ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА МОРСКОГО ФЛОТА
МИНИСТЕРСТВА ТРАНСПОРТА РОССИИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЗАО «Центральный научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт морского флота»

ВЫБОР БЕЗОПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ И КУРСОВЫХ УГЛОВ ПРИ ШТОРМОВОМ ПЛАВАНИИ СУДНА НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ

РД 31.00.57.2-91

Санкт-Петербург · ЗАО ЦНИИМФ · 2002

gost.e-ecolog.ru

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА МОРСКОГО ФЛОТА
МИНИСТЕРСТВА ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЗАО «Центральный научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт морского флота»

ВЫБОР БЕЗОПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ И КУРСОВЫХ УГЛОВ ПРИ ШТОРМОВОМ ПЛАВАНИИ СУДНА НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ

РД 31.00.57.2-91



Санкт-Петербург · ЗАО ЦНИИМФ · 2002

Выбор безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении (РД 31.00.57.2-91). – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2001. – 58 с.

Подготовлено к печати
Отделом безопасности мореплавания ЗАО ЦНИИМФ
по оригиналу издания 1993 г.
в связи с просьбами пользователей

Исполнители:
Г.М.Овчинников – технический редактор
И.Ю.Рогова, Е.В.Зубарева – оригинал-макет

© Составление, дизайн.
ЗАО ЦНИИМФ, 2002

РАЗРАБОТАН Центральным научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом морского флота

Директор, д.т.н. *В.И.Пересыпкин*

Руководитель темы и ответственный исполнитель, к.т.н. *А.И.Богданов*

СОГЛАСОВАН Российским морским Регистром судоходства

Директор *Р.А.Белик*

ВНЕСЕН Главной Госморинспекцией

Заместитель директора департамента – начальник Госморинспекции

С.В.Палехов

ДЕПАРТАМЕНТ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА
МИНИСТЕРСТВА ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Руководителям предприятий,
организаций и учреждений
(по списку)

от 22.02.93 № СМ-35/312

О введении в действие РД 31.00.57.2-91 «Выбор безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении» и Извещения № 2 об изменении РД 31.00.57-79 «Типовая информация об остойчивости и прочности грузового судна»

Департаментом морского транспорта Министерства транспорта Российской федерации утверждены РД 31.00.57.2-91 «Выбор безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении» (далее РД) и Извещение № 2 об изменении РД 31.00.57-79 «Типовая информация об остойчивости и прочности грузового судна»

ПРЕДЛАГАЮ:

1. С 01.09.93

1.1. Ввести в действие РД 31.00.57.2-91 и Извещение № 2 об изменении РД 31.00.57-79.

1.2. Считать утратившими силу РД 31.00.57.1-88 и Извещение №1 об изменении РД 31.00.57-79.

1.3. Считать сохраняющей силу документацию, разработанную по РД 31.00.57.1-88 до 01.09.93. Рекомендовать для судов с S-образной диаграммой статической остойчивости произвести корректировку упомянутой документации согласно п.3.1.6 РД.

2. Снабжать суда, находящиеся в постройке и эксплуатации, документацией в соответствии с РД и Извещением № 2.

3. Установить, что разработка документации в соответствии с РД и Извещением № 2 производится:

3.1. Для судов, находящихся в постройке, — организацией, проектирующей судно.

3.2. Для судов, находящихся в эксплуатации, – отраслевыми научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими институтами и высшими учебными заведениями по заказам пароходств, а также КБ пароходств в объеме, установленном инструктивным письмом ММФ № 45 от 16.05.89.

. . .

7. ЦНИИМФ.

С вводом в действие РД 31.00.57.2-91 внести необходимые изменения в действующие нормативные документы. Включить в перечень эксплуатационной документации, передаваемой на суда при их выходе из постройки, информацию для капитанов, вытекающую из настоящего РД.

8. Контроль за исполнением настоящих требований возложить на Госморинспекцию.

Заместитель директора департамента
– начальник Госморинспекции *С.В.Палехов*

ИЗВЕЩЕНИЕ № 2
об изменении РД 31.00.57-79
«Типовая информация об остойчивости и прочности грузового судна»

Вводится в действие с 01.09.93

1. Стр. 6, в подраздел «Дополнительные информационные материалы» после абзаца «Инструкция по опытному определению остойчивости судна в период погрузки методом кренования и/или по периоду качки» включить новый абзац «Инструкция по оценке безопасности и использованию диаграмм штормового плавания судна на попутном волнении».

2. Стр. 8, в «Содержание» после абзаца «Универсальная диаграмма статической остойчивости» включить новый абзац «Инструкция по оценке безопасности и использованию диаграмм штормового плавания судна на попутном волнении».

3. Стр. 21, подраздел «Загрузка судна» дополнить новым абзацем: «При загрузке рекомендуется учитывать особенности штормового плавания судна на попутном волнении в соответствии с Инструкцией на стр. 12.»

4. Стр. 21, в подразделе «Управление судном» абзац «На сильном попутном волнении...» изложить в новой редакции:

«В штормовых условиях плавания на попутном волнении и волнении с кормовых курсовых углов $\varphi = 180 \pm 45°$ следует опасаться уменьшения остойчивости при длительной задержке судна на гребне высоких волн, возникновения бортовой качки в режиме ее основного ($\tau_к \approx \tau_с$) и параметрического ($\tau_к = \tau_с/2$) резонансов, а для быстроходных и малых судов также захвата волной, потери управляемости и самопроизвольного, неуправляемого разворота лагом к волне — брочинга. При длине волны, близкой к длине судна, следует иметь скорость значительно меньшую скорости бега волн, не теряя при этом способности управляться. Выбор безопасных режимов штормового плавания судна на попутном волнении рекомендуется производить в соответствии с Инструкцией на стр. 26.»

5. Стр.36, после подраздела «Универсальная диаграмма статической остойчивости» включить новый подраздел «Инструкция по оценке безопасности и использованию диаграмм штормового плавания судна на попутном волнении», соответствующий разделу 2 РД 31.00.57.2-91.

