрытия палубы опасность представляют деформации кручения. Поэтому в конверт критериев этих судов входят моменты кручения. Для **пассажирских судов** одним из важных факторов эксплуатации является комфортность условий для пассажиров. Для них основным из критериев нормального функционирования считаются *вертикальные ускорения* в различных частях судна, которые являются главной причиной возникновения морской болезни. Особо неблагоприятными проявлениями действия волнения **при эксплуатации судов Ро-Ро и паромов, перевозящих автомобили и другую колесную**

технику, а также судов с палубными контейнерами, считаются ускорения в совокупности с наклонениями палубы, приводящие к большим нагрузкам на систему креплений, к риску смещения и повреждения груза. Для этих судов основной компонентой вектора мореходности служит комбинированный критерий. Его называют **эффективным наклонением** или **эффективным углом бортовой качки** и обозначают θ_F . Этот критерий учитывает действие на груз гравитационных сил, и сил, возникающих при качке от вертикальных, поперечных ускорений и наклонений. Продольные ускорения и дифферент здесь во внимание не принимаются.

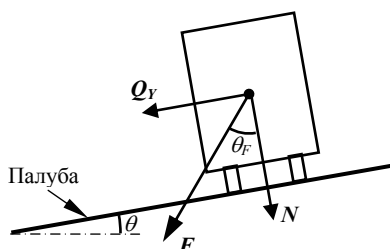


Рис. 1.4. Эффект действия ускорений и наклонения на груз

Угол θ_F определяется отношением тангенциальных Q_y и нормальных сил N , действующих на груз в процессе качки (рис. 1.4): $\theta_F = \arctan(Q_y / N)$. Следует отметить, что при вертикальных ускорениях, близких к g , нормальная сила может стать равной нулю. Величина θ_F вычисляется по значениям вертикальных, поперечных ускорений, углу бортовой качки, вертикальному и боковому расстояниям от центра тяжести судна [18].

Иногда используют критерий, называемый **эффективным наклонением судна** или **углом силы** (ϕ_F), который учитывает дополнительно (по сравнению с θ_F) угол килевой качки и продольные ускорения: $\phi_F = \arctan(Q / N)$.

На конкретных критериях и их нормах основаны штормовые диаграммы [5] и программные продукты, предназначенные для

контроля мореходности. Примером предельных уровней безопасности для штормовых диаграмм являются нормы, рекомендованные известным специалистом в области мореходных качеств судов Аэртсеном:

- 3 удара днищем при слеминге за время, равное 100 периодам килевой качки;
- 7 заливаний палубы бака за это же время;
- 25 оголений винта за это же время;
- значительная амплитуда 0,5g вертикального ускорения на носовом перпендикуляре;
- значительная амплитуда 0,4g вертикального ускорения на ходовом мостике;
- значительная амплитуда 30⁰ бортовой качки.

АСКМ позволяют оценивать большее число характеризующих мореходность показателей, чем штормовые диаграммы. Поэтому перечень используемых в них критериев мореходности шире. В общем случае в АСКМ состав вектора критериев и операционные ограничения для условий ветра и волнения вычисляются и назначаются с использованием одобренных методик, так как мнение «среднего капитана» о безопасной норме критериев мореходности в значительной мере субъективно. Но в то же время в этих средствах предусматривается возможность ручного изменения состава конверта критериев и их допустимых уровней, чтобы дать возможность капитану подстроить систему к особенностям конкретных ситуаций. Система обычно снабжается руководством, облегчающим выполнение этих процедур.

Режимы штормового плавания. Кроме конструктивных особенностей и загрузки на качку судна влияет его курс и скорость. Поэтому, когда условия функционирования выходят за рамки, при которых судно мореходно, можно уменьшить негативное воздействие волнения на судно. Для обеспечения безопасности в таких случаях используется обычно два способа: меняется режим хода или режим плавания. Реже перемещается балласт судна для изменения его посадки.

Под ***режимом хода*** подразумевается выбранная частота n вращения ВФШ (или шаг H_p ВРШ) и соответствующая ей

скорость хода V , т.е. совокупность значений (n, V) или (H_p, V) . В упрощенном варианте режимом хода считается скорость судна. При изменении режима хода направление движения судна остается постоянным.

Режимом плавания в штормовой обстановке называется перемещение с определенными n, V (или H_p, V) и *курсом* относительно волн, т.е. вектор (q, n, V) или (q, H_p, V) , где q – курсовой угол волнения. При упрощенном рассмотрении режим плавания определяется совокупностью значений (q, V) .

К уменьшению скорости хода прибегают, чтобы избежать сильных ударов волн, заливания (слеинга) или других нежелательных явлений. Курс и скорость изменяют, когда необходимость обеспечения безопасности плавания заставляет отказаться от движения в заданном направлении. Разность между предельным и действительным значениями показателя мореходности при данном режиме плавания называется **запасом мореходности** по этому параметру. Показатель, по которому при заданном режиме плавания запас мореходности минимален, называется **определяющим**. Таким в конкретных условиях может быть один или несколько параметров. Множество значений курса и скорости судна, при которых значения отдельного критерия мореходности не выходят за рамки допустимых, называется **зоной безопасных режимов плавания по этому показателю**.

Безопасным (благоприятным) режимом плавания в условиях волнения именуется режим, при котором не возникает обстоятельств, приводящих к повреждению судна, груза и к другим нежелательным последствиям. Множество возможных сочетаний курса и скорости, при которых не возникает упомянутых проблем, представляет собой **область допустимых (безопасных) режимов плавания** в условиях ветра и волнения. Эта область может быть также определена как множество режимов плавания, при которых состояние судна мореходно. Как уже упоминалось, мореходность судна определяется вектором операционных критериев. Поэтому область допустимых режимов плавания может быть

представлена как пересечение безопасных зон по составляющим вектора критериев мореходности.

Оптимальным режимом плавания в заданных гидрометеорологических условиях называется допустимый режим, соответствующий подходящему экстремуму критерия эффективности, отражающего основную цель перехода.

1.5. Основные виды контроля мореходности в рейсе

Обеспечение безопасного и эффективного плавания на волнении – одна из важных задач экипажа судна. Несмотря на повышение эксплуатационных требований, улучшение гидрометеорологического обеспечения, рост размеров судов, увеличение их энерговооруженности, совершенствование навигационного оборудования, ежегодно сотни морских судов терпят аварии из-за штормов. Многие из них по выходу в рейс были в хорошем мореходном состоянии и удовлетворяли расчетным критериям безопасности по устойчивости и прочности. Анализ свидетельствует, что к числу основных причин аварий относятся неправильные решения судоводителей при управлении судами в сложной гидрометеорологической обстановке и неполное знание ими мореходных качеств судна. Однако следует также признать, что в основе неудовлетворительности принимаемых судоводителем решений нередко лежит и трудность получения достаточно точной и полной информации о состоянии внешней среды и судна, отсутствие времени на проведение расчетов и подготовку обоснованных решений. Достаточно полный для принятия обоснованных решений контроль мореходности судна в процессе рейса включает такие операции:

- *измерение параметров, характеризующих состояние судна и внешней среды;*
- *расчет параметров мореходности по данным о ветре и волнении;*
- *оценку мореходности;*
- *вычисление элементов волнения по данным качки;*

- *определение областей допустимых режимов движения;*
- *нахождение оптимального режима движения;*
- *расчет требуемого балластного состояния судна;*
- *прогноз мореходности судна на ожидаемые условия плавания и ряд других.*

Традиционный контроль мореходности судна обычно основывается на проводимых самим судоводителем наблюдениях внешних условий и поведения судна, анализе данных факсимильных карт погоды, использовании существующих рекомендаций, упрощенных расчетов и штормовых диаграмм. Высота волн и их длина при традиционной оценке мореходности находится глазомерно путем сравнения с размерами корпуса при прохождении волн вдоль борта. Направление волнения устанавливается с помощью пеленгатора. При нахождении среднего кажущегося периода волн используется пеленгатор и секундомер. Погрешности таких измерений достаточно велики. Средняя квадратичная погрешность высот волн составляет $\pm 25\%$, направления их бега – $\pm(23\div 30)^\circ$, периода – ± 1 с. Среднюю (расчетную) длину волны получают также с помощью диаграммы Ю.В.Ремеза по измеренным значениям среднего кажущегося периода и курсового угла волн. Иногда длина волн измеряется по их эхосигналам на экране РЛС при работе на малой шкале дальности. Фиксируя время прохождения гребней волн через одну и ту же точку экрана РЛС, оператор может измерить и кажущийся период волн. Однако в практике судовождения такие радиолокационные определения элементов волнения широкого распространения не получили.

Из параметров, характеризующих реакцию судна на волнение, при традиционной оценке измеряется амплитуда углов бортовой качки и ее период. Однако показания применяемых для измерения углов качки маятниковых кренометров могут значительно отличаться от действительных углов крена. Период качки измеряется оператором с помощью секундомера.

Для расчета показателей мореходности судна по данным о волнении и для прогноза поведения судна на оставшуюся часть

пути традиционно используются специальные диаграммы, факсимильные карты погоды и упрощенные расчетные зависимости. Получение необходимой информации с помощью этих средств требует определенного времени и отвлечения судоводителя от наблюдения за окружающей обстановкой.

Чаще всего в традиционной методике с целью обеспечения безопасности определяются только резонансные зоны, находясь в которых необходимо изменить режим плавания из-за неблагоприятной качки. Следует учитывать, что резонансная зона – не всегда эффективная оценка неблагоприятных условий для судна. Интенсивность резонансных явлений зависит от силы волнения, размеров и формы корпуса судна, а также от его демпфирующих свойств. При умеренном волнении в резонансной зоне энергии волн может оказаться недостаточно, чтобы значения показателей мореходности вышли за операционные границы. Суда со скуловыми киями, обладающие большими демпфирующими свойствами, кренятся меньше и испытывают меньшие нагрузки при резонансе бортовой качки. Поэтому в действительности опасные области значений курса и скорости судна в условиях волнения могут быть как уже, так и шире резонансных зон. Численная оценка многих определяющих мореходность параметров здесь не проводится, что не позволяет выбирать оптимальный режим плавания в условиях ветра и волнения. В традиционной оценке мореходности велика роль субъективного фактора, здесь немаловажны собственные ощущения и опыт капитана. Капитан, не используя приборов, судит о плавности качки, о чрезмерности ускорений корпуса и ударов волн, об опасности возникающих в корпусе напряжений и т.д.

Анализируя традиционную методику контроля мореходности, можно отметить следующие ее недостатки:

- *необходимость затрат времени судоводителя на измерения и расчеты;*
- *большие интервалы времени между наблюдениями, невозможность измерений параметров волнения в ночных условиях;*
- *оценка неполного вектора мореходности;*

- *большие погрешности измерений, расчетов, субъективных оценок;*
- *значительная роль субъективного фактора как источника возможных ошибок, невозможность на основе опыта идентифицировать ряд неблагоприятных для судна ситуаций и получать количественные оценки;*
- *необходимость формирования решений на основе недостаточно полной и точной информации.*

Отмеченные недостатки традиционной методики составляют одну из причин неэффективности принимаемых решений по управлению судном в штормовых условиях.

Автоматизированный контроль мореходности судна в процессе рейса основывается на использовании компьютера, измерителей параметров движения и напряжений элементов корпуса, программ для мониторинга, прогноза мореходности судна, и выполнения других операций. В настоящее время сложились все условия для реализации такого контроля на судах. Созданы устройства для измерения параметров *волнения, движения корпуса на качке, напряжений элементов корпуса и т.д.* Разработаны электронные системы для контроля мореходности. Они обеспечивают непрерывный анализ мореходности судна в рейсе. Параметры волнения в этих системах рассчитываются с помощью компьютера по данным о качке или извлекаются из информации РЛС. Для измерения параметров качки применяются инерциальные датчики линейных и угловых перемещений, а также специальная спутниковая аппаратура. К инерциальным устройствам относятся гироскопические датчики вращений и акселерометры, измеряющие линейные ускорения. Имеются и комбинации этих датчиков, так называемые ***инерциальные измерительные модули (IMU – Inertial Motion Units)***, измеряющие параметры движения объектов во всех шести степенях свободы. Примером IMU является выпускаемый для морских судов норвежской компанией SEATEX датчик MRU.

Специальное бортовое оборудование спутниковых систем способно определять параметры всех видов качки. Обычно в нем применяются четыре или три антенны, расстояние между

которыми 1÷3 метра. Нередко в бортовых системах контроля мореходности это спутниковое оборудование комбинируется с IMU. Результаты измерений двух датчиков объединяются с помощью фильтра Калмана. Такие комбинированные датчики в настоящее время представлены на рынке морских приборов. Примером является система SeaPath фирмы SEATEX. Дополнительно при оценке параметров мореходности в комбинированных датчиках используется и вычисление параметров качки по данным о волнении.

Серийно выпускаются и приборы для измерения напряжений элементов корпуса – **тензометры** (электрорезисторные и волоконно-оптические). Они позволяют измерять напряжения в основных связях корпуса, вызванные статическими и динамическими нагрузками, в том числе и действием морских волн. При компьютерном контроле мореходности судна используется также информация датчиков упора, момента, частоты вращения гребного винта и данные других приборов, отражающие те или иные стороны поведения судна в условиях волнения.

Главная идея компьютерного контроля мореходности судна состоит в мониторинге характеризующих ее параметров, в сравнении их значений с допустимыми границами, в предупреждении штурманского состава, когда текущие значения параметров мореходности приближаются к операционным ограничениям или превышают их. Дополнительно система может вырабатывать рекомендации, как изменить курс и/или скорость, чтобы избежать опасных ситуаций. Бортовые компьютеры позволили применять для оценки и прогноза мореходности наиболее точные методы расчета реакции судна на ветроволновые воздействия. Из-за громоздкости, необходимости многочисленных вычислений и большого времени на получение результатов при ручном счете, в прошлом на судах эти методы были неприемлемы и использовались только на берегу при проектировании и постройке судов. Теперь, благодаря компьютерам, они позволяют на судне достаточно точно прогнозировать его поведение в штормовой обстановке, как вследствие своей

адекватности рассматриваемому процессу, так и за счет учета результатов, полученных при испытаниях моделей этого судна в процессе проектирования.

Необходимо также отметить новые возможности оперирования с гидрометеорологической информацией. В настоящее время она от служб погоды может поступать непосредственно на компьютер и использоваться при расчетах мореходности.

Применение устройств, измеряющих достаточное число характеризующих мореходность параметров, мониторинг их значений, автоматизация расчетов и выработка рекомендаций, автоматические предупреждения и сигнализация о возникающих проблемах, позволяют представить судоводителю полную и точную информацию о мореходном состоянии судна, оставить больше времени на принятие решений, повысить надежность и безопасность плавания.

Необходимо также отметить, что мониторинг параметров мореходности позволяет улучшить работу бортовых систем и механизмов. Так, например, данные о параметрах качки могут использоваться для улучшения настройки адаптивного авторулевого. Точная информация о скорости судна от GPS, сведения о текущем расходе топлива, об упоре и моменте гребного винта, данные о параметрах качки дают возможность автоматически подстраивать движительную установку на оптимальный режим работы при изменении курса в условиях волнения, при выходе на мелководье и при других обстоятельствах. Примером может служить система управления главным двигателем ESP 2000 (Electronic Speed Pilot) фирмы Stellar Marine, обеспечивающая существенную экономию топлива.

Направления автоматизации. Процесс контроля мореходности начал автоматизироваться на судах с конца 1970-х годов. Работы, проведенные в этой области, условно можно отнести к одному из трех направлений:

- *автоматизация расчетов;*
- *автоматизация измерений;*
- *автоматизация измерений и расчетов.*

Первое направление связано с применением компьютеров и эффективных методов расчета параметров мореходности по данным о волнении, которые измеряются традиционными визуальными способами. Соединений компьютера с датчиками информации и другими устройствами здесь не предусмотрено. Оно характерно для начального этапа развития компьютерных средств контроля мореходности. Используемые в этих системах методы расчета показателей мореходности основываются на математических моделях поведения судна в штормовых условиях. Они позволяют оценивать безопасность судна и предсказывать эффект от изменения курса и скорости в текущей обстановке, прогнозировать мореходность в ожидаемых погодных условиях в будущем. Система также способна выбрать и рекомендовать судоводителю наилучший по определенному критерию режим плавания в заданных ветроволновых условиях. Главное преимущество первого направления – возможность предсказания критических ситуаций. Его недостатками являются: большие погрешности и неполнота данных о волнении, получаемых традиционным путем, которые отражаются на точности текущих оценок мореходности; необходимость затрат времени на измерение параметров волнения и на ввод данных в компьютер, на систематическое повторение этих наблюдений для выявления изменений внешних условий с целью своевременного их учета.

Второе направление предполагает использование специальных датчиков, измеряющих в реальном времени параметры реакции судна на волнение; компьютера, осуществляющего мониторинг измеряемых параметров, сравнение их значений с допустимыми границами, вырабатывающего предупреждения о приближении контролируемых параметров к этим границам и сигналы тревог об их превышении. Получаемые с помощью измерений значения параметров мореходности в общем случае имеют лучшую точность, чем вычисленные по данным о волнении. Чтобы получить оптимальное соотношение *стоимость-эффективность* основанной на таком подходе системы, виды, количество и места установки датчиков выбираются применительно к конкретному судну с учетом его особенностей.

Примерами оборудования, относящегося к характеризующему направлению, являются *Системы мониторинга напряжений корпуса*, *Системы мониторинга параметров движения судна при качке*. Работа этих средств является автоматической. О возникающих неблагоприятных ситуациях система сама оповещает судоводителя. Она запоминает измерительные данные и результаты анализа, может передавать информацию в регистратор данных рейса («черный ящик») и другим устройствам и системам. Путем подсчета осуществления тех или иных событий за определенное время (превышения заданного уровня наклонения, напряжений в тех или иных элементах корпуса и т.д.) система может сигнализировать об опасности нежелательных последствий. Высокие уровни амплитуд при оценке таких «выбросов» обычно не используют, так как в этом случае они случаются редко, и для получения надежных оценок требуется больше времени, чем при меньших уровнях. К недостаткам систем второго направления относится малое использование расчетных методов для целей прогнозирования поведения судна в ожидаемых ветроволновых условиях и отсутствие выработки рекомендаций по обеспечению безопасного плавания.

Третье направление объединяет положительные стороны двух первых подходов. Оно свободно от их основных недостатков и имеет дополнительные преимущества. Среди них следует назвать возможность уточнения по измерительной информации математических моделей, используемых для прогнозирования реакции судна на волнение, а также параметров самого волнения. Такие системы наиболее полно отвечают целям обеспечения мореходной безопасности судна, так как способны идентифицировать текущую ситуацию; моделировать другие ситуации, которые возникнут при изменении курса и/или скорости, балластного состояния, погодных условий; выработать рекомендации по оптимальным режимам движения.

2. Характеристика морского волнения

2.1. Виды волнения

Волнение представляет собой процесс колебания морской поверхности. Оно классифицируется по различным признакам.

В зависимости от причины, вызвавшей колебание морской поверхности, выделяют *ветровое волнение, зыбь, приливы (отливы), сейши и цунами*. Реальное волнение обычно является смешанным и складывается главным образом из ветровых волн и одной-трех систем волн зыби. Считается, что направление перемещения ветровых волн совпадает с направлением действия ветра. Однако необходимо учитывать, что при изменении направления ветра волнение меняет свое направление медленнее и совпадает с направлением ветра примерно через 12 часов. Предельные высоты ветровых морских волн составляют 20÷30 м. Обычно их длина не превышает 600 м. и в 15 ... 25 раз больше высоты волн. Зыбь является следствием ранее прошедших или отдаленных штормов, при этом длина ее волн обычно существенно больше, чем у ветровых, а крутизна – меньше. Направление зыби в общем случае не совпадает с направлением ветра. Колебание морской поверхности, происходящие в условиях безветрия, называется *мертвой зыбью*. Иногда в одном районе могут наблюдаться две и даже три системы зыби, имеющие разные источники. В практическом судовождении смешанное волнение традиционно представляется только двумя волновыми системами: ветровыми волнами и основной (наиболее мощной) системой волн зыби.

По форме волн различают регулярное и нерегулярное волнение. *Регулярным* считается волнение моря, в котором форма профиля всех волн одинакова и близка к синусоиде, а длина гребней волн очень велика. *Нерегулярным* называют колебания поверхности моря, при которых следующие одна за другой волны различаются между собой по амплитуде, периоду, длине, форме, протяженности гребней, направлению распространения.

Волнение может быть двумерным и трехмерным. *Двумерным волнением* называется совокупность волн, профили которых во всех параллельных линии распространения вертикальных плоскостях одинаковы. *Трехмерное волнение* характеризуется ограниченной протяженностью гребней. Здесь профили волн в параллельных вертикальных плоскостях отличаются друг от друга. Реальное морское волнение нерегулярно и трехмерно. При развитом ветровом волнении гребни волн в среднем в два-три раза превышают их длину, а при зыби это отношение больше.

По степени развития различают развивающееся, установившееся (развитое) и затухающее волнение. Волнение моря, в котором средние характеристики волн не изменяются во времени, является *установившимся* (развитым). Если высота волн со временем растет, то волнение называют *развивающимся* (усиливающимся), а если уменьшается — *затухающим*.

Таблица 2.1 – Шкала степени волнения ВМО

Баллы	Диапазон $h_{1/3}, \text{м}$	$\bar{h}_{1/3}, \text{м}$	Словесная характеристика
0	0	0	Полный штиль
1	0 – 0,1	0,05	Штиль (рябь)
2	0,1 – 0,5	0,3	Очень слабое (спокойное)
3	0,5 – 1,25	0,875	Слабое
4	1,25 – 2,5	1,875	Умеренное
5	2,5 – 4,0	3,25	Значительное (бурное)
6	4,0 – 6,0	5,0	Очень бурное
7	6,0 – 9,0	7,5	Сильное
8	9,0 – 14,0	11,5	Очень сильное
9	>14,0	>14,0	Исключительное

В зависимости от интенсивности выделяют *штиль, слабое, умеренное, значительное, сильное, исключительное* волнение. Степень волнения обычно оценивают в зависимости от высоты волн по девятибалльной шкале. Существуют разные шкалы волнения. Шкала Главного управления гидрографической службы Военно-морского флота СССР (шкала ГУГС ВМФ, 1953 г.) составлена по градации высот волн 3%-ой обеспеченности. Волнению в баллах по принятой в 1970 г. Всемирной

Метеорологической организацией (ВМО) шкале, соответствует высота значительных волн, приведенная в табл. 2.1.

2.2. Регулярное волнение

При грубых оценках в судовождении взволнованная поверхность моря рассматривается как однородное поле, состоящее из совокупности плоских одинаковых волн синусоидального профиля (рис. 2.1). Волны называются **плоскими**, когда картина волнового движения одинакова в параллельных вертикальных плоскостях. Плоские волны имеют гребни бесконечной длины. Иногда плоские волны называют цилиндрическими. Волнение представленного вида называют *регулярным* или *правильным*, а составляющие его волны синусоидального профиля – *гармоническими плоскими волнами*. Характер близкий к регулярному волнению имеет мертвая зыбь.

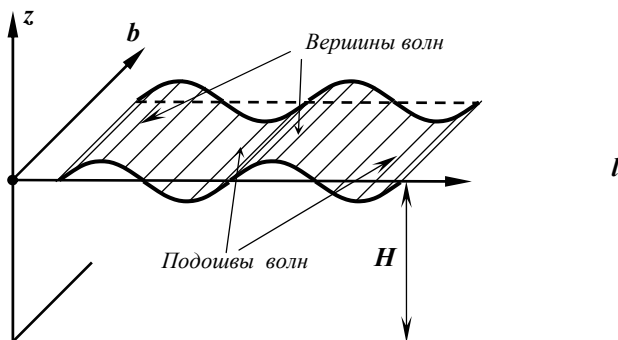


Рис. 2.1. Регулярное волнение

Различают следующие элементы отдельных волн. *Гребнем* волны называют ее часть, расположенную выше среднего волнового уровня. Вторую часть, находящуюся ниже среднего уровня, именуют *впадиной* или *ложбиной*. Наивысшую точку гребня называют *вершиной* волны, а наинизшую точку впадины – *подошвой* волны. *Фронтом* волны называется линия, проходящая вдоль ее гребней.

Геометрические характеристики волнения. Регулярное волнение характеризуется элементами профиля, получаемого при сечении одной волны плоскостью, перпендикулярной ее гребню (рис. 2.2).

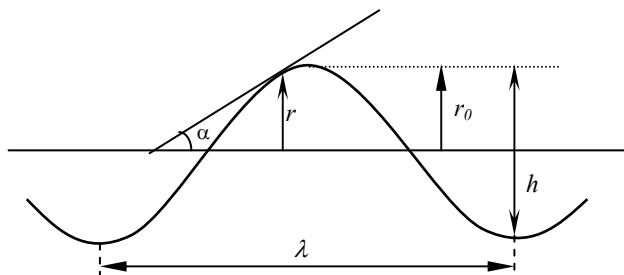


Рис. 2.2. Профиль регулярной волны

К геометрическим параметрам волн относятся: высота, длина, амплитуда, волновая ордината, угол волнового склона и другие характеристики.

Длиной волны λ называется горизонтальное расстояние между вершинами (гребнями) или подошвами (впадинами) двух соседних волн.

Высота волны h – это вертикальное расстояние от подошвы до вершины волны.

Амплитуда волн $\hat{r} = 0,5h$ представляет собой вертикальное расстояние между вершиной (подошвой) волны и линией невозмущенного уровня моря.

Волновая ордината r – это вертикальное расстояние от любой точки профиля волны до линии невозмущенного уровня моря.

Углом волнового склона α называется угол между касательной к профилю волны и горизонтальной плоскостью.

Амплитуда угла волнового склона $\hat{\alpha}$ представляет собой максимальное его значение в точках профиля волны.

Частотой формы волны Ω (волновым числом) называется отношение: $\Omega = 2\pi / \lambda$.

Крутизной волны (относительной высотой) называется отношение h/λ .

Кинематические характеристики волнения. Частицы воды в волне совершают движение по замкнутым траекториям (на глубокой воде – круговое движение, на мелководье – движение по эллипсам), что создает эффект бегущей волны, гребень которой перемещается в определенном направлении. Это явление характеризуется периодом, фазовой скоростью, угловой частотой и другими параметрами.

Периодом волн $\bar{\tau}$ называется время прохождения волной расстояния, равного ее длине.

Фазовая скорость V – это скорость перемещения профиля волны, т.е. скорость волны по направлению ее движения, перпендикулярного фронту волны.

Угловая частота ω определяется по формуле:
$$\omega = 2\pi / \bar{\tau} .$$

Для указания стороны волнения относительно меридиана или диаметральной плоскости (ДП) судна используются характеристики, связанные либо с направлением движения волн (по бегу волн) либо с направлением на точку, откуда приходят волны (против бега волн), отличающиеся от первых на 180^0 .

К показателям стороны волнения *по бегу волн* относятся: **направление движения (распространения) волн** K_w – угол между направлением на север и вектором фазовой скорости волн; **курсовой угол движения волн** q_w – угол между носовой частью диаметральной плоскости судна и вектором фазовой скорости.

Обратными характеристиками (*против бега волн*) являются: **направление волнения** A_w – азимут, от которого приходят волны ($A_w = K_w \pm 180^0$); **курсовой угол волнения** q – угол, отсчитываемый от носовой части ДП до направления на точку горизонта, от которой приходят волны ($q = 180 - q_w$).

Для обоих видов отсчета первый показатель называют *истинным направлением волнения*, а второй – *относительным направлением волнения*.

Ордината регулярной бегущей волны в данной точке моря определяется зависимостью:

$$r = \hat{r} \sin(\omega t + \Psi_r); \quad (2.1)$$

где Ψ_r – начальная фаза.

Угол волнового склона по фазе отстает на четверть периода от волновой ординаты:

$$\alpha = \hat{\alpha} \cos(\omega t + \Psi_r). \quad (2.2)$$

Связь между параметрами волн. Элементы волнения зависят от степени его развития и глубины акватории H . В зависимости от отношения глубины моря к длине волны различают глубоководные, промежуточные и мелководные волны. При глубине акватории, не меньшей четверти длины волны $H \geq \lambda/4$, волна считается *глубоководной*, а при $H < \lambda/20$ – *мелководной*. В диапазоне $\lambda/20 < H < \lambda/4$ волна является *промежуточной по глубине*.

Геометрические и кинематические параметры волн взаимосвязаны:

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= v\bar{\tau} \\ v &= \omega / \Omega = \sqrt{\frac{g \cdot \tanh(\Omega H)}{\Omega}} \\ \omega &= \sqrt{g\Omega \cdot \tanh(\Omega H)} \\ \hat{\alpha} &= \Omega \hat{r} = \pi h / \lambda \end{aligned} \right\}, \quad (2.3)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; \tanh – гиперболический тангенс.

Анализируя эти выражения, можно установить, что для глубоководных волн глубину H можно не учитывать, так как $\tanh(\Omega H) \approx 1$. В этом случае:

$$\Omega = \frac{\omega^2}{g}; \quad (2.4)$$

$$v = \sqrt{\frac{g}{\Omega}} = g \frac{\bar{\tau}}{2\pi} \approx 1,25\sqrt{\lambda}. \quad (2.5)$$

Для мелководных ветровых волн $\tanh(\Omega H) \approx \Omega H$. Отсюда вытекает, что:

$$\omega = \Omega \sqrt{gh}; \quad v = \sqrt{gH} \approx 3.1 \sqrt{H}.$$

Между высотой и длиной волны строгой зависимости нет. Волны одинаковой высоты могут иметь разные длины и периоды. Крутизна морских ветровых волн лежит в пределах $1/20 \div 1/30$. В практических расчетах обычно принимают $1/20$. Этому значению соответствует амплитуда волнового склона приблизительно равная 9^0 . Крутизна мелководной волны при уменьшении глубины растет. На малых глубинах $h/\lambda = 1/10 \div 1/8$. При больших значениях этого отношения происходит разрушение волн.

2.3. Нерегулярное двумерное волнение

В условиях волнения следующие одна за другой волны различаются между собой по амплитуде, периоду, длине, форме, протяженности гребней, направлению распространения. Волны, характеристики которых не повторяются, являются *нерегулярными*. Форма профиля реальных ветровых волн близка к *трохоиде*, но отличается от нее более крутым подветренным и пологим наветренным склоном. Напомним, что *трохоидой* называется кривая, описываемая точкой, лежащей на краю или внутри круга, который катится без скольжения по прямой линии. Нерегулярность и определенная хаотичность взволнованной поверхности моря дали основание рассматривать ее как случайное поле. При решении ряда задач волнение считают изотропным однородным случайным полем (рис. 2.3), представляемым совокупностью плоских нерегулярных волн со случайными фазами. В этом случае гребни волн имеют бесконечную длину, а профили индивидуальных волн во всех параллельных линии распространения вертикальных плоскостях – одинаковы.

Предположение об изотропности волн сводит трехмерное волнение к двумерному виду. Двумерная модель нерегулярного

волнения довольно широко применяется при расчетах мореходности судов. Это объясняется тем, что протяженность гребней ветровых волн в среднем в два-три раза превышает их длину. У волн зыби это отношение еще больше. Когда волнение существенно влияет на судно, гребни морских волн по длине обычно больше судна, что и позволяет приближенно считать волнение двумерным.

Изотропное нерегулярное волнение характеризуется своим сечением плоскостью, перпендикулярной гребням. Волновую ординату в точке пространства считают случайным стационарным процессом, удовлетворяющим условиям эргодичности. Вероятностные свойства нерегулярного двумерного волнения отражаются рядом показателей.

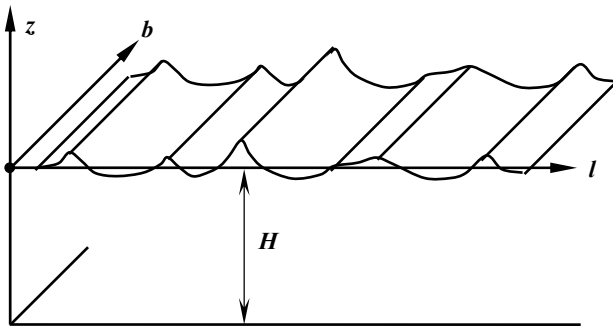


Рис. 2.3. Нерегулярное двумерное волнение

Распределение ординат и амплитуд волн. В данной точке моря волновая ордината является случайной непрерывной величиной. Такие величины полностью описываются функцией плотности распределения. На основе многочисленных экспериментальных данных установлено, что значения волновой ординаты подчиняются *нормальному закону*. Амплитуды и высоты волн следуют *закону Релея*.

Главные характеристики волнения. При решении многих практических вопросов нет надобности описывать волнение плотностью распределения. Достаточно бывает ограничиться численной характеристикой его направления и интенсивности.

Направление волнения. В отечественной практике судовождения и в ряде других стран основными являются показатели стороны волнения *против бега волн*: A_w или q . В других зарубежных странах ими считаются направления *по бегу волн*: K_w или q_w , отличающиеся от первых на 180° . Поэтому, используя различные средства для оценки мореходности, необходимо обращать внимание на вид применяемых в них характеристик направления волнения. Ниже при изложении материала используются направления волнения *против бега волн* (q и A_w).

Интенсивность волнения. Силу нерегулярного волнения характеризуют в баллах, средним квадратичным значением волновой ординаты, высотой волн трехпроцентной обеспеченности, высотой значительных волн. *Обеспеченностью* называется вероятность в процентах факта, что высота волн окажется больше заданной величины. В районах больших глубин обеспеченность определяется в соответствии с законом Релея.

Среднее квадратичное значение волновой ординаты σ_r представляет собой квадратный корень из дисперсии волнения, рассматриваемого как случайный стационарный процесс. Этот показатель называют также *наивероятнейшей амплитудой* волнения. Ее обеспеченность составляет 60,6%.

В отечественной практике, а также в России, стандартным показателем интенсивности волнения считается высота волн трехпроцентной обеспеченности – $h_{3\%}$. Под **высотой волны 3%-ой обеспеченности** понимают такую высоту, вероятность превышения которой составляет 3%. Иначе говоря, $h_{3\%}$ – это значение, больше которого могут быть только высоты трех из 100 последовательных волн.

В большинстве государств за рубежом силу волнения характеризуют высотой значительных волн – $h_{1/3}$. **Высота значительных волн** определяется как средняя одной трети наиболее высоких (из всей совокупности) волн. Эта высота имеет повторяемость 13,5%. Высота значительных волн

называется также *средней высотой самых больших волн* и *характерной высотой волнения*. Для расчета $h_{1/3}$ по скорости истинного ветра V_a при установившемся волнении Международной конференцией опытовых бассейнов (ИТТС – International Towing Tank Conference) рекомендуется выражение:

$$V_a = 10h_{1/3}^{2/3};$$

где скорость ветра V_a выражена в узлах, а $h_{1/3}$ – в метрах.

Исходя из закона распределения Релея, установлено [1], что $h_{1/3}$, σ_r и $h_{3\%}$ связаны соотношениями:

$$h_{1/3} = 4\sigma_r = 0,75h_{3\%};$$

$$h_{3\%} = 5,29\sigma_r = 1,336h_{1/3}; \quad \sigma_r = 0,19h_{3\%} = 0,25h_{1/3}.$$

Высота волн с обеспеченностью 0,1% условно принимается за **наибольшую возможную** в данном месте моря при шторме определенной силы. Различают также **среднюю высоту волн** ($\bar{h} = 0,625h_{1/3}$), которая имеет обеспеченность 45,6%. В ряде источников можно встретить **высоты волн другой обеспеченности**, чем рассмотрены выше, например: 1%, 2%, 5%, 10%, 20%.

Корреляционная функция волнения. Для описания вероятностных свойств изменения волновой ординаты во времени используется корреляционная функция $K_r(\tau)$. В простейшем случае ее представляют выражением [1]:

$$K_r(\tau) = \sigma_r^2 \exp(-c_r \tau) \cos \omega_P \tau. \quad (2.6)$$

Здесь τ – разность моментов времени; σ_r – среднее квадратичное значение волновой ординаты; ω_P – частота преобладающей гармоники волновой ординаты (гармоника, которая несет наибольшую энергию); c_r – коэффициент затухания. Частота преобладающей гармоники волновой ординаты – это пиковая частота, соответствующая максимуму спектра волнения. Как показал Н.Н.Рахманин, для развитого волнения на глубокой воде приближенно можно считать [8]:

$$c_r = 0,21\omega_P; \quad \omega_P = 1,43h_{3\%}^{-0,4}.$$

Спектр волнения. По рассмотренным выше характеристикам морского волнения затруднительно находить показатели мореходности судна. Гораздо проще это выполняется при замене волновой ординаты как функции времени случайной функцией вспомогательной комплексной переменной, имеющей размерность частоты.

При переходе к частотной координате нерегулярное волнение рассматривается как результат наложения неограниченного числа плоских гармонических волн со случайными амплитудами, частотами и фазами. Для судна, принимаемого за линейную динамическую систему, это позволяет представлять его реакцию на морское волнение в виде суммы реакций на гармонические волны. В результате исследование влияния нерегулярного волнения на судно сводится к простым методам, которые применяются при изучении действия на него регулярного волнения.

Для частотной характеристики плоского нерегулярного волнения как случайного стационарного процесса используется **функция спектральной плотности волновых ординат** $S_r(\omega)$ (энергетический спектр), представляющая распределение энергии волнения по различным частотам [4]. Эту функцию также называют одномерным **волновым спектром**. Переход от временной к комплексно-частотной области с использованием спектральных характеристик позволяет значительно упростить выкладки при определении параметров качки по данным о волнении. Этот способ нашел широкое применение при расчетах мореходности.

Функцию спектральной плотности волновых ординат в общем случае можно представить графиком, изображенным на рис. 2.4. Гармонику, соответствующую максимуму спектра, называют *преобладающей*.

Спектр волнения связан с корреляционной функцией этого процесса выражением [4]:

$$S_r(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega\tau} K_r(\tau) d\tau ; K_r(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} S_r(\omega) d\omega . (2.7)$$

Как всякое распределение, спектральная плотность может быть охарактеризована интегральными параметрами – моментами.

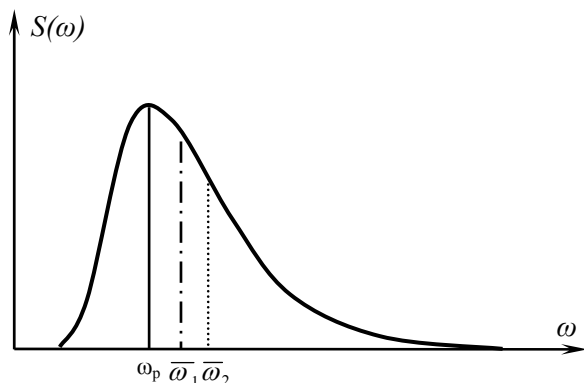


Рис. 2.4. Спектр двумерного нерегулярного волнения

Спектральным моментом случайной функции со спектром $S_r(\omega)$ называется величина:

$$m_{jr} = \int_0^{\infty} \omega^j S_r(\omega) d\omega. \quad (2.8)$$

Число j называется порядком момента. Оно может принимать любое целое положительное значение.

Через спектральные моменты выражаются характеристики, отражающие основные свойства волнения.

Дисперсия волновой ординаты. Момент нулевого порядка равен площади, ограниченной спектральной кривой. Он пропорционален полной энергии волнения и равен дисперсии σ_r^2 волнового процесса:

$$\sigma_r^2 = m_{0r} = \int_0^{\infty} S_r(\omega) d\omega. \quad (2.9)$$

Дисперсии скорости и ускорения волновой ординаты. Известно, когда случайный стационарный процесс имеет производную, то для получения ее частотного распределения

достаточно умножить спектральную плотность процесса на ω^2 . Отсюда следует, что дисперсии скорости $\sigma_{\dot{r}}^2$ и ускорения $\sigma_{\ddot{r}}^2$ волновой поверхности можно представить выражениями:

$$\sigma_{\dot{r}}^2 = m_{2r} = \int_0^{\infty} \omega^2 S_r(\omega) d\omega; \quad (2.10)$$

$$\sigma_{\ddot{r}}^2 = m_{4r} = \int_0^{\infty} \omega^4 S_r(\omega) d\omega. \quad (2.11)$$

Ширина энергетического спектра волнения вычисляется по формуле:

$$b_S = \sqrt{1 - \frac{m_{2r}^2}{m_{0r} m_{4r}}}. \quad (2.12)$$

Спектры волнения относятся к узким частотным распределениям ($b_S < 0,4$). Для них амплитуды волн соответствуют закону распределения Релея, а **высота значительных волн** определяется с помощью выражения:

$$h_{1/3} = 4\sqrt{m_{0r}} = 4\sigma_r. \quad (2.13)$$

В двумерном нерегулярном волнении выделяют следующие частоты (см. рис. 2.4): *пиковую* (ω_p), *взвешенную среднюю* ($\bar{\omega}_1$), *квадратично взвешенную среднюю* ($\bar{\omega}_2$). Пиковая частота ω_p соответствует максимуму волнового спектра.

Средние частоты волнения связаны с моментами его спектра отношениями [20]:

$$\bar{\omega}_1 = \frac{m_{1r}}{m_{0r}}; \quad \bar{\omega}_2 = \sqrt{\frac{m_{2r}}{m_{0r}}} = \frac{\sigma_{\dot{r}}}{\sigma_r}. \quad (2.14)$$

Квадратично взвешенная средняя частота $\bar{\omega}_2$ считается основной и обозначается $\bar{\omega}$.

Соответственно частотам выделяют и три периода нерегулярного волнения:

– *пиковый*: $\bar{\tau}_p = 2\pi / \omega_p$;

- взвешенный средний (average wave period): $\bar{\tau}_1 = 2\pi / \bar{\omega}_1$;
- квадратично взвешенный средний (average zero-crossing wave period): $\bar{\tau}_2 = 2\pi / \bar{\omega}_2$.

Квадратично взвешенный средний период $\bar{\tau}_2$ считают основным и называют *средним периодом* $\bar{\tau}$ ординаты нерегулярного волнения:

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_2 = 2\pi / \bar{\omega}_2 = 2\pi \frac{\sigma_r}{\sigma_f}. \quad (2.15)$$

Величину $\bar{\tau}_p$ называют также периодом преобладающего волнения. Разность между значениями $\bar{\tau}_p$, $\bar{\tau}$ невелика. Это позволяет при расчете резонансных явлений вместо периода преобладающего волнения использовать его средний период.

Идеализированные спектры морского волнения. Форма волнового спектра в данном месте и в данное время является неповторимой. Она зависит от текущих значений гидрометеорологических параметров, предыстории их изменения, географических и океанографических особенностей акватории. При практических расчетах, связанных с учетом волнения, для описания спектральной плотности волновых ординат используются предложенные рядом авторов функции. Они называются *идеализированными волновыми спектрами*, так как отражают только общие черты, присущие волнению всех морских глубоководных акваторий. По числу параметров, определяющих эти функции, спектры волнения бывают одно-, двух- и многопараметрическими.

Для расчета спектров первого вида достаточно знать только один параметр – высоту волн. Для определения двухпараметрических спектров требуется знать высоту и средний период волнения. Из известных описаний распределения энергии *ветрового волнения* можно назвать спектры Ю.М.Крылова, А.И.Вознесенского-Ю.А.Нецветова, Г.А.Фирсова, Пирсона-Московица, Неймана, Бретшнайдера, Хассельмана (спектр JONSWAP). Касаясь последнего распределения, следует отметить, что в 1968 и в 1969 году выполнялась обширная программа по измерению параметров

ветрового волнения в Северном море, известная как JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). На основе анализа ее результатов было получено выражение волнового спектра, названного по имени этой программы – JONSWAP. На 15-ой Международной конференции опытовых бассейнов (ITTC – International Towing Tank Conference) в 1978 году этот спектр был принят в качестве стандартного для Северного моря.

Большинство идеализированных спектров волнения относится к частотным распределениям, описываемых моделью:

$$S_r(\omega) = A\omega^{-k} \exp(-B\omega^{-n});$$

где A, B, k, n – параметры, зависящие от статистических характеристик волнения и условий волнообразования.

Спектр Бретшнейдера, например, характеризуется следующими значениями A, B, k, n [12]:

$$A = 0,78p^{-4}; \quad B = 2,36p^{-4}h_{3\%}^2; \quad k = 5; \quad n = 4;$$

где p – коэффициент степени развитости волнения ($0,6 < p < 1$ – усиливающееся волнение, $p = 1$ – установившееся волнение, $1 < p < 1,7$ – затухающее волнение).

За рубежом спектр Бретшнейдера был принят в качестве **стандартного** для расчета параметров мореходности: в 1967 году – Вторым Международным конгрессом по конструкции судов (ISSC – International Ship Structures Congress), в 1969 году – 12-ой Международной конференцией ITTC. По этой причине выражение Бретшнейдера также называют ISSC или ITTC волновым спектром. Если в нем соотношение между средним периодом $\bar{\tau}_1$ и высотой значительных волн принять равным $\bar{\tau}_1 = 3,861\sqrt{h_{1/3}}$, то получится однопараметрический волновой спектр Пирсона-Московица.

В отечественной практике при расчетах параметров мореходности нередко пользуются двухпараметрическим идеализированным спектром, заданным отраслевым стандартом СССР 1981 г [10]. Применяется также **спектр А.И.Вознесенского-Ю.А.Нецветаева** [12]:

$$S_r(\omega) = 9,43 \frac{\sigma_r^2}{\bar{\omega}} \cdot \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^6 \exp \left[-1,5 \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right], \quad (2.16)$$

где $\omega_p = 0,777\bar{\omega}$.

Упрощенный спектр. В простейшем случае нерегулярное волнение описывают корреляционной функцией (2.6). По ней с помощью соотношения (2.7) получается упрощенный спектр волновых ординат [13]:

$$S_r(\omega) = \frac{2c_r\sigma_r^2}{\pi} \cdot \frac{\omega^2 + \omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4c_r^2\omega^2}; \quad (2.17)$$

где $\omega_0^2 = c_r^2 + \omega_p^2$.

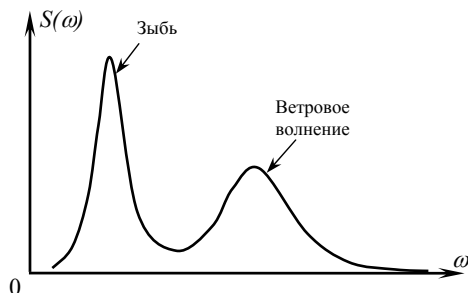


Рис. 2.5. Один из спектров смешанного волнения

Спектр смешанного волнения. Реальное волнение чаще всего является смешанным и состоит из ветровых волн и зыби. Энергетический спектр смешанного волнения существенно отличается от рассмотренных выше идеализированных частотных распределений ветровых волн. Он, как правило, имеет два максимума (рис. 2.5), которые приблизительно соответствуют пикам спектров каждой из волновых систем, образующих смешанное волнение. Спектр зыби обычно расположен в области более низких частот, чем спектр ветровых волн. Для возможности учета особенностей двух систем волнения при решении практических задач Гидрометцентры в настоящее время передают прогнозы, как основных параметров

смешанного волнения, так и его составляющих (ветрового волнения и зыби).

В современном программном обеспечении для расчета реакции судна на волнение используется обычно два волновых спектра – спектр ветрового волнения и спектр зыби. *Реакция судна на смешанное волнение получается как сумма реакций на две составляющие его системы волн.*

2.4. Нерегулярное трехмерное волнение

Реальное морское волнение нерегулярно и трехмерно. Ему вполне соответствует картина, показанная на рис. 2.6 изолиниями высот уровня воды. Такое волнение характеризуют пространственно-временными спектрами. Они основываются на представлении взволнованной поверхности моря трехмерной моделью в виде неизотропного однородного случайного поля. В такой модели нерегулярное волнение рассматривается как сумма плоских синусоидальных волн с различными частотами, амплитудами и *направлениями распространения*. Среднее направление распространения волн (\bar{q}) называется *генеральным*.

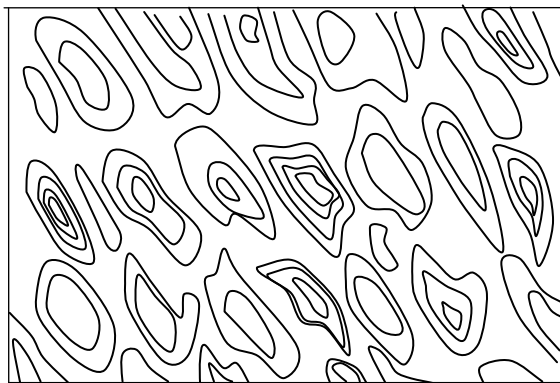


Рис. 2.6. Представление трехмерного волнового поля

Полная энергия трехмерного волнения имеет угловое распределение, симметричное относительно генерального

направления бега волн. Угол отклонения отдельной плоской гармоники волнения от генерального направления распространения волн обозначается ниже как β . Функция $S_r(\omega, \beta)$, характеризующая распределение удельной энергии волн по частоте и направлению распространения, называется двумерной спектральной плотностью волнения, или **двумерным волновым спектром**, или **2D-спектром волн**. Двумерный спектр ветрового волнения $S_r(\omega, \beta)$ обычно представляют в виде произведения одномерного спектра $S_r(\omega)$ и функции $f(\beta)$ распределения энергии волн по углу β [8]:

$$S_r(\omega, \beta) = S_r(\omega) \cdot f(\beta). \quad (2.18)$$

В практике расчетов качки в качестве функции $f(\beta)$ принимается выражение:

$$f(\beta) = \frac{\Gamma(0,5k_\varepsilon + 1)}{\sqrt{\pi} \cdot \Gamma(0,5k_\varepsilon + 0,5)} \cos^{k_\varepsilon} \beta;$$

где k_ε – параметр углового распределения энергии; $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Параметр k_ε зависит от стадии развития и силы морского волнения. Его значение определяется отношением средней длины гребней $l_{ГР}$ к средней длине λ волн. Эту зависимость представляют приближенной формулой:

$$k_\varepsilon = (l_{ГР} / \lambda)^2 - 1.$$

При сильном ветровом волнении протяженность гребней волн в среднем в 2÷2,5 раза больше их длины. Отсюда можно установить, что для условий, в которых оценка мореходности наиболее актуальна, значение k_ε может приниматься равным четырем. При $k_\varepsilon = 4$ функция $f(\beta)$ имеет вид [12]:

$$f(\beta) = \frac{8}{3\pi} \cos^4 \beta.$$

Соответственно спектр $S_r(\omega, \beta)$ трехмерного ветрового волнения будет следующим:

$$S_r(\omega, \beta) = \frac{8}{3\pi} S_r(\omega) \cos^4 \beta.$$

В целом для ветровых волн разной интенсивности значение k_ε может лежать в диапазоне от двух до пяти.