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 9
2. ИНСТРУКЦИЯ ПО ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ДИАГРАММ ШТОРМОВОГО ПЛАВАНИЯ СУДНА НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ 10
2.1. Введение 10
2.2. Основные признаки изменения поведения судна на попутном волнении, свидетельствующие о его недостаточной безопасности 11
2.3. Рекомендации по обеспечению безопасности штормового плавания на попутном волнении 12
2.4. Диаграммы штормового плавания судна на попутном волнении (диаграммы) 13
2.5. Порядок работы с диаграммами. Выбор оптимальной остойчивости. Определение безопасных режимов штормового плавания судна на попутном волнении 26
3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИАГРАММ ШТОРМОВОГО ПЛАВАНИЯ СУДНА НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ 39
3.1. Расчет зоны недостаточной остойчивости 39
3.2. Расчет зон основного и параметрического резонансов бортовой качки 51
3.3. Построение вертикальных $V_S(\beta)$, $V_S(H)$, $\Delta V_S(H,\lambda)$ и горизонтальных $h(d)$ осей диаграмм 54
3.4. Построение зоны брочинга 56
4. СОГЛАСОВАНИЕ ДОКУМЕНТАЦИИ 57
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ . . . 57

РУКОВОДЯЩИЙ ДОКУМЕНТ

ВЫБОР БЕЗОПАСНЫХ СКОРОСТЕЙ И КУРСОВЫХ УГЛОВ ПРИ ШТОРМОВОМ ПЛАВАНИИ СУДНА НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ

РД 31.00.57.2-91
Взамен РД 31.00.57.1-88
Дополнение к РД 31.00.57-79

Срок введения в действие установлен с 01.09.93

Настоящий руководящий документ (РД) устанавливает рекомендации по остойчивости и выбору безопасных режимов штормового плавания судна на попутном волнении, методику расчета необходимых для этого диаграмм и инструкцию по их использованию.

РД распространяется на строящиеся и находящиеся в эксплуатации транспортные суда длиной* 160 м и менее, удовлетворяющие требованиям ч. IV Правил Регистра, включая суда смешанного (река—море) плавания. Для судов большей длины требования РД могут выполняться по усмотрению судовладельца.

Требования раздела 2 РД являются дополнением к РД 31.00.57-79 «Типовая информация об остойчивости и прочности грузового судна», вводимым в действие Извещением № 2 об изменении РД 31.00.57-79.

Включение требований РД в Информацию об остойчивости новых судов должно быть предусмотрено в технических заданиях на их проектирование и строительство.

* Длина определяется по Правилам Регистра.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рекомендации раздела 2 РД предназначены для оценки остойчивости и безопасности плавания судна в штормовых условиях на попутном волнении и волнении с кормовых курсовых углов $\varphi = 180° \pm \beta$, где $0° \leq \beta \leq 45°$.

Они позволяют капитану:

при загрузке судна перед выходом в рейс:

- оценить степень опасности штормового плавания на расчетном попутном волнении при заданном варианте загрузки;
- получить рекомендации по рациональной посадке и остойчивости, при которых неблагоприятное влияние попутного волнения будет минимальным и в процессе рейса не потребуется существенно снижать скорость или изменять выгодный курс судна;

при фактической загрузке судна в рейсе:

- оценить степень опасности штормового плавания при фактических параметрах попутного волнения, глубине моря и курсовом угле к волне (КУВ);
- получить рекомендации по требуемому изменению посадки и остойчивости с целью уменьшения неблагоприятного влияния попутного волнения;
- получить рекомендации по выбору безопасных режимов штормового плавания на попутном волнении с целью предотвращения возникновения аварийной ситуации или опрокидывания судна.

Положения раздела 3 РД устанавливают методику расчета диаграмм штормового плавания судна на попутном волнении (диаграмм). Она предназначена для организаций, разрабатывающих «Информацию об остойчивости и прочности грузового судна» (ИО), указанных в инструктивном письме.

Расчет диаграмм должен производиться для случаев нагрузки, при которых возможно попадание судна в условия шторма, за исключением тех, когда известно, что безопасность его плавания на попутном волнении заведомо обеспечена. Их количество должно обеспечивать удобную интерполяцию для любого промежуточного случая нагрузки.

«Универсальные штормовые диаграммы» Ю.В.Ремеза не дают полной информации об опасных режимах плавания судов на попутном волнении. По ним может быть выполнена оценка только зон основного резонанса бортовой качки, если ее собственный период τ_c определен согласно п.3.1.3.

Суда, имеющие бортовой компьютер, рекомендуется оснащать специальным математическим обеспечением, позволяющим оперативно производить экспертную оценку безопасности штормового плавания данного судна на попутном волнении. Такое математическое обеспечение должно быть разработано в соответствии с РД и согласовано Регистром.

Его наличие не избавляет от необходимости иметь на судне обязательную техническую документацию, отвечающую РД.

2. ИНСТРУКЦИЯ ПО ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ДИАГРАММ ШТОРМОВОГО ПЛАВАНИЯ СУДНА НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ

2.1. Введение

При плавании судна в условиях шторма на попутном волнении или волнении с кормовых КУВ характеристики его основных мореходных качеств – остойчивости, качки и управляемости существенно изменяются. В определенных случаях эти изменения могут иметь опасный характер и привести к возникновению аварийной ситуации или опрокидыванию судна.

Аварии обычно предшествует одно из следующих трех явлений или их комбинация:

– значительное уменьшение или потеря поперечной остойчивости при прохождении вершины волны вблизи миделя судна. Наиболее опасным в этом отношении является движение на волнах, длина λ и скорость c которых близки соответственно к длине L и скорости V судна. При этом время $t_{(-)}$ пребывания судна с пониженной ниже опасного уровня остойчивостью за кажущийся период волны $\tau_к$ может оказаться больше, чем время опасного наклонения $t_{о.н.}$, потребного ему на наклонение из вертикального положения на опасный угол крена или на опрокидывание;

- основной или параметрический резонансы бортовой качки, когда соответственно $\tau_к \approx \tau_с$ или $\tau_к \approx \tau_с/2$ ($\tau_с$ – собственный период бортовой качки судна на тихой воде);
- захват волной, потеря управляемости и самопроизвольный неуправляемый разворот судна лагом к волне – брочинг. Наиболее опасным является захват на переднем склоне волн, имеющих $c > V$ и $\lambda = 0{,}8-1{,}3L$. Брочингу в основном подвержены быстроходные или малые суда, относительная скорость которых $F_r = V/\sqrt{gL} \geq 0{,}23$ ($g = 9{,}81$ м/с^2).

2.2. Основные признаки изменения поведения судна на попутном волнении, свидетельствующие о его недостаточной безопасности

2.2.1. В случае недостаточной остойчивости:

- неожиданное увеличение крена при нахождении вершины отдельных волн вблизи миделя судна, существенно превышающее значение предшествующих углов статического крена или амплитуд бортовой качки;
- длительное по сравнению с $1/4\tau_с$ наклонение судна на борт, задержка (зависание) в положении максимального крена и медленное возвращение в исходное состояние. Такие наклонения, в зависимости от наличия начального крена, вызванного несимметричной загрузкой, давлением ветра или иными причинами, могут быть асимметричными.

2.2.2. В случае основного или параметрического резонансов бортовой качки:

- значительное возрастание амплитуд бортовой качки судна, когда ее период τ приблизительно равен (основновной резонанс) или вдвое превышает (параметрический резонанс) кажущийся период волны $\tau_к$.

2.2.3. В случае брочинга:

- значительные колебания скорости за время прохождения волны относительно судна, его тенденция к разгону на переднем склоне попутной волны;

– ухудшение устойчивости на курсе и стремление судна развернуться лагом к волне, увеличение скорости и амплитуд перекладки руля, потребных для удержания на курсе (судно плохо слушается руля).

2.3. Рекомендации по обеспечению безопасности штормового плавания на попутном волнении

Оценку остойчивости судов при загрузке и определение безопасных режимов штормового плавания в рейсе рекомендуется производить согласно настоящей Инструкции и диаграммам штормового плавания судна на попутном волнении (диаграммам), описанным в подразделе 2.4.

В штормовых условиях плавания на попутном волнении и волнении с кормовых углов $\varphi = 180° \pm \beta$ ($\beta = 0 \pm 45°$) следует опасаться уменьшения остойчивости при длительной задержке судна на гребне высоких волн, возникновения бортовой качки в режиме ее основного ($\tau_к \approx \tau_с$) и параметрического ($\tau_к \approx \tau_с/2$) резонансов, а также возникновения брочинга.

При длине волны, близкой к длине судна, следует иметь скорость значительно меньшую скорости бега волн, не теряя при этом способности управляться.

Изменение курса с попутного или на попутный к волне рекомендуется производить таким образом, чтобы в интервале КУВ $\varphi = 180 \pm 45°$ поворот осуществлялся с достаточно большим радиусом циркуляции и судно имело скорость, соответствующую безопасной зоне диаграмм.

В случае получения судном значительного статического крена от смещения груза или иных причин штормовое плавание на попутном волнении не рекомендуется. В исключительных случаях, если судно не имеет свободы маневра и вынуждено следовать попутным курсом к волне, режимы плавания следует выбирать таким образом, чтобы соответствующая им точка на диаграммах была расположена в безопасной зоне, на значительном удалении от границ опасных зон.

Для предотвращения брочинга рекомендуется: иметь скорость менее 0,6–0,7 от скорости распространения опасных волн ($\lambda > 0{,}8L$); не допускать статического дифферента на нос; в случае опасности захвата судна волной резко сбавить скорость, в критических случаях — кратковременно дать задний ход, чтобы возможно скорее уменьшить скорость до безопасной, не теряя при этом способности управляться.

Кроме перечисленных выше, для всех судов при штормовом плавании на попутном волнении рекомендуется выполнять следующие общие мероприятия:

- уменьшить до минимума свободные поверхности жидких грузов;
- ликвидировать или максимально уменьшить статический крен от несимметричной загрузки, а также дифферент на нос;
- проверить надежность крепления грузов и водонепроницаемость закрытий;
- по возможности не допускать попадания больших масс воды на палубу, а также оледенения надводной части судна;
- не допускать перегрузки судна, приводящей к уменьшению высоты надводного борта.

2.4. Диаграммы штормового плавания судна на попутном волнении (диаграммы)

2.4.1. Оценка параметров неблагоприятных попутных волн и необходимости проверки безопасности плавания судна по диаграммам

Важным для капитана вопросом является определение параметров попутного волнения, при которых его неблагоприятное влияние на судно становится заметным и необходимо пользоваться диаграммами.

Область существования таких параметров ограничена внешним многоугольником на рис. 2.1. Она может быть установлена в зависимости от отношений $h_{3\%}/h_{3\%расч}$ и λ/L либо непосредственно от $h_{3\%}$ и λ или от h_3 и λ,