В отличие от чисто ветрового волнения зыбь имеет узкое угловое распределение ($k_\varepsilon > 5$), следствием чего являются более длинные гребни волн. При мертвой зыби значение k_ε достигает десяти. На практике это дает основание считать, что вся энергия зыби сконцентрирована на одном направлении, и спектр ее является одномерным - $S_r(\omega)$.

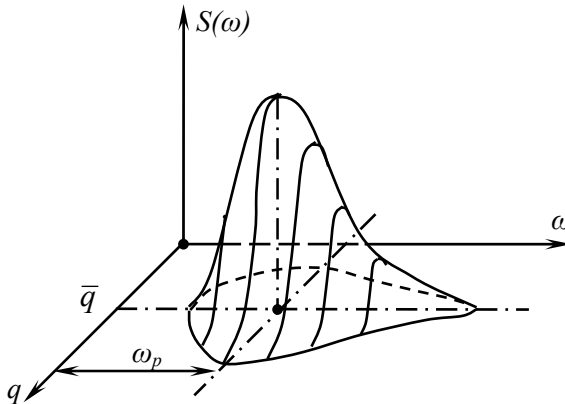


Рис. 2.7. 2D-спектр волнения

Пример одного из энергетических спектров $S_r(\omega, \beta)$ волнения представлен в прямоугольной системе координат на рис. 2.7. Проинтегрировав функцию $S_r(\omega, \beta)$ по всем возможным углам распространения β , от 2D-спектра можно перейти к одномерному частотному распределению энергии волнения $S_r(\omega)$.

Двумерное распределение энергии смешанного волнения представляется в виде суммы спектров ветрового волнения и зыби. При существенном частотном отличии преобладающих

гармоник ветрового волнения и зыби спектр $S_r(\omega, \beta)$ смешанного волнения имеет два максимума. Пример 2D-спектра смешанного волнения показан на рис. 2.8 в полярной системе координат.

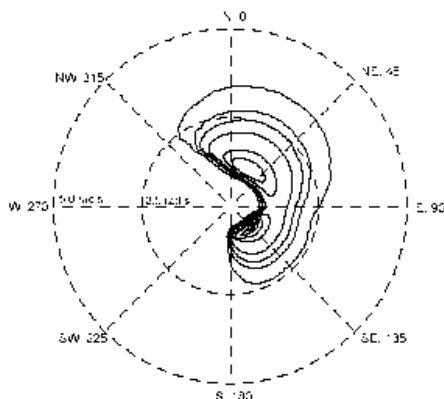


Рис. 2.8. 2D-спектр смешанного волнения

В современных программных средствах контроля мореходности волнение характеризуется двумерным спектром. Чтобы упростить изложение материала судоводителям, для которых требуется иметь лишь представление о принципах получения результатов, ниже ветровое волнение и зыбь считаются изотропным однородным случайным полем, характеризуемым одномерным частотным спектром.

2.5. Совершенствование моделей волнения

Процесс волнения настолько сложен, что, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор не создано единой теории для объяснения всех сторон этого природного явления.

Направления работ. Спектры ветровых волн в различных районах Мирового океана отличаются. Они зависят от сезона года, стадий развития ветра и волнения, глубины моря. Кроме того, спектр волнения может искажаться течением. Так, например, в районе Гольфстрима в Северной Атлантике при

сильном ветре, направленном против течения, высоты ветровых волн становятся выше, а их средний период уменьшается. Такое явление наблюдается и в районе течения мыса Игольного, когда оно встречается с волнением от SW. Следует также отметить, что при всей хаотичности волнового движения среди бегущих ветровых волн образуются так называемые волновые пакеты (группы волн) которые вначале нарастают до максимальной высоты, а затем убывают, иногда до полного затишья волн. Независимо от интенсивности волнения количество волн в группе колеблется от 2 до 15, а их среднее число составляет 5÷6. При сильном волнении высота наибольшей волны в группе более чем в два раза превышает среднюю высоту волн. Сказанное выше говорит о том, что идеализированные характеристики не учитывают в полной мере своеобразия реального волнения в рассматриваемых акваториях. Учитывая это, для практических целей считается целесообразным иметь сезонные модели волновых спектров для основных бассейнов Мирового океана.

Спектры морского волнения получаются на основе данных волномерных буев, следящих за колебаниями поверхности воды, а также дистанционными методами, в частности, использованием радиолокаторов, установленных на судах, самолетах и искусственных спутниках Земли. Для получения данных о волнении в прибрежных водах европейские страны, США и Канада, Япония используют сети волномерных буев. Ежегодная стоимость эксплуатации таких сетей составляет миллионы долларов. Большую помощь в определении характеристик морского волнения оказывают спутники дистанционного зондирования поверхности Земли. Среди выполненных спутниковых исследований элементов морского волнения можно назвать программы:

- *GEOSAT (1986-89) Военно-морских сил США;*
- *Торех/Poseidon (1992-2000) американско-французской группы исследований;*
- *Европейского космического агентства (1991-2001).*

В рамках последней программы Европейским космическим агентством были запущены два спутника дистанционного

зондирования: ERS-1, ERS-2 (European Remote Sensing Satellite). На спутниках были установлены радиолокационный высотомер (radar altimeter), радиолокатор с синтезированной апертурой (SAR – Synthetic Aperture Radar) и измеритель рассеянного излучения, называемый скатерометром (wind scatterometer).

Высотомер производит измерения расстояния от спутника до земной поверхности в вертикальном направлении. Он позволяет получать значительные высоты морских волн с точностью, близкой к точности волномерных буюв.

Радиолокатор с синтезированной апертурой обеспечивает более полную информацию о волнении, чем высотомер. В микроволновом режиме SAR выдает отражающие морское волнение снимки областей $(5 \times 5) \div (9 \times 9)$ км². По ним определяются характеристики волнения. Для нахождения волновых спектров применяется специально разработанный вариационный инверсионный метод, который в процессе исследований показал свою достаточную эффективность. Достоинством радаров с синтезируемой апертурой (по сравнению с фотографическим и телевизионным оборудованием) является возможность съемок поверхности Земли круглосуточно, не только в дневное, но и в ночное время, а также при наличии облаков, тумана, слоев пыли. Таким образом, информацию о морских волнах в ночное время и в условиях шторма, когда небо закрыто тучами, можно получить со спутников пока только с помощью радиолокационных средств.

Скатерометр обеспечил возможность получения точных данных об элементах ветра во всех районах Земного шара, что позволило значительно улучшить прогнозы погоды, в том числе и прогнозы морского волнения. Скатерометр является специализированным радаром, работающим на микроволновых частотах, которые проходят через облака. Радар посылает в сторону Земли сигнал и измеряет отраженный, или "обратно рассеянный" сигнал. Обратное рассеяние зависит от ряби волн на поверхности океана, что позволяет судить о скорости и направлении ветра в данном районе. С помощью скатерометра получают также информацию о ледовой обстановке.

Скатерометры, предоставляющие информацию об элементах ветровых полей, были также установлены на японских метеорологических спутниках Midori (Adeos), Midori 2 (Adeos 2), американском спутнике QuikScat (сокращение от Quick Scatterometer), запущенных в 1996, 2002 и 1999 году соответственно. В 2002 году для наблюдений Земли был выведен на орбиту спутник Европейского космического агентства ENVISAT. На его борту находятся 10 приборов, обеспечивающих непрерывное наблюдение и контроль земной суши, атмосферы, океанов и ледовых полей. На последний квартал 2005 года намечен запуск аппарата MetOp, который станет первым европейским оперативным метеорологическим спутником на полярной орбите, обеспечивающим ежедневное глобальное покрытие поверхности Земли. Он представляет собой вклад Европы в новую совместную с Соединенными Штатами Америки систему, которая будет предоставлять данные для мониторинга климатических условий и уточнения прогнозов погоды, в том числе и данных о ветре и волнении. На борту спутника MetOp будет размещено новое поколение приборов, созданных в Европе, с улучшенными характеристиками дистанционного зондирования Земли. Обсуждается также вопрос об организации со спутников постоянного мониторинга морской поверхности Земли в микроволновом режиме с целью обеспечения пользователей точной и полной информацией (включая спектр) о текущем состоянии волнения в любой точке Мирового океана.

Материалы проведенных спутниковых исследований поверхности океанов и морей используются для создания климатических пособий и для решения других задач. Для целей судовождения на основе спутниковых измерений в настоящее время составляются атласы волнения крупных морских регионов и основных торговых морских путей. Часть этой работы уже выполнена. Кроме сведений о высотах и направлениях распространения морских волн, создаваемые атласы содержат информацию о наиболее вероятных волновых спектрах и их параметрах.

Волны-солитоны. Обычно в сильный шторм высоты океанских волн достигают 7÷8 метров. При исключительном

волнении эти высоты доходят до 15 м. Крупнее ветровые морские волны бывают крайне редко, когда развивается необычно сильный ветер, дующий достаточно долго в одном направлении. Имеемые данные по высотам волн, которые появляются раз за 30 и более лет, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. – Наибольшие высоты волн

Зона океана	$h_{3\%,M}$	$h_{max,M}$
Зона 40-60° N Северной Атлантики	20	28
Зона 40-60° S Южной Атлантики и Индийский океан	23	32
Зоны северная 25-50° N и южная 42-55° S Тихого океана	21	30

Рассказы моряков об одиночных гигантских волнах, высотой 30 и более метров, которые наблюдались при обычном сильном волнении, ученые долгое время считали мифом. Морские волны, значительно превышающие свое окружение, называют *волнами-солитонами* или *волнами-монстрами*. Если считать, что возникают они из-за случайной интерференции нескольких малых волн, то, исходя из существующей теории волнения, такое явление должно происходить в Мировом океане один раз за десять тысяч лет. Однако в последние годы рассказы моряков о волнах-монстрах получили объективное подтверждение. Данные программы *MaxWave* Евросоюза, полученные с помощью спутников ERS-1, ERS-2, и результаты наблюдений с морских нефтегазовых платформ, позволили во многих районах Мирового океана на фоне обычных волн обнаружить гиганты, высоты которых не вписываются ни в одну из существующих теорий морского волнения.

Например, в январе 1995 года на одной из платформ в Северном море с помощью лазерных средств была зафиксирована волна высотой 26 м., в то время как самые большие волны в это время достигали только 12 м. За 12 лет наблюдений с платформ в Северном море при максимальных высотах волн 7÷12 м были отмечены 466 случаев появления отдельных волн, значительно превышающих 15 м.

За три недели наблюдения по проекту *MaxWave* с помощью аппаратуры спутников ERS-1, ERS-2 в Мировом океане были

обнаружены больше десяти гигантских волн, превышающих по высоте 25 метров. Одна из них возвышалась на 30 м. на фоне соседних десятиметровых волн. В процессе выполнения проекта *MaxWave* удалось научно доказать, что появляются гигантские волны при сильном волнении намного чаще, чем это следует из существующих моделей волнения. Обнаружены такие исключительные волны во многих районах Мирового океана. Наиболее часто волны-солитоны наблюдались в районе действия течения мыса Игольного (около побережья Южной Африки). Отмечали их и в Северной Атлантике, где течение Гольфстрим встречается с волнением, приходящим с моря Лабрадор. Обнаружены эти волны и в акваториях, где нет сильных течений, в районах погодных фронтов и циклонов. Выявлены они и в областях длительных штормов, где ветер непрерывно дул в одном направлении более 12 часов.

Считается, что механизмом образования волн-гигантов может быть дифракционная фокусировка малых волн, или концентрация их течением, а также нелинейный эффект, аналогичный изученному в теории колебаний Зубаски и Крускалом, приводящий к появлению локализованной, устойчиво распространяющейся уединенной волны (солитона). Ученые Технического университета Берлина, работающие в рамках проекта *MaxWave*, утверждают, что волны-монстры формируются процессом, в результате которого медленно распространяющиеся волны подхватываются последовательностью более быстрых волн, имеющих вдвое большую скорость, и при слиянии этих двух систем образуются условия для появления гигантской волны. Ряд исследователей выдвинули свои гипотезы для объяснения возникновения волн-солитонов. Однако пока ни одна из них не может считаться полностью приемлемой.

В настоящее время предполагают, что именно волны-монстры в условиях обычных штормов были причиной большинства аварий и гибели крупнотоннажных судов.

В составляемых по информации спутниковых наблюдений климатических Атласах морского волнения предполагается привести статистику появления гигантских волн в различных акваториях Мирового океана. Она позволит учитывать

возможность этого явления при планировании рейсов, что будет способствовать повышению безопасности плавания.

2.6. Наблюдаемые на судне параметры волнения

Вследствие хода судна воспринимаемое им волновое возмущение по скорости распространения, периоду и частоте отличается от волнения на поверхности моря. Наблюдаемые на движущемся судне параметры волнения называют *кажущимися*, или параметрами встречи судна с волнами, либо параметрами воздействия волн на судно. В обозначениях этих величин ниже будет использоваться индекс e , который указывает что это – *параметры встречи судна с волнами* (encounter parameters).

Гребни волн (рис. 2.9) перемещаются относительно движущегося судна со скоростью v_e , определяемой по формуле:

$$v_e = v + V \cos q; \quad (2.19)$$

где V – скорость судна; q – курсовой угол волнения.

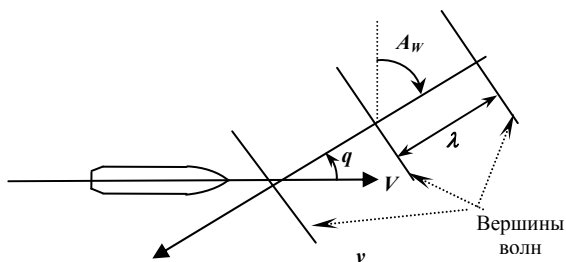


Рис. 2.9. Взаимное движение судна и волн

В результате кажущийся период $\bar{\tau}_e$ волнения оказывается равным:

$$\bar{\tau}_e = \lambda / v_e = \frac{\lambda}{v + V \cos q}. \quad (2.20)$$

Отсюда следует, что при острых курсовых углах ход судна уменьшает кажущийся период волн по сравнению с истинным периодом, а при тупых – увеличивает. Зная $\bar{\tau}_e$, можно найти частоту встречи судна с волнами:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{\bar{\tau}_e} = \omega + \Omega V \cos q. \quad (2.21)$$

Параметры качки определяются параметрами волнового воздействия на судно. Поэтому для их расчета требуется использовать спектр $S_r(\omega_e)$, представляющий распределение энергии по частоте встречи с волнами. Этот спектр можно определить, учитывая, что при воздействии волн на судно с частотой ω_e величина энергии в элементарной полосе $d\omega_e$ равна энергии истинного волнения в малом интервале $d\omega$:

$$S_r(\omega_e)d\omega_e = S_r(\omega)d\omega. \quad (2.22)$$

Отсюда следует, что:

$$S_r(\omega_e) = \frac{S_r(\omega)}{|d\omega_e / d\omega|}. \quad (2.23)$$

Для глубоководного волнения, принимая во внимание (2.21) и (2.4), получаем:

$$\frac{d\omega_e}{d\omega} = 1 + \frac{2V\omega}{g} \cos q.$$

Отсюда следует, что ординаты спектра $S_r(\omega_e)$ при больших глубинах могут быть рассчитаны по формуле:

$$S_r(\omega_e) = \frac{S_r(\omega)}{\left| 1 + \frac{2V\omega}{g} \cos q \right|}.$$

С учетом глубины отношение $d\omega_e / d\omega$ можно представить в виде:

$$\frac{d\omega_e}{d\omega} = 1 + \frac{V \cos q}{d\omega / d\Omega};$$

$$\text{где } \frac{d\omega}{d\Omega} = \frac{g \cdot \tanh(\Omega H) + \frac{\Omega g}{H \cdot \cosh^2(\Omega H)}}{2\sqrt{\Omega g \tanh(\Omega H)}}.$$

Применение спектров $S_r(\omega_e)$ волнового воздействия на судно связано с определенными вычислительными проблемами, так как на попутном волнении в знаменателе (2.23) в скобках может быть ноль и отрицательное число. Учитывая (2.22), моменты m'_{jr} кажущегося спектра могут быть рассчитаны без использования его выражения:

$$m'_{jr} = \int_0^{\infty} \omega_e^j S_r(\omega_e) d\omega_e = \int_0^{\infty} \omega_e^j S_r(\omega) d\omega. \quad (2.24)$$

Это обстоятельство используется при расчетах качки движущегося судна.

3. Основные сведения о бортовых средствах контроля мореходности

3.1. Назначение и состав АСКМ

Бортовая система контроля мореходности (АСКМ) представляет собой информационную систему, которая получает, хранит, обрабатывает информацию, необходимую для оценки, прогноза и оптимизации мореходности судна, и отображает результаты обработки в виде, облегчающем принятие решений по обеспечению безопасности судна и груза. Следует обратить внимание, что в названии системы термин «*контроль*» применен в широком смысле и обозначает совокупность наблюдения, оценки, прогноза и выработки активных мер для улучшения процесса.

Основное назначение АСКМ – повышение безопасности судна и груза, защиты окружающей среды, эффективности перевозок грузов морем. АСКМ оказывает судоводителям информационную поддержку при управлении судном в штормовых условиях. Это достигается предоставлением вахтенному помощнику полной и точной информации о мореходности судна, прогнозированием реакции судна на ветроволновые воздействия, предупреждением о приближении параметров мореходности к допустимым границам, тревогой об опасностях, выработкой рекомендаций для решения возникающих проблем.

Задачи, которые решает бортовая система контроля мореходности, могут быть разделены на три категории:

- *оперативная оценка мореходности судна;*
- *прогноз состояния судна на оставшуюся часть рейса с оценкой его мореходности;*
- *выработка рекомендаций по оптимизации мореходности.*

Состав АСКМ. Системы контроля мореходности выпускаются в разных конфигурациях, обеспечивающих приспособление образцов этих средств к различным типам

судов и к желаниям судовладельцев. Эти системы могут использоваться на морских судах всех типов и размеров. Различают АСКМ для крупнотоннажных балкеров и танкеров, контейнеровозов, пассажирских лайнеров, военных кораблей. АСКМ может являться составной частью интегрированной системы ходового мостика, навигационно-информационной системы, централизованной судовой системы мониторинга и сигнализации, систем стабилизации качки. Обычно конфигурация выбираемой для судна АСКМ, тип дисплея, формы и средства для оперирования данными определяются судовладельцами совместно с поставщиками АСКМ с учетом руководств и рекомендаций к этим системам, разработанным ИМО [24] и рядом классификационных обществ, например, ABS – Американским бюро судоходства [15], LR – Регистром Ллойда [21], DNV – Норвежским бюро Веритас, и др.

Основными частями всех АСКМ являются:

- *аппаратные средства;*
- *информационное обеспечение (данные);*
- *программное обеспечение;*
- *средства общения АСКМ с оператором;*



Рис. 3.1. Основной модуль АСКМ

Аппаратные средства включает основной модуль, периферийную аппаратуру и каналы связи. **Основной модуль** – это помещенный в специальной консоли высокопроизводительный персональный компьютер, имеющий каналы для соединения с датчиками информации о ветре, волнении, о параметрах движения судового корпуса и нагрузках

на нем. Он устанавливается в рулевой рубке, включает в себя системный блок, монитор, управляющую панель. На дисплее отображаются данные мониторинга характеристик мореходности, результаты их анализа и прогнозы значений на будущие моменты времени. Общий вид основного модуля одной из АСКМ приведен на рис. 3.1.

Периферийная аппаратура. Система контроля мореходности использует данные, поступающие из различных источников, и передает свои сведения другим системам и устройствам. На рис. 3.2 приведена одна из возможных конфигураций АСКМ с периферийными приборами.

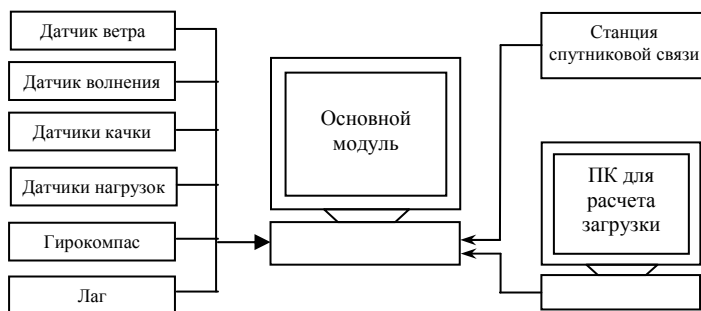
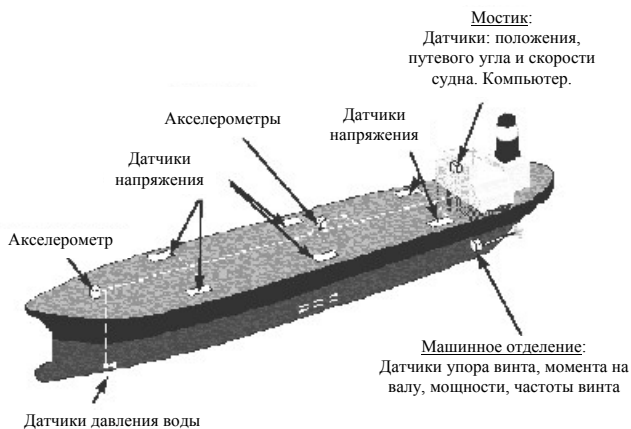


Рис. 3.2. Пример аппаратного обеспечения АСКМ

К основному модулю АСКМ могут подключаться датчики параметров качки, устройства для измерений напряжений элементов корпуса, компас, лаг, указатель скорости поворота, датчики элементов ветра, волнения, GPS-приемник, датчики упора, момента, частоты вращения гребного винта и другие приборы. АСКМ может быть интегрирована со станцией спутниковой связи, с компьютером для расчета плана загрузки судна и управления ей, со станцией планирования пути судна, с системами контроля балластного состояния, крена и дифферента судна, с радаром для измерения параметров волнения, с регистратором данных рейса, с системами стабилизации качки. С помощью станции спутниковой связи принимается информация о текущей и ожидаемой погоде, а также передаются данные о мореходности судна в офис

компании или другим береговым организациям. Расположение на судне элементов одной из АСКМ показано на рис. 3.3.



Основные модули систем контроля мореходности.

Условно или конструктивно АСКМ может быть разделена на следующие подсистемы:

- *текущей оценки мореходности;*
- *прогноза мореходности;*
- *оптимизации мореходности.*

Эти модули могут выступать как отдельные самостоятельные системы или быть объединенными в АСКМ. Для текущей оценки мореходности может использоваться и два отдельных модуля:

- мониторинга и анализа движения корпуса судна;
- мониторинга и анализа нагрузок на корпус и главный двигатель;

Информационное обеспечение АСКМ включает массивы данных (базы, и иные структурированные наборы), средства упорядочивания, кодирования, сжатия данных, системы конвертации форматов и другие элементы. Главную часть информационного обеспечения составляют хранящиеся в памяти АСКМ данные, требуемые для выполнения ее задач. Это сведения о судне, необходимые для расчета параметров качки и других величин, климатическая база данных, спектры ветрового

волнения и зыби для различных бассейнов Мирового океана, прогнозы ветра и волнения, получаемые от Гидрометцентров по спутниковым каналам связи и другая информация.

Программное обеспечение бортовой системы контроля мореходности судна – это совокупность всех ее программ и программных пакетов. Оно состоит из:

- *программ для съема информации с датчиков системы и выдачи результатов другим техническим устройствам;*
- *прикладных программных средств;*
- *вспомогательных программ.*

Прикладные средства включают программы и программные пакеты, предназначенные для выполнения функций, ради которых создана АСКМ. К категории прикладных относятся программы:

- обработки и анализа результатов наблюдений параметров, характеризующих мореходность судна;
- оценки вероятности мореходных опасностей;
- прогнозирования реакции судна на ожидаемые погодные условия;
- выработки рекомендаций с целью поддержки решений капитана судна и ряда других.

Прикладные программы в зависимости от активации кнопок, ключей и иных элементов пользовательского интерфейса позволяют решать различные задачи, касающиеся контроля и обеспечения безопасности судна и его механизмов в сложных погодных условиях.

Средства общения с оператором включают пользовательский интерфейс, методы и формы отображения информации, звуковую сигнализацию, визуальные и голосовые предупреждения.

3.2. Функциональные возможности систем

Состав функций АСКМ зависит от вида системы и от ее конфигурации. Поэтому ниже характеризуются функции, которые можно встретить при работе с различными системами контроля мореходности. В конкретной АСКМ ряда из этих

функций может не быть. Она также может содержать функции, не представленные ниже.

Основные виды функций. Операции, выполняемые бортовыми системами контроля мореходности, могут быть разделены на следующие категории:

- *текущей оценки мореходности;*
- *прогнозирования поведения судна;*
- *оптимизации мореходности.*

Текущая оценка мореходности проводится АСКМ непрерывно. Этот процесс включает мониторинг и анализ параметров качки и напряжений корпуса судна. При текущей оценке мореходности после смены режима движения система в пределах короткого времени должна определять опасность повреждения корпуса, если она появляется. Согласно рекомендациям ABS, после окончания маневра это время не должно превышать десять минут. Система по умолчанию использует критерии мореходности, пределы их безопасных значений и уровни предупреждений о приближении к этим пределам, которые подходят для данной серии судов. Судоводителю предоставляется возможность изменять состав этих критериев и их уровни, чтобы учесть особенности текущего состояния судна и его загрузки.

Мониторинг и анализ параметров качки. Для измерения параметров поступательного и вращательного движения корпуса в условиях волнения применяются акселерометры, датчики угловых скоростей, инклинометры и другие приборы. Измерения проводятся автоматически через малый интервал времени (непрерывно), накапливаются и анализируются. При анализе качки:

- *рассчитываются средние, средне квадратичные и пиковые значения амплитуд угловых и линейных ускорений, скоростей и перемещений носа, центра массы и кормы судна;*
- *вычисляются периоды перемещений;*
- *оценивается вероятность слеминга, заливания, оголения винта, опасных углов бортовой качки;*

- для пассажирских судов определяется комфортность условий (вероятность морской болезни);
- выявляются тенденции в изменении характера качки;
- вырабатываются предупреждения о возможности опасных явлений и сигналы тревог об их наличии;
- определяются параметры волнения.

Данные о слеминге используются для выработки тревожных сообщений о его появлении, а также для предупреждения судового персонала, что эксплуатационные условия судна близки к таким, в результате которых может возникнуть слеминг. Он может привести к повреждению обшивки и/или набора корпуса. Эксплуатационные ограничения, определяющие опасность возникновения слеминга и уровни для тревог о его наличии, формируются на основе расчетов, модельных тестов, натурных испытаний по одобренным методикам. Они подлежат пересмотру со временем эксплуатации судна. Предупреждения о слеминге обычно базируются на данных акселерометра, измеряющего вертикальное ускорение бака судна, и/или датчика давления воды в носовой части днища. На опасность слеминга указывает характер изменения ускорения и рассчитываемая по информации акселерометра амплитуда вертикальных колебаний передней оконечности судна. Слеминг выявляется и по скачкам показаний датчика давления, возникающих при изменении погружения носовой части судна.

Данные о заливаемости применяются для предупреждения штурманского состава о том, что условия эксплуатации судна близки к таким, при которых масса принимаемой на палубу воды создает нагрузки, чреватые ущербом судну или грузу. Критерии возможности опасного заливания и уровни для тревог о его наличии находятся по утвержденным методикам на основе модельных тестов, натурных испытаний и подлежат пересмотру со временем. Сведения о количестве принимаемой на палубу воды могут поступать от специальных приборов или оцениваться по информации датчиков вертикального движения носовой оконечности судна.

Данные о параметрах качки служат для предупреждения судоводителей о том, что параметры движения корпуса

приближаются к уровням, при которых возникают специфические проблемы. Они устанавливаются конкретно для каждого судна. Например, для контейнеровозов это могут быть значения ускорений, при которых возникает опасность повреждений и потери палубных контейнеров; для судов Ро-Ро и паромов, перевозящих колесную технику, а также и контейнеровозов – *углы сил*, учитывающие влияние наклонений судна и ускорений на системы креплений грузов; для балкеров – *вертикальные изгибающие моменты*, которые могут стать причиной конструктивных повреждений; для других судов – *чрезмерная амплитуда бортовой качки*, снижение остойчивости и т.д.

Результаты измерений элементов качки используются в АСКМ и для определения параметров волнового поля. Наличие такой возможности позволяет предсказывать поведение судна при смене режима движения.

В ряде систем на основе измерений параметров качки проводится непрерывный контроль значений *показателя резонанса* и *отношения наблюдаемой амплитуды бортовой качки к ее среднему значению* с целью предупреждений судоводителя о возможности и возникновении параметрического резонанса.

Данные о вертикальных и горизонтальных ускорениях и других параметрах качки используются также для выработки сообщений, что условия работы экипажа становятся тяжелыми из-за интенсивной качки. Наибольшее влияние на самочувствие людей оказывают вертикальные ускорения. В средней части транспортных судов они могут превышать $0,3g$, а в оконечностях – $0,5g$. На промысловых судах вертикальные ускорения достигают $1g$. Несмотря на то, что члены экипажей адаптированы к качке, работать в условиях линейных ускорений, превышающих $0,4g$, крайне тяжело. Влияние волнения на самочувствие людей зависит как от амплитуды вертикальных ускорений, так и частоты их изменения и времени действия. Стандарты для определения благоприятных для людей условий в отношении морской болезни представлены в

документе ISO 2631/3. При оценке допустимых границ вертикальных и горизонтальных ускорений, исходя из влияния качки на физиологическое и психологическое состояния членов экипажа, нередко используют следующие упрощенные нормативы:

- вертикальные ускорения 0,4g;
- поперечные ускорения 0,3g.

Считается, что если значения параметров качки меньше этих норм, то работоспособность судового персонала не ухудшается и условия обитаемости не нарушены.

На пассажирских судах по данным вертикальных ускорений проводится анализ комфортности плавания, предназначенный для выявления условий, при которых пассажиры испытывают морскую болезнь. Это позволяет принять определенные меры для ослабления интенсивности качки с целью улучшения условий обитаемости. Самочувствие людей при качке ухудшается с увеличением времени воздействий на них вертикальных ускорений. Например, пассажиры, неадаптированные к качке, испытывают проявление морской болезни уже через 30 минут при вертикальных ускорениях 0,1g. При более высоких значениях ускорений морская болезнь наступает быстрее. В центральной части судна вертикальные ускорения ниже, и воздействие качки на самочувствие людей здесь меньше. АСКМ на основе анализа в различных местах судна вертикальных ускорений с учетом времени и частоты их воздействия вырабатывает сообщения о дискомфорте пассажиров.

Мониторинг и анализ нагрузок на корпусе. Для измерений нагрузок на корпусе в АСКМ используется определенное число тензометров и измерителей давления, установленных на элементах корпуса. Эти датчики предназначены для контроля общей и местной прочности.

Контроль общей прочности. Мониторинг напряжений, возникающих при общих деформациях корпуса, применяется для предупреждений капитана и его помощников о том, что напряжения конструкций приближаются к уровню, когда необходимо принять меры с целью их уменьшения. Этот

мониторинг на тихой воде и в условиях волнения должен показывать изгибающие моменты на корпусе, как они изменяются со временем и по длине судна. Мониторинг напряжений в течение грузовых и балластных операций служит для возможности предотвращения перегрузок и повреждений конструкций корпуса, а также для гарантии, что после выполнения названных работ прочность корпуса остается достаточной для плавания в открытом море. При проведении грузовых и балластных операций результаты такого мониторинга отображаются непрерывно. Уровни для предупреждения о высоких и опасных напряжениях на корпусе определяются с использованием одобренных нормативов и условий их применения.

Напряжения палубы при общем продольном изгибе измеряются тензодатчиками, расположенными параллельно ДП по бортам судна. Тензометры обычно устанавливаются там, где результаты измерений позволяют достаточно точно и быстро оценить общий изгибающий момент.

Напряжения корпуса при общих деформациях оцениваются и по информации измерителей перемещения элементов корпуса. Так, если по длине судна равномерно установить несколько *инерциальных измерительных модулей*, то по отличию их показаний крена определяется величина деформации кручения и общий крутящий момент, а по разнице показаний дифферента – величина изгиба корпуса и вертикальный изгибающий момент. Такой способ, например, реализован в *Системе контроля движения судна* фирмы Sea-Image Communication Ltd. (Канада).

Мониторинг местной прочности проводится АСКМ с целью предупреждения персонала на мостике, что отдельные компоненты структуры корпуса испытывают локальные нагрузки, приближающиеся к уровню, при котором необходимы действия для их уменьшения. Уровни опасных нагрузок для тревог и границы для предупреждений о приближении нагрузок к этим уровням находятся по одобренным методикам с учетом условий их применения.

Анализ результатов измерений. Результаты измерений нагрузок на корпусе накапливаются и анализируются системой. При анализе:

- вычисляются средние, средне квадратичные и экстремальные значения напряжений;
- находятся средние периоды нагрузок;
- оценивается степень опасности воздействий;
- подсчитывается число нагрузок с учетом их интенсивности для определения износа (усталости) конструкций;
- выявляются тенденции изменения нагрузок;
- формируются предупреждения о приближении напряжений к операционным ограничениям и превышении их.

Контроль усталости конструкций состоит в учете количества ведущих к ней исходных воздействий в соответствии с одобренными нормативами и условиями их применения. Этот контроль в соединении с текущей оценкой уровня остаточных деформаций используется для определения срока эксплуатации конструкций.

Прогнозирование мореходности. АСКМ обычно имеет функции, позволяющие по данным ветрового волнения и зыби прогнозировать параметры мореходности и вырабатывать сообщения о случаях, когда прогнозируемые значения превышают операционные ограничения. При прогнозе оцениваются вероятности слеминга, заливания, разгона гребного винта и отображаются предупреждения, когда такие явления будут иметь место.

АСКМ вырабатывает два вида прогнозов:

- *эффектов от изменения курса и скорости в текущей обстановке;*
- *параметров мореходности судна в ожидаемых погодных условиях в будущем.*

Оба вида прогнозов основываются на данных о волнении. Для предсказания мореходности в современных АСКМ используются спектральные характеристики волнения. Полнота и точность данных о волнении особенно важны при выборе режимов движения в текущей обстановке. Определяемые судоводителем визуально параметры волнения не являются достаточными. Кроме того, их невозможно получить в ночных условиях. Пока также недостаточно точны и полны данные, передаваемые службами погоды. Они включают только

направление, значительную высоту и средний период волн. Форма спектра предполагается стандартной. Ожидается, что в недалеком будущем точность и надежность данных волнения значительно возрастут. Но пока они пригодны лишь для качественного анализа обстановки и начальных приближений. Поэтому в АСКМ используются дополнительные средства для определения характеристик волнения. Это могут быть измерительные системы, основанные на информации РЛС, либо лазера, либо датчиков давления воды на обшивку корпуса. В практике судовождения из них пока используются только первые. В будущем точные данные о волнении и его спектре планируется получать от береговых метеоцентров на основе информации от специальных спутников зондирования земной поверхности. В настоящем параметры волнения в АСКМ определяются обычно расчетным методом по данным измерений параметров качки (по косвенным измерениям). На это затрачивается порядка 20 минут.

При оценке эффектов от изменения курса и скорости в текущей обстановке информация о волнении может вводиться вручную, сниматься автоматически с измерителей параметров волнения, либо поступать из самой системы, когда расчет характеристик волнения выполняется по косвенным измерениям. При прогнозировании мореходности на будущие моменты времени данные о волнении обычно вводятся вручную. Имеются также АСКМ, которые получают непосредственно на компьютер от служб погоды через станцию спутниковой связи прогностические цифровые сеточные данные о волнении и ветре. В этих АСКМ реализуется прогнозирование мореходности судна по линии его будущего пути

Оптимизация мореходности. Желательно, чтобы АСКМ могла для текущих и/или задаваемых условий погоды определять безопасные режимы движения судна и рекомендовать их капитану. Ряд АСКМ имеют такие функции и облегчают судоводителям принятие решений по управлению судном. Выработка рекомендаций основывается обычно на данных матриц критериев мореходности, рассчитанных для задаваемых значений курса относительно волн (от нуля до 360^0)

через 5^0 или 10^0) и скорости хода (от минимальной до полного хода через 1 узел).

Общий перечень выполняемых операций. Существующие системы для оценки, прогнозирования и оптимизации мореходности судна в определенной степени отличаются друг от друга составом оборудования, перечнем решаемых задач, информационными ресурсами и имеют неодинаковые названия.

Современная многофункциональная АСКМ выполняет следующие операции:

- *постоянно измеряет параметры качки (вертикальное, боковое ускорения, углы бортовой и килевой качки, погружение носа и др.);*
- *непрерывно измеряет силы сжатия/растяжения от общего продольного изгиба в различных местах судна, а также местные нагрузки;*
- *сравнивает результаты измерений с операционными ограничениями, предупреждает о приближении к допустимым значениям, сигнализирует о превышении их;*
- *сохраняет результаты измерений, производит их статистический анализ;*
- *показывает графики изменения параметров мореходности за введенный оператором интервал времени;*
- *на основе обработки результатов измерений за время, порядка 20 минут, определяет высоту, период и направление волн;*
- *оперативно предсказывает на следующие 20 минут параметры качки, вероятность слеминга, заливания, оголения винта;*
- *вырабатывает рекомендации о благоприятных значениях курса и/или скорости для движения в условиях волнения;*
- *по введенным данным о предполагаемом новом курсе и/или скорости предсказывает параметры всех видов качки, нагрузки на корпусе, вероятность слеминга, заливания и оголения винта, падение скорости, предупреждает, если предсказанные значения*

- приближаются к допустимым границам или превышают их;*
- *позволяет через каналы связи получать, сохранять в памяти и отображать на экране прогнозы погоды через 12 часов на время до 10 суток вперед;*
 - *по прогнозу волнения, по данным о намеченном курсе и скорости находит прогностические оценки падения скорости, параметров всех видов качки, нагрузок на корпус, определяет вероятность слеминга, заливания палубы и оголения винта, сигнализирует, если результаты прогноза неблагоприятны для судна;*
 - *позволяет оформлять отчеты об условиях плавания и параметрах мореходности судна на различных участках выполненного рейса.*

Если в состав АСКМ входит подсистема мониторинга морского волнения по данным РЛС, то значения параметров волнения получаются практически в реальном масштабе времени (с запаздыванием 2 мин.).

3.3. Отображение информации в АСКМ

Отображение информации в АСКМ должно обеспечивать высокий уровень понимания судоводителем текущей обстановки и облегчать принятие решений по управлению судном. Для того чтобы управление судном в условиях ветра и волн было эффективным, считается целесообразным иметь возможность отображения:

- *Результатов измерений и анализа основных видов качки. Рекомендаций по оптимизации режима движения с целью уменьшения интенсивности качки и вызываемых ею неблагоприятных явлений.*
- *Результатов измерений и анализа напряжений корпуса. Характеристик напряжений корпуса на тихой воде, в условиях волнения, ударных нагрузок, ускорений. Рекомендуемых мер по их уменьшению.*
- *Потребляемой гребным винтом мощности, частоты его вращения, шага винта (для ВРШ), расхода топлива.*

Рекомендаций по снижению расхода топлива и предупреждения перегрузки двигателя.

- *Характеристик внешних условий (ветра, волнения, температуры, атмосферного давления, глубины моря), тенденций их ухудшения.*

В АСКМ разных производителей используются неодинаковые формы отображения данных, характеризующих мореходность судна. Например, в системе мониторинга корпуса HMS (Hull Monitoring System) фирмы MCA Consultants, Inc. имеются экраны отображения:

1. Оперативных значений параметров состояния судна;
2. Графиков изменения характеристик мореходности за последние 60 с;
3. Графиков потребления энергии главным двигателем в зависимости от скорости хода и сопротивления движению судна;
4. Результатов четырех часового анализа килевой, бортовой качки, напряжений на палубе, вертикальных ускорений бака и кормы, давления воды в носовой части днища.

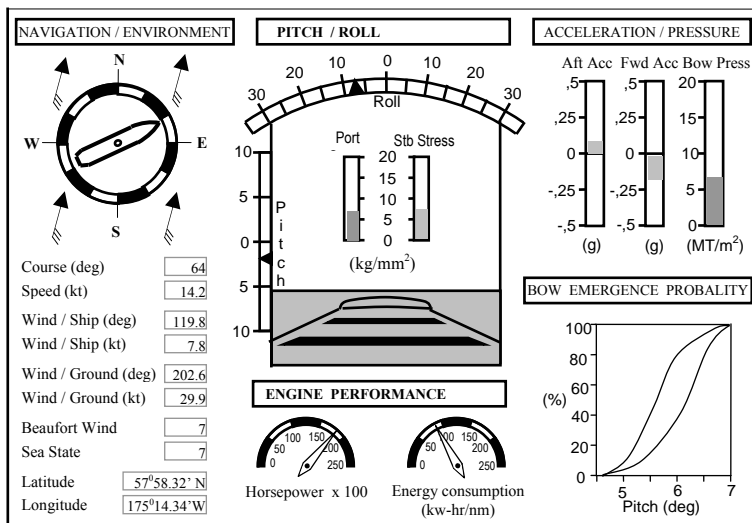


Рис. 3.4. Пример отображения оперативных данных

Вид отображения оперативной информации в системе HMS приведен на рис. 3.4. Вторая форма включает графики изменения за последние 60 с. следующих величин:

- давления в носовой части днища;
- ускорений носа и кормы;
- напряжений при общем продольном изгибе в центральной части судна на палубе с правого и левого бортов;
- углов килевой и бортовой качки.

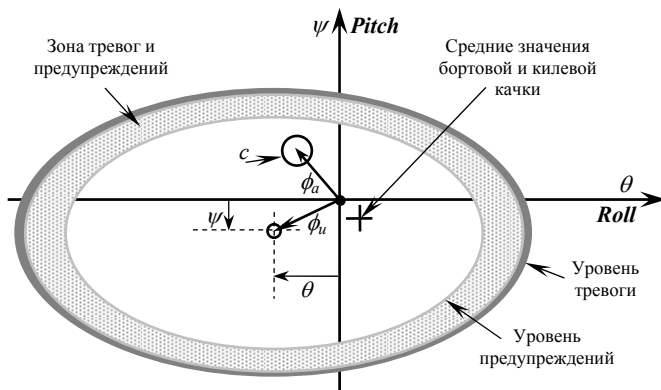


Рис. 3.5. К отображению значений критерия «угол силы»

Для представления текущих значений величин, характеризующих мореходность судна, используются различные элементы графического интерфейса и способы отображения, обеспечивающие высокий уровень восприятия данных. Приведем для примера схему (рис. 3.5), поясняющую способ комплексного отображения параметров всех основных видов качки как критерия «угол силы». Он реализован в *Системе контроля движения судна* фирмы Sea-Image Communication Ltd. (Канада). Угол сил ϕ_F (эффективное наклонение судна) определяется отношением касательной и нормальной (по отношению к плоскости палубы) действующих на груз сил. Он может быть представлен в вид суммы общего наклонения судна ϕ_u ; угла ϕ_a от горизонтальных ускорений, совпадающего с линией их действия; и угла, обусловленного

вертикальными ускорениями (ему соответствует радиус круга c на рисунке).

Зона тревог и предупреждений движется относительно начала координат системы $\theta\psi$ в соответствии с величинами углов килевой и бортовой качки. Центр круга c перемещается в зависимости от горизонтальных ускорений, а его радиус изменяется при изменении вертикальных ускорений. Когда часть круга накладывается на зону предупреждений, система индикацией сообщает об этом, а когда он заходит на уровень тревог – система вырабатывает сигнал тревоги.

Для целей оценки ситуации и выбора режимов хода при отображении характеристик мореходности довольно широко используются **полярные диаграммы скоростей**. Они могут показывать зоны благоприятных режимов движения по отдельным критериям мореходности и по разным совокупностям этих критериев, выбранных для оценки мореходности судна в целом. Возможно ориентирование диаграмм *по норду*, *по курсу*, *по направлению волнения* и представление различными палитрами цветов. В качестве примера на рис. 3.6 представлены три из многих видов полярных диаграмм, которые могут отображаться в системе «ОCTOPUS-DSS» фирмы AMARCON BV. Первая диаграмма показывает зоны допустимых и запретных режимов плавания по слемингу, вторая – по бортовой качке, а третья – по обоим этим критериям.

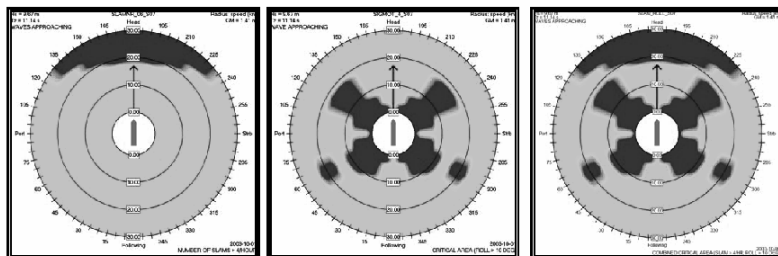


Рис. 3.6. Полярные диаграммы скоростей

На рис. 3.7 представлены отображаемые средствами фирмы SSPA с помощью полярной диаграммы зоны режимов движения по вектору мореходности судна, включающему:

- угол бортовой качки (Roll);
- вертикальный изгибающий момент (VBM);
- вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре (Zacc);
- поперечные ускорения (Yacc);
- работы двигателя без перегрузки (Engine).



Рис. 3.7. Зоны режимов плавания

Кривые жирные линии на рисунке соответствуют пороговым уровням, отделяющим допустимые по данному критерию режимы движения от запретных. Область допустимых режимов плавания по вектору показателей мореходности получается как пересечение благоприятных по отдельным критериям зон.

По рисунку можно установить, что угол бортовой качки и показатель работы двигателя без перегрузки из вектора критериев можно убрать, так как они не влияют на зону допустимых режимов плавания. Таким образом, отобразив все используемые в системе характеристики мореходной

безопасности, можно выбрать состав вектора критериев для данной ситуации.

3.4. Рекомендации по установке систем контроля мореходности

Рекомендации ИМО касаются одного из видов АСКМ – систем мониторинга нагрузок на корпусе (СМНК), и относятся к балкерам дедвейтом 20 тыс. тонн и более. Они изложены в циркуляре Комитета ИМО по морской безопасности MSC/Circ.646: «Рекомендации по установке *систем мониторинга нагрузок на корпусе* для повышения безопасной эксплуатации судов, перевозящих сухие грузы навалом», 1994. Аппаратурное и программное обеспечение системы должно быть одобрено национальной Администрацией. В приложении к циркуляру MSC/Circ.646 содержатся минимальные требования к СМНК, которые освещены ниже.

Система мониторинга нагрузок на корпусе предназначается для обеспечения капитана и штурманов информацией о параметрах качки и нагрузках на корпусе в процессе рейса и в течение грузовых операций. Эта система должна рассматриваться как вспомогательное средство. Она не освобождает судоводительский состав от принятия решений по обеспечению безопасности судна и от ответственности.

ИМО предлагается следующая минимальная конфигурация СМНК:

- *датчики для измерений механических напряжений палубы в направлении диаметральной плоскости;*
- *акселерометр в носовой части судна для измерения вертикального ускорения;*
- *два акселерометра в центральной части судна для измерения ускорений при вертикальной и поперечно-горизонтальной качке;*
- *микропроцессор;*
- *дисплей для представления информации датчиков и результатов ее обработки в удобном для оператора виде;*

- *устройство хранения данных для аккумуляирования информации с целью ее статистической обработки.*

Тензометры следует устанавливать на главной палубе по обоим бортам около каждого грузового трюма и в местах возникновения при общем продольном изгибе максимальных сил сжатия и растяжения. Требуется, чтобы они измеряли механическое напряжение палубы в направлении диаметральной плоскости судна в рейсе и при грузовых операциях. Тензометры должны учитывать температурный эффект и давать информацию о текущем и среднем значении нагрузки в месте их установки. На основе анализа этой информации должны формироваться предупреждения о возможности повреждений палубы и проникновении воды в трюма.

Требуется, чтобы сигналы от акселерометров характеризовали вертикальное и поперечное движение корпуса судна. На основе анализа информации акселерометра на баке судна должны вырабатываться предупреждения о возможности слеминга.

Микропроцессор предназначен для обработки сигналов датчиков, для сравнения их с допустимыми граничными значениями, одобренными национальной Администрацией. Рекомендуется соединять его с компьютером для расчета погрузки с целью получения параметров, характеризующих прочность и остойчивость судна, а также информации о фазе грузовых операций (начальная, промежуточная, конечная). Процессор с помощью звуковых и визуальных средств должен сообщать о высоких уровнях напряжений корпуса, приближающихся к предельным значениям, и подавать сигнал тревоги при появлении опасных нагрузок.

В системе следует использовать средства, гарантирующие целостность получаемой информации. Проверки всей системы должны производиться через интервал времени, одобренный национальной Администрацией.

Рекомендации классификационных обществ.

Руководства и наставления по установке систем контроля мореходности разработаны и основными классификационными обществами [15, 21, 22]. Согласно руководству (Guide for hull

condition monitoring systems. 2003) Американского бюро судоходства (ABS) системы контроля состояния корпуса должны оценивать общую прочность судна и включать тензометры, минимальное количество и расположение которых для основных типов судов представлено ниже.

Танкеры, балкеры, сухогрузы должны иметь:

- *два датчика на палубе посередине судна, один с правого, а другой с левого борта;*
- *один датчик на палубе на расстоянии $1/4$ длины судна от носовой оконечности;*
- *один датчик на палубе на расстоянии $1/4$ длины судна от кормовой оконечности.*

На контейнеровозах рекомендуется устанавливать:

- *четыре датчика по контуру мидельшпангоута (два на палубе и два на днище судна с правого и левого бортов);*
- *один датчик на палубе на расстоянии $1/4$ длины судна от носовой оконечности.*

В соответствии с Руководством ABS, системы контроля состояния корпуса должны иметь следующие документы:

1. Сведения об эксплуатационных характеристиках датчиков информации (точность, диапазон, разрешающая способность, частота измерений и т.д.) и тип их сертификации;
2. Описание методов, использованных для обработки и отображения данных;
3. Описание методики определения критериев для выработки предупреждений об опасности;
4. Описание с визуальным представлением форм отображения выходных данных;
5. Процедуры для установки датчиков информации;
6. Процедуры тестирования датчиков информации;
7. Процедуры тестирования системы;
8. Описание методов и возможностей регистрирующих устройств;
9. Инструкцию по эксплуатации системы;
10. Процедуры оперативного контроля системы.