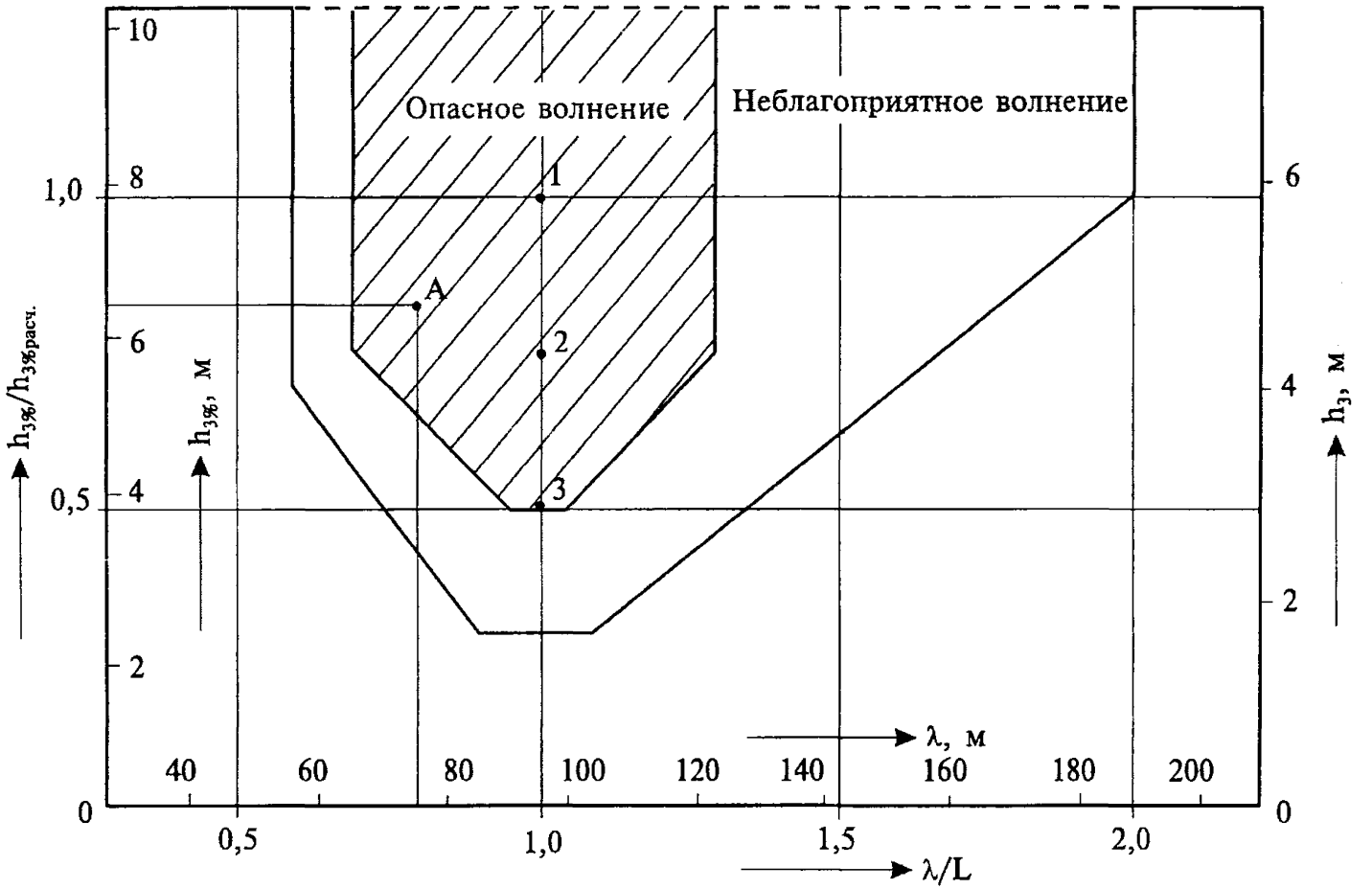

Рис. 2.1. Области отношений $h_{3\%}/h_{3\%расч.}$ и λ/L, при которых плавание судов на попутном волнении считается неблагоприятным или опасным

где $h_{3\%}$ – фактическая высота волн 3%-й обеспеченности;

h_3 – фактическая средняя высота волн зыби;

λ – фактическая средняя длина этих волн;

L – длина судна между перпендикулярами;

$h_{3\%расч.}$ – указанная в Информации об остойчивости высота волны 3%-й обеспеченности, принятая в качестве расчетной для данного судна при оценке остойчивости на попутном волнении (см. п.3.1.2).

Внутреннему заштрихованному многоугольнику соответствует область наиболее неблагоприятных, а также опасных для судна волн ($\lambda/L = 0{,}7-1{,}3$). В ней цифрами 1, 2 и 3 помечены параметры трех таких волн: высотой $h_{3\%(1,2,3)} = 1{,}0$; $0{,}75$ и $0{,}5h_{3\%расч}$ или $h_{3(1,2,3)} = h_{3\%(1,2,3)}/k_h$ ($k_h = 1{,}336$ – коэффициент перехода от высоты регулярной волны к эквивалентной ей по периоду высоте $h_{3\%}$), при которых построены диаграммы.

В Информации об остойчивости удобно использовать оси размерных параметров фактического волнения, рассчитанных для конкретного судна. На рис. 2.1 в качестве примера такие оси представлены для судна длиной $L = 96$ м.

При необходимости судну следовать в шторм попутным курсом предварительно следует определить параметры фактического волнения $h_{3\%}$ (или h_3) и λ и соответствующую им точку А нанести на рис. 2.1. Если точка А располагается за пределами внешнего многоугольника, плавание на данном попутном волнении считается благоприятным и проверка по диаграммам не требуется, если внутри – неблагоприятным и следует оценить его безопасность по диаграммам. В случае, если точка А попадает внутрь заштрихованного многоугольника, плавание при данных параметрах фактического попутного волнения может быть опасным для судна. Степень опасности возрастает по мере приближения значения λ/L к 1,0 и увеличения $h_{3\%}$ (или h_3). В этом случае требуется тщательная проверка по диаграммам, выбор безопасных скоростей и КУВ, а если их практическая реализация невозможна – отказ от плавания попутными курсами к волне.

Параметры фактического попутного волнения могут быть определены известными способами визуального наблюдения, по гидрометеопрогнозам или по гидрометеорологическим факсимильным картам волнения.

Приближенная оценка параметров фактического волнения может быть произведена по табл. 2.1 в зависимости от среднего периода волн и глубины моря.

Если фактическое волнение близко к правильному регулярному (зыби), то для оценки безопасных режимов плавания следует использовать высоту волн зыби h_3, указанную на основных диаграммах вместе с $h_{3\%}$. Соотношение высот волн $h_{3\%}$ и h_3 также приведено в табл. 2.1.

В случае смешанного волнения рекомендуется выделить волны, генеральное направление распространения которых отличается от курса судна на угол менее 45°, и их параметры использовать при оценке безопасности.

Рекомендации РД не распространяются на случаи плавания в зоне разрушающегося волнения, когда отношение высоты волны к глубине моря больше 0,5, а также в случае аномальных волн. Они не учитывают динамическое воздействие гребней волн при их обрушении на судно. Судоводителям следует избегать плавания попутным курсом в таких условиях и действовать исходя из собственного опыта и хорошей морской практики.

2.4.2. Описание диаграмм

Диаграммы штормового плавания на попутном волнении условно разделены на основные и дополнительные.

Основные диаграммы рассчитываются для каждого выбранного случая нагрузки при наиболее опасной в отношении остойчивости длине волны $\lambda = L$ и трех значениях ее высоты $h_{3\%} = h_{3\%расч}$, $0{,}75h_{3\%расч}$ и $0{,}5h_{3\%расч}$. Они характеризуют самое неблагоприятное сочетание пониженной остойчивости и резонансных режимов бортовой качки. Пример таких диаграмм для двух случаев нагрузки представлен на рис. 2.2, 2.3. При осадке данного судна менее 5,8 м его остойчивость на попутном волнении обеспечена и 1-я опасная зона отсутствует. Поэтому основные диаграммы могут не строиться.

Таблица 2.1

Приближенная оценка параметров волн 3%-й обеспеченности и зыби при произвольной глубине моря по их среднему периоду