4. Датчики информации АСКМ

Одним из условий повышения эффективности и безопасности судов является возможность получения объективной информации о мореходном состоянии судна в рейсе. Эта задача решается путем установки бортовых измерителей параметров мореходности. Наличие объективных данных о состоянии судна и знание их допустимых пределов позволяет АСКМ автоматически вырабатывать предупреждения, что эксплуатационные условия судна близки к таким, в результате которых могут возникнуть неблагоприятные последствия, и что необходимы действия для обеспечения безопасности судна и груза. Кроме того, такая информация может использоваться для улучшения управления судовыми техническими средствами с целью экономии энергоресурсов, для уточнения математических моделей, по которым предсказывается реакция судна на ветроволновые возмущения, для управления активными средствами стабилизации различных видов качки и для других нужд.

4.1. Устройства для измерения параметров воздействий среды

4.1.1. Датчики ветра

В настоящее время на судах применяются датчики скорости и направления ветра разных производителей. Типичный представитель этих приборов представлен на рис. 4.1. Он включает в свой состав устройства для измерения скорости и направления ветра.

Для получения скорости применяется пропеллер с лопастями спиралеобразной формы, вращение которого преобразуется в переменный синусоидальный ток. Частота генерируемого тока прямо пропорциональна скорости ветра. Указателем направления ветрового потока является флигель, на оси которого закреплен потенциометр. Сопротивление потенциометра линейно зависит от угла разворота флигеля. На вход потенциометра подается стабилизированное напряжение.

Напряжение выходного сигнала прямо пропорционально курсовому углу ветра.

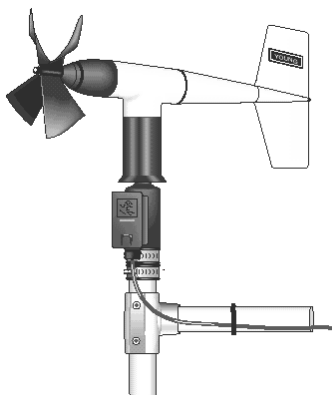


Рис. 4.1. Датчик параметров ветра

Типичный автоматический датчик ветра имеет следующие характеристики:

- диапазон скоростей 0–60 м/с;
- точность измерения скорости $\pm 0,2$ м/с;
- начальная чувствительность 0,4 м/с;
- выдерживает порывы ветра до 100 м/с;
- диапазон направлений 0–360° ;
- точность измерения направления $\pm 3^\circ$;
- размеры датчика 35 x 55 см;
- диаметр пропеллера 18 см;
- вес 1,5 кг.

Выходные сигналы датчика передаются на устройство отображения. Вид одного из них показан на рис. 4.2. Это устройство в наглядном виде представляет данные о средней скорости, скорости порывов и направлении ветра. Значения скорости отображаются в выбранных оператором единицах (узлах, м/с, км/ч). Курсовой угол ветра и сектор его изменения показываются на азимутальной шкале.



Рис. 4.2. Устройство отображения информации о ветре

4.1.2. Определители параметров волнения

Назначение. На судах начали применяться базирующиеся на РЛС *системы мониторинга параметров морского волнения* (СМПВ), которые служат для:

- *извлечения информации о волнении из эхосигналов РЛС;*
- *сохранения полученных данных;*
- *отображения значений параметров волнения на текущий и прошлые моменты времени;*
- *уведомлений об изменении силы волнения.*

На судне система мониторинга параметров волнения может работать автономно, либо входить в состав системы контроля мореходности. СМПВ предоставляет данные о волнении круглосуточно и позволяет штурманскому составу определять режимы штормования не только днем, но и ночью, не дожидаясь утра. Знание реальных параметров волнения способствует улучшению решения и других судовых задач.

Состав системы и предоставляемые данные. СМПВ состоит из специальной или конвенционной навигационной РЛС, высокоскоростного дигитайзера для преобразования эхосигналов РЛС в цифровой код, блока хранения данных, стандартного персонального компьютера и специального программного обеспечения. Для выполнения своих задач СМПВ

должна получать информацию о курсе, скорости судна и его координатах. Системе обеспечивается возможность стыковки с ГК, лагом, приемоиндикатором GPS, эхолотом, и другими приборами.

СМПВ измеряет и отображает все существенные параметры волнового поля при скоростях судна, вплоть до 40 узлов. В число этих параметров входят:

- *высота значительных волн;*
- *средний период и генеральное направление волнения;*
- *направление, скорость, период, длина преобладающих волн;*
- *пиковые значения направления, периода, длины двух составляющих смешанного волнения (ветровых волн и зыби);*
- *частотный спектр волнения;*
- *спектр по направлению;*
- *2D-спектр по X, Y-составляющим частоты формы волн;*
- *2D-спектр по частоте и направлению;*
- *скорость и направление поверхностного течения.*



Рис. 4.3. Отображение информации о волнении

Под *преобладающими волнами* понимается главная гармоника волнения, соответствующая пику его спектра. На эту гармонику приходится максимум энергии волн. СМПВ различает волны с длиной 40÷600 м. и с периодом от 5 до 40 с.

В системе по запросу показываются различные графики, характеризующие изменение параметров волнения со временем, результаты статистической обработки результатов измерений за определенный период времени и другие данные.

Из существующих систем мониторинга параметров морского волнения можно назвать «Wavex» фирмы Migos (Норвегия) и «WaMoS II» фирмы OceanWaveS (Германия). Название первой системы является сокращением от *Wave Extractor*, а второй – от *Wave Monitoring System*. На рис. 4.3 показана одна из форм отображения данных в СМПВ «Wavex». Эта система обеспечивает получение параметров волнения с точностью, охарактеризованной в табл. 4.1.

Таблица 4.1. – Погрешности параметров волнения

Характеристика	Диапазон	Разрешение	Погрешность
Высота значительных волн	0÷5 м	0.1 м	0.25÷0.50 м
Высота значительных волн	Выше 5 м	0.1 м	<10%
Период волн	3÷18 с	0.1 с	<10%
Направление волн	0÷360	1	<10%

Требования к РЛС. Для возможности получения в СМПВ данных о волнении с достаточной точностью, РЛС должна иметь такие технические параметры:

- диапазон волн – 3-х сантиметровый (X-band);
- ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости – не более 1,3⁰;
- частота вращения антенны – 24÷48 об/мин;
- длительность зондирующего импульса – 50÷80 нс;
- частота повторения импульсов – больше 1000 Гц;
- высота антенны над уровнем моря – не менее 8 м.

Минимальная высота морских волн, которая может измеряться СМПВ, составляет порядка 0,5-0,7 м. Для целей мониторинга волнения должны выбираться малые шкалы дальности РЛС – до 2-х миль. Чтобы не возникало ограничений

в использовании навигационной РЛС, для СМПВ может устанавливаться отдельный подходящий радар. По мнению производителей СМПВ таким является яхтенный радар фирмы «Koden», высококачественный, очень малый, легкий, недорогой и простой в установке.

Специальный радиолокационный датчик. В СМПВ применяются и РЛС, специально созданные для определения параметров волнения и поверхностного течения. Примером служит доплеровский микроволновой радар «SM-050», разработанный специалистами фирмы MIROS. В него встроен инерциальный датчик перемещений (IMU), информация которого используется для компенсации влияния на данные радара качки и для мониторинга ее параметров.

РЛС «SM-050» работает на частоте 5,8 ГГц. Она имеет шесть антенн (рис. 4.4) для облучения акватории в шести смежных секторах по 30° . Дистанция зондирования водной поверхности зависит от высоты антенны и составляет от 180 до 450 м. Рекомендуемая высота установки «SM-050» – от 20 до 100 м. Ширина диаграммы направленности антенн в горизонтальной плоскости составляет 24° .

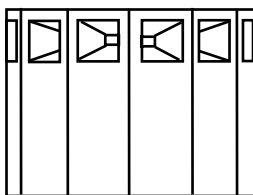


Рис. 4.4. Внешний вид радара SM-050

СМПВ, основанная на РЛС «SM-050», включает соединительную коробку, интерфейсный модуль, компьютер со специальным программным обеспечением, дисплей. Через интерфейсный модуль к системе может подключаться приемоиндикатор GPS, гирокомпас, датчик времени. На дисплее можно просмотреть параметры наблюдаемого волнения (его спектр по частоте и направлению, данные о текущих и прошлых значениях параметров волнения), скорость и направление поверхностного течения, параметры движения корпуса судна.

Характеристика выходных данных системы представлена в табл. 4.2.

Таблица 4.2. – Характеристика выходных данных СМПВ с «SM-050»

Параметр	Диапазон	Погрешность	Разрешение
Волнение			
Высота волн	0–30 м.	±5%	0,1 м.
Период	3–30 с.	±5%	0,1 с.
Направление	0–360 ⁰	±7 ⁰	1 ⁰
Течение			
Скорость	0–2,5 м/с	±0,05 м/с	0,01 м/с.
Направление	0–360 ⁰	±7 ⁰	1 ⁰
Интервал обновления	15 мин		
Амплитуда качки			
Вертикальной	±50 м.	±5%	0,1 м.
Продольной/ поперечной	±50 м.		0,1 м.
Бортовой/килевой	±30 ⁰	±0,1 ⁰	0,1 ⁰
Скорость качки			
Верт./продольной/ поперечной	±20 м/с.	±0,1 м/с	0,1 м/с
Ускорение качки			
Верт./продольной/ поперечной	±30 м/с ² .	±0,1 м/с ²	0,1 м/с ²

Принцип определения параметров морского волнения по данным РЛС. Для получения характеристик волнения анализируется информация РЛС о небольшом участке акватории около судна. Назовем его *субакваторией*. При работе РЛС появляется радиолокационный образ субакватории, благодаря отражению зондирующих импульсов РЛС от склонов волн, обращенных к антенне, и отсутствию эха от сторон волн, находящихся в зоне радиолокационной тени. Наилучшее условие для отражения радиоволн и максимальная амплитуда эхосигналов соответствует направлению оси антенны в сторону, откуда приходят морские волны.

При обработке эхосигналы от моря представляются в виде матрицы цифр, соответствующих амплитуде эха от точек субакватории. Эта матрица называется цифровым образом субакватории. Учитывая, что скорость вращения антенны достаточно велика, полученный при одном обзоре антенны цифровой образ относится к одному моменту времени. Путем анализа образа субакватории устанавливается направление q , по

которому наблюдается максимальная A_u амплитуда эхосигналов, и определяется частота формы волн. Для улучшения точности эта процедура выполняется для цифровых образов нескольких последовательных обзоров РЛС.

Зная A_u , можно найти высоту волн. Максимальная амплитуда эхосигналов пропорциональны высоте волн и зависит от вида антенны, ее высоты и типа РЛС. Приблизительно зависимость между A_u и h_w описывается выражением [25]:

$$h_w \approx k_0 + k_1 A_u,$$

где k_0, k_1 – эмпирически определяемые для каждого судна коэффициенты.

Цифровые образы последовательных обзоров относятся к разным моментам времени. Путем сравнения данных этих образов находится скорость бега волн, частота волнения и другие его параметры.

4.2. Измерители параметров движения судового корпуса

4.2.1. Инерциальные датчики угловых параметров качки

Параметры угловых перемещений судна обычно измеряются гироскопическими устройствами разных типов (с вращающимся ротором, волоконно-оптическими, вибрационными и другими). Наиболее подходящими для выполнения этой задачи на современном этапе являются волоконно-оптические и вибрационные гироскопы.

Волоконно-оптические измерители угловой скорости – одни из наиболее дешевых средне точных гироскопов (10–0,1 град/час). Этот вид приборов также называют фиброоптическими гироскопами (ФОГ).

Поясим принцип работы ФОГ. Допустим (рис. 4.5,а), что в плоскости инерциального пространства с системой координат $O\zeta\xi$ имеется неподвижный волоконно-оптический кабель (световод) длиной L , свернутый в виде кольца радиусом R .

Начало, и конец кабеля находятся в точке A . Если в нее подать свет, то его волна разделится на две. Эти две волны распространяются по кабелю в противоположных направлениях (примем, что первая волна – по часовой стрелке, а вторая – против нее). Обойдя световод, первая и вторая волны встретятся в точке A .

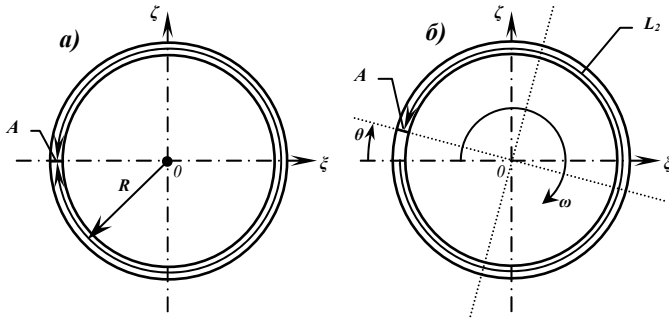


Рис. 4.5. К пояснению принципа работы ФОГ

Допустим теперь, что кольцо световода вращается вокруг своей оси по часовой стрелке с угловой скоростью ω (рис. 4.5,б). В момент, когда точка A проходит через ось $O\xi$, в нее подается свет. Разделившись на две волны, свет будет распространяться со скоростью c , не зависящей от скорости вращения световода. Точка A во время движения света по кабелю будет уходить от волны, движущейся по часовой стрелке и идти навстречу волне, огибающей световод против часовой стрелке. Вторая волна достигнет точки A и покинет световод раньше первой волны, так как ее путь L_2 окажется короче расстояния L_1 , проходимого первой волной. По разности времени прихода волн в точку A находится угловая скорость вращения световода.

При практической реализации в световоде поддерживаются колебания генерируемой лазером энергии, а определение разности между L_1 и L_2 выполняется с помощью интерферометра, измеряющего разность фаз между первой и второй световыми волнами.

Кольцевые виброгироскопы. Вибрационные гироскопы пока относятся к приборам низкой точности (ниже 10 град/час), но из-за малой стоимости, миниатюрных размеров, высокой надежности они особенно перспективны для судовых и многих других приложений. Прогрессирующими в настоящее время (из-за низкой цены и малых размеров) являются *микромеханические вибрационные датчики*, изготавливаемые на базе современных кремниевых технологий. Большинство из них относится к области низких точностей, ряд образцов обеспечивает среднюю точность. Наиболее совершенными видами кремниевых микромеханических виброгироскопов являются кольцевые и волновые твердотельные устройства.

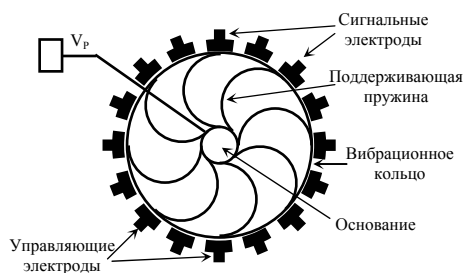


Рис. 4.6. Структура вибро-гироскопического ДУС

Кольцевой датчик (рис. 4.6) состоит из вибрационного кольца, восьми поддерживающих кольцо пружин, управляющих, сигнальных, и настраивающих электродов. Поддерживающие пружины укреплены на круглой основе внутри кольца. Эта основа и электроды закреплены на стеклянной пластине. Вибрационное кольцо и электроды изготовлены из кремниевой пластины с низким сопротивлением ($0,002 \Omega/\text{см}$). На них с помощью фотолитографии нанесено металлическое покрытие. На электрод кольца подается поляризованное напряжение V_p .

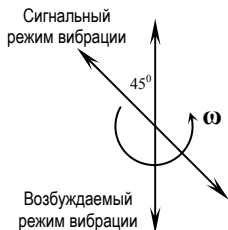


Рис. 4.7 . Направления вибрации первого и второго режимов

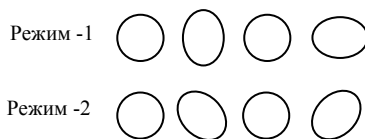


Рис. 4.8 . Формы кольца в четвертных фазах вибрации

В датчике выделяют два режима вибрации кварцевого кольца. С помощью управляющих электродов, на которые подается переменное напряжение, инициируется первый режим вибрации с постоянной амплитудой A_y (возбуждаемый режим). Когда происходит вращение гироскопа вокруг оси кольца с той или иной угловой скоростью ω , сила Кориолиса вызывает второй (сигнальный) режим совместной вибрации, отклоненной по направлению от первого на 45° . Возбуждаемый и сигнальный режимы вибрации кольца представлены на рис. 4.7. Формы кольца, соответствующие четырем фазам его колебаний в этих режимах, показаны на рис. 4.8.

Амплитуда A_C колебаний кольца во втором режиме пропорциональна ω . Таким образом, если по направлению 45° расположить сигнальный электрод, то максимальный зазор между ним и вибрирующим кольцом будет изменяться пропорционально угловой скорости поворота. Колебание величины зазора между поверхностями кольца и сигнального электрода приводит к пропорциональному изменению емкости между ними. По измерениям этой емкости получается значение угловой скорости поворота. Для возбуждения вибрации кольца может применяться три электрода. Такое же количество электродов используется и для выходных сигналов. Обычно четыре электрода служат для настройки (балансировки) гироскопа. Остальные электроды заземлены.

Примером виброгироскопов, способных обеспечивать разрешающую способность до $0,2$ град/мин, служит однокристалльный кремниевый микродатчик с кольцевым

резонатором фирмы Silicon Sensing Systems Japan Ltd. Его вибрационное кольцо имеет диаметр 2,7 мм. Чувствительность датчика составляет 140 мВ на 1 град/с. Он обладает высокой надежностью, не требует обслуживания.

Волновые твердотельные гироскопы. Похожую конструкцию на представленный выше вид вибрационных гироскопов имеют так называемые волновые твердотельные гироскопы (ВТГ). Они относятся к гиродатчикам средней точности. В основе функционирования ВТГ лежит физический принцип, заключающийся в инертных свойствах упругих волн в твердом теле. Если возбудить стоячие упругие волны в симметричном относительно оси резонаторе, то его вращение вызывает поворот (прецессию) стоячей волны как целого. Скорость прецессии пропорциональна проекции угловой скорости вращения на ось симметрии резонатора.

Резонатор ВТГ изготавливается из плавленного кварца, сапфира или другого материала, обладающего малым коэффициентом потерь при колебаниях. Обычная форма резонатора – тонкая, упругая полусфера с отверстием в полюсе. Из-за этого ВТГ также называется ***полусферическим резонаторным гироскопом***. У полюса полусферы резонатор жестко прикреплен к основанию в виде стеклянной пластины. Край резонатора, представляющий собой большую окружность полусферы, свободен. Этот край называют рабочим.

Резонатор окружен специальным кожухом, зазор между которым и поверхностью резонатора мал. На обращенные друг к другу поверхности кожуха и резонатора вдоль рабочего края последнего напыляются металлические электроды, которые образуют конденсаторы. На электроды резонатора подается поляризованное напряжение. Электроды на кожухе разделяются на управляющие, сигнальные и настроечные.

Конденсаторы с управляющими электродами служат для возбуждения в резонаторе колебаний и поддержания их постоянной амплитуды. С их помощью в резонаторе устанавливают форму колебаний, у которой стоячая волна имеет четыре пучности через каждые 90° . *Конденсаторы с сигнальными электродами* используются для измерения

положения пучностей на резонаторе. Третья группа конденсаторов применяется для настройки регулятора.

С помощью весьма сложной обработки данных, снимаемых с сигнальных электродов, получают угловую скорость движения резонатора относительно его оси.

К достоинствам ВТГ относятся:

- *высокое отношение точность / цена;*
- *способность переносить большие перегрузки;*
- *компактность и небольшой вес;*
- *низкая энергоемкость;*
- *малое время готовности;*
- *слабая зависимость от температуры окружающей среды.*

Твердотельные волновые резонаторы и гироскопы изготавливаются в настоящее время рядом фирм и организаций. Например, научно-производственным предприятием "Медикон" (Россия) создан малогабаритный твердотельный волновой гироскоп для гражданских навигационных систем, имеющий следующие технические характеристики:

- точность0,1 град/ч;
- случайная составляющая дрейфа0,005 град/ч;
- систематический дрейф 2,5 град/ч;
- максимальная измеряемая скорость 300 град/с;
- потребляемая мощность 1,5 Вт;
- вес механической части датчика97г;
- габариты ТВГ в корпусе \varnothing 50 x 150мм;
- рабочий температурный диапазон $- 40^0 + 40^0$ С;
- вибрационная прочность (от 3 до 200 Гц)10 g ;
- время готовности 5 с;
- время наработки на отказ не менее 100000ч;
- ценаниже 2000 \$.

Резонатор рассматриваемого гироскопа имеет такие параметры: рабочая частота – 8 кГц, диаметр – 30 мм, высота – 32 мм.

4.2.2. Инерциальные устройства для измерения линейных параметров качки

Для получения линейных параметров качки используются акселерометры. Они могут быть струнными, маятниковыми,

жидкостными, кварцевыми и т.д. Ограничений на тип акселерометров не накладывается, главное, чтобы они соответствовали целям решаемых АСКМ задач и были пригодны для эксплуатации в морских условиях. Точность этих приборов должна быть не хуже $\pm 0,01g$.

Принцип измерения ускорений. В основе работы акселерометров лежит второй закон Ньютона: когда известная «чувствительная масса» m движется с ускорением a , возникает сила $F = ma$, измерив которую можно получить значение ускорения. Для оценки силы в ряде акселерометров применяют пружину (рис. 4.9). Величина Δl растяжения/сжатия пружины пропорциональна действующей силе, а, следовательно, и ускорению:

$$\Delta l = k_a a ;$$

где k_a – коэффициент пропорциональности.

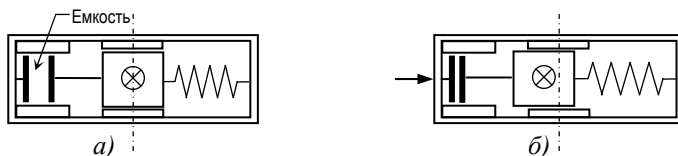


Рис. 4.9. Схема акселерометра: а) в спокойном состоянии; б) под действием ускорения

В микромеханических акселерометрах для измерения Δl обычно используется один из трех методов: *емкостной*, *пьезорезисторный*, *пьезоэлектрический*. На рис. 4.9 показан вариант первого метода.

Кремниевый емкостной акселерометр. Одними из перспективных датчиков ускорений являются кремниевые емкостные акселерометры. Они относятся к устройствам невысокой точности. Однако она вполне достаточна при измерениях элементов качки судна.

Рассматриваемый акселерометр (рис. 4.10) состоит из трех кремниевых пластин (A , M , B) и пружинок между ними. Эти элементы помещены в герметическую камеру, заполненную специальным «демпфирующим» газом. Внешние пластины A , B

по отношению к корпусу прибора неподвижны, а внутренняя – M , представляет собой чувствительную массу акселерометра. На пластинах с помощью фотолитографии нанесено металлическое покрытие. Пластины являются обкладками двух конденсаторов, обозначим их A , B в соответствии с названием внешних пластин прибора. Ёмкости этих конденсаторов зависят соответственно от расстояний между пластинами A , M и B , M .

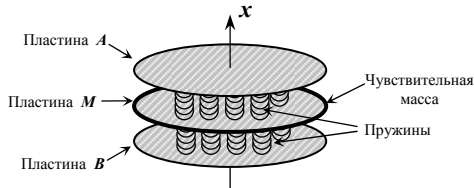


Рис. 4.10. Схема кремниевого емкостного акселерометра

Акселерометр измеряет ускорения, действующие вдоль оси ox . При отсутствии ускорений расстояния между пластинами A , M и B , M одинаковы, и емкости конденсаторов равны. Когда прибор движется вдоль своей оси с ускорением a , то зазоры между пластинами меняются на одинаковую величину: один в сторону увеличения, а другой – уменьшения. Соответственно изменяются и емкости конденсаторов. На основе измерения этих емкостей находится ускорение.

Характеристики акселерометров. Микроакселерометры бывают разных видов и точности. Один из кремниевых емкостных измерителей ускорений имеет следующие характеристики:

- диапазон измерений..... 100 м/с²;
- стабильность нуля..... 0,0001 м/с²;
- уровень шума, $1/\sqrt{Гц}$ 0,001 м/с²;
- нестабильность масштабного коэффициента... 0,15% ;
- габаритные размеры 17x11x12 мм³.

4.2.3. Комбинированные инерциальные датчики

На базе современных технологий для измерения параметров качки созданы однокоординатные и двухкоординатные инклинометры, датчики линейных и угловых перемещений,

комбинированные устройства, включая измерители движения во всех шести степенях свободы. Образцы таких приборов изготавливаются фирмами: Seatex, Measurement Devices Ltd, Silicon Sensing Systems Japan Ltd, MicroStrain, BS-Multidata и другими. На судне результаты измерений параметров качки позволяют оценивать его мореходность, параметры волнения и обоснованно выбирать режимы штормования.

Комбинированные инерциальные измерители движений в шести степенях свободы в зарубежной литературе называют Inertial Motion Unit (IMU). Примером серийно производимых IMU являются морские приборы: «MRU-5» (Motion reference unit) фирмы SIMRAD SEATEX, «LR-86» фирмы Litton, «S-108» фирмы SMC. Эти датчики включают в себя три волоконно-оптические гироскопа и три акселерометра. Они предназначены для многих приложений, включая и оценку мореходности судов.

Прибор «MRU-5» измеряет угловые скорости в диапазоне ± 150 град/с со средней квадратичной погрешностью (СКП) 0,025 град/с. Он определяет статические углы крена и дифферента с СКП $0,25^0$; а динамические углы бортовой, килевой качки и рыскание – $0,03^0$. Линейные ускорения «MRU-5» измеряет с СКП $0,01$ м/с² в диапазоне ± 30 м/с². Среднее время наработки «MRU-5» на отказ – 50000 час, вес прибора – 2,5 кг.

Комбинированный датчик «S-108» системы контроля движения судна фирмы SMC (Швеция) обеспечивает точность измерений:

- углов килевой и бортовой качки $0,01^0$;
- ускорений $0,001g$;
- вертикальной, продольной и поперечной качки ... 5 см;
- курса $1,0^0$.

Ряд IMU основан на использовании миниатюрных кремниевых виброгироскопов и акселерометров. Примером таких датчиков служит аппаратура фирмы Silicon Sensing Systems Japan Ltd. Она позволяет измерять:

- *угловые скорости в диапазоне от 0,1 до 100 град/с с разрешением 0,1 град/с;*
- *углы рыскания, килевой и бортовой качки с точностью $0,1^0$;*

- *линейные ускорения со средней квадратичной погрешностью 0,01 м/с².*

4.2.4. Спутниковые измерители параметров движения корпуса судна

Одним из спутниковых бортовых датчиков параметров качки судна является GPMS (GPS motion sensor), серийно выпускаемый фирмой SIREHNA. Он включает четырех антенную систему (рис. 4.11) и специальный GPS приемник. Кроме координат позиции судна, путевого угла и путевой скорости, GPMS измеряет курс судна и элементы качки. Определения угловых параметров качки характеризуется СКП 0,3⁰; линейные перемещения находятся с точностью 10 см.

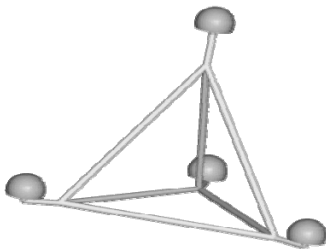


Рис. 4.11. Антенна спутникового датчика параметров движения судна

Данные GPMS о путевой скорости позволяют с достаточной точностью установить величину ее падения при движении на волнении. Сведения о параметрах качки используются для оценки мореходности судна и для предупреждений об опасных условиях эксплуатации.

С целью повышения точности и надежности измерений параметров качки, предназначенные для этой цели спутниковые приемоиндикаторы комплексированы с IMU. Примером является система «Seapath 100» фирмы SEATEX, включающая двухантенную спутниковую бортовую аппаратуру и инерциальный датчик «MRU-H».

4.3. Датчики напряжений корпуса судна и гребного вала

Механическое напряжение. Под механическим *напряжением* понимается возникающая при деформации тела упругая сила, приходящаяся на единицу площади его сечения. Достаточно большое число деформаций сводится к растяжению (сжатию). При растяжении тела напряжение считается положительным, а при сжатии - отрицательным. Мерой растяжения (сжатия) тел считается величина ε , называемая относительной продольной деформацией:

$$\varepsilon = \Delta L / L .$$

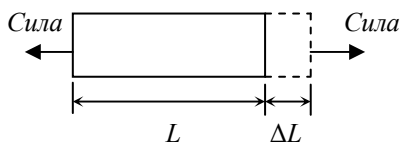


Рис. 4.12. К определению механического напряжения

Она показывает относительное изменение длины тела, вызванное нагрузкой (рис. 4.12). Напряжение при упругой продольной деформации, согласно закону Гука, пропорционально ε . Поэтому ε используется и в качестве меры напряжения тела, единица которой называется **стрейн** (strain). Один стрейн – это напряжение, вызывающее растяжение ΔL , равное длине тела L . Разрыв твердых тел наступает при деформациях, значительно меньших одного стрейна. Поэтому напряжения твердых тел выражают обычно в микрострейнах ($\mu\varepsilon = \varepsilon \times 10^{-6}$) или в миллестрейнах ($m\varepsilon = \varepsilon \times 10^{-3}$).

Напряжения тел измеряются **тензометрами**. Они могут быть электрическими, вибрационными, волоконно-оптическими. Ограничений на тип тензометров, используемых в системах оценки мореходности, не накладывается. Главное, чтобы они имели характеристики, соответствующие целям решаемых АСКМ задач, и были пригодны для эксплуатации в морских условиях.

Измерители напряжений элементов судового корпуса должны иметь точность не хуже 5 мк и быть способными работать в частотном диапазоне 0÷5 Гц. Погрешности этих приборов, вызванные суточным изменением температур окружающей среды и груза, подлежат корректировке. Рекомендуются, чтобы датчики деформаций, вызываемых общим продольным изгибом судна, имели длинную основу с целью уменьшения влияния локальных эффектов на результаты измерений.

Силы давления воды на обшивку корпуса судна в разных его местах измеряют с помощью специальных приборов. Они могут показывать давление в разных единицах измерений: в ньютонах на квадратный метр (н/м^2), в миллибарах ($\text{бар}=10^5 \text{ н/м}^2$), в технических атмосферах ($1 \text{ кг/см}^2=0,98 \text{ бара}$).

4.3.1. Резисторные измерители напряжений

Принцип действия. Традиционными датчиками механических напряжений являются устройства, основанные на свойстве проводников и полупроводников менять свое сопротивление при деформациях сжатия и растяжения. Эти приборы называются **тензорезисторами** (от лат. *tensus* – *напряженный* плюс *резистор*).

Явление изменения сопротивления материала под действием сил сжатия и растяжения было открыто еще в 1856 г. английским лордом Кельвиным. Как известно, сопротивление проводника R пропорционально его длине L и обратно пропорционально площади поперечного сечения S :

$$R = k_p L / S;$$

где k_p – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, если проводник под действием сил растягивается, его длина становится больше, а площадь поперечного сечения уменьшается. Это приводит к росту его сопротивления. Когда проводник сжимается, картина обратная. Длина проводника уменьшается, а его диаметр становится больше. Сопротивление проводника снижается. Открытие Кельвина не имело практического применения до 1930 года,

когда Карлсон предложил первый проволочный тензометр. Он стал использоваться на практике с 1931 года. В настоящее время для измерения линейных деформаций в упругой зоне применяются проволочные, фольговые и другие тензорезисторы. Они измеряют статические и динамические деформации с частотами изменения до десятков килогерц.

Главной характеристикой датчика напряжений является коэффициент F тензочувствительности:

$$F = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon}.$$

Здесь ΔR – изменение сопротивления R проводника при изменении его длины L на величину ΔL . Коэффициент F определяется свойствами материала, из которого изготовлен датчик. Но величину F влияют температура и другие факторы. Например, чувствительность тензорезистора зависит от проходящего по нему тока. Чем больше ток, тем выше чувствительность прибора. Однако использовать можно лишь ток ограниченной величины, так как с его увеличением растет нагрев тензодатчика. При превышении определенной температуры показания прибора становятся нестабильными. Для обеспечения высокой точности тензорезисторных измерений требуются специальные меры: экранирование, стабилизация режимов, корректировка и компенсация погрешностей. Снижение уровня погрешностей в датчиках напряжений выполняется конструктивно либо аналитически.

При увеличении длины L проводника чувствительность тензодатчика улучшается. Поэтому он изготавливается в виде гребенки (рис. 4.13). Гребенчатая структура тензорезистора (металлической проволоки или фольги) максимизирует его длину, подверженную натяжению в продольном направлении. Поперечное сечение датчика минимизируют, чтобы уменьшить эффект перерезывающего напряжения. Гребенка устанавливается на специальной основе и защищается кожухом. Основа прикрепляется к конструкции (палубе, стрингеру и др.), напряжение которой измеряется.



Рис. 4.13. Проволочный датчик напряжений

Для типичных датчиков механических напряжений $F \approx 2$, а сопротивление равно 120, 350 или 1000 Ом. Такие тензоизмерители имеют разрешающую способность порядка 1-го микрострейна.

На практике напряжения металлических конструкций редко превышают несколько миллестрейнов. Поэтому требуется измерять очень малые изменения сопротивления. Например, если напряжение испытуемого образца 500 $\mu\epsilon$, то при $F=2$ и $R=120$ Ом, изменение сопротивления составляет только 0,12 Ома.

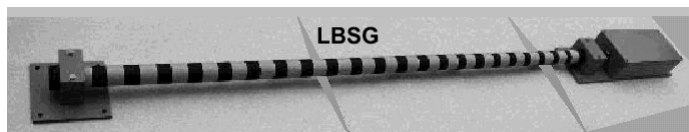


Рис. 4.14 . Судовой тензодатчик с длинной основой

Датчики напряжений палубы. На судах для измерения деформаций палубы при общем продольном изгибе применяются электрические датчики напряжений с длинной (LBSG – long base strain gauge) и короткой (SBSG – short base strain gauge) основой. Они показаны на рисунках 4.14, 4.15. Длина LBSG может быть от 150 до 240 см, а SBSG – от 8 до 13 см. Характеристики этих тензодатчиков приведены в табл. 4.3.



Рис. 4.15. Судовой тензодатчик с короткой основой

Таблица 4.3.– Характеристики датчиков напряжений

	SBSG	LBSG
Разрешение	5 мк	5 мк
Диапазон частот	0 ... 150 Hz	0 ... 5 Hz
Диапазон линейности	+/- 1000 мк	+/- 2000 мк
Макс. размер	130 mm	2420 mm
Питание	12 ... 24 V	12 ... 24 V
Температурный диапазон	-25 ⁰ C ... +70 ⁰ C	-25 ⁰ C ... +70 ⁰ C



Рис. 4.16. Тензодатчик с длинной основой, устанавливаемый на палубе балкера

Тензометры, устанавливаемые на палубе, должны быть защищены от заливания. На рис. 4.16 представлен пример закрепления LBSG на судне. Слева показан защитный кожух датчика.

Устройства для измерения момента на гребном валу.
Информация об упоре и моменте гребного винта важна для оценки состояния судна в условиях волнения и при тихой

погоде. Мониторинг момента на гребном валу в штормовых условиях дает возможность установить, не превышает ли его амплитуда допустимую для двигателя. Знание упора винта и скорости хода позволяет оценить сопротивление движению судна при ветроволновых воздействиях и установить, не перегружен ли двигатель. При тихой погоде анализ этих величин является основой для заключений о степени обрастания корпуса. По измерениям упора и момента может также оцениваться состояние гребного винта. Знание потребления топлива и момента на гребном валу дает возможность в процессе плавания судить об эффективности двигателя.

Для измерений момента на гребном валу используются различные средства: электрические, волоконно-оптические и другие. В этом разделе характеризуются устройства, основанные на применении тензорезисторов.

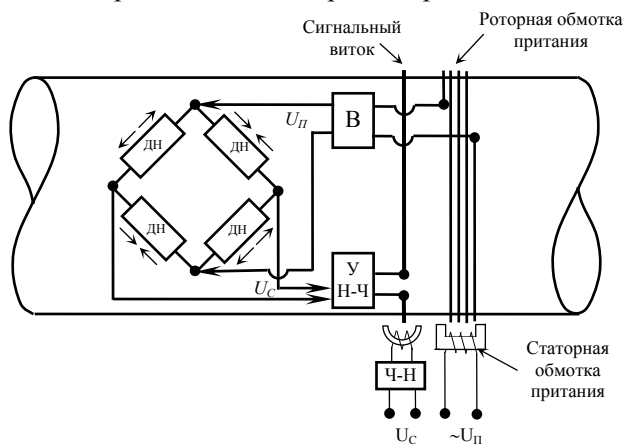


Рис. 4.17. Блок-схема устройства для измерения момента кручения на гребном валу

При нагрузке гребного вала возникает упругая деформация кручения, сопровождающаяся изменением напряженности его поверхности. Величина этих напряжений пропорциональна действующему на вал моменту. Направление наибольшего растяжения (сжатия) поверхностного слоя гребного вала при деформации кручения составляет угол 45° к его осевой линии.

Для измерения момента нагрузки, на поверхности гребного вала (рис. 4.17) укрепляются четыре тензорезистора (ДН) с одинаковым сопротивлением. Вид двух из них показан на рис. 4.18. Измерительные оси этих датчиков наклонены к оси вала под углом $+45^{\circ}$ и -45° . Тензодатчики соединяются по мостиковой схеме, на одну диагональ которого подается напряжение питания U_D , а с другой снимается выходной сигнал U_C , характеризующий момент на гребном валу. При отсутствии нагрузки плечи датчика сбалансированы и сигнальное напряжение равно нулю. При деформации кручения одна пара напротив лежащих датчиков вместе с поверхностью вала подвергается растяжению (сопротивление датчиков увеличивается), а другая пара – сжатию (сопротивление датчиков уменьшается). Это приводит к нарушению баланса мостика, на его выходе появляется сигнальное напряжение, пропорциональное величине момента на гребном валу. Использование мостиковой схемы позволяет исключить влияние температуры на измерения, так как действие ее на плечи мостика взаимно компенсируется.

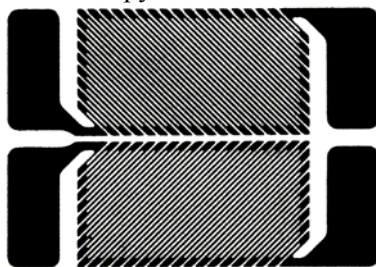


Рис. 4.18. Вид двух датчиков напряжений, используемых для измерений момента на гребном валу

Передача на вращающийся гребной вал питающего напряжения и снятие с него результатов измерений выполняется с помощью бесконтактных устройств. Для обеспечения тензометров питанием на гребном валу помещается роторная обмотка. Около нее на неподвижном по отношению к судну основании устанавливается статор. На обмотку статора подается питающее напряжение, которое индицируется в роторную

обмотку. Снимаемое с роторной обмотки переменное напряжение преобразуется выпрямителем (В) в постоянное и подается на питание мостиковой схемы.

Сигнальное напряжение U_C , характеризующее момент на гребном валу, очень мало. Для передачи его на статор используется специальная схема, включающая усилитель (У), преобразователь «напряжение-частота» (Н-Ч) и сигнальный виток. Роторная обмотка питания, выпрямитель, усилитель, преобразователь «напряжение-частота» и сигнальный виток помещаются на специальном кольце, укрепляемом на гребном валу. Снимаемый с преобразователя Н-Ч частотно-модулированный выходной сигнал поступает на виток, с которого путем индукции передается на обмотку статора. Здесь сигнал измеряется. Результаты измерений передаются: в устройство обработки, в накопитель с целью последующего статистического анализа, а также на отображение.

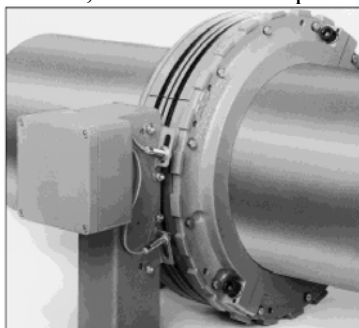


Рис. 4.19. Общий вид системы для измерения момента и частоты вращения гребного вала фирмы VAF Instruments

Для представления результатов измерений и обработки используются аналоговые и цифровые индикаторы. Выходные данные могут передаваться на дисплеи, предназначенные для интегрированного отображения информации, характеризующей эксплуатационное состояние судна.

Основанные на тензорезисторах устройства для измерения момента на гребном валу изготавливаются рядом организаций. Примером служат фирмы VAF Instruments (Голландия) и КУМА (Норвегия). На рис. 4.19 приведен общий вид выпускаемого

первой фирмой измерителя момента и частоты вращения гребного вала.

Датчики упора гребного винта. Основанная на тензорезисторах схема для измерения упора гребного винта аналогична показанной на рис. 4.17 схеме получения момента на валу. Отличие состоит в том, что для нахождения упора измерительные оси двух тензометров мостика направляются параллельно оси гребного вала, а двух других – перпендикулярно к ней. Деформации сжатия и растяжения гребного вала меньше в сравнении с деформацией его кручения, поэтому упор обычно измеряется с большей погрешностью, чем момент. Тем не менее, точность современных тензорезисторных измерителей упора гребного винта достаточна для практических целей. На судах применяются устройства как для отдельного измерения момента и упора гребного винта, так и для получения этих параметров одновременно. Ряд из них дополнительно измеряет частоту вращения гребного вала.

4.3.2. Волоконно-оптические тензометры

Волоконно-оптические тензодатчики перед электрическими измерителями механических напряжений имеют следующие преимущества: небольшие размеры, малый вес, высокое быстродействие, неподверженность коррозии, невосприимчивость к электромагнитным помехам. Кроме того, одно волокно может содержать несколько тензометров. Волоконно-оптические устройства не нуждаются в громоздких защитных кожухах. Они могут быть прикреплены к поверхности материала, встроены в конструкции и позволяют измерять растяжения, сжатия материалов, давление, температуру, ударные нагрузки.

Датчики, основанные на решетке Брэггов. Волоконная брэгговская решетка (FBG – fiber Bragg grating) представляет собой оптический элемент (наноструктуру), основанный на периодическом изменении показателя преломления сердцевинки или оболочки оптического волокна, который отражает свет определенной длины волны. Она названа так по имени английских физиков, отца и сына Генри и Лоуренса Брэггов,

работавших в Лондоне в начале XX века. Именно они, исследуя кристаллы под рентгеновскими лучами, установили, что периодические структуры (в их случае – кристаллы) могут быть отличными зеркалами для волн определенной длины.

На оптическом волокне FBG делают так. Сердцевину волокна экспонируют интенсивным излучением ультрафиолетового лазера, но не однородно, а в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии около 400 нанометров. В местах экспонирования коэффициент преломления необратимо увеличивается. В волокне таким образом формируется периодическая структура полос с чередующимся показателем преломления. Волокно с продольной вариацией показателя преломления и есть брэгговская решетка.

Каждая полоса FBG отражает назад малую часть излучения. Для длины волны в два раза большей, чем период решетки, отраженные лучи складываются в фазе. В результате появляется отраженный световой сигнал с очень узкой спектральной полосой. Отражаемая решеткой длина волны называется *брэгговской*. Для всех остальных длин волн FBG практически прозрачна.

Брэгговская длина волны определяется расстоянием между точками экспонирования и показателем преломления материала сердцевины световода. Она зависит от температуры и натяжения волокна. При нагревании или изменении натяжения волокна показатель преломления и расстояние между «точечками» решетки Брэггов изменяется, и от нее отражаются волны другой длины. Если в экспериментальных условиях провести измерения и установить, какая длина волны какому натяжению (температуре) соответствует, то можно сделать прибор, который по длине волны определяет, какое натяжение волокна (или температура) в том месте, где расположена брэгговская решетка. Таким образом, в волоконно-оптических датчиках на основе FBG измеряемой величине (температуре или механическому напряжению) соответствует смещение брэгговской длины волны. Принцип работы FBG-датчика поясняется на рис. 4.20 .

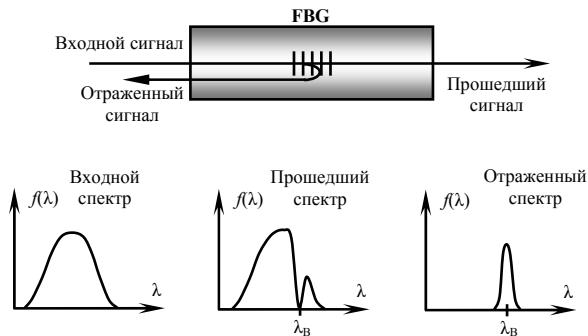


Рис. 4.20. Функциональный принцип тензодатчика на основе FBG

FBG-датчик включает источник света (лазер), чувствительный элемент (решетку Брэггов), систему регистрации (спектрометр) и процессор [23]. Система регистрации преобразует смещение длины волны, отраженной брэгговской решеткой, в электрический сигнал. На одно волокно может быть нанесено множество решеток Брэггов, каждая из которых дает отклик на собственной длине волны. В этом случае вместо точечного датчика получается распределенная система регистрации с мультиплексированием по длине волны. Использование длины волны света в качестве информационного параметра делает датчик нечувствительным к долговременным дрейфам параметров источника и приемника излучения, а также к случайным затуханиям оптической мощности в волокне.

FBG-датчики имеют малые размеры, высокую точность измерений (порядка 1-го микрострейна), очень большой срок работы, не требуют обслуживания. На судне они могут использоваться для мониторинга нагрузок в разных местах корпуса. Устанавливаемые на палубе датчики предназначены для регистрации нагрузок при общем продольном изгибе и кручении. Тензометры, закрепленные на конструкциях корпуса в форпике, служат источником данных о силе ударов волн и направлении, откуда они приходят. Тензодатчики в балластных

танках могут измерять локальное давление воды на корпус в местах установки на днищевых конструкциях.

Датчики, базирующиеся на технологии Фэбри-Перота (Fabry-Perot). На основе технологии Фэбри-Перота могут быть созданы измерители механических напряжений, давления, температуры и ряда других параметров. В этих приборах вместо лазера используется источник обычного белого света, а для получения результатов измерений применяется интерферометр.

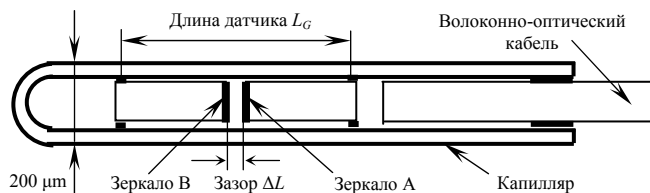


Рис. 4.21. Схема тензодатчика Фэбри-Перота

Чувствительное устройство волоконно-оптического тензометра Фэбри-Перота (рис. 4.21) включает два полупрозрачных зеркала *A* и *B*, которые закреплены на обращенных друг к другу концах двух отрезков волоконно-оптического кабеля. Эти отрезки волокна запаены на внешних концах в специальном капилляре. Зазор ΔL между зеркалами называется длиной полости Фэбри-Перота. Расстояние L_G между точками припайки отрезков волокна называется длиной датчика. Это расстояние определяет диапазон измерений и чувствительность прибора.

Датчик работает следующим образом. По волоконно-оптическому кабелю подается белый свет. Часть его отражается от полупрозрачного зеркала *A*, а оставшаяся часть проходит на зеркало *B* и отражается от него. Разность фаз отраженных от зеркал световых волн пропорциональна величине зазора между зеркалами. Она измеряется интерферометром. Когда капилляр прикреплен к конструкции, то при ее сжатии или растяжении величина зазора между зеркалами меняется, что позволяет по показаниям датчика определить величину напряжения: $\varepsilon = \Delta L / L_G$.

Преобразование оптического сигнала в электронный вид выполняется специальным интерферометром.

4.3.3. Датчики давления

Из многочисленных приборов для измерения давления забортной воды на корпус, которые могут быть применены для обнаружения слеминга и для других целей, рассмотрим только волоконно-оптические датчики, работающие по принципу Фэбри-Перота. Они гармонично могут быть включены в волоконно-оптические системы для измерений напряжений элементов корпуса судна.

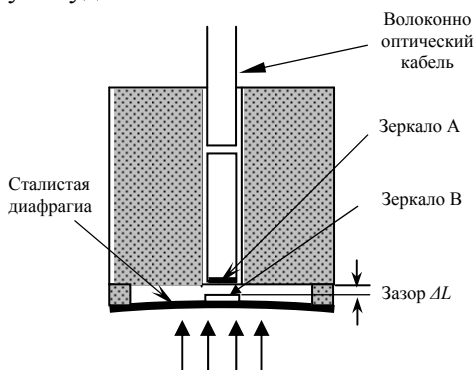


Рис. 4.22. Схема фиброоптического манометра

Состав датчика давления, использующего технологию Фэбри-Перота, представлен на рис. 4.22. Работа этих приборов основана на бесконтактном измерении прогиба стальной диафрагмы под действием давления воды. Эта диафрагма устанавливается заподлицо с обшивкой. Сам датчик размещается в специальном устройстве, позволяющем заменять его в эксплуатационных условиях. Диафрагма приваривается к корпусу датчика. Резиновые или пластмассовые прокладки в нем не используются, что повышает надежность прибора. Форма и материал диафрагмы выбираются таким образом, чтобы зависимость между действующим на диафрагму давлением и величиной ее прогиба была линейной. Когда датчик под давлением, зазор между полупрозрачным зеркалом

А, и поверхностью диафрагмы (зеркало В) изменяется. По волоконно-оптическому кабелю подается белый свет. Часть его отражается от полупрозрачного зеркала А, а оставшаяся часть проходит к диафрагме и отражается от зеркала В. Разность фаз отраженных световых волн пропорциональна величине зазора между зеркалами. Она измеряется с помощью интерферометра.

4.4. Счетчики потребляемого двигателем топлива

Одним из вопросов эффективной эксплуатации судна является экономичный расход топлива. Однако он зависит от многих факторов (условий погоды, загрузки судна, дифферента и др.) и точно может быть установлен только инструментально. Для измерения количества потребляемого двигателем топлива применяют специальные приборы – **счетчики топлива** (СТ). Их также называют *флоуметрами* (от англ. – flowmeter). Информация СТ способствует повышению экономичности и безопасности судовождения. По ней для различной загрузки и условий плавания могут быть установлены значения скорости, при которых топливо используется наиболее продуктивно. Это важно для улучшения показателей рейса. Наблюдение за расходом топлива позволяет также судить об эффективности выбранного режима штормования, работы двигателя и вовремя сигнализировать о скрытых проблемах в его работе.

Главные дизельные двигатели обычно работают на тяжелом топливе. Оно поступает на двигатель из расходных танков через смесительную цистерну, подогреватель и фильтр (Ф). Для избежания застывания топлива в расходном трубопроводе при внезапной остановке или уменьшении нагрузки двигателя в движительных установках используется *рециркуляция* – возврат с двигателя части топлива в смесительную или в расходную цистерну. Количество израсходованного топлива, таким образом, равняется разности между поступившей на двигатель и возвращенной в цистерну массы. Поэтому для получения величины потребляемого главным дизелем топлива используются два счетчика. Один из них измеряет количество

подаваемого на двигатель топлива, а второй – возвращаемого в цистерну.

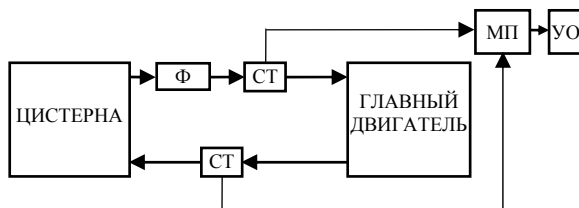


Рис. 4.23. Схема системы, измеряющей расход топлива главным двигателем

Типичная система (рис. 4.23) для измерения расхода топлива главным двигателем включает в себя:

- два счетчика топлива (СТ);
- два датчика температуры топлива (на рисунке не показаны);
- микропроцессор (МП) для определения потребления топлива в единицу времени, на миль пути и суммарного его расхода;
- устройство отображения (УО).

Данные датчиков температуры используются для учета ее влияния на вязкость топлива, проходящего по питающему и возвратному трубопроводам, с целью повышения точности расчета его расхода.



Рис. 4.24. Счетчик топлива фирмы FuelCom System

Счетчики топлива могут быть разных типов. Наиболее часто применяются приборы, работающие по принципу турбины. Они включают в свой состав чувствительный элемент (один или два импеллера), устройство съема и передачи результатов измерений, индикатор. Импеллер помещается в поток топлива и приводится им во вращение. Частота вращения импеллера отслеживается специальным устройством, по данным которого подсчитывается количество прошедшего топлива. Примером СТ турбинного типа является измерительное устройство фирмы FuelCom System (США), внешний вид которого приведен на рис. 4.24.

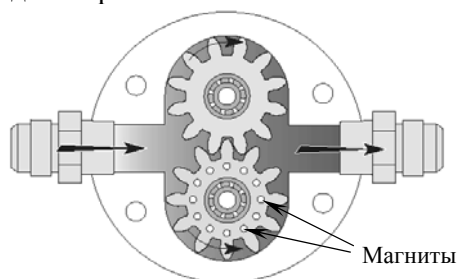


Рис. 4.25. Принцип работы счетчика топлива

В этом флоуметре используется два импеллера (рис. 4.25), вращаемые потоком топлива. В импеллеры встроены магниты. На поле этих магнитов реагирует специальный бесконтактный сенсор. В процессе вращения импеллера он генерирует пульсирующий выходной сигнал. Число пульсаций равняется количеству прошедших около сенсора магнитов и пропорционально массе поступившего топлива. Прибор обеспечивает измерения с погрешностью, не превышающей 1% от количества поданного топлива.

4.5. Гидрометеорологическая информация

По прогнозам погоды в АСКМ предсказывается мореходность судна на будущие моменты времени, что позволяет принять своевременные меры для избежания опасных

ситуаций. Сведения об информационных службах, передающих гидрометданные на суда, могут быть найдены в специальных печатных изданиях, например:

- *World Meteorological Organization Publication 9 – Weather Reporting, Volume D – Information for Shipping (Broadcast Schedules)*;
- *A Mariners Guide to Marine Weather Services – Coastal, Offshore, and High Seas (NOAA/PA 98054)*;
- *NOAA Weather Radio Brochure (NOAA/PA 94070, 3/97)*;
- *The British Admiralty List of Radio Signals (Volume 3 – Maritime Safety Information Services, Volume 4 – Meteorological Observation Stations, Volume 5 – Global Maritime Distress and Safety Systems)*;
- *Maritime Navigational Safety Information Sources, (9/94)*;
- *Maritime Radio Users Handbook (1992)*;
- *Canadian Coast Guard Radio Aids to Navigation*.

Перечни источников информации о погоде можно также найти на вебсайтах:

- Всемирной Метеорологической Организации (WMO) – <http://www.wmo.ch>;
- Национальной службы погоды США (NWS) – <http://www.nws.noaa.gov/om/marine/home.htm> (морские прогнозы), <http://www.nws.noaa.gov/om/marine/home.htm#text> (морские текстовые сообщения), <http://www.nws.noaa.gov/fax/marine.shtml> (факсимильная продукция).

К передаваемой на судно информации о погоде обычно предъявляются требования: своевременности, точности, надежности, полноты, возможности эффективного использования для решения судовых задач.

4.5.1. Основные виды данных о погоде

Информация о погоде, предназначенная для мореплавателей, классифицируется по различным признакам.

В зависимости от отражаемых элементов и явлений сведения о погоде делят на:

- *данные о приземном ветре и волнении*;

- сведения об ураганах;
- информацию о льдах и айсбергах;
- данные о температуре воздуха и воды;
- сведения о барических системах;
- информацию о поверхностных течениях;
- данные о других элементах и явлениях погоды.

Практически любая информация о погоде (ветер, волнение, лед, снег, туман, дождь, изменение температуры воздуха и воды, теплые фронты, холодные фронты, атмосферное давление и т.д.) важна, так как она влияет на эффективность выполнения судовых задач, сохранную перевозку груза, безопасность мореплавания. При передачах данные об отдельных элементах погоды объединяются по тому или иному признаку. К основным группам сообщений о погоде относят: *информацию о состоянии погоды, моря, льда; предупреждения об угрозе возникновения опасных гидрометеорологических явлений* (шторма, урагана, резких изменений в ледовой обстановке); *прогнозы погоды различной заблаговременности*. Для расчета параметров качки, для оценки вероятности мореходных опасностей, для вычисления нагрузок на корпусе **основными** являются данные о ветре и волнении.

По отношению источника данных к судну информация о погоде может быть *внутренней* и *внешней*. **К внутренней информации** относятся результаты выполненных на судне гидрометеорологических наблюдений, сведения о погоде, помещенные в пособиях для штурманов и в память судового компьютера. **Внешняя информация** поступает от внешних по отношению к судну источников. Сюда входят обзоры, предупреждения, прогнозы и другая информация о погоде, распространяемая береговыми метеоцентрами, бюро, станциями, а также гидрометданные с других судов, буев, спутников и от других источников.

В зависимости от времени, к которому относятся данные, различают *климатическую информацию, реальные данные текущей и прошлой погоды, гидрометеорологические прогнозы.*

Климатическая информация отражает среднестатистические условия погоды, являющиеся обобщенным результатом многолетних наблюдений, и носит общеоценочный характер. При проработке рейсов с ней обычно знакомятся в первую очередь. Ее можно найти в следующих пособиях для мореплавателей:

- Гидрометеорологические очерки лоций;
- Лоцманские (климатические) карты;
- Атласы физико-географических данных, в том числе Морской атлас;
- Атласы и таблицы отдельных элементов погоды (течений, волнения, приливов, температуры, плотности воды, ураганов и т.д.);
- Морские справочники и другие специальные пособия.

Созданы также *глобальные климатические базы данных*, позволяющие с помощью компьютера быстро выбрать сведения о климате для любой точки на Земном шаре и отобразить их в наглядном виде на фоне электронных карт.

Реальные данные о прошлой погоде хранятся обычно на Гидрометцентрах. Здесь речь идет о так называемых типовых изменениях атмосферных процессов, характер которых повторяется и может использоваться в настоящем при формировании долгосрочных прогнозов погоды.

Информация об элементах текущей погоды получается с помощью бортовых гидрометеорологических приборов. Ее также передают береговые метеоцентры.

Особенно важны для обеспечения безопасного плавания **прогнозы погоды**. С позиции использования на судах, они разделяются на краткосрочные (от 1-х до 3-х суток), средней продолжительности (до 5-ти, 6-ти суток) и долговременные (до 10-ти, 16-ти суток). В основе выработки на береговых Гидрометцентрах прогнозов небольшой заблаговременности (до 5-ти, 6-ти суток) лежит решение систем уравнений, включающих данные наблюдений за погодой на всем Земном шаре. Для долгосрочных прогнозов дополнительно используется библиотека типовых вариантов изменений погоды в прошлом. Она позволяет найти подобный по развитию образец погоды в прошлом и использовать его аналогию в настоящем

для предсказания значений гидрометеорологических параметров на время до 10-ти, 16-ти суток.

Классификация данных в зависимости от уровня решаемых задач судождения. Применительно к выполнению морских переходов решения по управлению судном обычно разделяются на три уровня: стратегические, тактические, оперативные. Стратегические решения определяют действия по выполнению всего рейса. Они захватывают промежуток времени, в среднем порядка 10–15 суток. Тактические решения затрагивают поведение судна как системы управления на интервале порядка от суток до трех вперед. Оперативные решения касаются действий системы в настоящем и в ближайшем будущем (в течение нескольких часов).

Гидрометеорологическая информация в зависимости от уровня решений, для выработки которых она используется, также подразделяется на *стратегическую, тактическую, оперативную*. Элементы погоды могут развиваться и перемещаться довольно быстро, обычно со скоростями от 10 до 50 узлов. В среднем изменения погоды обгоняют судно на 5–20 узлов, а то и больше. В результате, чтобы обеспечить безопасность и иметь возможность избежать тяжелых погодных условий, вовремя изменив курс и/или скорость хода, найти убежище и укрыться в нем, сведений о текущей погоде, а иногда и краткосрочных ее прогнозов, может быть недостаточно. Используя только оперативную и тактическую информацию о погоде, можно поставить себя в положение, когда не останется достаточного времени для уклонения от надвигающихся тяжелых условий. Поэтому для целей судождения нужны долговременные прогнозы погоды, на основе которых возможно формирование стратегических решений, обеспечивающих в совокупности с тактическими и оперативными действиями безопасность и эффективность выполнения всего перехода.

В зависимости от степени обработки различают *исходную (первичную, сырую) гидрометинформацию и результаты ее анализа*.

Исходная информация – это результаты измерений параметров погоды на береговых постах, судах, автоматических

станциях, установленных на специальных буйках и в труднодоступных местах, и другие гидрометеорологические наблюдения. Применять «сырую» информацию в навигационных целях затруднительно, так как требуется дополнительный ее анализ, уменьшение погрешностей, систематизация и распространение на районы, где не выполняются наблюдения.

Полученные в результате анализа сведения более удобны для использования. В судовождении обычно оперируют информацией, представляющей собой результаты обработки и анализа на береговых Гидрометцентрах многочисленных исходных данных о погоде. Такая принимаемая на судах агрегированная информация облегчает и ускоряет принятие решений.

По форме отражения обстановки гидрометеорологическая информация делится на *текстовую, графическую, сеточную, комбинированную*.

В виде **текста** передаются бюллетени, обзоры, предупреждения и другие данные о погоде. Пользоваться печатной и принятой с голоса текстовой информацией для анализа погоды на пути следования, без нанесения ее на карту, неудобно, так как отсутствует необходимая наглядность ее представления.

Графическая информация о погоде включает в себя:

- карты особых явлений погоды;
- фото-, теле-, радиолокационные изображения, передаваемые с метеоспутников;
- карты синоптической ситуации на уровне моря;
- высотные карты барической топографии;
- синоптические и прогностические карты волнения;
- карты распространения льдов и айсбергов;
- прогностические карты разной заблаговременности;
- карты схемы развития синоптических процессов;
- карты температур, данные батитермографических наблюдений и другие материалы.

Нагрузка карт может быть различной. Одни из них содержат только значения гидрометеорологических элементов. Используя такие карты, судоводитель производит анализ погодных

условий самостоятельно. Другіє карты отражають результаты выполненного на берегу анализа, включающего расчерчивание изобар, нанесение положений фронтов и барических систем, отображение изолиний высот волн, их направлений, а также дополнения данных путем теоретического расчета и т.п.

Наиболее употребительны в практике судовождения карты: приземной погоды, волнения, распределения льдов и айсбергов. Первые карты особенно важны для штурмана. Он должен уметь их читать и применять для целей судовождения. Национальные бюро погоды выпускают два типа наземных карт – это цветные и черно-белые. На цветных синоптическая обстановка отражена более полно и наглядно, однако для приема черно-белых карт достаточен дешевый факсимильный аппарат.

При важности всех факсимильных карт погоды, нужно признать, что для обеспечения мореходности основными из них являются карты ветра и волнения.

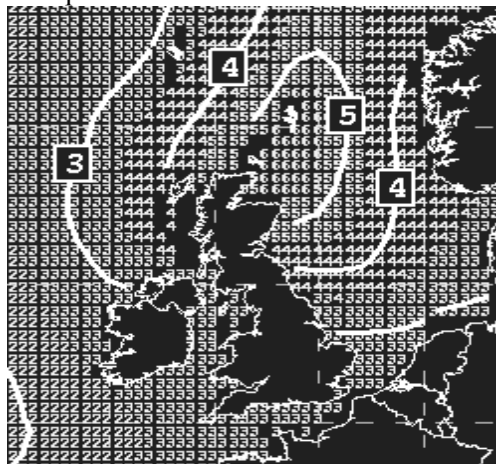


Рис. 4.26. Фрагмент сеточных данных

Сеточные данные являются разновидностью текста. Они представляют поля погодных элементов значениями в узловых точках, образуемых пересечением меридианов и параллелей, нанесенных на поверхность Земли через определенный шаг. Узлы обычно нумеруются в определенной последовательности.

Ряд Гидрометцентров уже передают цифровые сеточные гидрометданные для целей судовождения. Например, такую информацию о ветре и волнении можно получить по электронной почте от *Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды*, бюро *Национальной службы погоды США*, с метеоцентра *Oceanweather* (США) и от ряда других метеослужб. Сеточные данные на Мировой океан передают отдельными массивами, которые содержат значения одного гидрометеорологического параметра на то или иное время прогноза. На рис. 4.26 представлен фрагмент массива значительных высот волн. При необходимости для любого узла сетки можно получить прогноз нескольких элементов погоды. Пример таких прогностических данных о ветре и волнении от нуля часов по Гринвичу через 6 часов на трое суток вперед показан в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Пример прогноза для одного узла сетки

Latitude: 35 00' 00" North (35.000)
 Longitude: 130 00' 00" East (130.000)
 Grid Point: 9630 (GLOBAL Model)

Прог. Час.	Ветер			Смешанное волнение			Ветровое волнение			Зыбь		
	\bar{v}_a	v_{an}	<i>Dir</i>	$h_{1/3}$	τ_p	<i>Dir</i>	$h_{1/3}$	τ_p	<i>Dir</i>	$h_{1/3}$	τ_p	<i>Dir</i>
+6	19	25	NE	2.3	10	NE	1.8	6	NE	1.4	10	NNE
+12	19	26	NE	2.3	9	NE	1.9	7	NE	1.2	10	NNE
+18	19	26	NE	2.1	7	NE	1.9	7	NE	0.9	10	NNE
+24	19	26	NE	2.1	7	NE	1.9	7	NE	0.7	10	NNE
+30	19	25	ENE	2.0	7	NE	1.9	7	NE	0.6	10	NNE
+36	19	25	ENE	1.9	7	NE	1.9	7	ENE	0.4	11	NNE
+42	19	26	NE	2.0	7	NE	2.0	7	NE	0.2	11	ENE
+48	19	26	NE	2.0	7	NE	2.0	7	NE	0.2	11	S
+54	19	26	NE	2.1	7	NE	2.0	7	NE	0.2	12	SSW
+60	20	26	NE	2.1	7	NE	2.1	7	NE	0.2	12	SSW
+66	21	28	NE	2.3	7	NE	2.3	7	NE	0.2	12	SSW
+72	22	30	NE	2.6	8	NE	2.6	8	NE	0.2	12	SSW

В таблице обозначено: \bar{v}_a – средняя скорость ветра в узлах (10–ти минутная); v_{an} – максимальная скорость порывов ветра в узлах (3–х секундная); *Dir* – направление ветра/волнения.

По виду предоставления передаваемая с береговых центров информация о погоде может быть *вещательной (голосом), печатной, электронной.*

Вещательная информация не содержит образ синоптической ситуации и не представляет процесс ее развития. Судоводитель должен записать эту информацию, чтобы иметь возможность ее анализа в навигационных целях. Вещательная информация может быть неправильно понята из-за помех либо недостаточно хорошего знания языка, на котором она передается.

Отпечатанные на бумаге данные, особенно карты, более наглядны, дают возможность анализировать погодные условия на пути следования и оценивать ситуации. Однако для компьютера такая информация неудобна, так как требует ручного ввода.

Электронная информация. Наличие в судовом компьютере сведений о текущей и ожидаемой погоде на весь Мировой океан позволяет:

- отображать на экране монитора синоптическую обстановку любого района;
- определять ожидаемые погодные условия в любой точке маршрута по времени прихода в нее;
- просматривать развитие гидрометеорологических ситуаций в динамике;
- автоматически вырабатывать предупреждения об опасностях, просто и быстро численно оценивать параметры поведения судна в ожидаемых ветроволновых условиях.

Для выполнения названных операций необходимо своевременно получать с береговых Гидрометцентров большие массивы информации о погоде и автоматически записывать их в память судовых компьютеров. Предназначенная для мореплавателей спутниковая сеть Инмарсат позволяет переслать в электронном виде сведения о погоде любому оборудованному средствами GMDSS судну. Возросшая мощность бортовых компьютеров достаточна для эффективного применения этих данных при решении задач судовождения. Такая возможность еще 15 лет назад была только мечтой.

Классифицироваться гидрометеорологическая информация может и по виду связи для ее доставки. Для передачи гидрометеорологической информации на суда могут использоваться: *телефония, факсимильная связь, телекс, электронная почта, глобальное соединение World-Wide Web (WWW)*.

Телеграфную Морзе связь для передачи сигналов бедствия, а также метеорологических и навигационных предупреждений прекратили использовать с 1999 г.

Телефония является видом коммуникации, обеспечивающим диалог голосом. Первоначально речь передавалась при помощи электрических аналоговых сигналов, в которые звуковые колебания преобразовывалась в микрофоне телефонной трубки. В настоящее время перешли к использованию дискретных сигналов, когда при разговоре через коммуникационную сеть посылаются короткие блоки цифровых данных размером в 1 байт. Новые телефоны передают в сеть и принимают из нее дискретную информацию. В них, по сравнению со старыми аппаратами, на передающей стороне дополнительно проводится аналого-цифровое преобразование сигналов. При приеме осуществляется обратное преобразование.

Использование цифровых сигналов позволило осуществить интеграцию различных коммуникационных средств. Звук стал передаваться по тем же сетям, что и другие типы данных (тексты, изображения). Произошла интеграция компьютера с телефонным аппаратом, появилась компьютерная и интеллектуальная телефонии.

Службы цифровой телефонии предоставляют разнообразные виды услуг для пользователей, в том числе *речевой диалог между абонентами, речевая почта, факсимильная связь, удаленное чтение текстов, речевой диалог с Базами Данных (БД)*.

Факсимильная связь представляет собой технологию передачи через коммуникационную сеть неподвижных текстовых и графических изображений. Она осуществляется при помощи пары факс-аппаратов через телефонную сеть либо Цифровую Сеть с Интеграцией Служб. Задачей факсимильной связи является доставка документов с бумажных листов

отправителей на бумажные листы получателей. На судах с помощью факсимильной связи получают карты погоды. Факсимильная связь проста, но имеет ряд недостатков, к которым, в первую очередь, относятся:

- невозможность хранения данных в запоминающих устройствах;
- крайне ограниченные возможности редактирования информации;
- неудобная связь для компьютеров (данные на бумаге);
- неточная передача информации, связанная с использованием бумаги и механического привода.

Телекс представляет собой способ передачи *текстовых документов*, символы которых соответствуют пишущим машинкам. Этот вид связи обеспечивает автоматическую передачу сообщений с небольшой скоростью. Абонентами сети являются простые терминалы, клавиатура которых позволяет вводить, запоминать и передавать тексты. Телексная связь применяется для передачи на суда навигационных, метеорологических предупреждений и срочных сообщений в международной автоматической службе NAVTEX. На судне сообщения распечатываются автоматически с помощью узкополосного печатающего устройства. Недостатками телексной связи является возможность передачи только текста с ограниченным числом символом, малая скорость и ряд других.

Электронная почта – это современный вид коммуникации, обеспечивающий обмен сообщениями или документами без применения бумажного носителя. Она предназначена для передачи любых сообщений, включающих тексты, речь, изображения. Электронная почта является одной из служб глобальной компьютерной сети Интернет и позволяет передавать данные напрямую в память компьютеров. По электронной почте могут пересылаться сообщения пяти видов: *тексты, мозаичная графика, геометрическая графика, многотоновые изображения, речь*. Способ доставки сообщений первого вида называется *телетексом*. Следующие три вида почты охватывает *видеотекс*, обеспечивающий передачу изображений, включая тексты. Режим многотоновых изображений позволяет пересылать рисунки и фотографии. Последний вид сообщений относится к *речевой почте*.

Передача сообщений электронной почтой может осуществляться через телефонную сеть, сеть коммутации пакетов, Цифровую Сеть с Интеграцией Служб и сети других типов. Электронная почта предоставляет пользователям многочисленные виды услуг. С ее помощью могут доставляться на суда все виды гидрометеорологической информации.

Глобальное соединение WWW – технология, обеспечивающая доступ к документам на сайтах и в Базах данных сети Интернет. Документы могут содержать различные объекты: тексты, изображения, звук. С помощью WWW можно просматривать и переписывать в память судового компьютера любую информацию о погоде, размещаемую гидрометеорологическими организациями на своих сайтах.

4.5.2. Компьютерный учет гидрометеорологической информации на судах

Наилучшая практика предупреждения повреждений судну и грузу из-за воздействий стихии – это своевременное получение соответствующей гидрометинформации и анализ ее дважды в сутки, обычно утром и вечером. Для приема сведений о погоде на судах имеется специальное оборудование. Штурману необходимо уметь им пользоваться и анализировать полученные данные. Кроме того, он должен знать, как применить информацию о погоде для обеспечения безопасности судна и груза, для выбора оптимального маршрута, для определения наилучшего времени выхода в рейс, для решений других навигационных и эксплуатационных задач.

Сбор и анализ информации о погоде день за днем один или два раза в сутки, оценка влияния внешних условий на судно и груз, корректировка маршрута для обеспечения безопасности судна, груза и повышения экономической эффективности рейса – необходимый, сложный и занимающий время процесс. Следует учитывать, что штурмана обычно не имеют много времени на получение и тщательный анализ гидрометеорологической информации, на использование ее для улучшения показателей рейса. Поэтому предпринимаются меры

по организации для этой цели компьютерной помощи. Она затрагивает широкий круг вопросов:

- *подготовку данных на Гидрометцентрах в виде, удобном для восприятия и использования в судовых компьютерах;*
- *выработку стандартов на состав и формат передаваемых файлов гидрометеорологической информации, а также стандартов ее отображения в судовых системах;*
- *развитие дешевых и высокоскоростных средств доставки гидрометданных на суда;*
- *разработку программ для судовых компьютеров.*

В настоящее время эти вопросы выполняются в комплексе, однако внедрение новых коммуникационных технологий на судах, по сравнению с береговыми организациями, более трудоемко. Здесь информацию необходимо доставлять в любую точку Мирового океана, причем применяемые средства должны быть надежными и приемлемыми для всех морских государств.

Информация метеоцентров. Службы погоды в настоящее время решают вопросы представления и передачи погодной информации в электронном виде. Многие из них открыли свои вебсайты, на которых помещают данные о погоде, и предоставляют услуги электронной почты и WWW.

Национальная Служба Погоды США (NWS – National Weather Service), через Интернет передает текстовые и графические прогнозы погоды, спутниковые фотографические, телевизионные и радиолокационные изображения поверхности Земли, ледовые анализы, прогнозы и отчеты об айсбергах, климатическую информацию, данные метеонаблюдений буев и других станций. Пока прогностические карты погоды предоставляются в растровом формате, что ограничивает их применение для решения задач судовождения. В ближайшем будущем планируется образовывать и передавать данные этих карт в векторном и сеточном форматах.

NWS сделала доступными для потребителей генерируемые компьютером в сеточном виде прогнозы погоды. Они не всегда получаются качественными, но их уже можно использовать в системах с электронными картами и в компьютерных средствах, предназначенных для планирования пути и обеспечения

мореходной безопасности. Для выработки высококачественных цифровых прогнозов погоды специалистами NWS разрабатывается новая технология и программное обеспечение, известное как *Интерактивная система подготовки прогнозов*. Ее продукция будет представляться в различных форматах: в виде текстов, таблиц, графических изображений, сеточных данных.

Бюро прогнозов NWS передает на ограниченные районы в сеточном формате данные: о направлении, скорости ветра и его порывов; о направлении бега и высоте волн. Эти сведения могут автоматически записываться в память судовых компьютеров и использоваться для целей информационной поддержки решений штурманского персонала.

Центр прогноза тропических циклонов (TPC – Tropical Prediction Center) и *Центр предсказания состояния океанской среды* (OPC – Ocean Prediction Center) NWS в цифровом виде передают прогнозы приводного давления, скорости и направления ветра, направления, высоты и преобладающих периодов ветрового волнения и зыби на весь Мировой океан с разрешением по широте и долготе $0,5^{\circ}$. Эти материалы посылаются в новом сеточном формате (GRIB2 – Gridded Binary 2) – стандартном формате для передачи метеорологической информации. Формат GRIB был разработан ВМО специально для передачи больших объемов сеточных данных на автоматические центры через высокоскоростные телекоммуникационные каналы. Пакетирование информации в код GRIB делает сообщения более компактными, чем ориентированные на символы бюллетени. Это обеспечивает более быстрый обмен данными между компьютерами. GRIB может служить и форматом для хранения метеоинформации в памяти. Данные о погоде, предназначенные для образования графических изображений, представляются в формате PNG – Portable Network Graphics.

Прогностический центр Oceanweather Inc. (США) поместил первые графические данные о волнении на весь мировой океан на своем Интернет-сайте, открытом в 1994 году. В настоящее время он дважды в сутки передает глобальные прогнозы элементов ветра и волнения на 10 суток вперед. Эти

сведения в сеточном формате доступны через электронную почту и могут использоваться в разработанных этой фирмой программных продуктах для судов: *Системе для отображения данных погоды* (OBS – Oceanweather Display System), *Системе для оперативного прогнозирования тропических циклонов* (CYCLOPS – Tropical Cyclone Operational Prediction System), *Системе для оптимизации пути и обеспечения безопасности* (VOSS – Vessel Optimization & Safety System).

Гидрометцентр России и Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) являются головными организациями по разработке Единой системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО). Эта работа начата в 1999 году и рассчитана на десять лет. Одной из задач ЕСИМО является обслуживание потребителей данными и информационной продукцией в виде, удобном для компьютерной обработки.

Другие метеоцентры. Высококачественные цифровые прогностические данные о ветре и волнении предоставляют *Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды* (ECMWF - European Center for medium-range weather forecast), *Метеорологическая организация Великобритании* (UK's MET Office), *Японская метеорологическая ассоциация* (Japan's JMA), *Океанографический центр военно-морского флота США* (FNMOC - US Navy's Fleet numerical oceanographic Center), центр *Neptune* метеослужбы Франции (Meteo-France) и ряд других. ECMWF предсказывает погоду на десять суток вперед и передает сеточные данные о ветре, волнении, температуре воздуха, давлении, поверхностных течениях с разрешением 1,5⁰. Более подробная информация об этом центре и его продукции может быть найдена на сайте <http://www.ecmwf.int>.

Сети связи для передачи электронных данных на суда. В электронном виде информационная продукция Гидрометцентров может передаваться на суда, находящиеся в любой точке Мирового океана, только через спутниковые системы связи. Из них можно назвать Inmarsat, Iridium, Globalstar, Thuraya, Emsat, I-CO, Celsat, ECCO, Ellipso, ACeS, Spaceway и др. Для их использования на судне необходимо

иметь специальные терминалы. Стоимость спутниковой связи довольно высока. Дешевый и глобальный доступ к WWW через спутниковую связь для мореплавателей планируется обеспечить в ближайшем будущем (5–7 лет). Из систем спутниковой связи на современном этапе требованиям морских пользователей в наибольшей, по-видимому, степени отвечают Инмарсат, Иридиум, Глобалстар.

ИНМАРСАТ создавалась специально для целей мореплавания. Ее космический сегмент состоит из 11 геостационарных спутников, а зона обслуживания включает районы от 75⁰N до 75⁰S. Полярные районы Инмарсат не покрывает. Инмарсат обеспечивает голосовую связь, передачу факсов, телексов, электронной почты и доступ к сети Интернет. Ранее Инмарсат обслуживал преимущественно морской рынок. За последние годы его пользователями стали спасательные организации и министерства по чрезвычайным ситуациям, транспортные компании, авиалинии и органы управления воздушным движением, работники государственных и частных организаций. Инмарсат предоставляет несколько видов обслуживания пользователей.

Inmarsat-C обеспечивает телексную связь и низкоскоростную передачу данных (600 бит/сек) на основе метода хранения и последующей передачи через всенаправленную антенну. Инмарсат-C представляет услуги электронной почты через конкретную наземную станцию. Терминалы этой системы имеются на каждом, удовлетворяющем требованиям GMDSS судне. Они могут иметь в своем составе приемник GPS или подсоединяться к нему.

Inmarsat mini-M предоставляет услуги связи: телефонию, передачу данных, факсимильные сообщения, электронную почту. Разработаны терминалы для использования на морском, речном, авиационном, автомобильном, железнодорожном транспорте, а также модели для стационарного применения в отдаленных районах и сельских местностях. Тарифы на услуги связи этой службы самые низкие в Инмарсат.

Inmarsat M4 обеспечивает высокоскоростную передачу данных (до 64 кбит/сек) с помощью портативных терминалов весом около 4 кг. Помимо этого предоставляет традиционный

набор услуг: телефония 4,8 кбит/сек, факсимильная связь, передача данных 2,4 кбит/сек.

Inmarsat Fleet предназначен для удовлетворения коммуникационных нужд судов различных типов. Новой услугой здесь является высококачественная связь по Цифровой сети с интеграцией служб (ISDN) со скоростью 64 кбит/с, совмещенная с глобальной Мобильной системой передачи пакетных данных (MPDS). Эта услуга может быть использована для обновления в реальном времени навигационных карт и гидрометеорологической информации, проведения видеоконференций и для других целей. MPDS является идеальным решением для передачи небольших объемов данных в кратчайшие сроки и обеспечивает работу экипажа с электронной почтой, постоянную связь с Интернетом или внутренней сетью компании, а также доступ к корпоративным базам данных практически из любой точки Земного шара. Технологии MPDS и ISDN позволяют внедрять телеметрические системы мониторинга груза и оборудования.

ИРИДИУМ является первой всемирной спутниковой системой мобильной персональной связи на базе низкоорбитальных спутников. Она находится в эксплуатации с 1998 года и способна успешно обеспечивать связь с объектами, находящимися в самых отдаленных районах Земного шара, включая воздушное пространство, океанские зоны и многочисленные регионы, в которых в данный момент отсутствуют всякие системы связи. Иридиум предлагает уникальные услуги всемирного пейджинга, с возможностью получения сообщений в любой точке земного шара независимо от наличия местных пейджинговых операторов. В качестве самостоятельной или дополнительной услуги пейджинг Иридиум позволяет абонентам получать буквенно-цифровые сообщения на одном из 13 языков, поддерживаемых системой, в любом месте планеты.

Иридиум включает сеть из 66 спутников. Они находятся на шести близких к полярным орбитах (наклон к экватору $86,4^{\circ}$) с высотой 780 км. Период обращения спутников – 100 мин. 28 с. Телефон Иридиум дает возможность общения с абонентами в любой точке мира и связи с ними через Интернет. Система

обеспечивает цифровую голосовую и факсимильную связь, передачу данных со скоростью 2,4 кбит/с. Для соединений Интернет скорость передачи данных – до 10 кбит/с. Иридиум позволяет посылать факсимильные сообщения с обычного персонального компьютера.

Стоимость телефона этой системы в 2003 г. составляла от 900 до 1200\$, а минуты разговора: 1,4 ÷ 3,0\$. Низкая стоимость и компактность бортового устройства системы Иридиум, возможность передачи различных видов данных, использования Интернет, низкая цена минуты связи, делают эту систему перспективной для применения на судах и для других приложений.

ГЛОБАЛСТАР является всемирной системой связи на базе низкоорбитальных спутников, которая расширяет возможности сотовых сетей, взаимодействуя с наземными сетями связи разных видов. Работает с октября 1999 года. Пользователи системы могут осуществлять вызовы в самых отдаленных и труднодоступных районах территории Земли в диапазоне широт от 70°S до 70°N. Глобалстар предлагает следующие виды услуг: *подвижная и стационарная телефония; асинхронная передача данных со скоростью 9600 бит/с (Internet, email, FTP, P2P); позиционирование с точностью до 300 м.*

Созвездие системы включает 48 спутников, расположенных по шесть на восьми орбитах. По отношению к Иридиуму Глобалстар является конкурирующей системой. К ее достоинствам относятся: экономичность; высокое качество и надежность связи; работа в неблагоприятных условиях; быстрое установление соединений (менее 10 сек); кодовый доступ, предотвращающий возможность несанкционированного прослушивания линии связи; малая стоимость разговора (минута связи 1\$); и ряд других.

МОБИЛЬНЫЕ СОТОВЫЕ СЕТИ. Для передачи информации на судовые компьютеры могут использоваться и наземные сети мобильной связи. Они не имеют глобального покрытия и обслуживают только прибрежные районы. Одним из таких средств является сотовый телефон. Максимальная скорость передачи информации для обычной сотовой связи

составляет 14,4 кбит/с. Ряд сервисных провайдеров сотовой службы обеспечивают улучшенное обслуживание со скоростями от 56 до 144 кбит/с. Этот вид коммуникации целесообразно использовать для обеспечения данными о погоде малых судов, ограниченных в средствах связи.

5. Теоретические основы расчета мореходности

Существует три основных направления получения значений показателей мореходности: измерение, вычисление по данным о ветре и волнении, измерение и вычисление. Наиболее эффективным является третье направление. Для оценки, прогноза и оптимизации мореходности в АСКМ наряду с измерениями параметров реакции судна на волнение широко используются расчетные методы. Они базируются на трудах многих ученых: А.Н.Крылова, С.Н.Благовещенского, В.Г.Власова, Ю.Л.Воробьева, Л.М.Ногида, Ю.В.Ремеза, В.Г.Сизова, Г.Е.Павленко, М.Д. Хаскинда, И.К.Бородая, Д.В.Кондрикова, В.Б.Липиса, В.В.Луговского, В.А.Некрасова, Ю.И.Нечаева, Ю.А.Нецветаева, Неймана, Конолли, Льюиса, Очи, Тасаки и других. Алгоритмы расчета параметров мореходности выгодно дополняют измерительную аппаратуру АСКМ. С их помощью повышается точность и надежность оперативных оценок безопасности судна, прогнозируются параметры качки, обеспечивается нахождение элементов движения корпуса и нагрузок на нем в тех местах судна, где невозможно установить измерительные устройства, и решаются другие задачи.

Для вычисления реакции судна на ветроволновые воздействия в АСКМ обычно используется метод плоских сечений, называемый за рубежом Strip Theory. Базовые принципы этой теории были впервые опубликованы М.Д. Хаскинсом, разрабатывались Салвенсеном, Такком и Фалтинсеном. Для ее формирования большое значение имели труды А.З.Салькаева, Я.М.Элиса, Урселла, Тасаи, Франка, Кейла, Неймана, Икеда и других исследователей. В теории плоских сечений предполагается, что проблема движения судна на волнении является линейной или может быть линеаризована. Для вывода уравнений, связывающих параметры мореходности с волновым профилем, судно разделяется на 20–30 поперечных секций, для которых рассчитываются гидромеханические коэффициенты и возмущающие волновые нагрузки. Для

получения трехмерной модели двумерные значения соответствующих характеристик численно интегрируются по длине судна. Параметры движения корпуса судна на волнении находятся путем решения дифференциальных уравнений в частотной области.

Метод плоских сечений позволяет достаточно точно предсказывать поведение на волнении морских судов, у которых отношение длины к ширине больше трех и число Фруда не слишком велико. На его основе создано много компьютерных программ для расчета характеристик мореходности, которые нашли применение, как в судостроении, так и в судовождении. Несмотря на имеемые ограничения, этот метод остается пока наиболее часто используемым практическим средством расчета параметров реакции судна на волновые воздействия.

5.1. Программные средства для расчетов параметров мореходности

Для теоретической оценки и предсказания реакции судна на ветроволновые воздействия созданы специальные пакеты программ. Примерами являются программные продукты: «SEAWAY» Дельфтского университета технологии, «Seakeeper» Австралийского морского инженерного исследовательского центра при Университете технологии Западной Австралии, «VisualSMP» Военно-морских сил США. Охарактеризуем кратко только первые программные средства, так как другие имеют с ними много общего. Программа «SEAWAY» разработана Джоаном Джоурни (J.M.J.Journee) на основе метода плоских сечений и позволяет:

- *рассчитать для разных загрузок судна на тихой воде водоизмещение, координаты центра величины, метацентрические высоты, величину смоченной поверхности корпуса, вертикальные перерезывающие силы, избегающие моменты и другие характеризующие состояние судна величины;*
- *найти резонансные периоды основных видов качки;*
- *рассчитать волновые силы и моменты;*

- *вычислить абсолютные и относительные угловые и линейные перемещения, скорости, ускорения элементов корпуса судна на волнении различной бальности;*
- *определить среднее дополнительное сопротивление движению, вызванное волнением и ветром;*
- *рассчитать перерезывающие силы, изгибающие и крутящие моменты для волнения различной бальности;*
- *использовать различные спектральные модели нерегулярного волнения: Неймана, Бретшнейдера, Хассельмана и других авторов, включая и спектры, полученные в результате измерений параметров морского волнения с помощью специальных средств;*
- *оценить с учетом спектров волнения характеристики реакции судна, такие как энергетические спектры, значительные амплитуды и средние периоды качки;*
- *найти вероятности заливаемости, слеминга, разгона гребного винта и выполнить другие расчеты.*

Программа «SEAWAY» предназначена для использования в различных областях (проектирование судов, анализ аварий, обучение, бортовые системы). Первый ее вариант под DOS был создан Джоурнии еще в конце восьмидесятых годов двадцатого века. Последняя DOS-версия вышла в 2002 году. В 2003 году Джоан Джоурнии совместно с Леоном Адегистом разработал новую версию «SEAWAY» под Windows.

Программные средства «SEAWAY» были закуплены многими судостроительными, исследовательскими организациями и учебными заведениями. На судах этот продукт используется уже более десяти лет. Результаты применения «SEAWAY» показали, что это один из лучших коммерчески доступных программных пакетов для расчета мореходности. Его база данных включает более 120 форм корпусов судов. Параметры корпуса, прототипа которого нет в базе данных, могут быть заданы и записаны в базу. При расчетах по программе можно учитывать различные эффекты, влияющие на мореходность: свободные поверхности в танках и ряд других.

Используемые в программных средствах расчетные методы для оценки мореходности довольно сложны. Судоводителю нет

необходимости знать их досконально. Поэтому ниже эти методы охарактеризованы упрощенно.

5.2. Линейная динамическая система и ее частотные характеристики

5.2.1. Понятие линейной динамической системы

Определение линейной системы. При практических расчетах параметров качки судно обычно считается линейной динамической системой, преобразующей процесс волнения в процесс качки. Преобразуемый процесс в системе называется *входным*, а получаемый в результате преобразования – *выходным*. Главное, что определяет динамическую систему, это зависимости, связывающие ее входные и выходные величины. Предполагая для простоты, что входной X и выходной Y сигнал один, систему можно представить обобщенной схемой (рис. 5.1), на которой символом W обозначен оператор преобразования входной величины в выходную. Эти величины системы являются функциями времени: $X = X(t)$, $Y = Y(t)$.

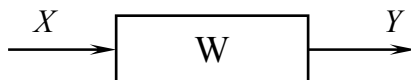


Рис. 5.1. Обобщенное представление динамической системы

Динамическая система называется линейной, когда связь между ее входной и выходной величинами описывается линейным дифференциальным уравнением. В общем случае это уравнение имеет следующий вид:

$$a_n \frac{d^n Y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} Y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dY}{dt} + a_0 Y = b_m \frac{d^m X}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} X}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dX}{dt} + b_0 X. \quad (5.1)$$

Здесь a_0, a_1, \dots, a_n и b_0, b_1, \dots, b_m – коэффициенты системы. Они могут быть постоянными величинами либо

функциями времени. Ниже рассматриваются только системы с постоянными коэффициентами.

В сокращенной форме дифференциальное уравнение (5.1) можно записать так

$$\sum_{p=0}^n a_p \frac{d^p Y}{dt^p} = \sum_{k=0}^m b_k \frac{d^k X}{dt^k}. \quad (5.2)$$

Основное свойство линейных систем. Линейные системы обладают свойством *аддитивности*, т.е. для них справедлив *принцип наложения (суперпозиции)*. Согласно ему реакция системы на любую комбинацию внешних воздействий равна сумме реакций на каждое из этих воздействий в отдельности. Отсюда следует, что реакция $Y(t)$ линейной системы (5.2) на входной сигнал $X(t)$, состоящий из суммы компонентов $x_j(t)$, равна сумме реакций $y_j(t)$ системы на отдельные $x_j(t)$ составляющие входного сигнала:

$$Y(t) = \sum_j y_j(t). \quad (5.3)$$

Принцип суперпозиции широко используется при исследованиях и анализе линейных систем. Входные сигналы систем могут быть самыми разнообразными. Ясно, что вид решения уравнения (5.2) зависит от характера изменения во времени входного сигнала. Чем сложнее по форме входной сигнал, тем труднее решить уравнение системы. Учитывая свойство аддитивности, любой самый сложный входной сигнал можно представить в виде суммы простых составляющих (ступенчатых, импульсных, или гармонических) и получить выходную величину как сумму реакций системы на элементарные компоненты. Благодаря этому исследование линейной системы может быть сведено к анализу ее реакции на входные сигналы простой формы. При изучении вопросов мореходности удобным оказывается использование в качестве компонент входного сигнала элементарных гармоник (синусоид). *Когда входной сигнал линейной системы простая гармоника, то в установившемся режиме на выходе этой системы также будет синусоидальный сигнал с частотой*

входного, но с другой амплитудой и фазой. Представление сигналов системы суммой гармоник позволяет значительно упростить анализ линейных систем.

Основные виды сигналов динамических систем.

Реальные входные и выходные величины линейной системы описываются двумя видами моделей: детерминированной и недетерминированной (стохастической, вероятностной). *Детерминированные* сигналы – это функции времени конкретного вида. *Недетерминированные* сигналы являются случайными процессами, которые только при реализации принимают тот или иной конкретный вид, причем заранее он неизвестен.

5.2.2. Линейная система с детерминированными сигналами

Изображение гармоника на комплексной плоскости. Для упрощения анализа линейной системы ее входные и выходные величины представляются в виде суммы гармоник. Математически гармоника $u(t)$ описывается выражением:

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega_u t + \Psi_u). \quad (5.4)$$

где \hat{u} – амплитуда гармоники; Ψ_u – начальная фаза; ω_u – угловая частота.

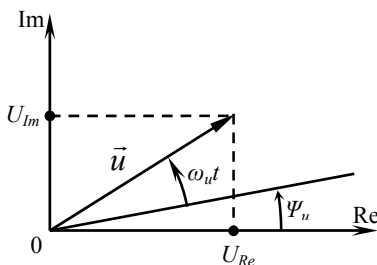


Рис. 5.2. Изображение гармоника на комплексной плоскости

Вместо (5.4) используют также изображение гармоника на плоскости комплексных чисел с действительной (Re) и мнимой (Im) осями (рис. 5.2). На этой плоскости гармонический сигнал $u(t)$ представляется вектором \vec{u} длиной \hat{u} , вращающимся с

угловой скоростью ω_u относительно начала координат. Изображение гармоник $u(t)$ на плоскости комплексных чисел обозначим как $u(i\omega_u)$, где i – мнимая единица. Как любое комплексное число, $u(i\omega_u)$ можно записать в алгебраической, тригонометрической и показательной формах. **В алгебраическом виде** $u(i\omega_u)$ представляется суммой действительной и мнимой компонент:

$$u(i\omega_u) = U_{\text{Re}} + i \cdot U_{\text{Im}}. \quad (5.5)$$

Тригонометрическая форма $u(i\omega_u)$ получается путем замены в (5.5) $U_{\text{Re}} = \hat{u} \cos \varphi$, $U_{\text{Im}} = \hat{u} \sin \varphi$, где $\varphi = \omega_u t + \Psi_u$:

$$u(i\omega_u) = \hat{u}(\cos \varphi + i \sin \varphi). \quad (5.6)$$

Для получения **показательной формы** в (5.6) учитывается, что $\cos \varphi = \frac{1}{2}(e^{i\varphi} + e^{-i\varphi})$, а $\sin \varphi = \frac{1}{2i}(e^{i\varphi} - e^{-i\varphi})$:

$$u(i\omega_u) = \hat{u}e^{i\varphi} = \hat{u}e^{i(\omega_u t + \Psi_u)}. \quad (5.7)$$

Комплексно-частотное разложение детерминированных сигналов. Допустим, что сигналы на входе и выходе линейной системы являются детерминированными и относятся к функциям, удовлетворяющим условиям Дирихле. С помощью преобразования Фурье любой такой сигнал $Z(t)$ можно заменить суммой $Z(\omega)$ гармоник с частотами от нуля до бесконечности:

$$Z(\omega) = \int_{\omega=0}^{\infty} \hat{u}(\omega) \sin[\omega t + \Psi(\omega)]. \quad (5.8)$$

Выражение $Z(\omega)$ называется **частотным разложением** сигнала $Z(t)$. Если в (5.8) использовать изображения гармоник на комплексной плоскости, то полученное выражение $Z(i\omega)$ будет **комплексно-частотным разложением** $Z(t)$ – изображением $Z(t)$ в комплексно-частотной области. Функцию $Z(t)$ в этом случае называют **оригиналом** $Z(i\omega)$. Разложение

$Z(i\omega)$ можно записать в алгебраической или в показательной форме:

$$Z(i\omega) = Z_{\text{Re}}(\omega) + i \cdot Z_{\text{Im}}(\omega) = \widehat{Z}(\omega) \cdot e^{i\varphi_Z(\omega)}; \quad (5.9)$$

где $\varphi_Z(\omega) = \omega t + \Psi_z(\omega)$; $\widehat{Z}(\omega)$ – амплитуды компонентов сигнала с частотами от нуля до бесконечности.

Анализируя (5.9), нетрудно установить, **что взятие производной от оригинала $Z(t)$ сводится к умножению изображения $Z(i\omega)$ на $(i\omega)$:**

$$\frac{dZ(t)}{dt} \Rightarrow i\omega Z(i\omega). \quad (5.10)$$

Представление линейной системы в комплексно-частотной области. Обозначим комплексно-частотные изображения входного X и выходного Y сигналов в линейной системе (рис. 5.1) как $X(i\omega)$ и $Y(i\omega)$, а связывающий их оператор, как $W(i\omega)$:

$$Y(i\omega) = W(i\omega)X(i\omega). \quad (5.11)$$

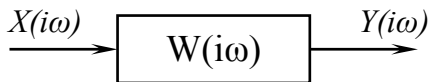


Рис. 5.3. Линейная система в комплексно-частотной области

В результате получим представление линейной системы в комплексно-частотной области (рис. 5.3). Оператор $W(i\omega)$ называется *комплексно-частотной передаточной функцией* или *амплитудно-фазовой частотной характеристикой* (АФЧХ) системы.

Комплексно-частотная передаточная функция системы определяется как отношение выходной величины системы к входной при условии, что входная величина изменяется по гармоническому закону с различными частотами от 0 до ∞ :

$$W(i\omega) = W_{y/x}(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{X(i\omega)}. \quad (5.12)$$

Учитывая в выражении (5.2) свойство (5.10), получаем:

$$W(i\omega) = \frac{\sum_{k=0}^m b_k (i\omega)^k}{\sum_{p=0}^n a_p (i\omega)^p}. \quad (5.13)$$

Таким образом, при переходе в комплексно-частотную область связь между входным и выходным сигналами становится алгебраической, что упрощает анализ линейной системы. Учитывая в (5.13), что $i^2 = -1$, и избавляясь от иррациональности в знаменателе, функцию $W(i\omega)$ запишем в алгебраической форме:

$$W(i\omega) = W_{\text{Re}}(\omega) + i \cdot W_{\text{Im}}(\omega). \quad (5.14)$$

Амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики системы. Изображения сигналов системы выразим в виде (5.8):

$$X(i\omega) = \widehat{X}(\omega)e^{i\varphi_x(\omega)}; \quad Y(i\omega) = \widehat{Y}(\omega)e^{i\varphi_y(\omega)}. \quad (5.15)$$

Здесь $\widehat{X}(\omega)$, $\widehat{Y}(\omega)$ – амплитуды компонентов входного и выходного сигналов системы; $\varphi_x(\omega) = \omega t + \Psi_x(\omega)$; $\varphi_y(\omega) = \omega t + \Psi_y(\omega)$. Учитывая (5.15), передаточную функцию $W(i\omega)$ запишем в показательной форме:

$$W(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{X(i\omega)} = A(\omega)e^{i\varphi(\omega)}. \quad (5.16)$$

В этом выражении

$$A(\omega) = A_{y/x}(\omega) = \frac{\widehat{Y}(\omega)}{\widehat{X}(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \varphi_y(\omega) - \varphi_x(\omega). \quad (5.17)$$

Функции $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ называют соответственно амплитудно-частотной (АЧХ) и фазово-частотной (ФЧХ) характеристиками линейной динамической системы.

Амплитудно-частотная характеристика равняется отношению амплитуды выходной величины к амплитуде входной при условии, что входная величина изменяется по гармоническому закону с различными частотами от 0 до ∞ .

Фазово-частотная характеристика представляет собой разность фаз выходной и входной величины при условии, что входная величина изменяется по гармоническому закону с различными частотами от 0 до ∞ .

Через составляющие $W_{\text{Re}}(\omega)$ и $W_{\text{Im}}(\omega)$ передаточной функции (5.14) АЧХ и ФЧХ линейной системы могут быть найдены по формулам:

$$A(\omega) = |W(i\omega)| = \sqrt{W_{\text{Re}}^2 + W_{\text{Im}}^2}; \quad (5.18)$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{W_{\text{Im}}(\omega)}{W_{\text{Re}}(\omega)}. \quad (5.19)$$

Амплитудно-частотная характеристика является **модулем**, а фазовая частотная характеристика – **аргументом** передаточной функции.

5.2.3. Правила получения частотных характеристик линейных систем

Приведем ряд правил, используемых при нахождении частотных характеристик линейных динамических систем.