$h_{3\%} = h_{3\%расч}$, м	Высота волн зыби h_3, м	Средняя длина волн, м	Средний период волн, с											
			Глубина моря, м											
			10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	~
2,50	1,87	20	3,59	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58
3,34	2,50	30	4,45	4,39	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38	4,38
4,11	3,08	40	5,29	5,11	5,07	5,06	5,06	5,06	5,06	5,06	5,06	5,06	5,06	5.06
4,82	3,61	50	6,14	5,79	5,70	5,67	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66	5,66
5,49	4,11	60	7,02	6,47	6,29	6,23	6,21	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20
6,13	4,59	70	7,92	7,17	6,88	6,77	6,73	6,71	6,70	6,70	6,70	6,70	6,70	6,70
6,74	5,05	80	8,84	7,87	7,48	7,30	7,22	7,19	7,17	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16
7,34	5,49	90	9,78	8,59	8,07	7,83	7,71	7,65	7,62	7,61	7,60	7,60	7,59	7,59
7,91	5,92	100	10,73	9,33	8,68	8,36	8,19	8,10	8,06	8,03	8,02	8,01	8,01	8,00
8,47	6,34	110	11,68	10,07	9,30	8,89	8,67	8,55	8,48	8,44	8,42	8,41	8,40	8,39
9,01	6,75	120	12,65	10,83	9,92	9,43	9,16	9,00	8,90	8,85	8,81	8,80	8,78	8,76
9,54	7,14	130	13,62	11,59	10,56	9,98	9,64	9,44	9,32	9,24	9,20	9,17	9,15	9,12
10,06	7,53	140	14,60	12,36	11,20	10,53	10,13	9,89	9,74	9,64	9,58	9,54	9,51	9,47
10,57	7,91	150	15,58	13,14	11,85	11,09	10,63	10,34	10,15	10,03	9,95	9,90	9,87	9,80
11,07	8,29	160	16,56	13,92	12,50	11,66	11,13	10,79	10,57	10,42	10,33	10,26	10,22	10,12
11,56	8,65	170	17.55	14,70	13,16	12,23	11,64	11,25	10,99	10,82	10,70	10,62	10,56	10,43
12,04	9,01	180	18,54	15,49	13,83	12,81	12,15	11,72	11,42	11,21	11,07	10,97	10,90	10,73
12,52	9,37	190	19,53	16,28	14,50	13,39	12,67	12,18	11,85	11,61	11,44	11,33	11,24	11,03
12,99	9,72	200	20,52	17,08	15,17	13,98	13,19	12,65	12,28	12,01	11,82	11,68	11,58	11,31
13,45	10,06	210	21,52	17,88	15,84	14,57	13,72	13,13	12,71	12,41	12,20	12,04	11,92	11,59
13,90	10,41	220	22,51	18,68	16,52	15,16	14,24	13,61	13,15	12,82	12,58	12,40	12,26	11,87
14,35	10,74	230	23,51	19,48	17,20	15,76	14,78	14,09	13,59	13,23	12,96	12,76	12,61	12,13
14,79	11,07	240	24,51	20,28	17,89	16,36	15,31	14,57	14,03	13,64	13,34	13,12	12,95	12,39
15,23	11,40	250	25,51	21,09	18,57	16,96	15,85	15,06	14,48	14,05	13,73	13,48	13,29	12,65

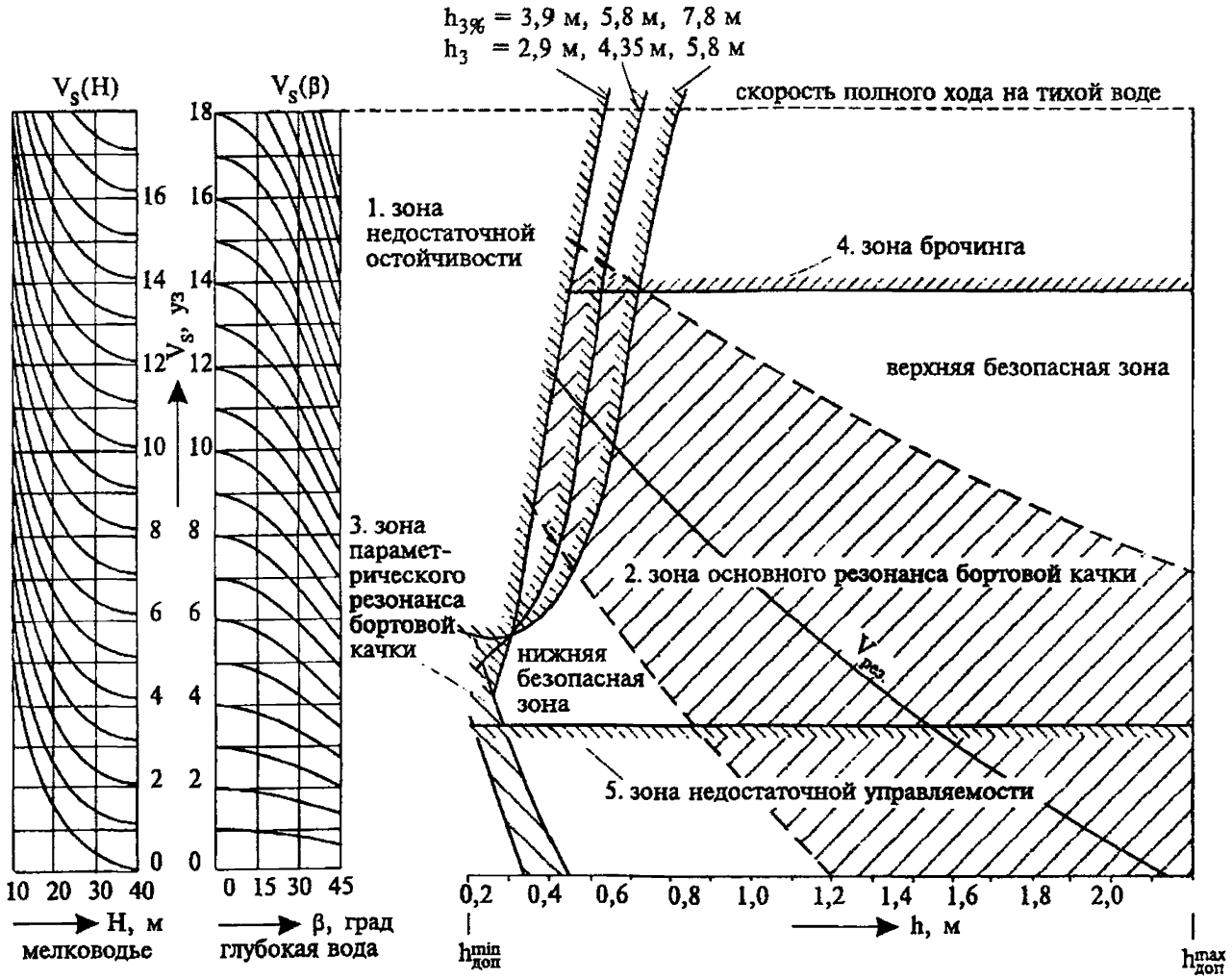

Рис. 2.2. Диаграмма штормового плавания судна на попутном волнении (основная, длина волны λ = 96 м). Курсовой угол к волне φ = 180° ± β. Осадка d = 6,57 м