Правило 1. Чтобы получить выражение комплексно-частотной передаточной функции $W(i\omega)$ по уравнению системы (5.2), необходимо в нем заменить оператор производной на $(i\omega)$, обозначения X входного и Y выходного сигналов их изображениями $X(i\omega)$, $Y(i\omega)$. Затем найти отношение изображения выходного сигнала к изображению входного и привести к виду (5.14) или (5.16).

После этого по формулам (5.18) и (5.19) можно найти амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристики динамической системы.

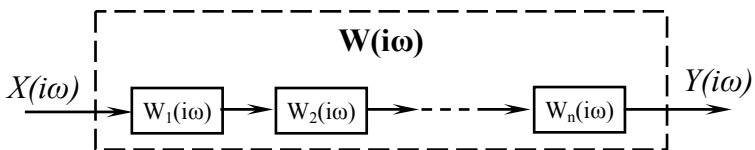


Рис. 5.4. Последовательное соединение звеньев

Правило 2. Когда линейная система представляет собой последовательное соединение звеньев (рис. 5.4) с известными передаточными функциями $W_k(i\omega)$, то передаточная функция $W(i\omega)$ такой системы равна произведению передаточных функций звеньев:

$$W(i\omega) = W_1(i\omega) \times W_2(i\omega) \times \dots \times W_n(i\omega) = \prod_{k=1}^n W_k(i\omega). \quad (5.20)$$

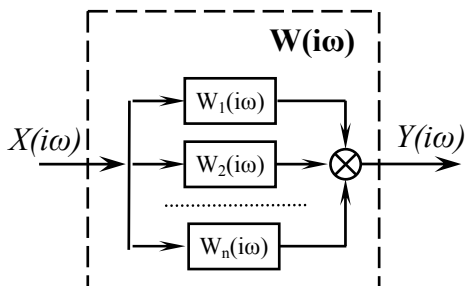


Рис. 5.5. Параллельное соединение звеньев

Правило 3. Если линейная система представляет собой параллельное соединение звеньев (рис. 5.5) с известными передаточными функциями $W_k(i\omega)$, то передаточная функция $W(i\omega)$ такой системы равна сумме передаточных функций звеньев:

$$W(i\omega) = W_1(i\omega) + W_2(i\omega) + \dots + W_n(i\omega) = \sum_{k=1}^n W_k(i\omega). \quad (5.21)$$

В заключение следует отметить, что достоинством частотных характеристик является и то, что они могут быть определены экспериментальным путем. При этом необязательно знать математическое описание системы.

5.2.4. Линейная динамическая система с недетерминированными сигналами

Основные положения. Допустим, что входным сигналом линейной системы является нормальный случайный стационарный процесс. Примем для простоты, что его математическое ожидание равно нулю. В теории случайных функций доказаны следующие положения.

1. Когда входным сигналом линейной динамической системы является стационарный процесс $X(t)$, то он может быть представлен комплексно-частотным разложением:

$$X(i\omega) = \sum_{j=1}^{\infty} X_{0j} e^{i(\omega_j t + \Psi_{Xj})}; \quad (5.22)$$

где X_{0j} – случайные некоррелированные величины, математические ожидания которых равны нулю.

Изображение $Y(i\omega)$ выходного сигнала $Y(t)$ этой системы можно рассматривать как сумму компонентов, являющихся реакцией системы на отдельные составляющие входного сигнала:

$$Y(i\omega) = \sum_{j=1}^{\infty} Y_{0j} e^{i(\omega_j t + \Psi_{Yj})}; \quad (5.23)$$

где Y_{0j} – случайные некоррелированные величины, математические ожидания которых равны нулю.

2. При преобразовании случайного процесса линейной системой законы распределения не изменяются. Если на линейную систему воздействует нормальный стационарный процесс, то на ее выходе получается также нормальный стационарный процесс. Отсюда следует, что основные виды качки являются нормальными стационарными процессами, а их амплитуды распределены по закону Релея.

3. Зависимость между изображениями входного и выходного стационарных процессов в линейной системе описывается комплексно-частотной передаточной функцией,

полученной для детерминированных входных и выходных сигналов:

$$Y(i\omega) = W(i\omega) \cdot X(i\omega). \quad (5.24)$$

4. Если в линейной системе входной сигнал имеет спектральную плотность $S_x(\omega)$, то спектр $S_y(\omega)$ выходного сигнала будет равен:

$$S_y(\omega) = A^2(\omega) \cdot S_x(\omega); \quad (5.25)$$

где $A(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика системы, полученная для детерминированных сигналов.

5. Когда случайный стационарный процесс имеет производную, то для получения ее спектральной плотности достаточно умножить спектр процесса на ω^2 :

$$S_{\dot{y}}(\omega) = \omega^2 S_y(\omega); \quad S_{\ddot{y}}(\omega) = \omega^4 S_y(\omega). \quad (5.26)$$

6. Когда ординаты случайного колебательного стационарного процесса распределены по нормальному закону и ширина его спектра меньше 0.4, то амплитуды этого процесса подчиняются закону Релея.

Выражение вида (5.22), (5.23) называются *спектральным* или *комплексно-частотным изображением случайного стационарного процесса*. Оно является частным случаем канонического разложения этого процесса, когда в качестве координатных функций используются гармоники.

Числовые характеристики выходного сигнала. По спектральной плотности $S_y(\omega)$ сигнала $Y(t)$, определяется ряд его важных числовых характеристик.

Дисперсия процесса $Y(t)$ равняется спектральному моменту нулевого порядка:

$$\sigma_y^2 = m_{0,y} = \int_0^{\infty} S_y(\omega) d\omega. \quad (5.27)$$

Когда амплитуды стационарного сигнала $Y(t)$ распределены по закону Релея, то вероятность $\Pr(C)$ того, что

амплитуда \hat{Y} этого процесса превысит допустимое значение Y_δ , может быть определена по формуле:

$$\Pr(C) = \Pr(\hat{Y} > Y_\delta) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{Y_\delta}{\sigma_Y} \right)^2}. \quad (5.28)$$

Количество N_δ превышений амплитудой \hat{Y} допустимого уровня Y_δ за промежутки времени t равно:

$$N_\delta = \Pr(C) \frac{t}{2\pi \sqrt{m_{0y}} / m_{2y}} = \frac{t \sigma_{\dot{y}}}{2\pi \sigma_y} \Pr(C) = \frac{t}{\bar{\tau}_y} \Pr(C); \quad (5.29)$$

$$\text{где } m_{2y} = \sigma_{\dot{y}}^2 = \int_0^\infty \omega^2 S_y(\omega) d\omega; \quad \bar{\tau}_y = 2\pi \frac{\sigma_y}{\sigma_{\dot{y}}} - \text{средний}$$

период процесса $Y(t)$.

5.3. Математическое описание качки судна

5.3.1. Общие сведения

При сильном шторме зависимость между волновым воздействием и параметрами реакции на него судна нелинейная. Однако при более благоприятных состояниях моря вплоть до значительного шторма, для крупных судов предположение о линейности такой зависимости в общем случае является приемлемым (за исключением бортовой качки, где нелинейность демпфирующего эффекта значительна). К настоящему времени создана адекватная теория качки, учитывающая нерегулярность волнения, размеры судна, его осадку, форму обводов корпуса, распределение гидродинамических давлений и другие существенные факторы. Все виды качки, как правило, существуют одновременно и влияют друг на друга. Полученная при строгом подходе система из шести описывающих качку уравнений является взаимосвязанной и нелинейной. Однако, учитывая, что в большинстве условий эксплуатации нелинейность проявляется

мало, что наиболее подходящим математическим аппаратом для изучения качки на нерегулярном волнении оказались методы спектральной теории стационарных процессов, взаимосвязанную нелинейную систему уравнений, описывающую процесс колебаний судна, заменяют линейной. При упрощенной оценке мореходности взаимосвязанную линейную систему качки разделяют на уравнения отдельных видов колебаний судна и используют из них уравнения бортовой, килевой и вертикальной качки. Следует отметить, что на практике обычно пренебрегают только продольно-горизонтальной качкой и разделяют линейную систему из шести уравнений на две: одну из трех взаимосвязанных уравнений (поперечно-горизонтальные, бортовые колебания и рыскание) и вторую из двух уравнений (вертикальная и килевая качка).

Для обеспечения эффективности спектральных оценок *приведение нелинейных уравнений качки к линейным* выполняется с помощью метода статистической линеаризации. Он основан на замене качающегося судна как нелинейной динамической системы эквивалентной линейной системой. Теоретические аспекты метода статистической линеаризации содержатся, например, в работах А.В.Герасимова.

При разделении уравнений учитываются закономерности отдельных видов качки, малое влияние килевых, продольно-вертикальных колебаний и рыскания на бортовую качку для достаточно удлиненных симметричных корпусов и ряд других аспектов. При упрощенной оценке мореходности по основным видам качки судно может считаться типичным колебательным звеном, описываемым линейным дифференциальным уравнением второго порядка.

Все виды качки являются нормальными случайными стационарными процессами. При линейности судна, как объекта качки, это следует из нормальности и стационарности волнения. Этот факт также подтвержден результатами многочисленных наблюдений качки судов при мореходных испытаниях.

По линейным дифференциальным уравнениям, описывающим колебания судна на волнении, определяются частотные характеристики судна, которые используются для расчета параметров качки.

5.3.2. Линейная модель бортовой качки

Моменты сил. При бортовой качке на любое судно действуют моменты внешних сил (восстанавливающий – M_B , демпфирующий – M_D , кренящий – M_K) и инерционный момент – M_I . Они показаны на рис. 5.6, где C – центр величины судна, $D = \gamma \nabla$ – весовое водоизмещение (γ – удельный вес воды; ∇ – объемное водоизмещение), h_θ – поперечная метацентрическая высота.

Восстанавливающий момент обусловлен входящими в воду и выходящими из нее клиновидными объемами aob и $a'ob'$ (см. рис. 5.6) при наклонении судна относительно невозмущенного уровня моря. Этот момент при угле крена θ определяется формулой:

$$M_B = -Dh_\theta \sin \theta \approx -Dh_\theta \theta. \quad (5.30)$$

Знак «минус» в формуле (5.30) берется потому, что восстанавливающий момент противоположен по знаку углу наклона θ и действует в сторону его уменьшения. Следует отметить, что в действительности восстанавливающий момент нелинеен (только при малых наклонениях судна можно считать метацентрическую высоту h_θ постоянной и $\sin \theta = \theta$).

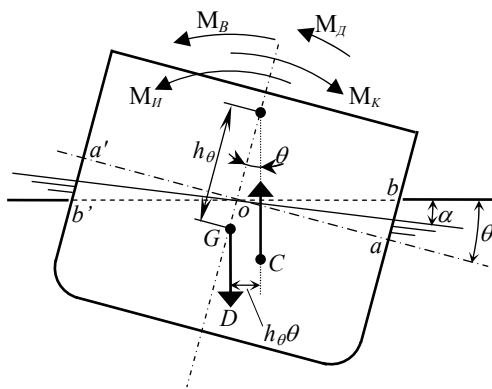


Рис. 5.6. Моменты, действующие на судно при бортовой качке

Демпфирующий момент M_D имеет сложную зависимость $M_D(\dot{\theta})$ от угловой скорости $\dot{\theta}$ бортовой качки судна. Он противоположен по знаку $\dot{\theta}$ и направлен в сторону ее снижения. В линейной теории качки момент M_D считается пропорциональным $\dot{\theta}$:

$$M_D = -K_{\theta 1} \dot{\theta}; \quad (5.31)$$

где $K_{\theta 1}$ – коэффициент линейного закона изменения M_D .

Экспериментальные исследования, проведенные многими авторами, показывают, что в действительности функция $M_D(\dot{\theta})$ близка к квадратичной:

$$M_D = M_D(\dot{\theta}) = -K_{\theta 2} \dot{\theta} \cdot |\dot{\theta}|. \quad (5.32)$$

Здесь $K_{\theta 2}$ – коэффициент квадратичной функции M_D .

Нелинейность функции $M_D(\dot{\theta})$ является существенной. Она должна тем или иным образом учитываться при использовании спектральных методов расчета качки, основанных на линейной теории. Одним из способов такого учета является приведение выражения (5.32) к виду (5.31) по условию равенства работ, совершаемых демпфирующим моментом при линейном и квадратичном законах его изменения. В результате применения этого способа получается следующее соотношение [12]:

$$K_{\theta 1} = \frac{8}{3\pi} K_{\theta 2} \theta_0 \omega \approx \frac{8}{3\pi} K_{\theta 2} \theta_0 \omega_{\theta}. \quad (5.33)$$

Кренящий момент. Если бы при курсовом угле волнения $q = 90^0$ ширина и осадка судна были бы пренебрежимо малы с длиной морской волны (угол волнового склона α по ширине судна и его осадке был бы постоянным), то кренящий момент M_K мог бы рассматриваться как приращение восстанавливающего момента от изменения положения поверхности воды на угол α (см. рис. 5.6): $M_K = Dh_{\theta} \alpha$. В действительности размеры судна соизмеримы с длиной волны.

Значение угла волнового склона меняется по осадке и ширине судна, а также в зависимости от курсового угла волнения. Это обстоятельство в формуле кренящего момента учитывается с помощью редуccionного коэффициента бортовой качки χ_{θ} :

$$M_K = Dh_{\theta} \chi_{\theta} \alpha. \quad (5.34)$$

Редуccionный коэффициент зависит от курсового угла q волнения и соотношения длины λ морской волны с шириной B и осадкой T судна. При косом набегании волны составляющая α_y угла волнового склона, вызывающая накренивание судна, уменьшается в зависимости от угла q приближенно по синусоидальному закону ($\alpha_y \approx \alpha \sin q$). Отсюда следует, что:

$$\chi_{\theta} \approx \chi_{\theta\perp} \sin q.$$

В этом выражении $\chi_{\theta\perp}$ – редуccionный коэффициент бортовой качки, соответствующий $q = 90^{\circ}$. Значение $\chi_{\theta\perp}$ может находиться в диапазоне от единицы до нуля. При уменьшении размеров судна или при увеличении длины морской волны $\chi_{\theta\perp}$ стремится к единице. При упрощенном подходе этот коэффициент выражают через параметры $k_{\chi B}$, $k_{\chi T}$, учитывающие соизмеримость длины морской волны соответственно с шириной и осадкой судна [11]:

$$\chi_{\theta\perp} = k_{\chi B} k_{\chi T}.$$

Значения $k_{\chi B}$, $k_{\chi T}$ могут быть получены по формулам:

$$k_{\chi B} \approx 1 - \sqrt{\delta_T} (B/\lambda)^2;$$

$$k_{\chi T} \approx 0,98 - 4,5(T/\lambda)(\delta/\delta_T)^2.$$

Здесь δ – коэффициент общей полноты; δ_T – коэффициент полноты площади ватерлинии. Приближенно $\chi_{\theta\perp}$ можно также оценить по формуле А.В.Герасимова [13]:

$$\chi_{\theta\perp} = 1 - k_{\chi} \Omega.$$

В ней $k_\chi = T\rho_\theta / h_\theta$, где ρ_θ – поперечный метацентрический радиус. Для глубоководного волнения формула А.В.Герасимова принимает вид:

$$\chi_{\theta\perp} = 1 - k_\chi \omega^2 / g.$$

Момент сил инерции определяется выражением:

$$M_{II} = (I_X + \Delta I_X) \ddot{\theta}; \quad (5.35)$$

где I_X – момент инерции массы судна относительно центральной продольной оси; ΔI_X – присоединенный момент инерции относительно той же оси.

Момент инерции I_X равен произведению массы судна ($m_c = D/g$) на квадрат его радиуса инерции ρ_X относительно центральной продольной оси:

$$I_X = m_c \rho_X^2.$$

Значение ρ_X морских судов лежит в диапазоне от $0,30B$ до $0,40B$. Приблизительно этот радиус инерции может быть определен по формуле, предложенной классификационным обществом «Бюро Веритас» [20]:

$$\rho_X \approx 0,289B \left[1,0 + \left(\frac{2z_g}{B} \right)^2 \right]. \quad (5.36)$$

В этом выражении z_g – высота центра тяжести судна над килем. Для вычисления I_X могут также использоваться эмпирические формулы Павленко, Шиманского, Дуайра [12].

Присоединенный момент инерции ΔI_X морских судов лежит в диапазоне $(0,20 \div 0,35)I_X$. Чаще всего его принимают равным $0,3I_X$.

Уравнение бортовой качки. В соответствии с принципом Даламбера для составления дифференциального уравнения бортовой качки сумма внешних моментов, включая момент инерции судна, приравнивается нулю. Учитывая выражения для

инерционного, восстанавливающего, демпфирующего и кренящего моментов, получаем:

$$(I_X + \Delta I_X) \ddot{\theta} + K_{\theta 1} \dot{\theta} + Dh_{\theta} \theta = Dh_{\theta} \chi_{\theta} \alpha . \quad (5.37)$$

Разделив на $(I_X + \Delta I_X)$ правую и левую часть (5.37), приведем это уравнение к виду:

$$\ddot{\theta} + 2\mu_{\theta} \omega_{\theta} \dot{\theta} + \omega_{\theta}^2 \theta = b_{\theta} \alpha . \quad (5.38)$$

Здесь ω_{θ} – частота свободных незатухающих колебаний судна; μ_{θ} – относительный коэффициент затухания; b_{θ} – коэффициент пропорциональности. В этом уравнении **частота ω_{θ} свободных незатухающих бортовых колебаний судна** определяется выражением:

$$\omega_{\theta} = \sqrt{\frac{Dh_{\theta}}{I_X + \Delta I_X}} .$$

Ее можно рассчитать также по периоду T_{θ} свободных бортовых колебаний судна:

$$\omega_{\theta} = 2\pi / T_{\theta} . \quad (5.39)$$

В судовождении этот период приблизительно определяется по так называемой «капитанской» формуле [11]:

$$T_{\theta} = k_{\theta} B / \sqrt{h_{\theta}} . \quad (5.39,a)$$

Ниже приведены эмпирически полученные для разных типов судов значения коэффициента k_{θ} [10]:

- *крупные пассажирские суда* – $0,80 \div 0,85$;
- *средние суда* – $0,78 \div 0,80$;
- *грузовые суда в полном грузу* – $0,88 \div 0,91$;
- *нефтерудовозы с полным грузом нефти* – $0,72 \div 0,76$;
- *те же с полным грузом руды* – $0,50 \div 0,53$;
- *те же с балластом* – $0,74 \div 0,80$;
- *добывающие промысловые суда и плавучие базы* – $0,76 \div 0,82$;
- *мелкие рыболовные суда* – $0,83 \div 0,86$.

Предложены и другие способы нахождения k_{θ} . Например, для морских транспортных судов в грузу (кроме танкеров и

газовозов) значения k_θ можно выбрать в зависимости от δ/δ_T^2 и отношения высоты борта к ширине судна из табл. 5.1 [8].

Таблица 5.1. – Коэффициент k_θ

δ/δ_T^2	Отношение высоты борта к ширине судна				
	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8
0,9	0,62	0,66	0,69	0,73	0,76
1,0	0,65	0,69	0,72	0,76	0,79
1,2	0,71	0,75	0,78	0,81	0,84
1,4	0,76	0,80	0,82	0,85	0,88
1,6	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92
1,8	0,85	0,89	0,92	0,94	0,96
2,0	0,90	0,94	0,96	0,98	1,00

Относительный коэффициент затухания μ_θ в уравнении (5.38) бортовой качки редко превышает значение 0,2. Он определяется отношением:

$$\mu_\theta = \frac{K_{\theta 1}}{2\omega_\theta(I_X + \Delta I_X)} = \frac{K_{\theta 1}\omega_\theta}{2Dh_\theta}.$$

Учитывая (5.33), μ_θ можно представить выражением:

$$\mu_\theta = \frac{8}{6\pi} w_\theta \hat{\theta} \approx 0,425 w_\theta \hat{\theta}. \quad (5.40)$$

Входящее в эту формулу отношение $w_\theta = K_{\theta 2}/(I_X + \Delta I_X)$ называется *относительным коэффициентом квадратичного закона демпфирования*. Этот коэффициент (соответственно и демпфирование корпусом судна качки) растет при наличии скуловых килей и увеличении скорости хода. Для нахождения w_θ предложено несколько формул. Одна из них:

$$w_\theta = w_{\theta 0}(1 + k_{\mu V} Fr)(1 + k_{\mu S} S_{CK}). \quad (5.41)$$

В этом выражении S_{CK} – суммарная площадь скуловых килей; $k_{\mu V} = 1,5 \div 2,5$; $k_{\mu S} = 20/(LB)$; $w_{\theta 0}$ – коэффициент, который находится по одной из существующих для этой цели формул, например, по формуле С.П.Сюрко:

$$w_{\theta 0} = \sqrt[8]{T_{\theta}^2 / h_{\theta}} \cdot [(\delta - 0,75)^2 + 3(\delta_T - 0,72)^2 + 0,01(B/T)^2].$$

Коэффициент пропорциональности b_{θ} определяется выражением:

$$b_{\theta} = \omega_{\theta}^2 \chi_{\theta}. \quad (5.42)$$

5.3.3. Уравнение килевой качки

Килевые колебания судна обычно представляются упрощенным дифференциальным уравнением [10]:

$$\ddot{\psi} + 2\mu_{\psi}\omega_{\psi}\dot{\psi} + \omega_{\psi}^2\psi = b_{\psi}\alpha. \quad (5.43)$$

В этом выражении ω_{ψ} – частота свободных незатухающих колебаний судна; μ_{ψ} – относительный коэффициент затухания; b_{ψ} – коэффициент пропорциональности.

Частота свободных незатухающих килевых колебаний судна определяется выражением:

$$\omega_{\psi} = \sqrt{\frac{Dh_{\psi}}{I_Y + \Delta I_Y}};$$

где h_{ψ} – продольная метацентрическая высота; I_Y – момент инерции массы судна относительно центральной поперечной оси; ΔI_Y – присоединенный момент инерции относительно той же оси.

Продольная метацентрическая высота обычно находится по формуле [11]:

$$h_{\psi} \approx \frac{\delta_T^2 L^2}{14\delta T}.$$

Момент инерции I_Y равен произведению массы судна m_c на квадрат его радиуса инерции ρ_Y относительно центральной поперечной оси: $I_Y = m_c \rho_Y^2$. Значение ρ_Y лежит в диапазоне от $0,22L$ до $0,28L$. Обычно момент инерции I_Y рассчитывается с помощью эмпирической зависимости [13]:

$$I_Y \approx 0,07 m_c \delta_T L^2.$$

Присоединенный момент инерции ΔI_Y при упрощенном рассмотрении процесса качки считается равным моменту I_Y .

Относительный коэффициент затухания μ_ψ килевых колебаний судна больше, чем μ_θ . Он определяется соотношением:

$$\mu_\psi = \frac{K_{\psi D}}{2\omega_\psi(I_Y + \Delta I_Y)} = \frac{K_{\psi D}\omega_\psi}{2Dh_\psi}.$$

Здесь $K_{\psi D}$ – коэффициент демпфирующего момента. Зависимость демпфирующего момента $M_{\psi D}$ от угловой скорости килевой качки $\dot{\psi}$ близка к линейной: $M_{\psi D} = -K_{\psi D}\dot{\psi}$. По сравнению с бортовой качкой, движение судна при килевой и вертикальной качке демпфируется лучше.

Коэффициент пропорциональности b_ψ в уравнении (5.43) определяется выражением:

$$b_\psi = \omega_\psi^2 \chi_\psi.$$

В этой формуле χ_ψ – *редукционный коэффициент* килевой качки. Он является функцией частоты волновых гармоник и зависит от соотношения длины волны и размеров судна. Значение χ_ψ лежит в диапазоне от нуля до единицы и растет с увеличением длины морской волны. Для движущегося судна необходимо учитывать зависимость χ_ψ от курсового угла волнения. Приближенно можно считать, что

$$\chi_\psi \approx \chi_{\psi 0} \cos q;$$

где $\chi_{\psi 0}$ – редукционный коэффициент для $q = 0^0$.

5.3.4. Упрощенное описание вертикальной качки

Упрощенно процесс вертикальной качки описывается дифференциальным уравнением [10]:

$$\ddot{\zeta} + 2\mu_{\zeta}\omega_{\zeta}\dot{\zeta} + \omega_{\zeta}^2\zeta = b_{\zeta}r. \quad (5.44)$$

В этом уравнении ω_{ζ} – частота свободных незатухающих колебаний судна; μ_{ζ} – относительный коэффициент затухания; b_{ζ} – коэффициент пропорциональности.

Частота свободных незатухающих вертикальных колебаний судна равна:

$$\omega_{\zeta} = \sqrt{\frac{\gamma S}{m_c + \Delta m_c}}.$$

Здесь S – площадь ватерлинии; Δm_c – присоединенная масса. При упрощенном рассмотрении Δm_c считается равной массе судна.

Относительный коэффициент затухания μ_{ζ} превышает μ_{θ} . Он определяется соотношением:

$$\mu_{\zeta} = \frac{K_{\zeta D}}{2\omega_{\zeta}(m_c + \Delta m_c)} = \frac{K_{\zeta D}\omega_{\zeta}}{2\gamma S}.$$

Здесь $K_{\zeta D}$ – коэффициент силы $F_{\zeta D}$ сопротивления, которая практически линейно зависит от скорости вертикального перемещения судна: $F_{\zeta D} = -K_{\zeta D}\dot{\zeta}$.

Коэффициент пропорциональности b_{ζ} уравнения вертикальной качки находится по формуле:

$$b_{\zeta} = \omega_{\zeta}^2 \chi_{\zeta};$$

где χ_{ζ} – редуцированный коэффициент.

5.3.5. Переходные характеристики судна

По приведенным выше выражениям (5.38), (5.43), (5.44) нетрудно заметить, что при упрощенном подходе судно по бортовой, килевой, вертикальной качке является типичным

колебательным звеном, описываемым линейным дифференциальным уравнением второго порядка. Так как структура упрощенного математического описания основных видов качки одинакова, то аналогичными по форме будут и выражения переходных характеристик судна. Поэтому ниже методика их получения рассматривается только для бортовой качки.

Свободные затухающие колебания судна. Уравнение (5.38) без правой части описывает свободное движение судна по углу θ на тихой воде:

$$\ddot{\theta} + 2\mu_{\theta}\omega_{\theta}\dot{\theta} + \omega_{\theta}^2\theta = 0. \quad (5.45)$$

Его решение при начальных условиях $\theta(0) = \theta_H$, $\dot{\theta}(0) = 0$ и значении $0 < \mu_{\theta} < 1$ представляет процесс затухающих колебаний:

$$\theta = \hat{\theta} e^{-\mu_{\theta}\omega'_{\theta}t} \cos(\omega'_{\theta}t + \Psi_0). \quad (5.46)$$

В этом выражении:

$$\omega'_{\theta} = \omega_{\theta} \sqrt{1 - \mu_{\theta}^2}; \quad \hat{\theta} = \frac{\theta_H}{\sqrt{1 - \mu_{\theta}^2}}; \quad \Psi_0 = \arcsin \mu_{\theta}.$$

Частота свободных затухающих колебаний судна ω'_{θ} мало отличается от частоты незатухающих ($\omega'_{\theta} \approx \omega_{\theta}$), так как μ_{θ} обычно не превышает 0,2. Отсюда следует, что ω_{θ} можно считать характеристикой собственных колебаний судна на тихой воде.

Частотные характеристики судна. Ниже в общем случае при обозначении частотной характеристики системы отношением в индексе будет указываться, какие величины она связывает. Например, если входная величина системы X , а выходная Y , то обозначением амплитудно-частотной характеристики будет $A_{y/x}(\omega)$. Только когда входной величиной для судна является ордината морского волнения, знаменатель в индексе будет опускаться, т.е. $W_{\theta}(i\omega) = W_{\theta/r}(i\omega)$, $A_{\psi}(\omega) = A_{\psi/r}(\omega)$.

Учитывая, что при упрощенном подходе судно является типичным колебательным звеном, частотные характеристики которого представлены во многих литературных источниках, касающихся линейных динамических систем, нетрудно привести их и для судна. Комплексно-частотная передаточная функция $W_{\theta/\alpha}(i\omega_e)$ движущегося судна, как объекта бортовой качки, имеет вид:

$$W_{\theta/\alpha}(i\omega_e) = W_{\text{Re}}(\omega_e) + i \cdot W_{\text{Im}}(\omega_e); \quad (5.47)$$

где
$$W_{\text{Re}}(\omega_e) = \frac{\chi_\theta(1 - \varepsilon_\theta^2)}{(1 - \varepsilon_\theta^2)^2 + (2\mu_\theta\varepsilon_\theta)^2}; \quad (5.48)$$

$$W_{\text{Im}}(\omega_e) = -\frac{2\mu_\theta\varepsilon_\theta\chi_\theta}{(1 - \varepsilon_\theta^2)^2 + (2\mu_\theta\varepsilon_\theta)^2}. \quad (5.49)$$

Напомним, что здесь $\varepsilon_\theta = \omega_e / \omega_\theta$ – показатель резонанса бортовой качки. Амплитудно-частотная характеристика $A_{\theta/\alpha}(\omega_e)$ определяется выражением:

$$A_{\theta/\alpha}(\omega_e) = \frac{\chi_\theta}{\sqrt{(1 - \varepsilon_\theta^2)^2 + (2\mu_\theta\varepsilon_\theta)^2}}. \quad (5.50)$$

Соотношения (5.47)-(5.50) можно также вывести из уравнения (5.38) с помощью первого правила параграфа 5.2.3.

Учитывая, что амплитуды волновой ординаты и угла волнового склона связаны отношением $\tilde{\alpha} = \Omega \tilde{r}$, получаем:

$$A_\theta(\omega_e) = \Omega A_{\theta/\alpha}(\omega_e). \quad (5.51)$$

При расчете значений этой функции необходимо учитывать зависимость редуцированного коэффициента и частоты формы Ω от частоты ω гармоник истинного волнения. Для глубоководного волнения $\Omega = \omega^2 / g$.

Оценим по выражению (5.50) максимально возможное значение амплитуды бортовой качки на волнении при отсутствии резонанса, пренебрегая демпфированием ($\mu_\theta = 0$) и

принимая $\chi_\theta = 1$, т.е. заведомо допуская ошибку в сторону завышения амплитуды качки. При таком условии

$$A_{\theta/\alpha}(\omega_e) = \frac{1}{|1 - \varepsilon_\theta^2|}. \quad (5.52)$$

Напомним, что $A_{\theta/\alpha}(\omega_e)$ характеризует отношение амплитуды качки к амплитуде угла волнового склона. По выражению (5.52) можно определить, что при дорезонансных кажущихся частотах волн $\varepsilon_\theta < 0,7$ будет справедливым:

$$\hat{\theta} < 1,95\hat{\alpha}, \text{ а при зарезонансных } \varepsilon_\theta > 1,3 - \hat{\theta} < 1,45\hat{\alpha}.$$

Амплитуда $\hat{\alpha}$ угла волнового склона обычно не превышает $8 \cdot 10^0$, причем она уменьшается с ростом длины волны. Таким образом, если режим движения выбран вне резонансной зоны, то амплитуда бортовой качки не будет превышать 20^0 при $\varepsilon_\theta < 0,7$, и 15^0 при $\varepsilon_\theta > 1,3$.

5.4. Принципы расчета качки и резонансных явлений

5.4.1. Расчет и прогнозирование параметров качки

Основные формулы. Методику расчета осветим только для бортовой качки, так как для других видов колебаний судна она аналогична. В современных программных средствах при расчете реакции судна на смешанное волнение используются два спектра – спектр ветрового волнения и спектр зыби. Ответ судна на воздействие смешанного волнения получается как сумма реакций на его компоненты. Формулы расчета реакции судна на зыбь и ветровое волнение практически одинаковы, что дает возможность охарактеризовать алгоритм получения параметров качки, используя *только ветровую составляющую волнения*.

Для определения параметров качки вначале по прогностическим (или измеренным) данным о высоте и периоде волн выбирается подходящий энергетический спектр волнения

$S_r(\omega)$. Спектр волновой ординаты кажущегося ветрового волнения обозначим $S_r(\omega_e)$. Он связан с $S_r(\omega)$ соотношением (2.23). Так как судно считается линейной системой, то спектр бортовой качки, согласно (5.25), будет таким:

$$S_\theta(\omega_e) = A_\theta^2(\omega_e) S_r(\omega_e).$$

Дисперсия σ_θ^2 углов бортовой качки равняется нулевому спектральному моменту $m_{0\theta}$:

$$\sigma_\theta^2 = m_{0\theta} = \int_0^\infty S_\theta(\omega_e) d\omega_e. \quad (5.53)$$

Для характеристики бортовой качки могут использоваться ее амплитуды разной обеспеченности. Амплитуда качки $\hat{\theta}_\sigma = \sigma_\theta$ называется **наивероятнейшей**. Ее повторяемость составляет 60,6%. **Средняя амплитуда качки** (математическое ожидание амплитуды) $\bar{\theta} \approx 1,25\sigma_\theta$ имеет обеспеченность 45,6%. **Значительная амплитуда $\hat{\theta}_{1/3}$** бортовых колебаний судна равна $\hat{\theta}_{1/3} = 2\sigma_\theta$ и характеризуется повторяемостью 13,5%. Амплитуде $\hat{\theta}_{\Lambda\%} = k_\sigma \sigma_\theta$ произвольной обеспеченности $\Lambda\%$ соответствует значение k_σ , приведенное в табл. 5.2.

Таблица 5.2. – Коэффициенты k_σ для $\hat{\theta}$ различной обеспеченности

%	0,5	1	2	3	5	10	20	30
k_σ	3,25	3,04	2,79	2,64	2,44	2,15	1,79	1,56

Дисперсии угловых скоростей и ускорений бортовой качки, как следует из (5.26), могут быть получены по формулам:

$$\sigma_{\dot{\theta}}^2 = \int_0^\infty \omega_e^2 S_\theta(\omega_e) d\omega_e; \quad \sigma_{\ddot{\theta}}^2 = \int_0^\infty \omega_e^4 S_\theta(\omega_e) d\omega_e. \quad (5.54)$$

Опасность бортовой качки определяется в зависимости от величины амплитуд ее углов, или скоростей, либо ускорений, при которой возникают специфически проблемы, угрожающие судну или грузу. Такими проблемами могут быть: превышение допустимого угла крена, смещение груза, чрезмерные напряжения элементов корпуса или креплений грузов и т.д.

Рассмотрим оценку неблагоприятности бортовых колебаний судна только в зависимости от амплитуды накрений. В качестве наибольшего допустимого значения θ_σ бортовой качки принимается угол, превышение которого угрожает безопасности судна. Это может быть угол входа палубы или комингсов люков в воду, или предельный динамический угол крена, либо другая характерная точка на диаграмме остойчивости судна, отделяющая опасные накрения от безопасных. Вероятность того, что амплитуда бортовой качки превысит допустимое значение θ_σ , может быть подсчитана по формуле [10]:

$$\Pr(\hat{\theta} > \theta_\sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\theta_\sigma}{\sigma_\theta} \right)^2}. \quad (5.55)$$

Если эта вероятность достаточно велика, то качка опасна.

Условие неблагоприятности бортовой качки может быть представлено и через ее амплитуду малой обеспеченности. Примером может служить критерий, который формулируется так: полупроцентная амплитуда $\hat{\theta}_{0,5\%} = 3,25\sigma_\theta$, полученная в результате расчета качки для заданных условий, не должна превышать точку θ_σ заката на диаграмме остойчивости.

Когда опасность судну определяется чрезмерными значениями скорости $\dot{\theta}$ или ускорения $\ddot{\theta}$, то по допустимым значениям $\dot{\theta}_\sigma$ или $\ddot{\theta}_\sigma$ она оценивается способом, подобным рассмотренному для θ .

Прогнозирование вертикальной и килевой качки по данным о волнении производится *аналогично*. Однако при этом должны использоваться амплитудно-частотные характеристики судна, соответствующие этим видам качки.

Особенности расчета бортовой качки. Отметим ряд особенностей, которые имеют место при оценке параметров бортовой качки.

1) Учет нелинейности зависимости демпфирующего момента M_D от $\dot{\theta}$. Функция $M_D(\dot{\theta})$ близка к квадратичной. Чтобы учесть это обстоятельство в линейной модели качки, коэффициент демпфирования μ_θ выражается соотношением (5.40) через амплитуду $\hat{\theta}$ накренений. Однако она перед расчетом качки неизвестна, так как сама является искомой величиной. Вследствие этого параметры качки находят методом последовательных приближений.

Вначале, чтобы иметь возможность получить μ_θ , задается начальное значение $\hat{\theta}^{(0)}$. Используя его, по формулам (5.40), (5.51), (5.52) вычисляется амплитуда качки в первом приближении $\hat{\theta}^{(1)}$. Затем расчеты повторяются, и уже со значением $\hat{\theta}^{(1)}$ находится второе приближение $\hat{\theta}^{(2)}$. Так продолжается до тех пор, пока последовательно полученные значения $\hat{\theta}^{(j)}$ и $\hat{\theta}^{(j+1)}$ не станут практически одинаковыми.

2) Динамические накренения от ветра. У отдельных судов порывы ветра или действие шквалов вызывают существенные динамические накренения, которые в штормовых условиях, складываясь с углом бортовой качки, могут достичь опасных значений. Величину возможных накренений этих судов от шквального ветра следует учитывать при назначении допустимого значения θ_0 бортовой качки.

Порывы ветра представляют собой пульсации его скорости около некоторого среднего значения. Скорость ветра в порыве возрастает и падает практически мгновенно. При шквале скорость ветра резко повышается от нулевого либо другого значения скорости ветра. Однако это увеличение скорости происходит медленнее, чем в порыве, и обычно сопровождается изменением направления ветра.

Динамический ветровой крен приближенно определяется по диаграмме статической или динамической остойчивости (или

расчетным путем), исходя из предположения, что на судно внезапно стал действовать кренящий момент $M_{III} = const$, созданный силой давления P_{III} шквального ветра, приложенной в центре парусности. Этот кренящий момент определяется выражением [13]:

$$M_{III} = P_{III}(z_{II} - T);$$

где z_{II} – аппликата центра парусности; T – осадка судна.

Таким образом, при рассмотрении динамических накрений направление шквального ветра считается нормальным к диаметральной плоскости судна независимо от курсового угла наблюдаемого ветра.

Силу давления шквального ветра обычно получают по формуле [14]:

$$P_{III} = 1,3 \frac{\rho_a}{2} S_B V_{III}^2;$$

где S_B – площадь боковой парусности судна, ρ_a – плотность воздуха, V_{III} – максимальное значение абсолютной скорости ветра при шквале.

В условиях волнения величина динамического крена зависит от того, в каком положении находилось судно в момент шквала. Наиболее неблагоприятным является крен на наветренный борт. Поэтому при анализе опасности углов бортовой качки обычно считается, что в момент порыва ветра судно накренилось в наветренную сторону на угол, равный наибольшей амплитуде качки. При таком начальном условии динамический угол крена θ_d на подветренный борт при шквале может быть определен по диаграмме остойчивости из уравнения работ A_B восстанавливающего момента, A_{III} кренящего момента и кинетической энергии $K_{\mathcal{O}}$ судна, соответствующей амплитуде качки:

$$A_B - K_{\mathcal{O}} = A_{III}.$$

На диаграмме статической остойчивости (Рис. 5.7) при отсутствии ветра уравнение работ при амплитуде качки $\hat{\theta}$

представляется схемой **а)**, на которой $A_B = K_{\Theta}$. При шквале этому уравнению соответствует схема **б)**.

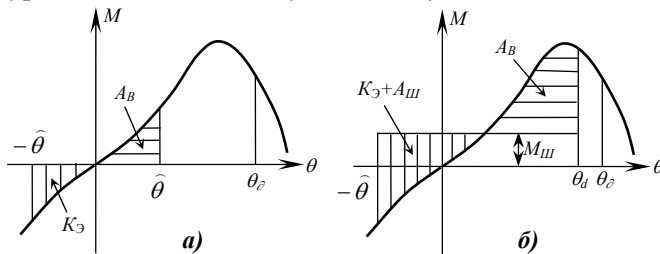


Рис. 5.7. Влияние шквала на угол бортовой качки

Приближенно допустимое значение $\theta_{\Theta III}$ амплитуды бортовой качки при шквале заданной силы определяется как значение $\hat{\theta}$ (см. рис. 5.7,б), при котором угол накренения θ_d на подветренный борт равен θ_{Θ} .

3) Пренебрежение трехмерностью волнения при расчете бортовой качки ухудшает точность получаемых результатов. Поведение судна на трехмерном волнении не такое, как на двумерном, поскольку уже невозможно получить чисто поперечную (судно лагом к волне) или чисто продольную (встречное или попутное волнение) качку.

5.4.2. Определение резонансных зон

Резонансные зоны. Охарактеризуем этот вопрос применительно к бортовой качке, считая волнение чисто ветровым. Для других видов колебаний судна на волнении рассмотрение этого вопроса может быть выполнено по аналогии.

Представим (рис. 5.8) амплитудно-частотную характеристику судна по бортовой качке (5.51) для двух значений коэффициента затухания μ_{θ} . Эти графики характеризуют отношения амплитуды бортовой качки к амплитуде волновой ординаты при разных значениях кажущейся частоты волнения. Из рисунка видно, что чем

меньше у судна коэффициент демпфирования μ_θ , тем сильнее проявляется резонанс.

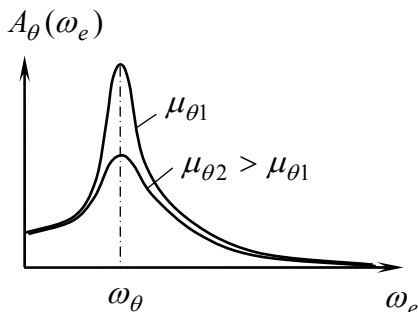


Рис. 5.8. АЧХ судна по бортовой качке

Возникающий в условиях нерегулярного волнения резонанс называется *статистическим*. Он соответствует совпадению частоты свободных колебаний судна и максимальной кажущейся частоты спектра волнения. Так как эта пиковая частота мало отличается от средней кажущейся частоты волнения, то условием резонанса обычно считается совпадение кажущейся средней частоты ω_e волнения с ω_θ . Значение ω_e зависит от курсового угла q волнения и скорости судна V . Поэтому резонанс качки судна наблюдается только при определенных сочетаниях q и V . *Область режимов движения, при которых амплитуда качки резко увеличена, называется резонансной зоной*. Границы этой зоны обычно определяют, исходя из значений показателя резонанса $\varepsilon_\theta = \omega_e / \omega_\theta$.

Неблагоприятным в отношении резонанса (рис. 5.9) обычно считается диапазон частот ω_e , при которых значение показателя резонанса лежит в интервале от 0,7 до 1,3. В штормовых условиях резонанс качки представляет опасность для судна. Поэтому в АСКМ предусматриваются программные средства, позволяющие устанавливать для разных видов качки зоны резонанса. Такие области опасных режимов движения на волнении получают для бортовой, килевой и вертикальной качки (у дополнительных видов качки резонанс невозможен).

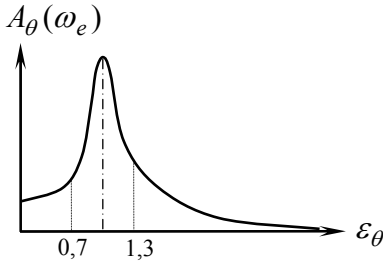


Рис. 5.9. Область резонанса бортовой качки

Основной резонанс бортовой качки наблюдается при:

$$0,7 < \varepsilon_\theta < 1,3.$$

Учитывая формулу (2.21), ε_θ можно представить в виде:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\omega_e}{\omega_\theta} = \frac{\omega + \Omega V \cos q}{\omega_\theta}.$$

Здесь ω – средняя частота истинного волнения. Когда параметры волнения неизменны, то отношения ω/ω_θ и Ω/ω_θ являются постоянными величинами, обозначим их c_1, c_2 , и выражение показателя резонанса будет таким:

$$\varepsilon_\theta = c_1 + c_2 V \cos q. \quad (5.56)$$

Отсюда следует, что при постоянном значении ε_θ проекция $V_W = V \cos q$ вектора скорости судна на направление бега волн также будет постоянной величиной, и *граница резонансной зоны, соответствующая $\varepsilon_\theta = 0,7$ (или $\varepsilon_\theta = 1,3$), будет геометрическим местом точек концов векторов скорости судна V_1, V_2, V_3, \dots , проекции которых на направление бега волн одинаковы.* В полярной системе координат эта граница является прямой линией (рис. 5.10). Для смешанного волнения, включающего ветровую составляющую и зыбь, конфигурация зоны резонанса более сложная.

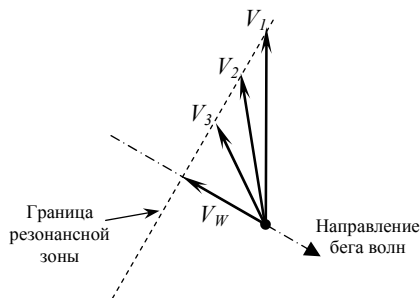


Рис. 5.10. Вид границы резонансной зоны

Параметрический резонанс рассматривается обычно только для бортовой качки. Он возникает, когда кажущийся период волнения равен половине собственного периода бортовых колебаний судна на тихой воде. Здесь неблагоприятным является диапазон ε_θ :

$$1,6 < \varepsilon_\theta < 2,4 .$$

Близость длины волн к длине судна. Одним из факторов, ухудшающих ситуации заливания палубы, слеминга, разгона винта, возникновения больших напряжений в связях корпуса на встречном волнении и снижения остойчивости судов на попутном волнении является близость длины волн и судна:

$$\lambda / L = 0,7 \div 1,3 . \quad (5.57)$$

Определим фазовую скорость бега волн для этого случая. На глубокой воде границам (5.57) будут соответствовать значения фазовой скорости $v_1 = 1,25\sqrt{0,7L}$, $v_2 = 1,25\sqrt{1,3L}$. Для малых глубин соответствующие условию (5.57) значения скорости бега волн могут быть получены по формуле (2.3)

$$v = \sqrt{\frac{g \tanh(\Omega H)}{\Omega}} \quad \text{при} \quad \Omega_1 = \frac{2\pi}{0,7L} \quad \text{и} \quad \Omega_2 = \frac{2\pi}{1,3L} .$$

Графическое представление информации. На рис. 5.11 для случая чисто ветрового волнения приведена форма отображения информации в одной из программ упрощенной оценки мореходности судна. Главной в этой форме является

полярная диаграмма скоростей судна, ориентированная по направлению бега волн.

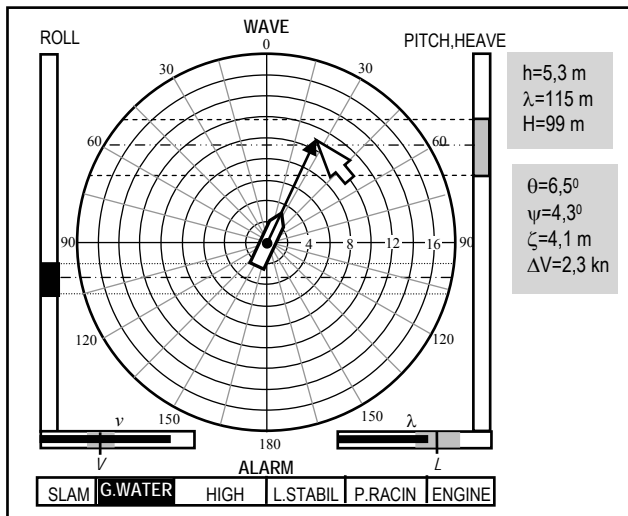


Рис. 5.11. Представление данных об основных видах качки

После выхода из порта в программу заносятся изменившиеся после загрузки/выгрузки значения необходимых при расчетах параметров судна. При использовании программы в рейсе задаются высота, длина морских волн и глубина акватории. По этой информации программа находит и отображает на дисплее зоны резонанса: бортовых колебаний (ROLL), килевой и вертикальной качки (PITCH, HEAVE). Графически представляются соотношения между длиной судна L и длиной волны λ , скоростью судна V и скоростью бега волн v .

Для обеспечения возможности выполнения анализа мореходности при различных режимах плавания, курсором на полярной диаграмме можно задавать положение конца вектора скорости судна. Для указанного режима программа отображает на экране в цифровом виде амплитуды основных видов качки, величину потери скорости хода и выдает визуальное предупреждение, когда существует опасность:

- *слеминга* – SLAM;

- заливания – *G.WATER (Green water)*;
- больших ускорений – *HIGH ACC. (High acceleration)*;
- потери устойчивости – *L.STABIL. (Loss of stability)*;
- разгона винта – *P.RACING (Propeller racing)*;
- перегрузки главного двигателя – *ENGINE (Engine overload)*.

5.4.3. Определение волнового спектра по измерениям параметров качки

Для возможности предсказания с достаточной точностью эффектов от изменения курса и скорости в условиях волнения немаловажным является близость используемого при вычислениях спектра волнения к реальному амплитудно-частотному распределению. К сожалению, часто при решении такой задачи располагают весьма приближенными данными о волнении, получаемыми с помощью визуальных наблюдений или из сводок служб погоды. Информации о спектре волнения здесь вообще нет, и приходится пользоваться его стандартным частотным распределением, которое может быть далеким от реального. Для улучшения точности предсказания эффектов от изменения режима движения в ряде АСКМ спектр волнения оценивают по результатам измерений параметров качки. Охарактеризуем принципы такой оценки.

Казалось бы, что если спектр $S_K(\omega)$ качки связан со спектром волнения соотношением $S_K(\omega) = A_K^2(\omega)S_r(\omega)$, то спектр волнения может быть найден по формуле:

$$S_r(\omega) = S_K(\omega) / A_K^2(\omega);$$

где спектр $S_K(\omega)$ оценивается по результатам измерений.

Однако имеются обстоятельства, затрудняющие такое прямое определение. Во-первых, для того чтобы спектр качки четко отражал волновое воздействие, волны должны иметь длинные гребни, или направление их должно быть известным. Во-вторых, судно, как преобразователь волновых воздействий в колебательное движение корпуса, является низкочастотным фильтром. Поэтому спектр качки покрывает лишь часть частотного диапазона спектра волнения, а оставшуюся часть

восстановить по результатам измерений невозможно. Кроме того, спектр реакции судна определяется для частоты встречи с волнами. А на попутном волнении функции кажущегося и истинного волновых спектров могут значительно отличаться друг от друга. Из-за этого при расчетах спектра истинного волнения могут возникнуть затруднения.

Поэтому на практике применяют методы [17, 19], позволяющие в той или иной мере обойти имеемые проблемы. Одним из них является так называемый *вариационный метод* [18]. В нем при описании формы волнового спектра используются предварительно выбранные функции $f_j(\omega)$. Энергетический спектр волновой ординаты записывается в виде линейной комбинации этих функций с неизвестными коэффициентами c_j :

$$S_r(\omega) = \sum_{j=1}^n [c_j f_j(\omega)].$$

Критерием $I(c_1, c_2, \dots, c_n)$ соответствия спектра $S_r(\omega)$ частотному распределению параметра качки $S_K(\omega)$, вычисляемому по результатам измерений, является функция:

$$I(c_1, c_2, \dots, c_n) = \int_0^{\infty} \left[A_K^2(\omega) \sum_{j=1}^n [c_j f_j(\omega)] - S_K(\omega) \right]^2 d\omega.$$

Оптимальной оценке волнового спектра соответствуют значения коэффициентов c_j , при которых значение функции $I(c_1, c_2, \dots, c_n)$ является наименьшим. Условие минимума записывается в виде:

$$\frac{\partial I}{\partial c_j} = 0, \quad \text{где } j = 1, 2, \dots, n.$$

Выражения этих частных производных образуют систему n линейных уравнений, при решении которой найдутся искомые значения коэффициентов c_j , определяющих спектр волнения. В функции I в качестве $S_K(\omega)$ могут браться найденные по

наблюдениям спектры килевой, вертикальной, бортовой качки. Соответствующими им должны быть амплитудно-частотные характеристики судна. Может также образовываться система уравнений, основанная на измерениях параметров всех основных видов качки. Обычно по данным килевой и вертикальной качки волновой спектр оценивается лучше, чем по данным бортовой, поскольку в последней сильнее резонансные проявления. Кроме того, для улучшения оценки волнового спектра дополнительно могут быть привлечены измерения напряжений элементов корпуса, момента на валу гребного винта и других параметров, значения которых отражают действие морского волнения.

Использование вариационного метода с достаточно хорошо подобранными функциями $f_j(\omega)$ позволяет оценивать волновой спектр в полном частотном диапазоне по наблюдениям качки, представляющим более узкий частотный интервал. Обычно процедура определения волнового спектра занимает порядка 20 минут.

5.5. Оценка неблагоприятных эффектов при движении против волн

5.5.1. Математическое описание вертикального перемещения оконечностей судна на качке

Ряд неблагоприятных для судна явлений (заливаемость, слеминг, большие ускорения бака и кормы, оголение гребного винта) связаны с плаванием в условиях встречного волнения. На таком волнении в качке судна преобладают вертикальные и килевые колебания, в процессе которых поперечные сечения судна перемещаются относительно поверхности волн так, что уровень воды у борта непрерывно изменяется. Если вертикальные относительные колебания сечений корпуса превышают осадку, то происходит оголение днища. Когда они больше высоты надводного борта, вода заликает палубу. Ясно, что заливаемость, слеминг, большие ускорения бака и кормы,

оголение гребного винта существенно связаны с процессом вертикальных относительных перемещений сечений корпуса.



Рис. 5.12. Вертикальное перемещение оконечности судна

Для вывода формул, описывающих параметры вертикального перемещения корпуса на встречном волнении, используем схему, представленную на рис.5.12. На ней обозначено:

- X – шпангоутное сечение на расстоянии x от центра массы судна;
- WL – ватерлиния не имеющего хода судна в условиях тихой воды;
- F, T – соответственно высота надводного борта и осадка судна в сечении X ;
- Δ – изменение уровня воды, обусловленное погружением в воду и подъемом из нее оконечности корпуса;
- z – вертикальное перемещение точек сечения X относительно невозмущенного уровня моря;
- s – ордината колебания поверхности воды в сечении X относительно ватерлинии WL .

Учитывая, что углы даже интенсивной килевой качки не достигают больших значений, подъем/опускание точек корпуса без большой погрешности можно рассматривать как перемещение по направлению связанной с судном оси OZ .

Абсолютное вертикальное перемещение точек в шпангоутном сечении X , как следует из рисунка, равно:

$$z = x\psi - \zeta. \quad (5.58)$$

Здесь знак минус объясняется тем, что на рисунке выбрано положение судна, когда значение ζ отрицательно.

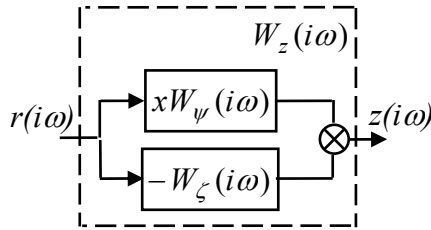


Рис. 5.13. Зависимость изображений z и r

Определим связь между z и волновой ординатой r в комплексно-частотной области. Учитывая (5.58), зависимость между изображением z и r можно представить схемой, включающей два параллельно соединенных звена (рис. 5.13). Отсюда следует, что связывающая $z(i\omega)$ и $r(i\omega)$ передаточная функция $W_z(i\omega)$ равна:

$$W_z(i\omega) = xW_\psi(i\omega) - W_\zeta(i\omega). \quad (5.59)$$

Здесь $W_\psi(i\omega)$, $W_\zeta(i\omega)$ – известные передаточные функции между ψ , ζ и волновой ординатой r . По компонентам записи $W_z(i\omega)$ в алгебраической форме определяется амплитудно-частотная характеристика $A_z(\omega)$:

$$A_z(\omega) = |W_z(i\omega)| = \sqrt{W_{z\text{Re}}^2 + W_{z\text{Im}}^2}. \quad (5.60)$$

Так как судно считается линейной системой, то $z(t)$ – это нормальный стационарный процесс. Его спектральная плотность, согласно (5.25):

$$S_z(\omega_e) = A_z^2(\omega_e)S_r(\omega_e). \quad (5.61)$$

Дисперсия σ_z^2 перемещений z равняется нулевому спектральному моменту:

$$\sigma_z^2 = \int_0^\infty S_z(\omega_e) d\omega_e. \quad (5.62)$$

Учитывая (5.26), дисперсии скорости \dot{z} и ускорения \ddot{z} могут быть найдены по формулам:

$$\sigma_{\dot{z}}^2 = \int_0^{\infty} \omega_e^2 S_z(\omega_e) d\omega_e ; \quad (5.63)$$

$$\sigma_{\ddot{z}}^2 = \int_0^{\infty} \omega_e^4 S_z(\omega_e) d\omega_e . \quad (5.64)$$

Колебание уровня воды относительно борта судна происходит из-за бега морских волн и качки судна. В сечении **X** (рис. 5.12) ордината s этого колебания может быть представлена в виде:

$$s = x\psi - \zeta + r + \Delta . \quad (5.65)$$

Как уже говорилось, Δ – это изменение уровня, обусловленное погружением в воду и подъемом из нее оконечности корпуса. При погружении бака поверхность воды около него поднимается выше статического уровня моря, а при выходе из воды – ее поверхность опускается ниже этого уровня. В сечении **X**, близком к носовому перпендикуляру, увеличение амплитуды относительных колебаний от этого фактора может быть оценено по эмпирической формуле Тасаки (R.Tasaki) [12]:

$$\frac{\widehat{\Delta}}{\widehat{s}} = \frac{\delta - 0.45}{3} \sqrt{\frac{\omega_e^2 L}{g}} ; \quad (5.66)$$

где \widehat{s} и $\widehat{\Delta}$ – соответственно амплитуды s и Δ в сечениях **X**, близких к носовому перпендикуляру.

Оценим взаимосвязь между s и волновой ординатой r в комплексно-частотной области без учета Δ (учет этой поправки особых затруднений не вызывает). На основе (5.65) зависимость между изображениями s и волновой ординаты r в комплексно-частотной области представляется схемой, изображенной на рис. 5.14. Отсюда следует:

$$W_s(i\omega) = 1 + xW_\psi(i\omega) - W_\zeta(i\omega) . \quad (5.67)$$

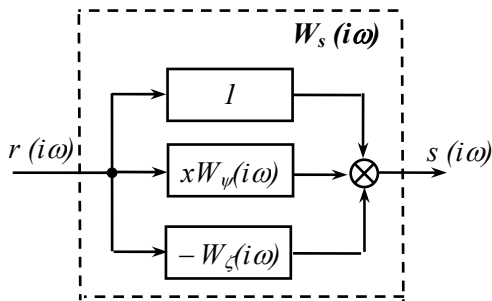


Рис. 5.14. Зависимость изображений s и r

Рассчитав действительную $W_{s\text{Re}}$ и мнимую $W_{s\text{Im}}$ компоненты $W_s(i\omega)$, можно найти амплитудно-частотную характеристику:

$$A_s(\omega) = |W_s(i\omega)| = \sqrt{W_{s\text{Re}}^2 + W_{s\text{Im}}^2} \quad (5.68)$$

Как и для случая абсолютного перемещения, характеристики колебания поверхности воды относительно WL в сечении X находятся по формулам:

$$S_s(\omega_e) = A_s^2(\omega_e) S_r(\omega_e) \quad (5.69)$$

$$\sigma_s^2 = \int_0^{\infty} S_s(\omega_e) d\omega_e \quad (5.70)$$

$$\sigma_{\dot{s}}^2 = \int_0^{\infty} \omega_e^2 S_s(\omega_e) d\omega_e \quad (5.71)$$

$$\sigma_{\ddot{s}}^2 = \int_0^{\infty} \omega_e^4 S_s(\omega_e) d\omega_e \quad (5.72)$$

Для конкретного судна величина σ_s зависит от режима штормового плавания и практически пропорциональна высоте волн. На встречном волнении для носовых сечений она может вдвое превышать среднее квадратичное значение волновой ординаты σ_r .

5.5.2. Оценка заливаемости

Заливаемость судна обычно оценивают по частоте попадания воды на палубу через бак. Это явление происходит при достаточно сильном встречном волнении, когда осадка судна больше высоты надводного борта в носовой части судна. При оценке мореходности *заливаемость отождествляется с превышением профилем набегающей волны линии верхней палубы в районе носового перпендикуляра.*

Эффективный надводный борт. Геометрическая высота F надводного борта на носовом перпендикуляре при движении на тихой воде из-за ходовой волны уменьшается на величину ΔF . Поэтому при оценке заливаемости берется значение *эффективной высоты* F_E надводного борта:

$$F_E = F - \Delta F. \quad (5.73)$$

Изменение ΔF может быть подсчитано по эмпирической формуле Тасаки:

$$\Delta F = 0,75 Fr^2 BL / L_\Lambda; \quad (5.74)$$

где L_Λ – длина носового заострения корпуса.

Оценка вероятности заливания. Так как волновая ордината имеет нормальное распределение, то и относительное перемещение s (рис. 5.12) является нормальным стационарным процессом, амплитуда \hat{s} которого подчиняется распределению Релея. Заливание наступает, когда амплитуда \hat{s} относительных колебаний уровня воды по борту судна превышает значение F_E . С учетом закона распределения \hat{s} вероятность Pr_{3AL} заливания вычисляется по формуле:

$$\text{Pr}_{3AL} = \text{Pr}(\hat{s} > F_E) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{F_E}{\sigma_s} \right)^2}. \quad (5.75)$$

Для определения среднего числа заливаний палубы N_{3AL} за данный промежуток времени t используется выражение, аналогичное (5.29):

$$N_{3AL} = \frac{t}{\bar{\tau}_S} \text{Pr}_{3AL}. \quad (5.76)$$

Здесь $\bar{\tau}_S$ – средний период относительных колебаний волнового профиля:

$$\bar{\tau}_S = 2\pi \frac{\sigma_s}{\sigma_{\dot{s}}}$$

Предложены различные нормы для оценки степени опасности заливания. Так, например, предельно допустимой считается вероятность заливания 0,03 или 0,07. В ряде случаев полагают, что риск неблагоприятных последствий от заливания существует, когда среднее числа заливаний палубы превышает 20 за час или $N_{ЗАЛ} \geq 3$ за 100 периодов килевой качки.

5.5.3. Вероятность слеминга

Слеминг появляется при сильном встречном волнении, когда осадка носом недостаточно велика. Крайние носовые сечения корпуса имеют, как правило, большую прочность и килеватость днища. Для них удары о воду не представляют опасности. Уязвимо в этом отношении днище на расстоянии $(0,1 \div 0,25)L$ от носа, где его форма приближается к плоской, а местная прочность меньше. Для определения слеминга предложено несколько критериев. Наиболее известные из них – критерий Очи (М.К.Очи) и критерий Конолли (J.E.Conolly). В качестве первого критерия используется величина и скорость вертикального относительного движения уровня воды по борту судна. В критерии Конолли учитывается также ударное давление на днище судна. Ниже рассматривается только первый критерий.

Согласно критерию Очи **слеминг определяется двумя условиями:**

1. Амплитуда \bar{s} относительного перемещения уровня воды по борту на расстоянии 10% длины судна от носового перпендикуляра превосходит осадку T в этом сечении;
2. Скорость \dot{s} сближения носовой оконечности судна с поверхностью воды в этом сечении больше лимитирующего значения v_{∂} .

Таким образом, при определении вероятности слеминга в формуле (5.65) значение x принимается равным $0,4L$.

Первое условие для появления слеминга записывается в виде: $\hat{s} > T$. Вероятность его выполнения оценивается по формуле:

$$\Pr(\hat{s} > T) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T}{\sigma_s}\right)^2}. \quad (5.77)$$

Второе условие определяется неравенством: $\hat{s} > v_{\partial}$. Эмпирически Очи установил, что для судна длиной 520 футов v_{∂} равно 12 футов за секунду. С учетом масштабного коэффициента по этому значению была получена формула для вычисления v_{∂} судов разной длины:

$$v_{\partial} = 0,0928\sqrt{gL}. \quad (5.78)$$

Вероятность выполнения второго условия появления слеминга равна:

$$\Pr(\hat{s} > v_{\partial}) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v_{\partial}}{\sigma_{\hat{s}}}\right)^2}. \quad (5.79)$$

Слеминг наступает, когда оба условия выполняются одновременно, вероятность чего равна произведению вероятностей (5.77), (5.79):

$$\Pr_{СЛ} = e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{T}{\sigma_s}\right)^2 + \left(\frac{v_{\partial}}{\sigma_{\hat{s}}}\right)^2\right]}. \quad (5.80)$$

Среднее число $N_{СЛ}$ ударов днищем о воду за время t находится по формуле:

$$N_{СЛ} = \frac{t}{\bar{\tau}_S} \Pr_{СЛ}. \quad (5.81)$$

Можно встретить различные нормы для оценки опасности слеминга. Например, считается, что риск неблагоприятных последствий от слеминга существует, когда его вероятность больше 0,002, или когда среднее число ударов днищем о воду за 100 периодов килевой качки превышает 0,2.

5.5.4. Оценка абсолютных ускорений

Чрезмерные вертикальные \ddot{z} и боковые \ddot{y} ускорения нарушают нормальный режим работы судового оборудования, способствуют смещению груза, ухудшают условия работы экипажа, приводят к увеличению напряжений корпуса. Поэтому желательно, чтобы вероятность превышения амплитудами \ddot{z} , \ddot{y} установленных для судна значений $a_{z\partial}$, $a_{y\partial}$ была достаточно малой. Лимитирующее значение $a_{z\partial}$ ускорения зависит от расположения выбираемого сечения относительно миделя и выбирается в пределах от $0,4g$ до $1,0g$. Его получают по специальным одобренным методикам. В районе надстройки значение $a_{z\partial}$ нередко принимается равным $(0,4 \div 0,5)g$, а в оконечностях судна – $(0,8 \div 1,9)g$, исходя из неблагоприятного уровня инерционных воздействий качки на самочувствие экипажа. Для боковых ускорений в районе надстройки обычно принимают $a_{y\partial}$ равным $(0,4 \div 0,6)g$.

Нахождения вероятности превышения амплитудой ускорения порогового значения охарактеризуем только для вертикальных ускорений. Абсолютное перемещение z оконечности судна описывается выражением (5.58), в котором x принимается равным отстоянию выбранного сечения X от миделя судна. Учитывая, что амплитуда \hat{z} вертикального ускорения \ddot{z} подчиняется распределению Релея, вероятность $\text{Pr}_{УСК}$ превышения этой амплитудой порогового значения $a_{z\partial}$ можно представить в виде:

$$\text{Pr}_{УСК} = \text{Pr}(\hat{z} > a_{z\partial}) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{a_{z\partial}}{\sigma_{\ddot{z}}} \right)^2}. \quad (5.82)$$

Для оценки благоприятности ускорений используются определенные граничные значения. Например, вертикальные ускорения на носовом перпендикуляре считаются чрезмерными, когда вероятность того, что они превысят $0,8g$, больше $0,001$.

Горизонтальные ускорения в районе надстройки считаются неблагоприятными, когда вероятность превышения ими уровня $0,5g$ больше $0,001$.

5.5.5. Разгон гребного винта и двигателя

Из-за волнения и качки судна колеблется расстояние оси гребного винта от поверхности воды. В результате изменяется нагрузка на винт. Когда осадка кормой недостаточно велика, винт может выходить из воды. При оголении лопастей из-за подсоса воздуха происходит разгон гребного винта и двигателя. При последующем входе гребного винта в воду он тормозится, а нагрузка на двигатель резко возрастает. В результате наблюдается неравномерная работа пропульсивной установки с забросом оборотов. Это явление вызывает рост динамических нагрузок на двигатель и приводит к ограничению используемой мощности. Периодическое снижение упора, момента сопротивления и падение эффективности гребного винта ухудшает ходовые качества судна на волнении, особенно в балласте. Кроме того, переменные гидродинамические силы и моменты, действующие на винт при качке, могут привести к авариям лопастей, конструкций гребного валопровода, вызывать вибрацию вала и кормы. Несмотря на наличие предельного (или всережимного) регулятора оборотов, уменьшающего вероятность поломки двигателя при оголении винта, резко изменяющиеся динамические нагрузки неблагоприятны для пропульсивной установки, и их необходимо избегать. Обычно считается, что разгон двигателя существует, когда срабатывает его защита по частоте вращения.

Расстояние от оси гребного винта до поверхности воды можно представить выражением:

$$d = d_{WL} - s. \quad (5.83)$$

Здесь d_{WL} – погружение оси винта на тихой воде при стоянке судна; s – относительное колебание уровня воды в районе винта, определяемое выражением (5.65) при значении x , равным отстоянию плоскости гребного винта от центра массы судна. Разгон гребного винта, вызывающий срабатывание

защиты двигателя по частоте вращения, происходит, когда погружение оси винта становится меньше определенного порогового значения d_{δ} :

$$d = d_{WL} - s < d_{\delta}. \quad (5.84)$$

Нередко этим порогом считается радиус гребного винта. Японский исследователь Фукуда (J.Fukuda), основываясь на своих наблюдениях, предложил в качестве d_{δ} принимать третью часть диаметра D_P гребного винта:

$$d_{\delta} = D_P / 3; \quad (5.85)$$

Аэртссен (G.Aertssen), анализируя большое число полномасштабных испытаний, пришел к заключению, что разгон гребного винта с последующим срабатыванием защиты двигателя происходит при уменьшении момента на валу более чем на 25%.

Вероятность разгона гребного винта $\text{Pr}_{P3Г}$ может быть представлена выражением:

$$\text{Pr}_{P3Г} = \text{Pr}(\bar{s} > d_{WL} - d_{\delta}) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{d_{WL} - d_{\delta}}{\sigma_s} \right)^2}. \quad (5.86)$$

По этой вероятности можно определить среднее число $N_{P3Г}$ срабатывания защиты двигателя по частоте вращения за интервал времени t :

$$N_{P3Г} = \frac{t}{\bar{\tau}_S} \text{Pr}_{P3Г}. \quad (5.87)$$

Из норм оценки неблагоприятности волнения для работы движительной установки можно привести следующую: риска для двигателя нет, когда среднее число срабатывания его защиты по частоте вращения не превышает 0,1 за час.

5.5.6. Комбинированные критерии мореходности

При штормовании на встречном волнении могут наблюдаться в отдельности, иногда и совместно перечисленные выше опасные для судна явления. Это необходимо учитывать

при нормировании мореходности. Рассматривая такую задачу для штормования при носовых курсовых углах волнения, обычно выделяют две категории судов: *с большой осадкой, с малой осадкой*.

В первую категорию включают суда, имеющие загрузку, при которой в штормовых условиях вероятность заливания носовой оконечности судна больше, чем вероятность появления слеминга или разгона винта. Ко второй категории относят суда с большей вероятностью появления слеминга и/или разгона винта, чем заливаемости.

Критерий опасности для судов с большой осадкой. Согласно исследованиям Очи и Моттера для этой категории судов неблагоприятны ситуации, в которых вероятность заливания и/или опасных ускорений бака, больше 0,07:

$$\Pr(\text{ЗАЛ and / or УСК}) > 0,07. \quad (5.88)$$

Для двух статистически независимых событий A и B можно записать

$$\Pr(A \text{ and / or } B) = 1 - \Pr(\text{not } A) \cdot \Pr(\text{not } B). \quad (5.89)$$

В результате вероятность события $\Pr(A \text{ and / or } B) > C$ представляется в виде:

$$\Pr_1 = \Pr(\text{not } A) \cdot \Pr(\text{not } B) < 1,0 - C. \quad (5.90)$$

Отсюда следует, что неблагоприятными для судов с большой осадкой являются ситуации, когда вероятность одновременного отсутствия заливания палубы и опасных ускорений бака меньше 0,93:

$$\Pr_1 = \left[1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{F_E}{\sigma_S} \right)^2} \right] \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{a_{\partial}}{\sigma_{\ddot{z}}} \right)^2} \right] < 0,93. \quad (5.91)$$

Критерий опасности для судов с малой осадкой. Для судов с малой осадкой предложено неблагоприятными считать ситуации, в которых вероятность слеминга и/или разгона винта и/или опасных ускорений бака, превышает 0,03:

$$\Pr(\text{СЛ and / or РЗГ and / or УСК}) > 0,03. \quad (5.92)$$

Как и в предыдущем случае, такой критерий может быть сведен к виду (5.90):

$$\text{Pr}_2 = \text{Pr}(\text{not } \text{СЛ}) \cdot \text{Pr}(\text{not } \text{PЗГ}) \cdot \text{Pr}(\text{not } \text{УСК}) < 1 - 0,03.$$

В результате можно установить, что для судов с малой осадкой неблагоприятными являются ситуации, в которых вероятность Pr_2 меньше 0,97:

$$\text{Pr}_2 = \left[1 - e^{-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{T}{\sigma_s} \right)^2 + \left(\frac{v_{\partial}}{\sigma_s} \right)^2 \right\}} \right] \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{d_{WL} - d_{\partial}}{\sigma_s} \right)^2} \right] \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{a_{\partial}}{\sigma_z} \right)^2} \right] < 0,97$$

5.6. Потери скорости хода в штормовых условиях

На снижение скорости судна в условиях волнения влияют многие причины:

- *возрастание сопротивления воды вследствие качки судна (включая рыскание) и непосредственное воздействие волн на его корпус;*
- *давление ветра на надводную часть судна;*
- *уменьшение эффективности гребного винта;*
- *нарушение установившегося режима работы главного двигателя и ограничение его мощности при разгоне гребного винта;*
- *наличие поверхностного ветрового течения и перемещения частиц воды, участвующих в волновом движении, и ряд других.*

Анализ процессов движения судов дает возможность установить, что основными из причин уменьшения скорости в штормовых условиях являются:

- дополнительное сопротивление движению судна, вызываемое ветром и волнами;
- снижение скорости хода капитаном для избежания мореходных опасностей (заливания, слеминга и т.д.) и перегрузки главного двигателя.

До недавнего времени в мореплавании для оценки потерь скорости на волнении применялись упрощенные формулы, полученные на основе анализа большого числа рейсов многих судов. Установка бортовых приемоиндикаторов GPS, определяющих с высокой точностью скорость относительно грунта, позволила для конкретного судна устанавливать зависимости скорости хода от интенсивности и направления волнения в виде таблиц и графиков, а затем использовать полученные данные для прогнозирования движения в ожидаемых погодных условиях.

5.6.1. Приближенные методы для оценки потерь скорости на волнении

Эмпирические формулы для оценки потерь скорости на волнении. В навигации до недавнего времени для расчета средней потери скорости в зависимости от интенсивности волнения, его курсового угла и скорости судна на тихой воде использовались эмпирические зависимости, установленные путем анализа большого числа рейсов. Примерами являются формулы Регистра Ллойда, ЦНИИМФ, ОВИМУ, а также формулы П.М.Хохлова, Н.И.Струйского, Б.И.Сайфулина и Б.А.Андрианова, Аэртсена и ряда других авторов.

Формула Аэртсена основана на обширном статистическом материале и записывается [14]:

$$\frac{\Delta V}{V_T} = 0.01 \left(\frac{m}{L} + n \right).$$

В ней V_T – скорость судна на тихой воде; m и n – коэффициенты, зависящие от силы волнения и его курсового угла. Их значения приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3. – Коэффициенты m, n

Число баллов по Бофорту	Направление волнения							
	Встречное		Скуловое		Траверзное		Попутное	
	M	n	m	n	m	n	m	N
5	900	2	700	2	350	1	100	0
6	1300	6	1000	5	500	3	200	1

7	2100	11	1400	8	700	5	400	2
8	3600	18	2300	12	1000	7	700	3

Формула ЦНИИМФ, применяемая для нахождения величины скорости в ветроволновых условиях, имеет вид [11]:

$$V = V_T - (0,745h_{3\%} - 0,275qh_{3\%})(1 - 1,35 \cdot 10^{-6} DV_T).$$

Относительно просто потери скорости на волнении можно оценить по следующему выражению:

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx \frac{0,01 \cdot C_3}{\sqrt{1 + (5q/\pi)^2}} \left(\frac{175h_{1/3}\sqrt{h_{1/3}}}{L} + 0,32h_{1/3}^2 \right).$$

Здесь C_3 – эмпирически определяемый коэффициент, близкий к единице. При современном навигационном оборудовании каждое судно может оценить коэффициент C_3 на основе точных определений скорости при движении в условиях волнения.

Обычно в эмпирических формулах судно характеризуется одним или двумя параметрами. В действительности потери скорости хода зависят от большего их числа: формы корпуса, длины, ширины, тоннажа, вида энергетической установки судна. Поэтому получаемые для конкретного судна по вышеприведенным формулам оценки потерь скорости хода могут существенно отличаться от действительных значений.

Графики для оценки потерь скорости. На основе точных измерений скорости с помощью приемника GPS для конкретного судна можно определить таблицы и графики потерь хода в зависимости от высоты волн и курсового угла волнения. Обычно такие данные получают для полного переднего хода, которым суда движутся большую часть своего ходового времени. Примером служит график, приведенный на рис. 5.15. Нахождение для судна такой зависимости требует времени, которого у штурманов не так уж много.

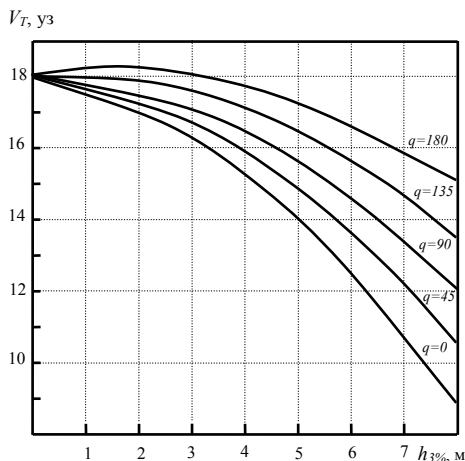


Рис. 5.15. Кривые потерь скорости хода на волнении

В дальнейшем график потерь скорости на волнении может быть использован при планировании перехода и для уточнения первоначального плана в процессе рейса.

5.6.2. Сопротивление движению судна в штормовых условиях

В настоящее время не существует теоретически разработанного способа расчета полного сопротивления воды движению судна, дающего результат с достаточной точностью. Поэтому применяются методы, основанные на многочисленных модельных и натурных испытаниях. Они позволяют найти буксировочное сопротивление судна по данным, характеризующим размеры, форму корпуса, осадку, и учесть влияние на скорость хода особенностей пропульсивной установки. Для конкретного судна параметры расчетных зависимостей могут корректироваться по непосредственным измерениям скорости хода, потребления топлива главным двигателем, момента и упора на валу гребного винта. В результате обеспечивается довольно высокая точность определения буксировочного сопротивления при разных нагрузках судна.

Полное (буксировочное) сопротивление R судна в условиях ветра и волнения можно представить суммой:

$$R = R_T + R_a + R_w. \quad (5.93)$$

Она включает:

- *сопротивление движению на тихой воде: $R_T = R_T(V)$;*
- *среднее ветровое сопротивление: $R_a = R_a(V, V_a, q_a)$;*
- *среднее сопротивление от действия морских волн:*
 $R_w = R_w(V, h_{1/3}, \bar{\tau}, q)$.

В приведенных обозначениях: V – скорость судна; V_a, q_a – скорость и курсовой угол истинного ветра; $\bar{\tau}, q$ – средний период и курсовой угол волнения.

Сопротивление движению судна на тихой воде.

Разработано несколько методов для оценки буксировочного сопротивления судов на тихой воде. Они базируются на многочисленных модельных и натуральных испытаниях, результаты которых трансформированы в графики, таблицы и эмпирические расчетные формулы. В качестве примеров можно назвать методы:

- адмиралтейских коэффициентов;
- В.М.Штумпфа;
- Ю.А.Будницкого;
- Ауф’м Келлера (W.H. Auf ’m Keller);
- Судостроительной исследовательской ассоциации Японии и ряд других.

Названные методы охарактеризованы в справочниках по теории корабля и в других источниках. Существующие алгоритмы для нахождения R_T имеет обычно ограничения, определяющие область их применения. *Способ адмиралтейских коэффициентов* пригоден только для тихоходных судов (до чисел Фруда 0,10–0,12). *Алгоритм Судостроительной исследовательской ассоциации Японии* предназначен для расчета сопротивления быстроходных судов с коэффициентами полноты от 0,55 до 0,65. *Метод Ю.А.Будницкого* охватывает суда, со следующими характеристиками:

- масса судна: $D=500 \dots 200000$ т;

- коэффициент общей полноты: $\delta = 0,55 \dots 0,85$;
- скорость хода: $V = 10 \dots 25$ узлов;
- число Фруда: $Fr = 0,14 \dots 0,30$;
- $L/\sqrt[3]{\nabla} = 4,5 \dots 7,0$ (∇ – объемное водоизмещение судна).

На практике для нахождения буксировочного сопротивления на тихой воде довольно часто применяется выражение, в котором для всех составляющих R_T (трения, формы, корабельных волн) используется общая формула для силы сопротивления движению тела в жидкости. Это выражение R_T имеет вид:

$$R_T = (k_{TP} + k_{ФВ}) \frac{\rho}{2} S_{CM} V^2; \quad (5.94)$$

где k_{TP} – коэффициент сопротивления трения; $k_{ФВ}$ – коэффициент сопротивления формы и волнообразования; S_{CM} – площадь смоченной поверхности судна; ρ – плотность воды; V – скорость судна относительно воды.

Площадь смоченной поверхности определяется по одной из существующих формул. Например, расчет S_{CM} судов с небольшим коэффициентом полноты δ может выполняться по формуле С.П.Муратова, а для судов с большими значениями δ – по формуле В.А.Семеки. Величину S_{CM} промысловых судов рекомендуется находить по формуле В.А.Ерошина. Для вычисления S_{CM} речных судов без тоннелей применяется формула А.Б.Карпова. В отечественной практике судовождения для расчетов смоченной поверхности морских транспортных судов применяется формула С.И.Демина. Все упомянутые формулы обеспечивают расчет S_{CM} с погрешностью, не превышающей 2÷4% от точного значения.

Для чистого корпуса входящий в (5.94) коэффициент k_{TP} можно рассчитывать по рекомендуемой Международной конференцией опытовых бассейнов формуле [20]:

$$k_{TP} = \frac{0,075}{[\lg(Rn) - 2]^2}.$$

В ней $Rn = VL / \nu_\epsilon$ является числом Рейнольдса, в котором ν_ϵ – кинематический коэффициент вязкости морской воды. Зависимость ν_ϵ от температуры t° С морской воды может быть аппроксимирована выражением:

$$\nu_\epsilon = 10^{-6} \left[a_0 + a_1 t^\circ + a_2 (t^\circ)^2 \right] \text{ м}^2/\text{с};$$

где $a_0 = 1,786$; $a_1 = -0,049$; $a_2 = 5,926 \cdot 10^{-4}$.

Коэффициент сопротивления формы и волнообразования $k_{\Phi B}$ наиболее точно рассчитывается с помощью подходящего выражения, параметры которого оцениваются на основе регрессионного анализа данных модельных и натуральных испытаний конкретной серии судов. Обычно для этой цели берут полином того или другого вида, описывающий изменение $k_{\Phi B}$ в зависимости от средней осадки T , дифферента d и скорости судна. Например, может использоваться выражение:

$$k_{\Phi B} = c_0 + c_1 T + c_2 d + c_3 V + c_4 d^2,$$

либо более сложная полиномиальная зависимость.

Упрощенный метод оценки R_T . В задачах судовождения сопротивление движению судна на тихой воде представляется зависимостью:

$$R_T = k_{RT} V^2.$$

Коэффициент полного сопротивления k_{RT} считается постоянной величиной при заданной осадке и состоянии корпуса. Для судна с чистым корпусом он вычисляется с помощью предложенного С.И.Деминым выражения [14]:

$$k_{RT} = 5,88 + 0,000654 \cdot S_{CM} \sqrt{\frac{B}{T}}.$$

Входящая в это выражение площадь смоченной поверхности корпуса рассчитывается по формуле:

$$S_{CM} = D^{2/3} (4,854 + 0.492 \frac{B}{T}).$$

Ветровое сопротивление. При расчетах для штормовых условий буксировочного сопротивления судов с малой парусностью (грузеных танкеров и балкеров) действием ветра обычно пренебрегают. Для судов со значительной парусностью ветровая составляющая R_a учитывается обычно с помощью эмпирических формул Ишервуда (Isherwood). Они были созданы на основе анализа многочисленных данных о ветровом сопротивлении, полученных различными авторами при модельных испытаниях и натурных наблюдениях коммерческих судов. Приближенно R_a находится также по формуле [14]:

$$R_a = 1,3 \frac{\rho_a}{2} S_{ЛБ} V_{ak}^2 \cos q_{ak};$$

где ρ_a – плотность воздуха; $S_{ЛБ}$ – лобовая площадь парусности; q_{ak}, V_{ak} – соответственно курсовой угол и скорость кажущегося ветра.

Сопротивление от действия волн. Добавочное среднее сопротивление движению судна от морских волн R_w является основной причиной естественного снижения хода в штормовых условиях. Теоретические решения задачи определения этого сопротивления были получены М.Д.Хаскиндом, В.Г.Сизовым, Питерсом и Стокером, Маруо, Нейманом. При практических расчетах R_w используются обычно приближенные методы. Среди них можно назвать способы А.И.Вознесенского и Г.А.Фирсова, В.Я.Ткачева и В.С.Шпакова, Л.С.Шифрина, Миямото и других авторов. В программном обеспечении систем контроля мореходности из приближенных процедур нашли применение:

- *метод излучаемой энергии, предложенный в 1972 г. Гарритсмой и Бекельманом;*
- *метод интегрированного давления, опубликованный в 1970 г. Боезе.*

Первый метод дает хорошие результаты при носовых и траверзных курсовых углах волнения. Вторым методом применим для волнения с любого направления. Представленные этими авторами выражения амплитудно-частотных характеристик $A_R(\omega)$ судов позволяют по спектрам ветрового волнения и зыби, достаточно точно рассчитать среднее добавочное сопротивление движению судна от действия морских волн:

$$R_w = 2 \int_0^{\infty} A_R^2(\omega_e) S_r(\omega_e) d\omega_e . \quad (5.95)$$

Следует отметить, что из существующих приближенных процедур определения среднего волнового сопротивления спектральные методы обладают наибольшими возможностями, так как позволяют достаточно полно учесть как характер волнения, так и особенности судна. Однако они громоздки. Этот недостаток может привести к чрезмерной затрате времени, например, при выборе оптимального трансокеанского пути, связанного с оценкой многочисленных вариантов режимов движения, и при решении ряда других задач. Имеются также и более простые, по сравнению со спектральными, методы, обеспечивающие быстрый расчет, но не позволяющие учесть ряд факторов, в частности, особенности смешанного волнения. Примером является достаточно эффективный метод В.Б.Липиса [5], а также целый ряд других упрощенных процедур. Находится среднее волновое сопротивление движению судна и через величину потери скорости судна, определяемую по той или иной из существующих для этой цели многочисленных формул. Основанием для выбора того или иного метода для расчета R_w является в первую очередь характер и особенности решаемой задачи.

5.7. Предупреждение перегрузки главного двигателя

Рассмотренные в параграфе 5.6 способы предназначены для оценки буксировочного сопротивления и скорости судна в

условиях ветра и волн. Однако они не позволяют установить, будет ли перегружен двигатель, и рассчитать, насколько надо снизить его мощность, чтобы работа движительной установки была нормальной. Этим вопросам посвящен данный параграф.

5.7.1. Схема преобразования энергии в движение судна

Кроме ветра, волнения, размеров и формы судового корпуса и надстройки при выборе режимов хода в штормовых условиях необходимо учитывать:

- тип, размеры, характеристики движителя;
- тип, выходную мощность, характеристики главного двигателя.



Рис. 5.16. Схема преобразования энергии в движение судна

Методы учета этих факторов для разных типов движительных установок отличаются друг от друга. Ниже освещается только один вариант пропульсивной схемы судна, включающей малооборотный двигатель внутреннего сгорания – ДВС (дизельный), напрямую работающий через валопровод на винт фиксированного шага (ВФШ). Схема преобразования энергии в прямолинейное движение судна в такой установке представлена на рис. 5.16. На ней обозначено:

h_f – положение топливной рейки, определяющей величину цикловой подачи топлива;

M_e – момент, передаваемый двигателем на гребной вал (эффективный крутящий момент);

n – частота вращения винта;

M_B – момент, приложенный к гребному винту;

P_e – тяга (полезный упор) гребного винта;

V_p – осевая скорость перемещения гребного винта относительно воды;

R – буксировочное сопротивление;

V – скорость судна.

Мощность вращающегося тела равна произведению крутящего момента на угловую скорость. Отсюда следует, что выходная мощность главного двигателя N_e (**эффективная мощность**) связана с M_e соотношением:

$$N_e = M_e \omega = 2\pi n M_e. \quad (5.96)$$

Здесь ω – угловая скорость вращения вала двигателя. Необходимо отметить, что эффективная мощность главного двигателя считается приближенно пропорциональной кубу частоты вращения его вала:

$$N_e \approx k_N n^3; \quad (5.97)$$

где k_N – коэффициент пропорциональности.

Момент M_B , приложенный к движителю, называется **моментом гребного вала**. Он связан с эффективным крутящим моментом соотношением: $M_B = \eta_B M_e$, где η_B – коэффициент, учитывающий механические потери в валопроводе (КПД валопровода). При прямолинейном равномерном движении судна момент на валу равняется моменту сопротивления гребного винта M : $M = M_B$. Подводимая к гребному винту мощность N_B называется **валовой мощностью**:

$$N_B = \eta_B N_e = 2\pi n M_B.$$

Отсюда следует, что:

$$N_e = \frac{2\pi}{\eta_B} n M_B = \frac{2\pi}{\eta_B} n M.$$

Гребной винт является преобразователем приложенного к нему момента в движущую судно силу P_e , которая называется **тягой винта** или полезным упором. При прямолинейном равномерном движении тяга винта уравнивается силой R буксировочного сопротивления: $P_e = R$. Приближенно можно считать, что:

$$R \approx k_R V^2; \quad (5.98)$$

где k_R – коэффициент полного сопротивления движению судна при рассматриваемых ветроволновых условиях.

Развиваемую винтом полезную мощность (буксировочную мощность) обозначим N_P . Учитывая, что мощность прямолинейно движущегося тела равна произведению вызывающей перемещение силы на скорость тела, N_P можно записать:

$$N_P = P_e V = R V \approx k_R V^3 = \eta \eta_B N_e = \eta N_B = \eta \eta_B k_N n^3. \quad (5.99)$$

Приведенная в этом выражении величина $\eta = N_P / N_B$, равная отношению буксировочной мощности к мощности, подводимой к гребному винту, называется **пропульсивным коэффициентом**. На современных транспортных судах значения пропульсивного коэффициента достигают для одновинтовых судов – 0,70 ... 0,80, а для двухвинтовых – 0,60 ... 0,70. Анализируя (5.99), можно установить, что в общем случае установившаяся скорость судна приблизительно пропорциональна частоте вращения винта:

$$V = k_V n;$$

где $k_V = \sqrt[3]{\frac{\eta \eta_B k_N}{k_R}}$ – коэффициент пропорциональности.

5.7.2. Характеристики главного двигателя

Понятие о характеристиках работы ДВС. Режим эксплуатации двигателя внутреннего сгорания определяется эффективным крутящим моментом M_e и частотой вращения n , или, что то же самое, – эффективной мощностью N_e и n , поскольку $N_e = 2\pi M_e n$. **Номинальным режимом работы главного двигателя** ниже считается режим (N_{eA}, n_A) , соответствующий установившемуся прямолинейному движению судна полным передним ходом в тихую погоду при осадке по летнюю грузовую марку.

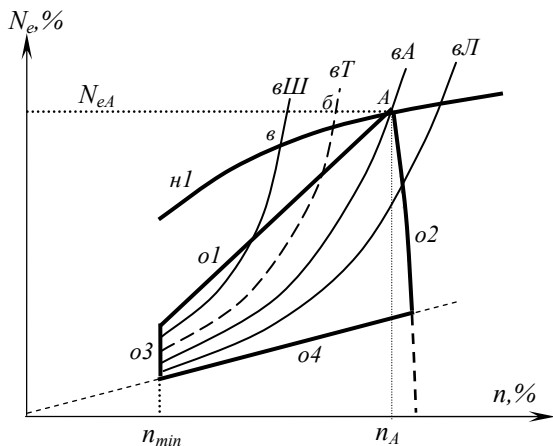


Рис. 5.17. Характеристики дизельного двигателя

Для оценки рабочего процесса главного двигателя используются его так называемые *характеристики*. Под **характеристиками главного двигателя** понимается графическая или аналитическая зависимость мощности двигателя (или других параметров его работы) от частоты вращения винта (или других величин). Характеристики главного двигателя разделяются на внешние, ограничительные, винтовые, топливные и другие [9]. Некоторые из них представлены на рис. 5.17, где точкой *A* отмечен номинальный режим работы двигателя.

Внешние характеристики. Из показателей этого вида на рис. 5.17 приведен только один – **номинальная внешняя характеристика** (*н1*). Она представляет зависимость мощности от частоты вращения гребного винта при постоянной цикловой подаче топлива, соответствующей номинальному режиму работы двигателя.

Ограничительные характеристики служат для выделения **области эксплуатационных (рабочих) режимов** главного двигателя – множества сочетаний (N_e, n) , при которых главный двигатель может нормально работать длительное время. Эта область (см. рис. 5.17) очерчивается:

- *заградительной характеристикой по тепловой напряженности – о1;*
- *регуляторной характеристикой – о2;*
- *наименьшей устойчивой частотой вращения – о3;*
- *характеристикой минимальной мощности – о4.*

Перечисленные пределы называются соответственно ***верхней, правой, левой и нижней*** ограничительными характеристиками рабочей области главного двигателя. *Верхняя характеристика о1*, будем обозначать ее также $N_{cp}(n)$, является границей, в режимах выше которой двигатель работает с тепловой перегрузкой. *Регуляторная характеристика* – это зависимость мощности двигателя от частоты вращения гребного вала при перемещении органа топливоподачи автоматическим регулятором, предупреждающим разгон винта.

Винтовые характеристики главного двигателя. Условия нагрузки на гребной винт непосредственно влияют на параметры рабочего процесса движительной установки. При увеличении сопротивления движению судна вследствие волнения, обрастания корпуса, влияния мелководья и т.д. ВФШ при той же частоте вращения поглощает больший крутящий момент. Двигатель реагирует на это самопроизвольным снижением частоты вращения. В результате изменившийся режим его работы может выйти из эксплуатационной области, и, если не снизить подачу топлива, то главный двигатель будет работать с перегрузкой.

Винтовой характеристикой называется зависимость мощности главного двигателя от частоты его вращения при неизменных условиях плавания (при постоянном коэффициенте полного сопротивления движению судна: $k_R = const$).

На рисунке 5.17 представлены винтовые характеристики:

- *вА – для нормальных условий плавания (тихая погода, полная загрузка, чистая подводная часть корпуса);*
- *вШ – для швартовного режима, характеризуемого наибольшим моментом сопротивления вращению гребного винта;*

- vT – для условий повышенного сопротивления движению судна (волнение моря, мелководье);
- $vЛ$ – для условий уменьшенного сопротивления движению судна (тихая погода, чистый корпус, судно в балласте).

Винтовая характеристика vA проходит через точку A номинального режима работы главного двигателя. Нетрудно заметить, что если положение топливной рейки соответствует номинальному режиму и плавание судна происходит в условиях волнения (винтовая характеристика vT), то режим работы главного двигателя будет представлен точкой b . Она лежит выше ограничительной характеристики $o1$ и соответствует режиму работы с тепловой перегрузкой. Чтобы двигатель привести в эксплуатационный режим, необходимо снизить его мощность, уменьшив величину цикловой подачи топлива.

Потребление топлива. Величина цикловой подачи топлива c_f в судовом главном двигателе пропорциональна перемещению h_f топливной рейки:

$$c_f = k_c h_f; \quad (5.100)$$

где k_c – коэффициент пропорциональности.

Расход топлива в секунду f_S зависит от c_f и частоты вращения гребного вала:

$$f_S = k_T k_{Ц} c_f n; \quad (5.101)$$

где k_T – коэффициент тактности дизеля, $k_{Ц}$ – количество его цилиндров.

Количество потребляемого в час топлива f_h равно $3600 f_S$. Расход топлива может рассматриваться как функция эффективной мощности главного двигателя. Зависимость f_h от N_e называется **топливной характеристикой**. В паспортных данных двигателя приводится топливная характеристика, соответствующая установившимся режимам его работы. В аналитической форме топливные характеристики двигателей обычно представляются уравнением полинома второго порядка:

$$f_h = f_{hA} \left[a_0 + a_1 \frac{N_e}{N_{eA}} + a_2 \left(\frac{N_e}{N_{eA}} \right)^2 \right];$$

где N_{eA} , f_{hA} – соответственно выходная мощность и часовой расход топлива в номинальном режиме работы двигателя; a_0, a_1, a_2 – коэффициенты ($a_0 + a_1 + a_2 = 1$).

Часовой расход топлива выражается и через величину эффективного удельного расхода топлива c_e :

$$f_h = c_e N_e; \quad (5.102)$$

Следует отметить, что c_e зависит от режима управления работой двигателя и погодных условий. При заданной постоянной мощности и благоприятных условиях плавания режим работы главных двигателей является установившимся. Фактический расход топлива в такой ситуации близок к паспортным данным. Если же гребная установка управляется по закону поддержания постоянства частоты вращения гребного вала, то двигатель при ходе судна на волнении работает в условиях резко переменной нагрузки. В этом случае из-за высокой инерции системы воздухообеспечения давление наддува не успевает подстраиваться к изменению цикловой подачи топлива. Это обстоятельство ведет к увеличению эффективного удельного расхода топлива, к росту тепловой напряженности деталей двигателя. Здесь фактические параметры работы двигателя, в частности f_h , не соответствуют его паспортным данным. Этот эффект, хотя и в меньшей степени, наблюдается и при заданной постоянной мощности двигателя, когда судно испытывает килевую и вертикальную качку, сопровождающуюся изменением нагрузки на гребном винте. Поэтому для возможности удовлетворительного прогноза расхода топлива производители АСКМ запрашивают у производителя главного судового двигателя более подробную, чем в паспортных данных, информацию, полученную при детальном исследовании работы такого типа двигателей в разных условиях.

Для измерения потребления топлива двигателем применяются специальные приборы, однако погрешности большинства из них пока довольно велики. Лучшие результаты получаются по формулам (5.100), (5.101) на основе высокоточных измерений положения топливной рейки и частоты вращения гребного вала. В современных автоматизированных двигателях с электронным впрыскиванием величина текущего расхода топлива измеряется с высокой точностью и отображается для оператора. Такая возможность позволяет использовать результаты измерений расхода топлива для эффективного контроля состояния двигателя, гребного винта и корпуса судна.

Для подсчета количества топлива на рейс обычно используется его расход f_M на милю пути. Эта величина получается по формуле:

$$f_M = f_h / V .$$

Учитывая (5.99) и (5.102), расход f_M можно представить выражением:

$$f_M \approx \frac{c_e}{\eta\eta_B} R = \frac{c_e k_R}{\eta\eta_B} V^2 = k_F V^2 . \quad (5.103)$$

где $k_F = c_e k_R / (\eta\eta_B)$.

Производная df_M / dV характеризует изменение расхода топлива на милю при небольшом увеличении или уменьшении скорости. Учитывая (5.103), можно установить, что:

$$\frac{df_M}{dV} \approx 2k_F V . \quad (5.104)$$

Потребление смазочного масла при нормальной работе двигателя считается приблизительно равным 10% от расхода топлива.

5.7.3. Характеристики гребного винта

Основными гидромеханическими характеристиками гребного винта являются сила упора P и момент сопротивления

вращению M . Эти величины определяются по известным формулам [12]:

$$P = K_1 \rho n^2 D_P^4, \quad M = K_2 \rho n^2 D_P^5; \quad (5.105)$$

где K_1, K_2 – коэффициенты упора и момента гребного винта; ρ – плотность воды.

Коэффициенты K_1, K_2 зависят от числа лопастей, относительной поступи $\lambda_P = V_P / (nD_P)$, шагового и дискового отношений гребного винта. Графики зависимости K_1, K_2 от названных элементов получаются на основе испытаний моделей гребных винтов в опытовых бассейнах и кавитационных трубах. Результаты испытаний винтов многих серий были аппроксимированы полиномами, позволяющими расчетным путем получать значения K_1, K_2 . Здесь можно назвать полиномиальные зависимости, полученные Оостервельдом и Оосаненом для распространенных за рубежом гребных винтов серии Трооста (серии В), аппроксимации Н.А.Титова для винтов серий Т4-58, Т4-75 и ряд других. Вид и коэффициенты этих полиномов приведены, например, в *справочнике* [12]. Для конкретного гребного винта с данным числом лопастей, шаговым и дисковым отношениями коэффициенты K_1, K_2 зависят только от поступи.

Коэффициент полезного действия гребного винта равен отношению производимой им полезной мощности $N_S = PV_P$ к потребляемой мощности N_B :

$$\eta_P = N_S / N_B. \quad (5.106)$$

Упор \bar{P} и момент \bar{M} за корпусом судна немного отличаются от их значений P, M в свободной воде из-за неравномерности распределения по диску винта скорости попутного потока. Это учитывается с помощью специальных коэффициентов η_1, η_2 , близких к единице:

$$\bar{P} = \eta_1 P; \quad \bar{M} = \eta_2 M.$$

Коэффициент η_1 лежит в пределах 0,98...1. Средним для коэффициента η_2 одновинтовых судов считается значение 1,04, а двухвинтовых – 0,97.