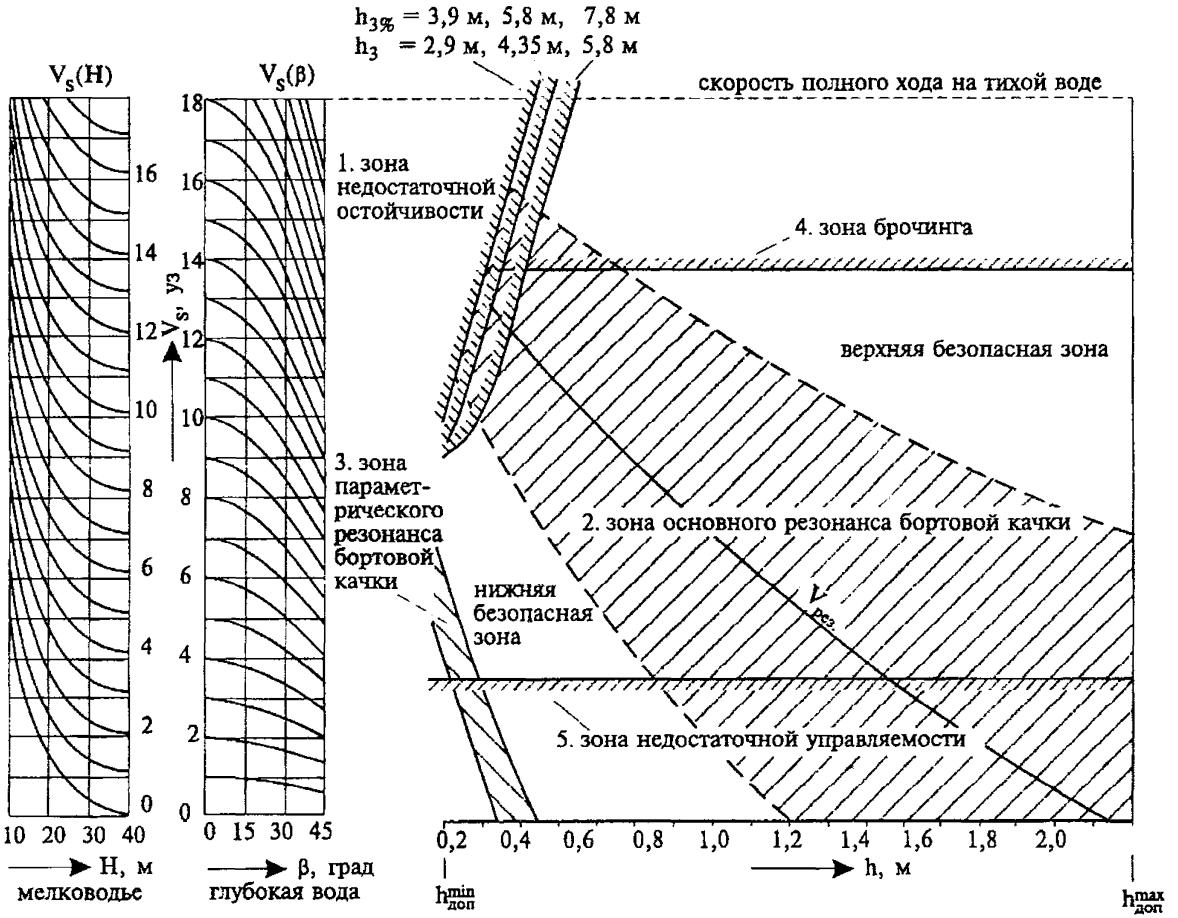

Рис. 2.3. Диаграмма штормового плавания судна на попутном волнении (основная, длина волны λ = 96 м) Курсовой угол к волне φ = 180° ± β. Осадка d = 6,0 м

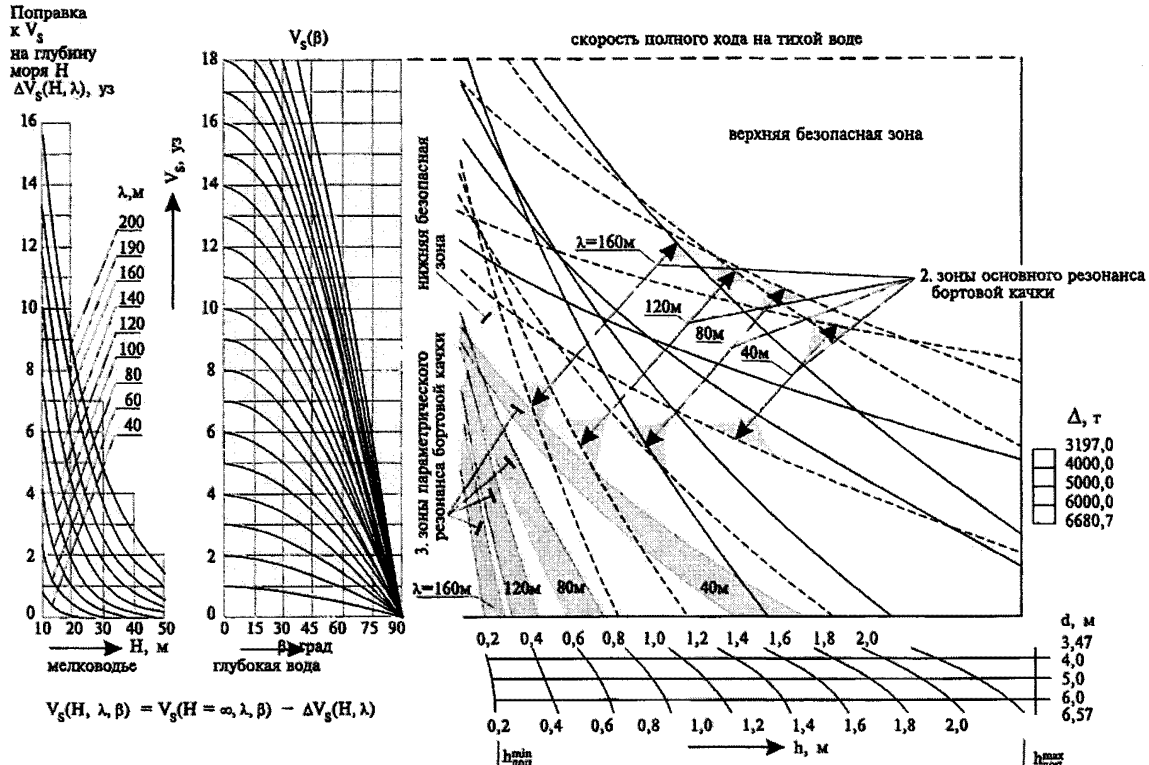

Рис. 2.4. Диаграмма штормового плавания судна на попутном волнении (дополнительная, длина волн λ = 40, 80, 120, 160 м) Курсовой угол к волне φ = 180° ± β

По горизонтальной оси диаграмм отложены значения начальных метацентрических высот (МЦВ) судна на тихой воде h, определенных с учетом поправки на свободные поверхности в интервале от минимально $h_{доп}^{min}$ до максимально $h_{доп}^{max}$, допускаемых по Правилам Регистра.