5.7.4. Взаимодействие винта и корпуса судна

Гребной винт работает в потоке воды, возмущенном корпусом судна. К элементам влияния этого обстоятельства на работу пропульсивного комплекса относят скорость попутного потока и силу засасывания.

Скорость попутного потока. Судно, перемещаясь, увлекает за собой воду, так что за его корпусом образуется **попутный поток**. Среднее значение U скорости попутного потока по диску винта приводит к уменьшению скорости винта относительно воды по сравнению со скоростью судна:

$$V_p = V - U = V(1 - w); \quad (5.107)$$

Отношение $w = U/V$ называется **коэффициентом попутного потока**. На практике он нередко оценивается по приближенным формулам Тейлора:

$$\text{для одновинтовых судов } w = 0,50\delta - 0,05;$$

$$\text{для двухвинтовых судов } w = 0,55\delta - 0,20.$$

Сила засасывания. Работающий гребной винт подсасывает воду, из-за чего кормовая оконечность обтекается с большими скоростями, чем при неработающем винте. В результате появляется так называемая сила засасывания P_t , направленная против движения судна. Отсюда следует, что упор винта уравнивает не только силу буксировочного сопротивления, но и силу засасывания:

$$R = P_e = P - P_t = P(1 - k_t). \quad (5.108)$$

Отношение $k_t = P_t/P$ называется **коэффициентом силы засасывания**. Для расчетного ходового режима работы винта k_t можно оценить по формулам Вейнгарта:

$$\text{для одновинтовых судов } k_t = w \left(1,57 - 2,30 \frac{\delta}{\delta_T} + 1,50\delta \right).$$

для двухвинтовых судов $k_t = w \left(1,67 - 2,30 \frac{\delta}{\delta_T} + 1,50 \delta \right)$.

Для режимов работы гребного винта, отличающихся от расчетного, коэффициент засасывания определяется по приближенной формуле Папмеля, учитывающей зависимость k_t от скольжения s_1 винта:

$$k_t = \frac{k_{0t}}{s_1} = \frac{k_{0t}}{1 - \lambda_p / (H_p / D_p)}; \quad (5.109)$$

где (H_p / D_p) – шаговое отношение (H_p – шаг винта); k_{0t} – коэффициент засасывания при работе винта на швартовых ($k_{0t} \approx (0,4 \div 0,5)w$).

Снижение тяги винта на волнении. Воздействие волнения на пропульсивный комплекс проявляется в изменениях погружения винта, из-за чего может происходить периодический подсос винтом воздуха и включаться защита двигателя. В результате падает нагрузка винта по упору и моменту, возрастают амплитуды их колебательных составляющих, уменьшается скорость судна. Проблема влияния волнения на снижение тяги винта детально исследована в монографии Липиса В.Б. *Гидродинамика гребного винта при качке судна*. – Л.: Судостроение, 1975. – 263 с. В ней приведены выражения для оценки падения упора винта из-за колебаний его погружения.

Приближенно уменьшение ΔP_e тяги винта на волнении можно рассчитать по формуле:

$$\Delta P_e = k_e \text{Pr}_{P3Г} P_e; \quad (5.110)$$

где k_e – коэффициент пропорциональности; $\text{Pr}_{P3Г}$ – вероятность разгона винта.

5.7.5. Определение режима хода для условий ветра и волнения

Задача определения режима хода. Гребной винт, двигатель и корпус судна связаны между собой кинематически и

динамически. Кинематическая связь двигатель-винт, винт-корпус выражается равенствами: $n_{\text{двиг}} = n_{\text{винта}}, V_P = V(1 - w)$.

Условия динамической связи между названными элементами таковы:

- *потребляемая винтом мощность равняется мощности, передаваемой двигателем;*
- *тяга винта равна буксировочному сопротивлению судна.*

При установившемся движении судна кинематические и динамические условия выполняются. Если какая-либо из величин, входящих в эти условия, изменяется, вся система перестраивается на новое состояние, при котором условия связи опять будут выполняться. Однако, в новом состоянии равновесия, например, при увеличившемся сопротивлении движению судна, режим работы двигателя может выйти из эксплуатационной области, и двигатель будет работать с перегрузкой.

Раньше скорость грузовых судов была небольшой. Они могли использовать полную мощность двигателей практически в любую погоду за исключением редких случаев. И теперь это относится к тихоходным большим танкерам и балкерам со сравнительно малой, по отношению к их водоизмещению, мощностью движительной установки. Но в целом сейчас ситуация другая. Мощность главного двигателя современных судов нередко оказывается чрезмерной в штормовых условиях и должна снижаться, чтобы избежать его перегрузки, либо заливания судна или других мореходных опасностей. Поэтому в рейсе может возникнуть необходимость *нахождения для наблюдаемых или ожидаемых штормовых условий и заданного курса следования режима хода (n, V), в котором скорость судна будет максимальной при условии работы двигателя без перегрузки.*

Математически эта задача может быть представлена следующим образом. Динамические связи между двигателем и винтом, между винтом и корпусом записываются системой двух нелинейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{двиг}}(h_f, n) = N_{\text{винт}}(V, n) / \eta_B \\ R(V, v_a, q_a, h_{3\%}, \bar{\tau}, q) = P_e(V, n, k_t) \end{aligned} \right\} . \quad (5.111)$$

Требуется из этой нелинейной системы, составленной для заданной загрузки и курса судна, для текущих или прогнозируемых погодных условий, определить режим хода без перегрузки двигателя, при котором скорость судна максимальна.

Графоаналитический способ решения задачи.

Охарактеризуем вначале метод решения поставленной задачи с помощью *паспортной диаграммы*. Она изображает взаимосогласованные кинематические, силовые и энергетические характеристики корпуса, гребного винта и главного двигателя. В нее входят (рис. 5.18) две находящиеся друг над другом диаграммы: *полезной тяги* и *эффективной мощности*. По горизонтальной оси обеих диаграмм откладывается скорость судна V . Верхняя диаграмма состоит из изолиний n_j частоты вращения винта, кривой располагаемой тяги и графика буксировочного сопротивления. Нижняя диаграмма включает изолинии n_j частоты вращения винта и заградительную характеристику $N_{cp}(n)$ двигателя по тепловой напряженности. Несмотря на принимаемую независимость от условий плавания изолиний n_j , кривой располагаемой тяги и заградительной характеристики, паспортная диаграмма не является неизменной при использовании. График буксировочного сопротивления на ней должен соответствовать конкретной загрузке судна, условиям его плавания и определенному постоянному курсу движения.

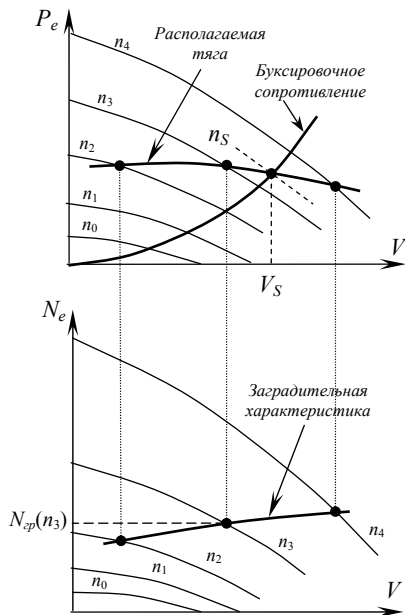


Рис. 5.18. Паспортная диаграмма судна

Построение паспортной диаграммы. Для построения паспортной диаграммы задаются из возможных диапазонов четыре–десять значений относительной поступи λ_P гребного винта (например, $\lambda_P=0, 0.2, 0.4, 0.6$) и ряд значений частоты его вращения (например, $n = n_0, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$; где $n_0 = n_{\min}$, $n_5 = n_A$). Для пар λ_{Pi}, n_j рассчитывают матрицу значений эффективной мощности двигателя $N_e(i, j) = N_e(\lambda_{Pi}, n_j)$, тяги винта $P_e(i, j) = P_e(\lambda_{Pi}, n_j)$ и скорости $V(i, j) = V(\lambda_{Pi}, n_j)$:

$$N_e = \frac{2\pi}{\eta_B} K_2 \rho n^3 D_P^5; \quad (5.112)$$

$$P_e = K_1 \rho n^2 D_P^4 (1 - k_t); \quad (5.113)$$

$$V = \frac{\lambda_P n D_P}{(1 - w)}. \quad (5.114)$$

Результаты расчета заносятся в табл. 5.4.

Таблица 5.4. – Матрица значений N_e, P_e, V

	J	0	1	2	3	4	5
i	$n(j)$ $\lambda_p(i)$	$n(0)$	$n(1)$	$N(2)$	$n(2)$	$n(2)$	$n(2)$
0	$\lambda_p(0)$	$N_e(0,0)$ $P_e(0,0)$ $V(0,0)$	$N_e(0,1)$ $P_e(0,1)$ $V(0,1)$	$N_e(0,2)$ $P_e(0,2)$ $V(0,2)$	$N_e(0,3)$ $P_e(0,3)$ $V(0,3)$	$N_e(0,4)$ $P_e(0,4)$ $V(0,4)$	$N_e(0,5)$ $P_e(0,5)$ $V(0,5)$
1	$\lambda_p(1)$	$N_e(1,0)$ $P_e(1,0)$ $V(1,0)$	$N_e(1,1)$ $P_e(1,1)$ $V(1,1)$	$N_e(1,2)$ $P_e(1,2)$ $V(1,2)$	$N_e(1,3)$ $P_e(1,3)$ $V(1,3)$	$N_e(1,4)$ $P_e(1,4)$ $V(1,4)$	$N_e(1,5)$ $P_e(1,5)$ $V(1,5)$
2	$\lambda_p(2)$	$N_e(2,0)$ $P_e(2,0)$ $V(2,0)$	$N_e(2,1)$ $P_e(2,1)$ $V(2,1)$	$N_e(2,2)$ $P_e(2,2)$ $V(2,2)$	$N_e(2,3)$ $P_e(2,3)$ $V(2,3)$	$N_e(2,4)$ $P_e(2,4)$ $V(2,4)$	$N_e(2,5)$ $P_e(2,5)$ $V(2,5)$
3	$\lambda_p(2)$	$N_e(3,0)$ $P_e(3,0)$ $V(3,0)$	$N_e(3,1)$ $P_e(3,1)$ $V(3,1)$	$N_e(3,2)$ $P_e(3,2)$ $V(3,2)$	$N_e(3,3)$ $P_e(3,3)$ $V(3,3)$	$N_e(3,4)$ $P_e(3,4)$ $V(3,4)$	$N_e(2,5)$ $P_e(0,5)$ $V(0,5)$
4	$\lambda_p(i)$	$N_e(4,0)$ $P_e(4,0)$ $V(4,0)$	$N_e(4,1)$ $P_e(4,1)$ $V(4,1)$	$N_e(4,2)$ $P_e(4,2)$ $V(4,2)$	$N_e(4,3)$ $P_e(4,3)$ $V(4,3)$	$N_e(4,4)$ $P_e(4,4)$ $V(4,4)$	$N_e(5,5)$ $P_e(5,5)$ $V(5,5)$

Нахождение кривых постоянных значений частоты вращения. На верхней диаграмме отмечаются в виде точек пары значений $P_e(i, j), V(i, j)$ ячеек таблицы 5.4. Соответственно на нижнюю диаграмму наносятся точки, отвечающие значениям $N_e(i, j), V(i, j)$. Соединяя отдельно на верхней и нижней диаграмме точки, соответствующие одному значению n , получают кривые постоянных значений частоты вращения винта n_j .

Нанесение заградительной характеристики и кривой располагаемой тяги. На нижней диаграмме точки кривой $N_{zp}(n)$ отмечаются на линиях постоянного значения частоты с помощью горизонтальных линий, каждая из которых проводится от значения $N_{zp}(n_j)$ на вертикальной оси до кривой n_j . Соединяющая полученные точки кривая линия представляет заградительную характеристику, ограничивающую

сверху рабочую область двигателя. Точки кривой располагаемой тяги находятся проектированием точек $N_{zp}(n_j)$ на соответствующие кривые n_j верхнего графика.

Нанесение кривой буксировочного сопротивления. Для выбранных значений скорости хода V_i рассчитывается значения $R(V_i)$ буксировочного сопротивления, соответствующего текущим (или заданным) условиям плавания: осадке носом и кормой; силе ветра и его курсовому углу; высоте, среднему периоду, курсовому углу волн. Чтобы кривая располагаемой тяги оставалась неизменной, уменьшение ΔP_e тяги винта на волнении (5.110) добавляется к $R(V_i)$. Полученные пары значений $V_i, R(V_i)$ отмечаются на верхней диаграмме в виде точек, через которые проводится кривая буксировочного сопротивления.

Выбор режима работы двигателя с помощью паспортной диаграммы. Паспортная диаграмма используется для решения ряда задач, в том числе и для определения для штормовых условий режима хода, при котором скорость судна максимальна и двигатель не перегружен. При нормальной работе двигателя наибольшую скорость судно имеет при равенстве предельной тяги винта полному буксировочному сопротивлению. Такую тягу гребной винт развивает, когда двигатель работает по заградительной характеристике. Отсюда следует, что *на паспортной диаграмме решением рассматриваемой задачи является точка пересечения кривых располагаемой тяги и буксировочного сопротивления.* Этой точке соответствует скорость судна V_S и частота вращения винта n_S , при которых двигатель в заданных условиях будет работать без перегрузки, обеспечивая на данном курсе максимальную скорость судна.

Численное решение задачи. Охарактеризуем один из алгоритмов расчета режима хода (V_S, n_S) , в котором в заданных условиях при нормальной работе двигателя достигается

максимальную скорость хода. Этот алгоритм включает следующие этапы.

1. Диапазон $[0, \lambda_{PM}]$, в котором могут находиться значения относительной поступи λ_p гребного винта, и диапазон $[n_{\min}, n_A]$ частоты его вращения n , представляются достаточно большим (порядка 100 или больше) k числом значений λ_{p_i}, n_j ($i = 0, 1, 2, 3, \dots k$; $j = 0, 1, 2, 3, \dots k$):

$$\lambda_{p_i} = i \cdot \Delta_\lambda; \quad n_j = n_{\min} + j \cdot \Delta_n;$$

где $\Delta_\lambda = \lambda_{PM} / k$, $\Delta_n = (n_A - n_{\min}) / k$ – шаги изменения значений λ_{p_i}, n_j .

2. По λ_{p_i}, n_j с помощью формулы (5.112) рассчитывается матрица значений эффективной мощности двигателя: $N_e(i, j) = N_e(\lambda_{p_i}, n_j)$ (табл. 5.5). В каждом столбце этой матрицы определяется значение $N_e(i, j)$, наиболее близкое к значению $N_{ep}(n_j)$ заградительной характеристики. Соответствующая строке этого значения относительная поступь гребного винта обозначается λ_{p_j} . Таким способом выделяются пары n_j, λ_{p_j} , при которых значения эффективной мощности $N_e(\lambda_{p_j}, n_j)$ совпадают с заградительной характеристикой, а значения тяги гребного винта $P_e(\lambda_{p_j}, n_j)$ – с кривой располагаемой тяги.

Таблица 5.5. – Матрица $N_e(i, j)$

	j	0	1	2	...	J	...	k
I	n	N_0	n_1	n_2	...	n_j	...	n_k
	λ_p	$N_e(0,0)$	$N_e(0,1)$	$N_e(0,2)$	...	$N_e(0,j)$	...	$N_e(0, k)$
0	λ_{p0}	$N_e(1,0)$	$N_e(1,1)$	$N_e(1,2)$	...	$N_e(1,j)$	...	$N_e(1, k)$
1	λ_{p1}	$N_e(2,0)$	$N_e(2,1)$	$N_e(2,2)$	...	$N_e(2,j)$	...	$N_e(2, k)$
2	λ_{p2}	...	...	...	...	...	...	...
...
i	λ_{p_i}	$N_e(I,0)$	$N_e(I,1)$	$N_e(i,2)$	...	$N_e(i,j)$	...	$N_e(i, k)$

...
k	λ_{pk}	$N_e(k,0)$	$N_e(k,1)$	$N_e(k,2)$	...	$N_e(k,j)$	...	$N_e(k,k)$

3. По λ_{pj} , n_j с помощью формул (5.113), (5.114) вычисляются значения кривой располагаемой тяги $P_e(j)$ и скорости судна $V(j)$. Затем по скоростям $V(j)$ находятся оценки буксировочного сопротивления $R(j)$, соответствующие заданным условиям плавания (осадке носом и кормой; силе ветра и его курсовому углу; высоте, среднему периоду, курсовому углу волн). Последовательности $P_e(j)$, $V(j)$, $R(j)$ приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6. – Значения $P_e(j)$, $V(j)$, $R(j)$

j	0	1	2	...	J	...	k
n	n_0	n_1	n_2	...	n_j	...	n_k
λ_p	λ_{p0}	λ_{p1}	λ_{p2}		λ_{pj}		λ_{pk}
P_e	$P_e(0)$	$P_e(1)$	$P_e(2)$	...	$P_e(j)$	...	$P_e(k)$
V	$V(0)$	$V(1)$	$V(2)$	...	$V(j)$	...	$V(k)$
R	$R(0)$	$R(1)$	$R(2)$	...	$R(j)$	...	$R(k)$

4. Учитывая, что значения $P_e(j)$ принадлежат кривой располагаемой тяги, а значения $R(j)$ – графику буксировочного сопротивления, для нахождения точки пересечения этих линий в табл. 5.6 находится столбец $j = s$, в котором разность между значениями $P_e(j)$ и $R(j)$ минимальна. Отсюда следует, что значения $n_j = n_s$, $V(j) = V_s$ столбца s представляют искомый режим нормальной работы двигателя, обеспечивающий максимальную скорость хода.

5.8. Принцип расчета нагрузок на корпусе

Нагрузки на корпус судна при плавании можно разделить на нагрузки, действующие на тихой воде, и вызванные волнением

нагрузки. Последние вызваны гидростатическими силами от изменения уровня воды относительно корпуса, гидродинамические воздействия и силами инерции всех масс при качке.

При расчете нагрузок судно делится поперечными сечениями на двадцать-тридцать шпаций. Обозначим количество этих шпаций n , а их номера j , где $j = 1, 2, 3, \dots n$. В сечения судна включаются все продольные связи корпуса, участвующие в общем его изгибе и простирающиеся по всей длине судна или на значительной ее части. Исходя из допустимых напряжений в связях, по одобренным методикам определяются допустимые значения перерезывающих сил и изгибающих моментов для этих сечений.

Чтобы для конкретной загрузки получить вертикальные перерезывающие силы и моменты, а также крутящие моменты, нужны распределения по длине судна следующих параметров: *веса (или масс); сил поддержания; ординат и аппликат центров масс; радиусов инерции масс относительно горизонтальных продольных осей, проходящих через центра тяжести.*

Рассмотрим принципы получения функций распределения веса $P(x)$ и сил плавучести $\gamma \nabla(x)$ по длине судна (рис. 5.19,а) на тихой воде и нахождения по ним перерезывающих сил и изгибающих моментов. Здесь $\nabla(x)$ – распределение погруженных объемов судна по его длине. Для определения функции $P(x)$ рассчитывается вес каждой выделенной шпации. Он получается путем суммирования сил тяжести всех находящихся в ней элементов. По найденным значениям строится кривая $P(x)$ распределения сил веса по длине судна (рис. 5.19,б). Распределение сил поддержания $\gamma \nabla(x)$ находится с помощью строевой по шпангоутам путем замены для каждой шпации судна площади по строевой равновеликой площадью прямоугольника (рис. 5.19,б). Разность функций $P(x)$ и $\gamma \nabla(x)$ (рис. 5.19,в) характеризует распределение по длине судна вертикальной нагрузки на корпус:

$$p(x) = P(x) - \gamma \nabla(x).$$

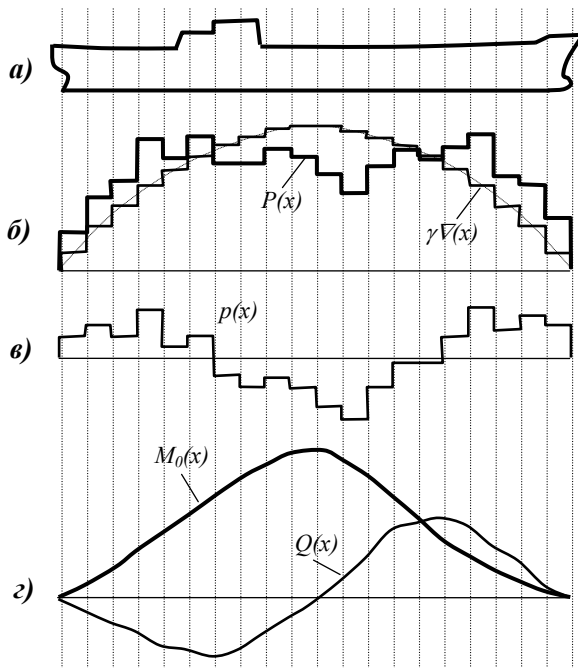


Рис. 5.19. Графики сил и моментов

Интегральная (суммарная) по продольной оси судна кривая от нагрузки $p(x)$ дает значения $Q(x)$ вертикальных перерезывающих сил (рис. 5.19,г). Интегральная по $Q(x)$ кривая отражает (рис. 5.19,г) распределение по длине судна изгибающих моментов $M_0(x)$. По ней можно определить значение и положение наибольшего изгибающего момента, действующего на корпус при рассматриваемом состоянии нагрузки. При несимметричной относительно ДП загрузке на корпусе появляется крутящий момент.

В условиях волнения к перерезывающим силам и изгибающим моментам, соответствующим тихой воде, добавляются силы инерции масс на качке и изменения гидростатических сил на шпациях судна. Значения дополнительных воздействий от волнения получаются по

формулам, приведенным в [20]. Суммарные перерезывающие силы и изгибающие моменты на корпусе судна в условиях волнения не должны превышать их операционных ограничений.

Кроме вертикальных нагрузок, при плавании косым курсом к направлению бега волн на корпусе появляются изгибающий момент в горизонтальной плоскости и крутящий момент в вертикальных поперечных плоскостях. Эти моменты достигают наибольшей величины при курсовом угле волнения около 60^0 и длине волны, равной длине судна. Крутящие моменты особенно опасны для судов с большим раскрытием палубы, в частности для контейнеровозов.

5.9. Выбор режима плавания на волнении

Общие сведения. При плавании в ветроволновых условиях судно должно быть мореходным. Если наблюдаются сильные удары волн по корпусу, заливание и забрызгивание палубы, чрезмерная бортовая или килевая качка, или другие вызванные волнением проблемы, определяется подходящий режим плавания, при котором функционирование судна является безопасным. Нахождение подходящего режима плавания может быть разделено на две задачи: *определение режима хода* (обычно при умеренном и значительном волнении) и *выбор режима движения* – курса и скорости (обычно для сильного и очень сильного волнения). Первой задаче соответствуют ветроволновые условия, в которых для достижения нормального функционирования судна достаточно снизить скорость хода без изменения курса следования. Если штормовые условия настолько сложны, что плавание судна в нужном направлении невозможно, то решается вторая задача, которую называют также выбором режима штормования. **Штормование** представляет собой особый вид плавания, при котором судно удерживается на месте или идёт относительно ветра и волн наиболее благоприятными курсом и скоростью. Многолетняя практика рекомендует разные способы штормования в зависимости от конструктивных особенностей судна, его загрузки, дифферента, наличия палубного груза и других

условий. Различают штормование *против волны, скулой к волне, по волне, лагом к ней, с застопоренной машиной, на якорь*. При наличии палубного груза, малой остойчивости и других факторов, снижающих мореходность судна, штормовые условия стараются переждать в порту или на закрытом рейде. При выборе режима плавания в шторм стремятся уменьшить амплитуды качки, уклониться от резонансных явлений, а при движении на попутном волнении, кроме того, избегать скоростей, которые сопровождаются потерей остойчивости. Амплитуды и фазы качки существенно зависят от скорости судна и его курса по отношению к волне. Изменяя режим движения, можно добиться умеренной качки и избежать опасных последствий шторма.

Своевременный и правильный расчёт режима движения имеет большое значение при плавании на волнении. Средства, облегчающие выбор для штормовых условий элементов движения судна с целью обеспечения его мореходности, предлагались отечественными и зарубежными учеными и специалистами. Примерами служат нормативные документы по управлению судном в шторм, универсальная штормовая диаграмма Ю.В.Ремеза, специальные диаграммы В.Г.Власова, С.Н.Благовещенского, Л.М.Ногида, В.Б.Липиса и Д.В.Кондрикова, А.И.Богданова и других авторов [5], многочисленные программные продукты. Обобщением опыта штормового плавания, формированием практических рекомендаций по управлению судами в шторм, разработкой алгоритмов для упрощенной оценки и выбора режимов штормования занимались В.В.Чудов, Г.Аэртсен, Л.Р.Аксютин, Л.А.Козырь, А.С.Мальцев, С.П.Сюрко, Б.В.Бердинских, К.В.Казанский, И.Г.Филлипов и другие авторы.

Штормовые диаграммы отражают зависимость мореходности только от основных, влияющих на нее факторов. Применяя эти средства, нельзя с достаточной полнотой учесть особенности внешних условий, самого судна, его загрузки. Программные продукты имеют лучшие возможности и обладают большей гибкостью. Они бывают разных видов. Одни из них созданы для конкретных типов судов, учитывают форму и размеры их корпуса, вид энергетических установок и

двигателей. Такие программы имеются для судов с дизельными и турбинными двигателями, для одновальных и многовальных энергетических установок, для судов с ВФШ и ВРШ и т.д. Разработаны также универсальные программные продукты, которые могут быть применены на судах различных типов. После инсталлирования таких программ в память компьютера вводятся параметры судна, необходимые при расчетах мореходности и выборе режима движения на волнении.

Штормовые диаграммы, специальные программы, а также информация, содержащаяся в нормативных документах, помогают капитану выбирать оптимальное решение. Но необходимо отметить, что расчетным путем пока невозможно предусмотреть все многообразие ситуаций, возникающих при попадании судов в штормовые условия.

Оптимальный режим движения в условиях ветра и волн. Выбор режима плавания на волнении зависит от многих факторов. Здесь необходимо учитывать реальные и прогнозируемые гидрометеорологические условия на пути следования, навигационную обстановку, возможность обледенения судна, характер перевозимого груза, его размещение, количество судовых запасов и, главное, мореходность судна при различных сочетаниях курса и скорости. Оптимальным в шторм является режим движения, отвечающий экстремуму подходящего критерия. При выборе критерия оптимальности, прежде всего, учитывается, что для эффективной эксплуатации судна необходимо, чтобы в любую погоду оно по возможности держало путь по назначению без излишней потери ходового времени. Поэтому *оптимальному режиму хода в условиях умеренного или значительного волнения соответствует наибольшее значение скорости судна в диапазоне от минимальной до полной, при которой судно остается мореходным.*

Когда из-за погодных условий судно не может удерживать запланированный курс, критерием оптимальности обычно служит скорость сближения с активной плановой путевой точкой (соответственно и с пунктом назначения). Под активной плановой путевой точкой понимается ближайшая из запланированных точек изменения курса, через которую судно

обязательно должно пройти на пути в порт назначения. *Курс и скорость в штормовой обстановке оптимальны, когда судно мореходно и скорость его сближения с активной плановой путевой точкой максимальна.*

Для расчета наилучших значений курса и скорости необходимо знать параметры волнового поля. Они могут быть взяты из данных о волнении, передаваемых Гидрометцентрами, или измерены на судне. Традиционно на судне высота волн определяется глазомерно при прохождении их вдоль борта, направление волнения устанавливается с помощью пеленгатора, а средний кажущийся период находится с помощью пеленгатора и секундомера. Точность и полнота таких данных часто недостаточна для выбора наиболее благоприятных значений курса и скорости. Ряд современных судов оснащены специальными, основанными на РЛС системами, которые предоставляют достаточно полную и точную информацию о волнении, включая его спектр. АСКМ определенных типов оценивают параметры волнового поля по измерениям элементов качки, используя те или иные алгоритмы [17-19]. При такой оценке приблизительно за 20 минут с достаточной для практики точностью определяются все основные характеристики волнения, включая его спектр. Путевая регистрация, анализ параметров качки и пульсаций скорости судна, сопоставление их с нагрузкой на движителях, расходом топлива и динамикой переключений руля помогают при оптимизации хода судна в условиях умеренного волнения и при выборе безопасных режимов штормового плавания.

Зная параметры волнения, зависимость от них параметров мореходности и операционные ограничения судна, можно выбрать наилучший режим его движения. Как уже упоминалось, состояние судна является мореходным, когда значения параметров движения и напряжений элементов корпуса, показатели остойчивости судна и работы главного двигателя, вероятности заливания, слеминга, разгона винта, находятся в допустимых пределах. Для оценки безопасности штормового плавания конкретного судна с определенной загрузкой устанавливается состав его **вектора критериев мореходности.**

Обозначим его \vec{Cr} . К составляющим этого вектора у одних судов относится амплитуда углов бортовой качки, вероятности слеминга, разгона винта; у других – ускорения при бортовой качке, вероятность заливания, вертикальные изгибающие моменты на корпусе. Когда возможна потеря остойчивости, то в составляющие вектора мореходности включается метацентрическая высота. Затруднения в оценку мореходности вносит то обстоятельство, что у одного и того же судна в разных рейсах состав вектора операционных критериев может быть неодинаковым. Этот состав можно установить с помощью АСКМ, отобразив на полярной диаграмме скоростей линии предельных значений всех величин, которые можно использовать в качестве критериев, и оценив по полученной картине, какие из них определяют мореходность.

Охарактеризуем один из алгоритмов расчета оптимальных курса и скорости на волнении по критерию скорости сближения с активной плановой путевой точкой. Допустим, что для рассматриваемого судна вектор критериев мореходности включает показатели амплитуд бортовой качки (Cr_θ), слеминга (Cr_S), перегрузки главного двигателя (Cr_E), потери управляемости из-за малой скорости (Cr_C):

$$\vec{Cr} = (Cr_\theta, Cr_S, Cr_E, Cr_C).$$

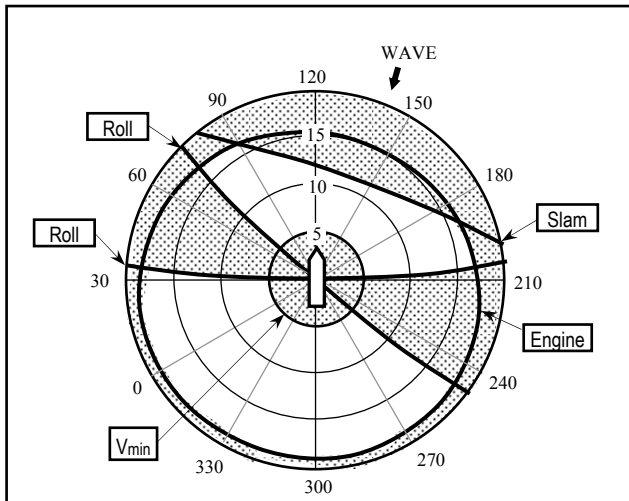
Решение задачи основывается на матрице значений $\vec{Cr}_{i,j}$, рассчитываемой для курсов K_i в диапазоне от 0 до 360^0 через 5^0 или 10^0 и для значений скорости хода V_j от самого малого до полного через 1 узел. Элементы этой матрицы получаются с учетом данных о ветре и волнении. Путем анализа значений $\vec{Cr}_{i,j}$ определяются границы режимов хода по каждому критерию. Область неуправляемости ограничивается самым малым ходом или другим подходящим значением V_{\min} . Одна из ситуаций, когда судно следует курсом 120^0 , представлена на рис. 5.20. Для каждого направления K_i определяется

максимальное значение скорости V_{mi} , при котором судно мореходно (компоненты вектора $\vec{C}r$ не выходят за операционные ограничения). Если при всех скоростях движение курсом K_i опасно, то он исключается из дальнейшего рассмотрения.

Затем находятся проекции $V_{mi}^{(II)}$ скоростей V_{mi} на курс K_{II} к активной плановой путевой точке. Курс K_S и скорость V_S , соответствующие наибольшей (с учетом знака) из проекций $V_{mi}^{(II)}$, являются наилучшими для движения в условиях волнения.

Преимуществом современных программ перед штормовыми диаграммами, помимо высокой скорости расчетов, являются:

- *учет интенсивности и частотного распределения обеих составляющих волнения (ветровых волн и зыби);*
- *учет размеров, формы корпуса судна и его загрузки;*
- *анализ достаточного для оценки и оптимизации мореходности судна числа параметров, включая и нагрузки в уязвимых местах корпуса;*
- *способность уточнения расчетных зависимостей на основе результатов измерений параметров мореходности.*



- Область допустимых режимов движения.
- Запрещенная зона

Рис. 5.20. Зоны режимов движения

Хотя программные средства для оценки мореходности и выбора режима движения эффективнее штормовых диаграмм, они не могут пока охватить все многообразие возможных условий плавания и считаются вспомогательным средством, облегчающим судовождение в штормовых условиях, но не освобождающим капитана от принятия решений и ответственности. Кроме рекомендаций этих программных продуктов, при выборе режима штормования капитан должен учесть особенности конкретного перехода: наличие палубных и крупногабаритных грузов, свойства и размещение грузов, вероятность их смещения, количество запасов, возможность обледенения, состояние систем и механизмов, подготовленность экипажа и другие обстоятельства, которые влияют на безопасность судна, груза в штормовых условиях, экономические показатели рейса.

В сильный шторм важно не только правильное определение режима штормования, но и управление судном при переходе в этот режим и при удержании его. Для любого судна в

зависимости от условий и степени шторма поворот на другой курс связан с неприятными или даже опасными обстоятельствами: усилением качки, зарыванием в волну, попаданием больших масс воды на палубу и с другими эффектами [3,7]. К самой трудной операции управления в шторм следует отнести необходимость приведения носа судна к ветру, если ранее оно шло по волне. Особенно это тяжело и до некоторой степени опасно для судов, груженных сыпучим грузом, так как при положении лагом к волне судно получает большой крен, и груз может сместиться. При управлении рулем в процессе поворота должна учитываться не только величина изменения курса, но и начальный, промежуточные, конечный курсовые углы волнения и другие обстоятельства. Например, следует выбрать время начала поворота, чтобы избежать в процессе его выполнения ударов больших волн в борт. Средняя частота появления таких волн составляет приблизительно $1/20$ из числа проходящих волн. Поэтому, чтобы в шторм лечь на новый курс, наблюдением устанавливается закономерность изменения размеров волн. Поворот выполняется сразу после прохождения очередной группы наиболее развитых волн. В штормовых условиях из-за трехмерности волнения обычно 2-3 группы крупных волн проходят мимо борта, и лишь после этого происходит встреча судна с такой волной. Если принять период штормовых волн порядка 8 с., то получается, что в среднем столкновение с группой больших волн происходит через 4-5 минут. Для обеспечения безопасности в ряде случаев перед поворотом следует уменьшить скорость хода, или при его выполнении кратковременно увеличить мощность двигателя для повышения эффективности руля.

Удерживать судно на курсе в штормовых условиях также непросто. Авторулевой может не справиться с этой задачей. Нередко требуется заблаговременно перейти на ручное управление, так как в штормовых условиях неуправляемость судна опасна. Вручную удерживать заданный курс в сильный шторм удастся чаще всего переключками руля на большие углы.

Отсюда можно заключить, что хотя средства контроля и прогноза мореходности повышают безопасность штормового

плавания, значительную роль в этом процессе имеют опыт и подготовленность судового персонала.

6. Понятие о методах выбора оптимального плана перехода

Все более осознается, что высококвалифицированное планирование переходов с учетом прогнозов погоды и мореходных свойств конкретного судна является важным вкладом в безопасность, надежность и экономичность эксплуатации флота. Системы, прогнозирующие мореходность судна, выгодно дополняют компьютерные устройства, предназначенные для планирования его пути. Нередко эти средства объединяются в рамках одной системы. Вопросам выбора оптимальных планов следования к пунктам назначения посвящены работы многих ученых (В.Г.Сизов, З.К.Абузяров, К.П.Васильев, Л.С.Шифрин, В.В.Дремлюг, О.Н.Землин, В.М.Лившиц, Ю.А.Хованский, С.С.Кубрин, Н.Н.Моисеев, Н.К.Бурова, В.Т.Долгочуб, В.И.Малушин, В.В.Правдюк, А.Н.Тарасов, Н.М.Тверье, Е.Д.Баскаков, В.И.Удалов, Г.И.Уханов, Ю.М.Филиппов, G.J.Hatliner, H.D.Hamilton, G.Arnason, F.D.Falkner, Takagi Matao, Ganno Masaaki, Hosoda Ryusuke, Shimazaki Haruko, Henry Chen, Peter Lacey и др). Ниже освещены принципы планирования переходов с учетом мореходных свойств судна.

6.1. Общие сведения о планировании переходов

Понятие о плане перехода. Планированию и проработке рейсов уделяется первостепенное внимание, так как от качества выполнения этих задач существенно зависят экономические показатели работы и безопасность судов. Под **планом перехода** обычно понимается график, определяющий в пространстве и во времени предстоящий процесс следования судна от причала порта отхода до причала пункта назначения. Этим планом устанавливается маршрут движения, скорость хода на его участках, время отхода, моменты прибытия в поворотные точки и в конечный пункт. Краеугольной задачей планирования

перехода, несомненно, является выбор подходящего маршрута следования к порту назначения. Безопасный путь, с наибольшей полнотой соответствующий целям рейса, называют по-разному: *наилучшим, наивыгоднейшим, оптимальным.*

При составлении плана перехода используются данные о цели рейса, включая требования к ее достижению, сведения о судне как объекте управления, информация о внешних условиях на пути судна. Чтобы план был эффективным, детально прорабатываются маршруты и режимы движения, навигационно-гидрографические и гидрометеорологические условия на линии пути, использование ресурсов и многие другие вопросы. Основным средством совершенствования планов перехода являются прогнозы будущего состояния внешней среды и мореходности судна в районах плавания. Для выбора наивыгоднейшего пути необходимы прогностические данные о ветре, волнении, поверхностных течениях, районах плохой видимости, зонах обледенения, сведения о ледовой обстановке, о наличии айсбергов, и т.д., а также модели, с достаточной полнотой и точностью отражающие реакцию судна на внешние воздействия.

Постановка задачи составления плана перехода может быть различной. Например, если маршрут перехода, время отхода из порта погрузки и прихода в конечный пункт назначены, то при планировании следует установить режимы хода на участках пути и моменты прихода в поворотные точки. Когда заданы моменты выхода в рейс и прихода в порт разгрузки, а путь движения не назначен, то при планировании необходимо выбрать маршрут следования, режимы хода на его участках и рассчитать моменты прихода в поворотные точки.

Выбор наилучшего варианта плана перехода основывается на оценках эффективности всех возможных вариантов. Заключительный подсчет экономической выгоды плавания из порта отхода в пункт назначения согласно намеченному плану обычно производится после рейса путем сопоставления его показателей с расчетными результатами условного выполнения такого рейса по климатическому пути, но при наблюдавшихся в действительности гидрометеорологических условиях.

Оптимальный план перехода – это график следования к порту назначения, соответствующий экстремуму подходящего критерия эффективности. Такой критерий называют также *критерием качества* и *критерием оптимальности*. Он должен быть количественным, чтобы численно, объективно сопоставлять возможные варианты перехода и выбирать из них наилучший. Т.е. **критерий эффективности** должен служить мерой степени соответствия плана основным целям судна в предстоящем рейсе. К выполнению перехода предъявляются требования безопасности судна, сохранности груза, соблюдение расписания, благоприятных условий для работы людей и технических средств, экономии энергоносителей и расходных материалов и т.д. Если пытаться все эти требования удовлетворить полностью, то из-за противоречивости ряда из них процедура выбора оптимального плана становится неопределяемой. Поэтому в качестве критерия эффективности выбирается показатель, соответствующий основной цели предстоящего рейса. Другие требования к его выполнению учитываются путем введения определенных ограничений на план перехода. Необходимо отметить, что в разных рейсах одного и того же судна его состояние, основные задачи и показатели эффективной работы могут отличаться. Отсюда следует, что критерии оптимальности планов движения одного и того же судна могут быть неодинаковыми.

Экономические критерии. Рассматривая основные цели переходов судов, необходимо отметить, что на первом месте в перевозках грузов морем стоят вопросы экономической выгоды. Поэтому критерий оптимальности плана должен быть мерой экономичности предстоящего перехода. *Экономичность* доставки груза из порта отхода в пункт назначения оценивается величиной эксплуатационных расходов судна. Выбор маршрута перехода и режимов движения на его участках влияет на следующие статьи этих затрат:

- *топливо, смазочное масло;*
- *содержание экипажа (заработанная плата, питание и др.);*
- *расходы на поддержание судна, его механизмов в рабочем состоянии, на ремонт.*

Последний вид затрат при оценке планов переходов обычно не принимается во внимание, ввиду отсутствия достаточно точной информации о количественном влиянии на них выбора маршрута и режимов хода. Учитывая это обстоятельство, применяются следующие экономические критерии эффективности планов переходов.

Если срок прибытия судна в пункт назначения строго не определен, то в качестве критерия эффективности плана обычно принимается *длительность перехода по времени*. Это обусловлено тем, что основные расходы судна (на топливо и смазочное масло, на содержание экипажа) практически пропорциональны времени. В результате, чем меньше времени судно затратит на переход, тем он экономичней. Применяется в этом случае и комбинированный критерий, предусматривающий минимизацию *длительности перехода и расхода топлива* с определенным соотношением между ними, учитываемым с помощью весового множителя.

Когда срок отхода и прихода заданы, то для транспортных судов критерием эффективности плана является *количество затрачиваемого на переход топлива*. Это объясняется тем, что здесь затраты на содержание экипажа одинаковы для всех вариантов плана. Стоимость же топлива является преобладающей статьёй эксплуатационных расходов судна. У некоторых судов она достигает 80% этих затрат. Топливо на судне используется для работы главной движительной установки и для вспомогательных целей (навигационных, хозяйственных и других). Потребление топлива для вспомогательных целей обычно не зависит от выбираемого маршрута и режимов хода на его участках. Таким образом, основным показателем оптимальности плана перехода в рассматриваемом случае является *потребление топлива и смазочного масла главной движительной установкой*. Стоимость бункерного топлива в настоящее время превысила 200 долларов за тонну. Крупнотоннажные суда с мощной машиной расходуют за сутки на ходу 20 и более тонн топлива. Нетрудно подсчитать, что при таких обстоятельствах уменьшение потребления топлива даже на один процент

оборачивается за год существенной экономией финансовых средств.

Меры, принимаемые на современном этапе для повышения эффективности грузопотоков, включают строгое определение моментов перевалки грузов. Это говорит о том, что в скором времени для грузовых судов критерий количества затрачиваемого на переход топлива станет преобладающим.

Другие виды критериев. Кроме рассмотренных выше заданий на рейс, определивших названные выше критерии, могут встретиться и другие варианты, которые требуют применения иных критериев оптимальности. Например, для *пассажирских судов*, когда задано их расписание движения между портами, критерием эффективности может выступать **величина углов и ускорений при качке**, определяющая комфортность условий для пассажиров.

Безопасность судна и груза. Перевозка грузов является эффективной, только при отсутствии повреждений судну и грузу в процессе рейса, и, тем более, аварийных происшествий и аварий. Обеспечение безопасности – важнейшее требование к составлению планов переходов. Для возможности численного учета, его выражают через операционные ограничения судна, которыми могут быть:

- *предельное значение высот волн на переходе;*
- *граничные значения для параметров качки;*
- *лимитирующие значения для элементов вертикального движения оконечностей судна;*
- *границы для вероятности слеминга (заливания, разгона гребного винта);*
- *пределы напряжений в уязвимых элементах корпуса;*
- *другие ограничения и комбинации вышеприведенных границ.*

С учетом основных операционных ограничений условия эффективности планов перехода, например, могут формулироваться так:

- для балкеров и танкеров – минимальное время рейса, на маршруте которого нагрузки на корпусе будут в допустимых пределах;
- для пассажирских судов – комфортные условия для пассажиров при строгом соблюдении расписания. Здесь комфортность

определяется границами параметров качки, выше которых развивается морская болезнь;

- для контейнеровозов (а также и для других грузовых судов) – наименьший расход топлива при заданном времени прибытия в пункт назначения без повреждений судна и груза. Здесь отсутствие опасности судну и грузу может определяться границами параметров качки, вероятностью мореходных опасностей, пределами нагрузок на корпусе и в креплениях грузов, комбинацией ограничений.

Оптимальное планирование на борту судна. За два последние десятилетия появились предпосылки для эффективного планирования переходов с учетом прогнозов погоды на борту судна.

Разработано новое поколение моделей для предсказания погоды, которые позволили на береговых Гидрометцентрах с помощью суперкомпьютеров обеспечивать высокую точность в прогнозировании элементов погоды на весь Мировой океан (обычно до 10, 15-ти суток вперед через интервал 12 часов). Здесь достаточно отметить, что по новым спектральным моделям волнения высота волн на трое суток вперед предсказывается с погрешностью, меньшей одного метра. Обеспечение требуемой для судовождения и других приложений точности прогнозов ветра и волнения – это проблема береговых Гидрометцентров. Формирование таких прогнозов не входит в задачу судовых систем. Высококачественные прогностические данные для целей судовождения передают организации: European Center for medium-range weather forecast, UK's MET Office, Japan's JMA, the US National Center for environmental prediction, US Navy's Fleet numerical oceanographic Center, прогностический центр Oceanweather Inc. (США) и ряд других. На современном этапе Гидрометцентры предоставляют параметры (высота, период, направление) как смешанного волнения, так и двух его основных составляющих (ветровая волна и зыбь).

Развитие цифровой компьютерной связи сделало возможным передачу с береговых станций в память бортовых компьютеров прогностической информации о погоде на весь Мировой океан. Сеточные данные о полях ветра, волнения, поверхностных

течений и других элементов представляются рядом Гидрометцентров с достаточным разрешением по широте и долготе ($0,5^0 \div 1,5^0$). Для целей выбора пути достаточно плотными считаются уже двухградусные сеточные данные. Когда разрешение ниже, в больших квадратах сетки может оказаться «провал» максимальных значений гидрометеорологических данных, что повлияет на точность расчетов.

На основе успехов в гидродинамике созданы эффективные математические методы, позволяющие достаточно точно по прогнозируемым значениям ветра и волнения с учетом глубины под килем предсказать реакцию судна (параметры всех видов качки, напряжения корпуса, увеличение сопротивления движению и падение скорости, вероятность резонанса, слеминга, заливания и т.д.). Появилась возможность достаточно точно предвычислять расход топлива с учетом многих факторов (вида двигателя, режима хода, ветра, волнения, мелководья, температуры воздуха и воды).

Отмеченные выше достижения послужили толчком к разработкам новых методов и компьютерных программ для облегчения капитану и его помощникам нахождения безопасного и экономически выгодного плана следования судна к пункту назначения.

6.2. Планирование оптимальной скорости перехода по заданному маршруту

Постановка задачи. Рассмотрим задачу планирования рейса с учетом гидрометеорологических прогнозов в упрощенном варианте, когда маршрут движения, время отхода и прихода заданы. Требуется определить скорость на участках маршрута, при которой судно прибудет в порт назначения в заданный срок с минимальным расходом топлива.

- Решение поставленной задачи** включает следующие этапы:
- *нахождение максимальных рабочих режимов хода на отрезках пути без учета прогнозов погоды и срока прибытия в конечный пункт;*

- расчет максимальной рабочей скорости на отрезках пути и продолжительности рейса для ожидаемых погодных условий без учета назначенного времени прихода;
- сравнение полученного времени с заданным;
- определение режимов хода, обеспечивающих максимальную экономию топлива при заданном времени прибытия в пункт назначения.

На первом этапе, исходя из возможностей судна и установленных официальными властями для ряда районов ограничений, определяются наибольшая V_{mx} и наименьшая V_{mn} скорости хода на отрезках маршрута без учета прогнозов погоды. Если официальных ограничений на скорость движения в районе плавания нет, то максимальной считается скорость полного хода. Установленные для каждого отрезка маршрута максимальные рабочие режимы хода обозначаются $V_{mx,j}$, где j – номер отрезка маршрута.

На втором этапе по значениям $V_{mx,j}$ с учетом поверхностных течений рассчитывается скорость хода относительно грунта и моменты прибытия судна в поворотные точки. По этим моментам и данным прогнозов погоды определяются ожидаемые значения параметров ветра и волнения на отрезках маршрута. На основе анализа глубин на линии пути выделяются мелководные участки. Если на одном отрезке маршрута погодные условия разные и/или на нем наряду с глубокой водой имеется мелководье, то он разбивается на меньшие участки, на каждом из которых коэффициент сопротивления k_R движению судна приближенно одинаков. Полученное количество участков маршрута, длину j -го участка и его направление обозначим соответственно как N , S_j , K_j .

Для всех выделенных участков находятся максимальные рабочие режимы V_{Zj} , при которых движение в ожидаемых погодных условиях безопасно. С этой целью выбирается подходящий для судна вектор критериев мореходности. В нем предусматривается, что V_{Zj} не должно быть меньше нижнего

порогового значения скорости $V_{mn,j}$, при котором судно теряет управляемость.

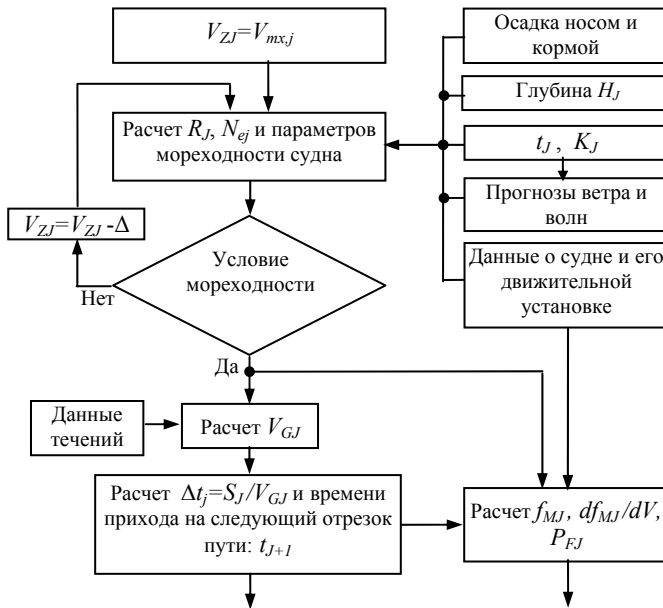


Рис. 6.1. Алгоритм расчета режима хода, времени прохождения и расхода топлива на отрезках пути

Схема алгоритма получения V_{ZJ} для отдельного участка маршрута приведена на рис. 6.1. Расчет проводится методом последовательных приближений. Начальное значение V_{ZJ} принимается равным $V_{mx,j}$. На каждом шаге в процессе приближений V_{ZJ} уменьшается на величину Δ и затем определяются: буксировочное сопротивление R_J с учетом глубины участка и ожидаемой на нем погоды, необходимая эффективная мощность двигателя N_{eJ} , значения критериев мореходности. Вычисление V_{ZJ} заканчивается, когда условие мореходности удовлетворяется. После этого находится:

- скорость относительно грунта V_{GJ} ;
- время прохождения участка пути Δt_J ;
- момент прибытия t_{J+1} в следующую путевую точку, продолжительность плавания к ней с момента выхода;
- потребление топлива на милю f_{MJ} , производная этого расхода по скорости df_{MJ} / dV , расход топлива P_{FJ} ;
- по времени t_{J+1} уточняются значения прогностических данных ветра и волнения для следующего участка пути.

Режим хода и перечисленные данные определяются для всех участков пути. После этого рассчитывается общее время перехода Δt_Σ и количество топлива – $P_{F\Sigma}$, необходимое для его выполнения.

На третьем этапе сравнивается полученное время перехода Δt_Σ с заданным Δt_Z :

$$\delta t_Z = \Delta t_Z - \Delta t_\Sigma.$$

Если $\delta t_Z < 0$, то доставить груз в порт назначения в заданный срок не представляется возможным. Сообщение об этом выдается оператору, и вычисления заканчиваются.

При $\delta t_Z > 0$ можно уменьшить скорость хода, сэкономить топливо и смазочное масло. В этом случае переходят к выполнению четвертого этапа.

На четвертом этапе выбирается отрезок пути, на котором целесообразно снизить скорость хода. Чтобы экономия топлива была максимальной, анализируются значения производной по времени расхода топлива на милю (df_{MJ} / dV) и выбирается участок маршрута (обозначим его номер k), на котором эта производная максимальна. На нем снижению скорости соответствует максимальная экономия топлива на милю пути. Для определения подходящей скорости V_{GK} вначале находится время, за которое следует пройти участок k , чтобы срок перехода соответствовал заданному:

$$\Delta t_K^{(H)} = \Delta t_K + \delta t_Z.$$

По этому времени вычисляется требуемое значение $V_{GK}^{(H)}$ путевой скорости на участке k :

$$V_{GK}^{(H)} = \frac{S_K}{\Delta t_K^{(H)}}.$$

Затем по $V_{GK}^{(H)}$ находится скорость относительно воды – $V_{ZK}^{(H)}$, при удержании которой на участке k время рейса будет равно заданному. В зависимости от величины $V_{ZK}^{(H)}$ выбирается один из следующих вариантов продолжения расчетов, обозначенных ниже как **А** и **Б**.

А) Когда $V_{ZK} - V_{ZK}^{(H)}$ меньше двух узлов и $V_{ZK}^{(H)} > V_{mn}$, то принимается, что $V_{ZK} = V_{ZK}^{(H)}$. Для этого значения определяется потребление топлива на милю пути, затраты топлива на переход и стоимость сэкономленного топлива. Затем рассчитываются моменты прибытия в поворотные точки и полученные значения t_J , Δt_J , V_{ZJ} , V_{GJ} и другие окончательные элементы плана предоставляются в наглядной форме оператору. На этом вычисления заканчиваются.

Б) Если $V_{ZK} - V_{ZK}^{(H)}$ больше двух узлов, то считается, что $V_{ZK} = V_{ZK} - 2$. Для нового значения скорости оценивается расход топлива на милю и производная этого расхода по скорости. Если V_{ZK} меньше минимальной для заданного участка скорости, то принимается $V_{ZK} = V_{mn}$ и участок k исключается из дальнейшего рассмотрения.

Выполняется возвращение к началу четвертого этапа.

6.3. Выбор оптимального маршрута перехода и скорости движения по нему

Задача планирования перехода в общем случае включает две части:

- *выбор маршрута следования;*
- *назначение скорости хода на участках пути.*

При компьютерном решении можно выделить три типа постановки задачи планирования переходов. ***Первый тип*** характеризуется определенностью множества альтернативных траекторий следования от порта отхода к порту назначения. ***Второй тип*** предполагает известность только границы судоходной области, через которую пройдет маршрут судна. ***Третий тип*** задачи планирования переходов представляет собой комбинацию двух первых, когда для одних районов на пути следования известны альтернативные маршруты их прохождения, а для других – только область, в которой надо выбрать траекторию движения.

Решение задачи первого типа по критерию расхода топлива сводится к рассмотренному в предыдущем параграфе планированию оптимальной скорости на заданном маршруте. Такое планирование выполняется для всех альтернативных траекторий. Искомым из множества альтернативных путей считается тот маршрут, для перехода по которому требуется минимальное количество топлива с учетом прихода в заданное время.

Если *критерием оптимальности выбрана продолжительность перехода*, то при планировании по алгоритму параграфа 6.2 значения скорости на отрезках рассматриваемого маршрута принимаются равными максимальному значению, при котором состояние судна является мореходным. После просчетов каждого из альтернативных маршрутов из них выбирается тот, время перехода по которому минимально.

Задача второго типа характерна для планирования трансокеанских переходов. Известны много методов, предложенных для ее решения (вариационные, изохрон, динамического программирования, перебора вариантов детерминированным и случайным способом в том числе и с помощью генетического алгоритма, *B*-сплайнов с применением многоцелевого генетического алгоритма и др.). Ниже характеризуется только один подход к решению этой задачи

(перебор вариантов), причем без рассмотрения упрощающих допущений, используемых для уменьшения объема вычислений. В этом подходе можно выделить три этапа:

- задание допустимой области решений в виде графа;
- расчет скорости движения, времени плавания и расхода топлива на возможных отрезках пути;
- поиск на графе оптимального решения по заданному критерию.

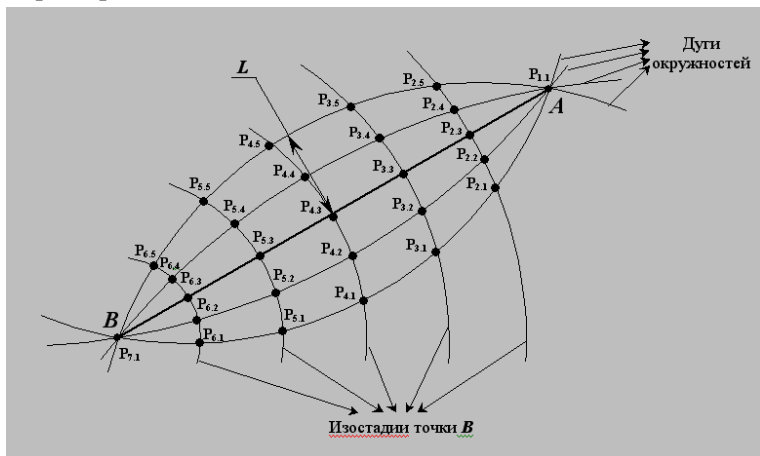


Рис. 6.2. К пояснению принципа генерации вершин графа

На первом этапе с помощью графа устанавливается область допустимых решений задачи. С этой целью могут быть использованы самые различные методы его определения. Например, граф может задаваться значением L максимального отклонения от стандартного маршрута, числом n путевых точек и количеством m положений каждой из них (n, m - нечетные). Генерация вершин графа может производиться относительно локсодромии, ортодромии или другого рекомендуемого для сезона плавания климатического пути.

Нередко вершины графа выбираются на изостадиях точки отхода или прихода, проведенных через интервал, приблизительно равный расстоянию, проходимому судном за 12 часов. Достоинством первого графа является возможность более

простого установления прогнозируемых значений ветра и волн в его вершинах, а положительной чертой второго – что после одинакового числа отрезков, пройденного по любому выбранному пути, судно оказывается на одном расстоянии от пункта назначения.

Принцип образования графа с начальной точкой пути A и конечной B ($n = 7, m = 5$) поясняется на примере определения его вершин $P_{k,j}$ на изостадиях точки прихода относительно локсодромии (рис. 6.2), представленной на карте в проекции Меркатора. Граф относительно ортодромии находится аналогично. В качестве примера на рис. 6.3 на меркаторской сетке представлен результат расчета вершин графа относительно ортодромии, полученный с помощью компьютера при $n = 15, m = 17, L = 600$ миль.

Ребра графа соединяют его вершины на соседних изостадиях и направлены в сторону уменьшения расстояния до пункта B . Они рассматриваются как возможные отрезки пути из точки A в точку B . Количество N_R ребер графа может быть подсчитано по формуле:

$$N_R = (n - 2)m^2 + 2m .$$

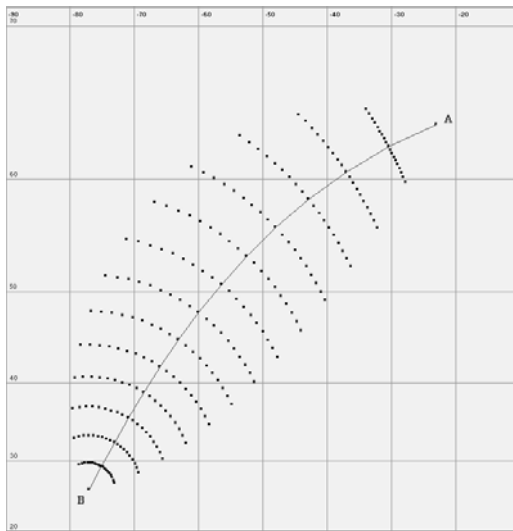


Рис. 6.3. Генерация вершин графа относительно ортодромии

На втором этапе рассчитываются локсодромические расстояния $D_{i,j,k}$ и курсы $K_{i,j,k}$ всех ребер $[P_{i,j}, P_{i+1,k}]$ графа. Индексы i, j в обозначениях $D_{i,j,k}$, $K_{i,j,k}$ определяют вершину $P_{i,j}$, где начинается ребро, а индекс k указывает вершину $P_{i+1,k}$ на соседней изостадии, в которой оно кончается. Затем приближенно находятся моменты $(ETA)_{i,j}$ прибытия в вершины графа $P_{i,j}$.

Из имеемых прогностических данных о погоде выбираются значения параметров ветра, волнения, поверхностных течений для точек $P_{i,j}$ на моменты $(ETA)_{i,j}$. Используя данные об ожидаемой погоде в вершинах графа, находятся скорость хода, время в пути, расход топлива на каждом его ребре. Для этой цели можно применить алгоритм, приведенный на рис. 6.1.

На третьем этапе выполняется поиск оптимального по заданному критерию варианта пути. Из всех маршрутов, которые можно провести через путевые точки $P_{k,j}$

(последовательно по номерам $k = 1, 2, \dots, n$), необходимо найти лучший. Естественно, чем больше задается вершин графа (чем он «плотнее»), тем точнее определяется оптимальный путь к точке назначения.

Когда критерием оптимальности выбрана продолжительность перехода, то на графе осуществляется поиск маршрута и максимальной скорости движения на его отрезках, при которых время в пути будет минимальным, а состояние судна – мореходным. Если критерием оптимальности является расход топлива при заданном времени прибытия в точку B , то обычно вначале планируется переход по критерию минимума времени при обеспечении мореходности судна. Затем производится коррекция планируемой скорости хода на отрезках этого пути для обеспечения минимального расхода топлива при заданном времени прибытия в точку B .

Метод перебора. Для выбора маршрута могут быть применены различные методы. Первый из них – метод перебора всех возможных вариантов пути. При большом числе вершин графа он связан с большими затратами времени на получение результата. В подтверждение этого достаточно отметить, что уже при $n = 9, m = 9$ число вариантов пути, которые нужно перебрать, превышает миллион. Поэтому метод перебора применяется, когда количество вершин графа выбрано не слишком большим и с использованием тех или иных ограничений (например, на величину изменения курса при переходе с одного отрезка на другой и ряда других). Для уточнения полученного при небольшом числе вершин графа маршрута может быть выполнено второе приближение. В нем найденный в первом приближении путь считается стандартным. Около него образуется охватывающий уже узкую область новый граф. В этой области также методом перебора находится второе приближение к оптимальному маршруту.

Генетический алгоритм. При «плотном графе» оптимальный вариант пути может находиться с помощью генетического алгоритма [16]. Он представляет собой эффективный метод случайного поиска экстремальных значений. При использовании этого алгоритма в задачах оптимизации простой

рандомизированный перебор поиска экстремума по методу Монте-Карло заменяется использованием особенностей биологической эволюции на уровне механизма кодирования и наследования – отбором наилучшей популяции (варианта решения), мутацией и скрещиванием (кроссинговером). *Мутация* – это почти полный аналог случайного шага в методе Монте-Карло. Она состоит в случайном изменении текущего варианта решения. *Кроссинговер* заключается в обмене частями двух прежних наилучших популяций. Генетический алгоритм относится к классу методов оптимизации, обладающих наилучшими нелокальными свойствами.

Охарактеризуем процедуру применения генетического алгоритма к выбору оптимального плана рейса для случая, когда критерием его оптимальности является продолжительность перехода по времени. При использовании генетического алгоритма каждый маршрут рассматривается как особь, хромосома которой состоит из n генов $G_{k,r}$, где k - номер маршрута, r - номер путевой точки. Значение гена равно номеру вершины графа на изостадии, проходящей через путевую точку r .

В начале поиска задается первое поколение (начальный вариант расчета), включающее m особей (маршрутов). Обычно берутся маршруты с такими путевыми точками:

$$\left. \begin{array}{l} P_{1,1}, P_{2,1}, P_{3,1}, \dots, P_{n-1,1}, P_{n,1} \\ P_{1,1}, P_{2,2}, P_{3,2}, \dots, P_{n-1,2}, P_{n,1} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ P_{1,1}, P_{2,m}, P_{3,m}, \dots, P_{n-1,m}, P_{n,m} \end{array} \right\}.$$

Жизнестойкость особи (маршрута) определяется с помощью целевой (фитнесс) функции. В поставленной задаче фитнесс функция представляет собой время перехода от точки A до точки B по анализируемому маршруту. Чем меньше это время, тем выше жизнестойкость особи.

Используя данные $t_{i,j,k}$ о прохождении отрезков графа, находится продолжительность по времени каждого маршрута из первого поколения и отбираются из них десять самых

«жизнестойких». Затем лучшие особи размножаются. Для этого с помощью операторов «скрещивания» и «мутации» получаются хромосомы второго поколения особей. Оператор скрещивания осуществляет обмен частями хромосом между двумя хромосомами популяции. Обычно используется одноточечный обмен, когда случайным образом определяется точка разрыва хромосомы и соответствующие сегменты хромосом родителей склеиваются в этой точке. Получается два генотипа потомков. Мутация – это преобразование хромосомы, случайно изменяющее одну или несколько ее позиций (генов).

В полученной второй популяции снова выбираются десять самых жизнестойких особи. После этого аналогично первому поколению лучшие особи размножаются, и получается их третье поколение. Таким же образом находятся следующие поколения, и для продолжения рода отбираются из них по десять самых лучших особей. На поколениях, достаточно удаленном от первого, вычисления заканчиваются. Хромосома лучшей особи последнего поколения определяет искомый маршрут. Достаточное для вычислений число поколений устанавливается на основании анализа результатов многочисленных расчетов.

В рейсе охарактеризованный оптимизационный процесс в идеале должен повторяться ежедневно с текущим местом судна и обновленным прогнозом погоды. При таком условии он представляет собой *динамический оптимизационный алгоритм* для выбора пути и скорости хода в океане.

7. Образцы судовых АСКМ

В настоящее время рядом фирм выпускаются серийные образцы систем для оценки, мониторинга, прогнозирования и оптимизации мореходности. Существующие АСКМ в определенной степени отличаются друг от друга составом оборудования, перечнем решаемых задач, методами их решений, информационными ресурсами. Ниже кратко характеризуются некоторые из выпускаемых АСКМ.

7.1. Система мониторинга параметров мореходности «HULLMOS»

Система «HULLMOS» разработана фирмой SIREHNA. Она предназначена для уменьшения напряжений корпуса и предупреждения появления их недопустимых значений в процессе эксплуатации судна. Это достигается на основе измерения деформаций корпуса при загрузке (статические напряжения) и параметров реакции судна на волнение на переходе (динамические нагрузки).

Состав системы. Базовая конфигурация системы включает в себя центральный модуль, который обычно располагается на мостике, резисторные тензодатчики с короткой (100 мм) и/или с длинной (1700 мм) основой, акселерометр на носу судна, каналы связи. Она может дополняться инерциальным модулем IMU, спутниковым датчиком GPMS (GPS based motion sensor), датчиком давления воды в носовой части днища и другими приборами.

Основные функции системы:

- *тензоизмерения и их анализ;*
- *измерение параметров движения корпуса и их анализ;*
- *определение характеристик морского волнения;*
- *регистрация данных и сигнализация;*
- *представление результатов измерений, анализа и обработки в наглядном виде;*

– *управление системой.*

Измерительные устройства. Система «HULLMOS» может использовать информацию измерителей механических напряжений, инерциальных и спутниковых датчиков линейных и угловых перемещений, манометров и других измерительных устройств.

Датчики напряжений могут устанавливаться на палубе и переборках. На палубе они располагаются таким образом, чтобы измерять деформации при общем продольном изгибе. Вид крепления датчиков должен обеспечить исключение эффектов влияния локальных напряжений, сварки и шлифовки на результаты измерений. Используемые в системе резисторные тензодатчики дополнены специальным электронным блоком для предварительного анализа результатов измерений. Этот блок содержит память и программные средства. В нем исключается влияние температуры на результаты измерений, выделяется статическая и динамическая составляющая нагрузок. Тензодатчики имеют и функции для самодиагностики. Они приспособлены для работы в локальной компьютерной сети. Выходная информация датчиков по каналам сети направляется для дальнейшего анализа в главный модуль системы.

В состав датчиков движения включен акселерометр, измеряющий вертикальное ускорение бака судна. Дополнительно в центральной части корпуса может устанавливаться и сопрягаться с системой инерциальный модуль IMU, измеряющий параметры движения судна во всех 6-ти степенях свободы. Предусмотрена возможность подключения к системе «HULLMOS» основанного на GPS спутникового измерителя параметров движения корпуса – GPMS.

Датчиком давления воды может служить манометр любого типа, удовлетворяющий требованиям к применению в АСКМ.

Главный модуль системы обеспечивает управление системой и процессом мониторинга параметров мореходности, выполняет анализ движения и напряжений судового корпуса, определяет состояние моря, поддерживает работу локальной сети, отображает результаты мониторинга и анализа.

При анализе нагрузок выполняются следующие операции:

- *определяются средние значения нагрузок;*
- *вычисляются стандартные отклонения от средних значений;*
- *находятся максимальные значения;*
- *оцениваются средние периоды изменения нагрузок;*
- *запоминаются и систематизируются результаты прошлых измерений;*
- *выявляются 24-часовые тенденции изменения нагрузок;*
- *отображаются тревожные сообщения, основанные на учете эксплуатационных ограничений, текущих оценок и трендов.*

Анализ движения корпуса включает:

- ~ *нахождение статистических характеристик параметров движения (средних, среднеквадратичных, пиковых значений);*
- ~ *оценку безопасности судна и груза;*
- ~ *оценку комфортности экипажа и/или пассажиров в разных частях судна (индикация возможности морской болезни);*
- ~ *выявление тенденций изменения параметров движения со временем;*
- ~ *предупреждение о приближении параметров движения к опасным границам и о превышении этих значений.*

Определение состояния моря в системе основано на измерениях параметров движения корпуса, нагрузок на нем, давления воды на уровне днища. При выполнении этой задачи оцениваются параметры волнения и его спектр по частоте и направлению. Кроме того, система запоминает результаты обработки и отслеживает тенденции изменения характеристик волнения со временем.

7.2. Система поддержки принятия решений «ОCTOPUS–DSS»

Изделие «ОCTOPUS-DSS» фирмы AMARCON BV представляет собой систему поддержки принятия решений по обеспечению безопасного плавания в неблагоприятных

погодных условиях. Эта система поставляется в разных конфигурациях. Она может оперировать информацией:

- *базы данных судна, содержащей характеризующие его параметры, в том числе и необходимые для оценки мореходности;*
- *компьютеров для расчета и управления погрузкой и балластировкой судна;*
- *приемника GPS и гироскопа;*
- *определителя параметров морского волнения по информации навигационной РЛС в X-диапазоне;*
- *прогнозов погоды;*
- *плана рейса судна.*

Система «OCTOPUS-DSS» преобразует текущую и прогностическую информацию в параметры реакции судна. Для этой цели в системе используются программные средства «SEAWAY» Дельфтского университета технологии. Система может выполнять непрерывный мониторинг параметров мореходности судна, предупреждать о приближении их значения к пороговым, сигнализировать о возможности слеминга, заливания и появления других мореходных опасностей. «OCTOPUS-DSS» просчитывает и отображает эффекты влияния на мореходность судна изменения курса, скорости, балластного состояния для текущих и прогнозируемых погодных условий. Помогает капитану выбрать оптимальный режим штормования.

Рассматриваемая система имеет программные средства для выбора оптимального маршрута и скорости хода на его участках с учетом ожидаемых погодных условий и оценок мореходности судна на оставшемся пути следования. При выполнении этой задачи могут использоваться различные критерии оптимальности (время перехода, расход топлива и др.). При расчетах учитываются многочисленные факторы, влияющие на скорость хода или требующие ее снижения капитаном для обеспечения безопасности судна и груза.

Система имеет программный модуль для обучения судоводителей работе с ней и для тренажа с целью получения необходимых навыков. «OCTOPUS-DSS» моделирует

различные неблагоприятные условия плавания, в которых оператор должен найти правильное решение, обеспечивающее эффективность эксплуатации судна. При необходимости от системы можно получить подсказку, что делать в тех или других условиях: как избежать слеминга, уменьшить заливаемость, предупредить перегрузку двигателя и т.д.

7.3. Система для оценки и оптимизации мореходности «VOSS»

Судовая система «VOSS» (Vessel Optimization and Safety System) фирмы Ocean Systems Incorporated (США) предназначена для избежания повреждений судну и грузу в тяжелых погодных условиях плавания и оптимизации маршрутов перехода. Она является эффективным средством для планирования рейсов с учетом погоды и консультантом по обеспечению безопасности в штормовых условиях. В настоящее время «VOSS» используется более чем на ста судах. На многих из них она интегрирована с навигационно-информационной системой «Voyage Management System» фирмы Litton Marine Systems и регистратором данных рейса.

Анализ разработчиками системы «VOSS» опыта ее эксплуатации показал, что она:

- *предотвращает задержки в пути из-за погодных условий на 80%;*
- *снижает количество повреждений корпуса на 73%;*
- *уменьшает число повреждений груза на 87%.*

Модель судна. Программные средства системы обеспечивают детальное моделирование движения корпуса судна в условиях качки, работу энергетической установки, расход топлива в различных погодных условиях. С помощью такой «виртуальной» модели достаточно точно оцениваются скорость и другие кинематические параметры судна при различных задаваемых погодных условиях. Для образования «виртуальной» модели судна используются следующие данные:

- *элементы общего чертежа судна;*
- *данные, характеризующие размеры и форму корпуса;*

- *гидростатические характеристики;*
- *характеристики гребного винта;*
- *характеристики главного двигателя;*
- *данные натурных испытаний маневренности и заводских испытаний двигателя;*
- *информация об остойчивости, погрузке и другие сведения.*

Модуль консультаций «VOSS» показывает эффект от изменения курса и/или скорости на бортовую, килевую качку, ускорения, на вероятность слеминга (заливания), на изгибающие моменты и перерезывающие силы в наиболее нагруженных балках корпуса. Система включает в свой состав датчик, непрерывно измеряющий текущие значения параметров качки судна (перемещения, скорости, ускорения). Он имеет размеры 115x66x31 мм³. По информации этого прибора вычисляются амплитуды и средние периоды параметров движения корпуса, вероятности превышения допустимых границ, отображаются графики изменения элементов качки, определяется спектр волнения, обеспечиваются заблаговременные предупреждения об основном и параметрическом резонансе. Кроме этого, «VOSS» отслеживает информацию о частоте вращения гребного винта и мощности главного двигателя.

Программные средства системы позволяют судоводителю устанавливать операционные ограничения для параметров качки, напряжений корпуса, работы главного двигателя. Совокупность таких параметров образует так называемый «пакет безопасной эксплуатации» (Safe operation envelope) называемый также конвертом (вектором) критериев мореходности. Система «VOSS» дает возможность для задаваемых судоводителем элементов ветрового волнения и зыби:

- *рассчитать параметры килевой, бортовой качки, ускорения различных частей корпуса;*
- *оценить вероятность слеминга, заливания, опасных ускорений, разгона двигателя;*
- *получить значения изгибающих моментов, перерезывающих сил;*

- *определить необходимость уменьшения мощности главного двигателя, чтобы предотвратить его перегрузку.*

Модуль «VOSS» для планирования переходов обеспечивает расчет времени прибытия в порт назначения по заданному маршруту при ожидаемых погодных условиях с учетом информации о поверхностных течениях, изменения буксировочного сопротивления движению судна, необходимого снижения скорости судоводителем для избежания мореходных опасностей. Он позволяет оператору составлять и генерировать маршруты с последующим нахождением наилучшего пути по критерию расхода топлива с исключением возможности повреждений судна и груза от погодных условий.

Гидрометеорологическая информация. Прогнозы ветра и волнения для системы «VOSS» генерирует метеоцентр Oceanweather (США). На нем для предсказания погодных условий используется обширная информация главных национальных метеоцентров США. Центр Oceanweather передает прогнозы ветра и волнения на десять суток вперед два раза каждый день в году. Высокое качество предсказания обеспечивается опытными метеорологами с помощью мощных компьютеров с программами для составления прогнозов на основе многочисленных исходных данных. Специалисты метеоцентра Oceanweather составили глобальную базу данных о ветре и волнении за прошедшие тридцать лет с интервалом 6 часов. Ее информация используется для многих целей, в том числе и для улучшения долгосрочного прогнозирования параметров ветра и волнения.

Метеоцентр Oceanweather предоставляет сеточные цифровые данные о текущей и ожидаемой погоде на весь Мировой океан с разрешением $1,25^{\circ}$ по широте и долготе. Эта информация включает:

- прогнозы скорости, направления приземного ветра, ветровых волн и зыби на период, до 10 суток;
- прогнозы атмосферного давления на земной поверхности на период, до 10 суток;
- прогнозы скорости местных ветров и высот волн у побережий;
- прогнозы высот, средних периодов и направлений смешанного волнения и его основных составляющих;

- сведения о пути движения и интенсивности тропических циклонов;
- средние значения скорости, направления поверхностных течений и расположение главных систем течений;
- текстовые советы по штормованию от Oceanweather и Правительственных центров предупреждений.

Эти сведения предоставляются специальными погодными серверами через Интернет. В судовом компьютере также находится помесечная климатическая база, данные которой могут использоваться при анализе погодных условий на предстоящем пути.

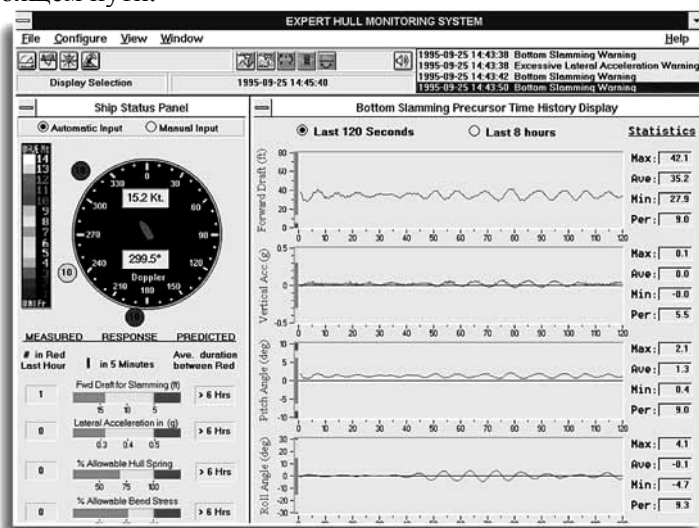


Рис. 7.1. Форма для представления параметров качки и нагрузок на корпусе в системе «VOSS»

Информации в системе «VOSS» отображается в нескольких формах. Одна из них представлена на рис. 7.1.

7.4. Волоконно-оптическая АСКМ «SENSFIB»

Система «SENSFIB» включает в себя следующие элементы:

- расположенные вдоль палубы волоконно-оптические приборы для измерения напряжений на корпусе при общем продольном изгибе;
- датчики локальных напряжений набора корпуса;
- акселерометры с электрооптическими конверторами;
- волоконно-оптическая сеть от надстройки судна до форпика;
- соединительные коробки для подключения к главной волоконно-оптической сети на судне световодов от датчиков информации;
- главный модуль системы, представляющий собой компьютер со специальным программным обеспечением, который связан с датчиками информации и станцией спутниковой связи, передающей данные о нагрузках на корпусе и другие сведения в офис компании;
- резервный блок питания;
- накопитель для хранения результатов измерений, обработки и данных, характеризующих состояние системы;
- принтер для распечатки отчетов;
- устройства сигнализации.

Волоконно-оптические датчики напряжений, используемые в системе «SENSFIB», основаны на решетке Брэггов и имеют следующие характеристики:

- размеры..... 220x140x30 мм³;
- вес.....0,25 кг;
- частота..... >100 гц;
- диапазон измерений.....>4000 мкε;
- чувствительность..... 1 мкε;
- нелинейность..... <1% в диапазоне 2500 мкε;
- температурный диапазон..... от –25⁰С до +70⁰С;
- помещены в корпусе из полиуретана.

Система «SENSFIB» обычно включает в свой состав один акселерометр, который размещается в диаметральной плоскости на баке судна и служит для измерения вертикального ускорения. Он снабжен электрооптическим конвертором и подсоединен к оптической сети через установленную на баке соединительную коробку. Акселерометр имеет следующие характеристики:

- диапазон измерений±3 g;
- частотный диапазон.....0–160 Гц;
- разрешение.....0,001 g;
- нелинейность.....<0,2%;
- температурный диапазон..... от –45⁰С до +85⁰С;

В волоконно-оптической сети используются 24-жильные кабели ($\varnothing 12,5$ мм) и четырехжильные световоды ($\varnothing 7,6$ мм).

Система «SENSFIB» выпускается в разных конфигурациях. Поставляемый комплект определяется покупателем. Системе обеспечена возможность соединения с компьютером для управления загрузкой, с приборами контроля балластного состояния, со средствами контроля крена и дифферента судна, с GPS-приемником, радаром для измерения параметров волнения, регистратором данных рейса, станцией спутниковой связи. «SENSFIB» может являться частью судовой централизованной системы мониторинга и сигнализации. В этом случае ее волоконно-оптическая сеть может использоваться для передачи данных других судовых средств, например, систем дистанционного контроля: главного двигателя, подруливающих устройств, уровня жидкостей в различных танках и т.д.

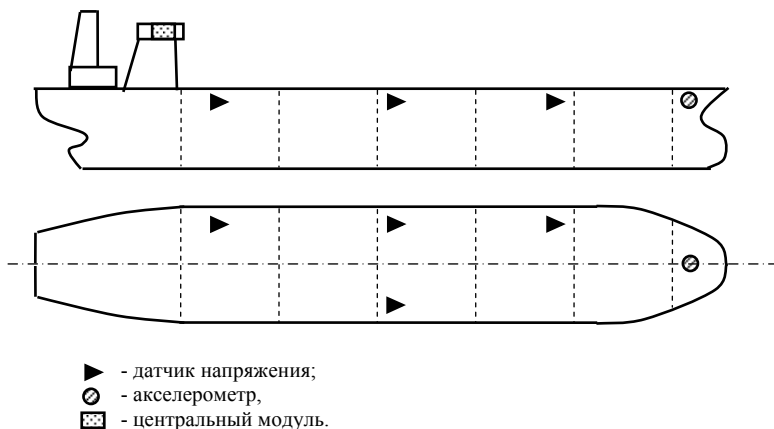


Рис. 7.2. Базовая конфигурация SENSFIB

Минимальная конфигурация «SENSFIB» для крупнотоннажных судов, перевозящих сухие грузы навалом, включает четыре тензодатчика, один акселерометр и главный модуль, расположенный на мостике. Датчики напряжений устанавливаются на палубе вдоль ДП и служат для измерения напряжений при общем продольном изгибе и кручении корпуса (рис. 7.2). По данным акселерометра определяются ускорение,

скорость и величина вертикального движения носовой части судна.

Регистр Ллойда рекомендует к этому комплекту добавлять в носовой части днища судна датчик давления для регистрации ударов о воду при слеминге. Рекомендации норвежского классификационного общества DNV дополнительно включают установку (рис. 7.3):

- датчиков местных напряжений на наборе в носовой части судна для определения силы ударов волн и направления волнения;
- тензодатчиков на бортовом наборе корпуса на миделе ниже ватерлинии для получения более полной картины напряжений при общем продольном изгибе и кручении.

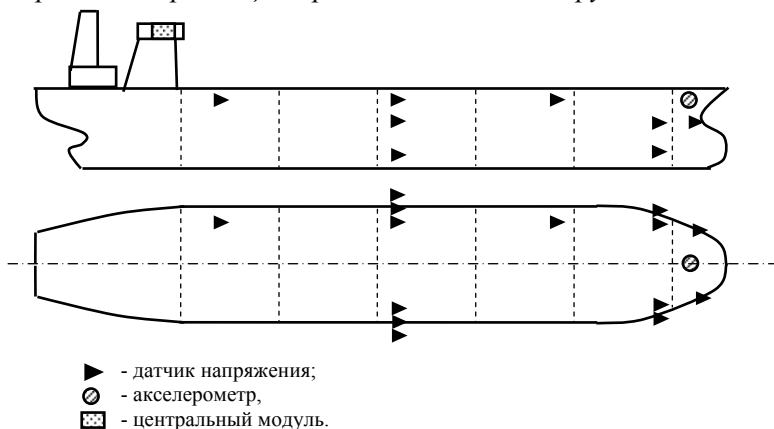


Рис. 7.3. Конфигурация SENSFIB, рекомендуемая DNV

7.5. Интегрированная морская система поддержки решений «IMDSS»

Интегрированная морская система поддержки решений «IMDSS» (Integrated Decision Support System) фирмы Oceanweather Inc. представляет собой пакет программ, который позволяет капитану и его помощникам существенно улучшить планирование рейса и его выполнение. При изменении погоды

капитан способен быстро принять эффективные решения в случаях, когда имеется необходимая гидрометеорологическая информация и средства для получения на ее основе данных о реакции судна. «IMDSS» предоставляет капитану эту возможность. Эта система превосходит многие другие планирующие переход средства совершенством процедур для оценки мореходности, улучшением прогнозов поведения судна на волнении, что позволяет своевременно принимать необходимые меры и уменьшает риск попадания судна в тяжелые погодные условия. «IMDSS» позволяет:

- выполнять планирование рейсов с учетом всех основных, влияющих на мореходность судна факторов;
- оптимизировать маршрут перехода;
- использовать долгосрочные прогнозы ветра, ветрового волнения и зыби;
- вырабатывать рекомендации по тактическому маневрированию в плохую погоду.

Система состоит из следующих программных модулей:

- *Погоды;*
- *Выбора пути;*
- *Консультаций;*
- *Руководств плавания;*
- *Коммуникаций;*
- *Информации для судна;*
- *Регистрации.*

Модуль погоды – это программа для отображения в наглядном виде гидрометеорологической обстановки. Он обеспечивает прием и использование вырабатываемых метеорологическим центром Oceanweather долговременных прогнозов погоды, которые включают данные, охарактеризованные в параграфе 7.3.

Модуль планирования пути представляет собой передовой программный продукт, разработанный, чтобы оказывать помощь штурманскому составу в выборе оптимального маршрута и скорости хода на его участках. Программа учитывает прогнозы погоды, расписание судна, стоимость топлива, операционные ограничения.

Консультативный модуль является программным средством, созданным для облегчения судоводителю выбора тактических маневров курсом и скоростью с целью предотвращения ущерба судну и грузу в условиях волнения и ветра. Программа предсказывает реакцию судна на ветроволновые воздействия (параметры бортовой, килевой качки, ускорения в указанных пользователем местах), оценивает вероятность оголения гребного винта, заливания палубы, слеминга, рассчитывает динамические изгибающие моменты и перерезывающие силы.

Программа руководств плавания хранит путевые точки рекомендованных маршрутов, позволяет использовать их в модуле планирования пути, дополнять их состав, а также автоматически генерировать AMVER отчеты.

Коммуникационная программа служит для передачи с судна на берег с высокой скоростью (до 19,200 бит в секунду) файлов через Инмарсат-А.

Программа для информации судна предназначена для быстрого приема руководящих документов с берега (with up to the minute fleet status information).

Регистрирующий модуль является программой, выполняющей регистрацию, хранение данных и генерирование отчетов мостика и машины, предусмотренных существующими требованиями.

8. Достоинства систем контроля мореходности судна

Необходимо отметить две основные проблемы, связанные с плаванием судов в штормовых условиях, это:

- безопасность судна и груза,
- экономическая эффективность эксплуатации судна.

Проблема безопасности состоит в предотвращении повреждений судну и грузу в сложных погодных условиях. *Экономическая проблема* оценивается с точки зрения уменьшения эксплуатационных расходов за счет выбора наиболее выгодного пути и режима хода судна. Обе названные проблемы чрезвычайно важны. Их решение при существующих масштабах морских перевозок является крупным резервом повышения эффективности работы морского транспорта. Определенное значение в решение этих проблем имеет внедрение на судах средств оценки, прогноза и оптимизации мореходности.

Экономичность эксплуатации судов напрямую зависит от успешности решения проблемы безопасности плавания. Много аварийных случаев с крупнотоннажными танкерами, балкерами, контейнеровозами, причинивших огромный ущерб окружающей среде, связаны с повреждениями, произошедшими из-за совпадения двух факторов: *возраста судна и больших волновых нагрузок на его корпус в штормовых условиях*. Главной причиной таких повреждений являются усталостные деформации в наборе корпуса, увеличивающиеся с возрастом судна. Эти деформации возникают как следствие грузовых, балластных операций и волновых нагрузок. Современные терминалы загружают балкера со скоростью, превышающей 16000 тонн/час. Скорость погрузки танкеров еще выше. В таком процессе при недостаточном контроле всегда возможно появление интенсивных изгибающих моментов и перерезывающих сил на корпусе. В штормовых условиях переменные волновые нагрузки – основная причина роста остаточных деформаций. Следствием увеличения остаточных

деформаций являются локальные разрушения элементов корпуса, которые накапливаются со временем. Если их оставлять без внимания и не ремонтировать, то они начинают угрожать структурной целостности судна.

Конструкции судов после постройки обладают определенным запасом прочности. Он уменьшается со временем, начиная с первого дня эксплуатации судна. Теоретически уменьшение запаса прочности корпуса до предельного значения должно распределяться на срок службы судна. Перегрузки, допускаемые по той или иной причине при грузовых операциях, балластировках, а также в условиях волнения, могут значительно ускорить процесс уменьшения прочности элементов корпуса. Усталость корпусных конструкций является функцией динамических воздействий на судно, их амплитуды, частоты, продолжительности. Если при умеренных средних нагрузках срок службы судна составляет 20 лет, то при интенсивных силовых воздействиях он может снизиться до 7 лет. Необходимо также отметить, что, используя традиционную методику оценки мореходности для крупнотоннажных судов, даже опытный капитан в отдельных случаях не может с уверенностью сказать, чрезмерны или нет волновые воздействия на корпус.

Задачей судового персонала является предупреждение и уменьшение числа причин, ведущих к повышенному износу корпуса судна, к повреждению его элементов. Выполнение этой задачи значительно облегчается при использовании АСКМ. Средства контроля мореходности объективно оценивают величину нагрузок, усталостные деформации, износ корпуса. Они **позволяют исключить недопустимые силовые воздействия на элементы корпуса в процессе грузовых операций и при плавании в условиях волнения, выявить случаи неправильного размещения грузов, избежать аварий и загрязнения окружающей среды, обоснованно планировать мероприятия по поддержанию корпуса в надлежащем состоянии.**

Используя АСКМ, возможно управлять судном в штормовых условиях, не допуская перегрузок элементов корпуса и других опасных явлений, в то же время работая на

предельно безопасном уровне, что позволяет обеспечить максимально возможную скорость следования к пункту назначения. Например, для преодоления опасностей штормового плавания на встречном волнении капитан, стремясь сохранить запланированный курс, вынужден намеренно снижать скорость судна. Не располагая конкретными числовыми данными о степени опасности слеминга (заливания), ускорений, разгона винта, капитан оценивает обстановку субъективно и снижает ход судна по своему усмотрению. Эти действия обычно сопровождаются излишней потерей скорости. Данные АСКМ количественно отражают уровень опасности неблагоприятных явлений в условиях волнения. Они **позволяют капитану определить, на сколько надо снизить обороты двигателя, чтобы с одной стороны, обеспечить безопасность плавания, а с другой – не допустить излишнюю потерю скорости судна**, максимально используя возможности пропульсивной установки. **Снижение потерь скорости хода на волнении дает непосредственный экономический эффект, который увеличивается с ростом энерговооруженности судов и цен на топливо.** Правильный прогноз скорости в условиях ветра и волн является резервом повышения технико-экономических показателей и безопасности плавания транспортных судов.

В тяжелых ветроволновых условиях, когда следовать запланированным курсом и скоростью опасно, система контроля мореходности **позволяет судоводителям обоснованно выбрать наилучший режим штормования.** Большое значение имеет способность АСКМ получать прогнозы погоды и на их основе оценивать мореходность судна в ожидаемых условиях плавания. Это **дает возможность заблаговременно уклониться от встречи с волнением высокой интенсивности и найти оптимальный план движения к порту назначения с гарантией безопасности судна при минимальных эксплуатационных расходах.**

Суммируя изложенное, можно заключить, что внедрение бортовых средств контроля, прогноза и оптимизации мореходности повышает безопасность и экономическую эффективность эксплуатации судов за счет:

- сокращения времени перехода морем;

- *уменьшения времени под грузовыми операциями;*
- *оптимального планирования маршрута движения и режимов хода на его участках;*
- *снижения вероятности повреждений обшивки и набора судна, груза, механизмов;*
- *уменьшения износа корпуса и увеличения срока службы судна;*
- *уменьшения затрат на ремонт.*

Список литературы

1. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л., Судостроение, 1982.–288 с.
2. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере. – Судостроение, 1992. – 224 с.
3. Козырь Л.А., Аксютин Л.Р. Управление судами в шторм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 95 с.
4. Крылов Ю.М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 256 с.
5. Липис В.Б., Ремез Ю.В. Безопасные режимы штормового плавания судов. – М.: Транспорт, 1982. – 117 с.
6. Лившиц В.М., Хованский Ю.А. Справочник судоводителей по гидрометеорологии. Плавание по наиболее выгодным путям – М.: Транспорт, 1967. – 168 с.
7. Мальцев А.С. Безопасность мореплавания на промысловых судах. – Одесса: Маяк, 1988 – 68 с.
8. Ремез Ю.В. Качка корабля. – Л.: Судостроение, 1983. – 328с.
9. Самсонов В.И., Худов Н.И. Двигатели внутреннего сгорания морских судов. Учебник для высш. учеб. заведений. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1990. – 368 с.
10. Сизов В.Г. Теория корабля. – Одесса, Феникс, 2003. – 284 с.
11. Справочник капитана дальнего плавания /Л.Р.Аксютин, В.М.Бондарь, Г.Г.Ермолаев и др.; под ред. Г.Г.Ермолаева. – М.: Транспорт, 1988. – 248 с.
12. Справочник по теории корабля. В трех томах. Под редакцией Я.И.Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985.
13. Справочник по теории корабля /В.Ф.Дробленков, А.И.Ермолаев, Н.П.Муру и др. – М.: Воениздат, 1984. – 589с.
14. Управление судном /С.И.Демин, Е.И.Жуков, Н.А.Кубачев и др.: Под ред. В.И.Снопкова. Учебник для вузов - М.: Транспорт, 1991. – 359 с.
15. American Bureau of Shipping – Guide for hull condition monitoring systems. – 2003. 19 pp.

16. Davis L. Handbook of Genetic Algorithms. – New York: Van Nostrand Reinhold. 1991.
17. Hirayama, T. “Real-time estimation of sea spectra based on motions of a running ship (2nd report) – Directional wave estimation”, – Journal of the Kansai Society of Naval Architects, NO.204, 1987. – 21-27 pp.
18. Huss M., Olander A. Theoretical Seakeeping Predictions On Board Ships – A System for Operational Guidance and Real Time Surveillance. – Stockholm, NAVAL ARCHITECTURE, 1994. – 93 pp.
19. Iseki, T., Ohtsu, K., Fujino, M. “A study on estimation of directional spectra based on ship motions”, – The Journal of Japan Institute of Navigation, Vol. 86, 1992. – 179-188.
20. J.M.J.Journee, L.J.M.Adegeest. Theoretical Manual of Strip Theory Program “SEAWAY for Windows”. – Delft University of Technology, Report 1370, 2003. – 336 pp.
21. Lloyd’s Register of Shipping – Provisional Rules for the Classification of Hull Surveillance Systems SEA and SEA(R) notations.
22. Maritime and Coastguard Agency (UK). Marine Guidance Note 108(M) – Hull Stress Monitoring Systems. – 1999.
23. Melle S.,M., Liu K. and Measures R., Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system, *Applied Optics*, 32(1993)19, 3601–3609.
24. MSC/Circ. 646 (IMO) – Recommendations for the fitting of Hull Stress Monitoring Systems. – June, 1994.
25. Ziemer, F. and H. Günther “A system to monitor ocean wave fields”, Proc. 2nd Int. Conf. On Air-Sea Interaction and Meteorology and Oceanography of the Coastal Zone. Lisboa, September 1994. – 22–27 pp.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Основные обозначения	6
1. Общие сведения	9
1.1. Ветроволновые воздействия и виды реакции судна на них	9
1.2. Опасности штормового плавания	12
1.2.1. Особенности качки	13
1.2.2. Проблемы движения против волн	18
1.2.3. Опасности плавания по волне	21
1.2.4. Нагрузки на движительную установку и корпус	23
1.2.5. Основные факторы, влияющие на интенсивность качки	27
1.3. Мореходность судна и ее обеспечение	27
1.4. Критерии мореходности и режимы штормового плавания	31
1.5. Основные виды контроля мореходности в рейсе	36
2. Характеристика морского волнения	44
2.1. Виды волнения	44
2.2. Регулярное волнение	46
2.3. Нерегулярное двухмерное волнение	50
2.4. Нерегулярное трехмерное волнение	60
2.5. Совершенствование моделей волнения	63
2.6. Наблюдаемые на судне параметры волнения	69
3. Основные сведения о бортовых средствах контроля мореходности	72
3.1. Назначение и состав АСКМ	72
3.2. Функциональные возможности систем	76
3.3. Отображение информации в АСКМ	85
3.4. Рекомендации по установке систем контроля мореходности	90
4. Датчики информации АСКМ	93
4.1. Устройства для измерения параметров воздействий среды	93
4.1.1. Датчики ветра	93
4.1.2. Определители параметров волнения	95
4.2. Измерители параметров движения судового корпуса	100
4.2.1. Инерциальные датчики угловых параметров качки	100
4.2.2. Инерциальные устройства для измерения линейных параметров качки	106
4.2.3. Комбинированные инерциальные датчики	108
4.2.4. Спутниковые измерители параметров движения	

корпуса судна	109
4.3. Датчики напряжений корпуса судна и гребного вала	110
4.3.1. Резисторные измерители напряжений	111
4.3.2. Волоконно-оптические тензометры	118
4.3.3. Датчики давления	122
4.4. Счетчики потребляемого двигателем топлива	123
4.5. Гидрометеорологическая информация	126
4.5.1. Основные виды данных о погоде	127
4.5.2. Компьютерный учет гидрометеорологической информации на судах	137
5. Теоретические основы расчета мореходности	144
5.1. Программные средства для расчета параметров мореходности	145
5.2. Линейная динамическая система и ее частотные характеристики	147
5.2.1. Понятие линейной динамической системы	147
5.2.2. Линейная система с детерминированными сигналами	149
5.2.3. Правила получения частотных характеристик линейных систем	153
5.2.4. Линейная динамическая система с недетерминированными сигналами	155
5.3. Математическое описание качки судна	157
5.3.1. Общие сведения	157
5.3.2. Линейная модель бортовой качки	159
5.3.3. Уравнение килевой качки	165
5.3.4. Упрощенное описание вертикальной качки	167
5.3.5. Переходные характеристики судна	168
5.4. Принципы расчета качки и резонансных явлений	171
5.4.1. Расчет и прогнозирование параметров качки	171
5.4.2. Определение резонансных зон	176
5.4.3. Определение волнового спектра по измерениям параметров качки	181
5.5. Оценка неблагоприятных эффектов при движении против волн	183
5.5.1. Математическое описание вертикального перемещения оконечностей судна на качке	183
5.5.2. Оценка заливаемости	188
5.5.3. Вероятность слеминга	189
5.5.4. Оценка абсолютных ускорений	191
5.5.5. Разгон гребного винта и двигателя	192
5.5.6. Комбинированные критерии мореходности	194

5.6. Потери скорости хода в штормовых условиях	195
5.6.1. Приближенные методы для оценки потерь скорости на волнении	196
5.6.2. Сопротивления движению судна в штормовых условия	198
5.7. Предупреждение перегрузки главного двигателя	204
5.7.1. Схема преобразования энергии в движение судна	204
5.7.2. Характеристики главного двигателя	207
5.7.3. Характеристики гребного винта	212
5.7.4. Взаимодействие винта и корпуса судна	213
5.7.5. Определение режима хода для условий ветра и волнения	215
5.8. Принцип расчета нагрузок на корпусе	222
5.9. Выбор режима плавания на волнении	224
6. Понятие о методах выбора оптимального плана перехода	233
6.1. Общие сведения о планировании переходов	233
6.2. Планирование оптимальной скорости перехода по заданному маршруту	239
6.3. Выбор оптимального маршрута перехода и скорости движения по нему	244
7. Образцы судовых АСКМ	251
7.1. Система мониторинга параметров мореходности «HULLMOS»	251
7.2. Система поддержки принятия решений «OCTOPUS-DSS»	253
7.3. Система для оценки и оптимизации мореходности «VOSS»	255
7.4. Волоконно-оптическая АСКМ «SENSFIB»	259
7.5. Интегрированная морская система поддержки решений «IMDSS»	262
8. Достоинства систем контроля мореходности судна	264
Список литературы	268