Основные диаграммы имеют 2 группы вертикальных осей, по которым отложены скорости судна $V_s(\beta,H)$.

Первая группа осей $V_s(\beta)$ относится к глубокой воде (когда глубина моря не оказывает практического влияния на скорость распространения расчетной волны) и соответствует курсовым углам β = 0, 15, 30 и 45°.

Вторая группа осей $V_s(H)$ относится к мелководью и соответствует курсовому углу β = 0° и глубине моря H = 10, 20, 30 и 40 м.

Обе группы построены в масштабе оси $V_s(\beta = 0°)$. В поле основных диаграмм нанесены пять заштрихованных неблагоприятных и опасных для плавания судна зон сочетания V_s, β, H и h: 1 – недостаточной остойчивости, 2 – основного резонанса бортовой качки, 3 – параметрического резонанса бортовой качки, 4 – брочинга, 5 – недостаточной управляемости.

Основные диаграммы предназначены для выбора оптимальной посадки и остойчивости при загрузке судна; оценки безопасных режимов плавания в рейсе при длинах волн, мало отличающихся от длины судна; приближенной оценки границ зоны недостаточной остойчивости при плавании в области, соответствующей неблагоприятному волнению на рис.2.1.

Дополнительные диаграммы предназначены главным образом для оценки безопасности плавания по 2-й и 3-й резонансным зонам бортовой качки при длине попутных волн, отличающихся от длины судна. При $\lambda \neq L$ резонансные режимы бортовой качки существуют, и их влияние может быть также неблагоприятным. Эти режимы не зависят от высоты волн, что позволяет дополнительные диаграммы для нескольких случаев нагрузки представить на одном графике, как это показано на рис. 2.4. При этом вертикальные оси $V_s(H)$ заменены на оси поправок $\Delta V_s(H,\beta)$ к скоростям судна Vs ва глубину моря, которые приведены для широкого диапазона длин волн, и добавлены горизонтальные оси $h(d)$, учитывающие изменение осадки судна.

Для удобства определения изменения курса судна с попутного до курса лагом к волне в случае необходимости ухода от резонансных видов бортовой качки вертикальные оси $V_s(\beta)$ построены в более широком диапазоне КУВ: $\beta = 0 \div 90°$.

В поле дополнительных диаграмм нанесены рассчитанные при $\beta = 0°$, $H = \infty$ и различных λ две серии кривых, ограничивающих неблагоприятные и опасные для плавания судна зоны сочетания V_s, β, H и h: 2 – основного резонанса бортовой качки, 3 – параметрического резонанса бортовой качки.

Имея набор основных диаграмм (рис. 2.2, 2.3) для выбранных характерных случаев нагрузки и дополнительные диаграммы (рис. 2.4), судоводитель может во всех случаях штормового плавания судна на попутном волнении оценить степень его опасности при фактических параметрах волнения, глубины моря, состоянии нагрузки и остойчивости и в случае необходимости обоснованно выбрать безопасные режимы плавания.

Диаграммы также позволяют при загрузке судна в порту заранее обеспечить такую остойчивость, чтобы при попадании в шторм на попутное волнение снижение его скорости и отклонение от выгодного курса были минимальными.

2.4.3. Характеристики опасных зон штормового плавания судна на попутном волнении

Первая, наиболее опасная зона – недостаточная остойчивость – построена в соответствии с формулой

$$V_{\text{пред}} < \frac{\left(c - \dfrac{4k_\tau \lambda}{\tau_c}\right)}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз}, \qquad (2.1)$$

вытекающей из основного критерия остойчивости судна на попутном волнении

$$Kfw = \frac{\tau_c}{4k_\tau \tau_к} > 1{,}0 \qquad (2.2)$$

где $k_\tau = \dfrac{t_{(-)}}{\tau_к}$ – безразмерный расчетный коэффициент, показывающий, какую часть кажущегося периода волны $\tau_к$ судно с начальной МЦВ h, имеющее крен в интервале от 10 до 40°, при скорости V, курсовом

угде β и параметрах волн $h_{3\%расч(1,2,3)}$ и λ имеет плечи остойчивости ниже нормированного для данного судна критического значения $l_{кр}$;

$\tau_k = \dfrac{\lambda}{c - V\cos\beta}$ – кажущийся период волны, с;

$c = \sqrt{\dfrac{g\lambda}{2\pi} th \dfrac{2\pi H}{\lambda}}$ – скорость распространения волны, м/с;

λ – длина волны, принимаемая в расчетах по формуле (2.1) равной L, м;

H – глубина моря, м;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

V – скорость судна, м/с.

Кривые, ограничивающие снизу 1-ю зону, соответствуют скоростям $V_{пред}$, при которых $t_{(-)} = t_{о.н.}$. Поэтому для обеспечения надлежащей безопасности плавания судна на попутном волнении следует выбирать такие h, V_s, H и β, чтобы соответствующая им точка диаграмм всегда лежала ниже этих кривых. Плавание в 1-й зоне не рекомендуется ни при каких обстоятельствах.

Вторая опасная зона – основной резонанс бортовой качки – ограничивает соотношение h, V_s, H и β, при которых возможно возникновение интенсивной бортовой качки в режиме ее основного резонанса ($\tau_k \approx \tau_c$), а также в неблагоприятной околорезонансной зоне, когда

$$\frac{\tau_c}{1{,}3} \le \tau_k \le \frac{\tau_c}{0{,}7} \qquad (2.3)$$

Она рассчитана по формуле

$$V = \frac{c - \dfrac{n\lambda}{\tau_c}}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз} \qquad (2.4)$$

где $n = 1$ – соответствует скорости судна при резонансе бортовой качки $V_{рез}$ (сплошная кривая в середине зоны);

$n = 0{,}7$ – соответствует верхней границе скоростей околорезонансной зоны (пунктирная кривая);

$n = 1{,}3$ – соответствует ее нижней границе (пунктирная кривая).

На основных диаграммах 2-я зона строится при длине волны $\lambda = L$, а на дополнительных – для ряда выбранных значений длин волн, $\lambda \neq L$.

Опасность плавания судна во 2-й зоне возрастает по мере приближения к границе зоны недостаточной остойчивости и к кривой $V_{рез}(\beta,H)$, а также по мере увеличения высоты и крутизны волн, курсового угла β и уменьшения глубины моря H. Поэтому для судов с малой остойчивостью либо перевозящих смещающиеся грузы плавание в этой зоне не рекомендуется. Для судов, имеющих достаточную остойчивость и не перевозящих смещающиеся грузы, можно допустить плавание в заштрихованной части 2-й зоны, если скорость судна $V_s(\beta,H)$ более чем на 2–3 узла отличается от $V_{рез}(\beta,H)$, либо если амплитуды бортовой качки и ее ускорения невелики. Однако при этом рекомендуется внимательно следить за поведением судна и уходить в безопасную зону $V_s(\beta,H)$ при увеличении амплитуд или ускорении качки. При параметрах волн, лежащих в заштрихованной области на рис. 2.1 вблизи и выше точки 1, вход судов в околорезонансную зону не рекомендуется.

Третья опасная зона – параметрический резонанс бортовой качки – ограничивает соотношение h, V_s, H и β, при которых возможно возникновение бортовой качки судна в режиме ее параметрического резонанса, когда $\tau_к \approx \tau_c/2$. Из-за того, что параметрический резонанс возможен лишь в узком диапазоне частот, а амплитуды качки могут достигать значительных величин, на диаграммах нанесены только околорезонансные зоны, границы которых определены с достаточным запасом в безопасную сторону условием

$$\frac{\tau_c}{2{,}1} \leq \tau_k \leq \frac{\tau_c}{1{,}9} \qquad (2.5)$$

Третья зона рассчитана по формуле

$$V = \frac{c - \frac{m\lambda}{\tau_c}}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз} \qquad (2.6)$$

где $m = 1{,}9$ – соответствует верхней границе околорезонансной зоны;

$m = 2{,}1$ – соответствует ее нижней границе.

На основных диаграммах она, так же как и 2-я зона, строится при длине волны $\lambda = L$, а на дополнительных – для ряда выбранных значений длин волн, $\lambda \neq L$.

Опасность плавания судов внутри 3-й зоны возрастает по мере удаления от ее границ, приближения к 1-й зоне недостаточной остойчивости, уменьшения глубины моря H, метацентрической высоты h и коэффициента демпфирования бортовой качки (например, при обрыве скуловых килей), а также с увеличением высоты и крутизны волн. Причем **особая опасность параметрического резонанса бортовой качки заключается в том, что интенсивные колебания большой амплитуды могут возникнуть неожиданно при прохождении группы неблагоприятных (близких к регулярным) волн на фоне общей благополучной предшествующей картины качки.** Плавание в 3-й зоне всех судов не рекомендуется.

Четвертая опасная зона – брочинг – строится на основных Диаграммах для судов, относительная скорость полного хода которых на тихой воде Fr превышает 0,23. Она существует при длинах волн $\lambda > 0{,}8L$, КУВ $\beta = 0 \pm 45°$ и ограничивает верхнее значение безопасных скоростей судна. Нижняя граница этой зоны отвечает условию $V = k_б\sqrt{L} / \cos\beta$, уз ($k_б \geq 1{,}4$, см. п.3.4).

Плавание судов в 4-й зоне не рекомендуется. Степень опасности такого плавания возрастает с уменьшением МЦВ и длины судна, увеличением его относительной скорости и крутизны волн.

В дополнение к перечисленным опасным зонам следует отметить неблагоприятную для плавания 5-ю зону – недостаточной управляемости, соответствующую малым скоростям, при которых судно может стать плохо управляемым в условиях шторма и более подверженным ударам попутных

волн и заливанию. Верхняя граница этой зоны назначается судоводителем исходя из опыта эксплуатации конкретного судна и наносится пунктиром на основных диаграммах. Длительное плавание в этой зоне не рекомендуется.

2.4.4. Безопасные зоны штормового плавания судна на попутном волнении

Безопасным сочетаниям значений осадок, начальных МЦВ, скоростей судна, глубин моря, параметров волн и КУВ при плавании судна на попутном волнении на диаграммах соответствуют зоны, точки которых не принадлежат ни одной из опасных зон и расположены ниже скорости полного хода на тихой воде.

Допускаемым в некоторых случаях сочетаниям значений перечисленных параметров на диаграммах соответствуют только точки 2-й опасной зоны, не являющиеся границей 1-й опасной зоны и отстоящие более чем на 2—3 уз от кривых $V_{рез}(\beta,H)$ либо соответствующие высокой остойчивости и приемлемым значениям амплитуд и ускорений бортовой качки.

По усмотрению судоводителя допускается также кратковременное плавание в неблагоприятной 5-й зоне.

В зависимости от начальной МЦВ на диаграммах выделяются две безопасные зоны — нижняя и верхняя. При плавании в нижней безопасной зоне уменьшение скорости должно быть таким, чтобы судно не теряло способности управляться.

2.5. Порядок работы с диаграммами. Выбор оптимальной остойчивости. Определение безопасных режимов штормового плавания судна на попутном волнении*

2.5.1. При загрузке судна перед выходом в рейс

При загрузке судна в порту рекомендуется учитывать безопасность его штормового плавания на попутном волнении. Для этого следует стремиться обеспечить такую остойчивость, чтобы при попадании в шторм на попутное волнение снижение его скорости и отклонение от выгодного курса,

---

* Приведенные ниже примеры являются иллюстративными и не могут быть использованы для иных целей.

необходимые для обеспечения безопасного плавания, были минимальными. Оценка такой оптимальной остойчивости производится для наиболее опасного расчетного случая, когда $\lambda = L$ и $h_{3\%} = h_{3\%расч}$. Она может выполняться приближенно по одной из основных диаграмм для осадки, равной или несколько превышающей предполагаемую фактическую, либо более точно – линейной интерполяцией между диаграммами для двух смежных осадок.

Если для смежных осадок полученные значения МЦВ отличаются не более чем на 0,05 м, а скоростей – не более чем на 1 уз, искомые величины для фактической осадки можно определить как среднее арифметическое между их соответствующими смежными значениями или «на глаз».

Пример 1.

Судно с малой остойчивостью

Известно:

Длина судна $L = 96{,}0$ м.
Предполагаемый случай нагрузки соответствует средней осадке $d = 6{,}45$ м.
Диапазон возможного изменения МЦВ $h = 0{,}4–0{,}6$ м.
Высота расчетной волны $h_{3расч.} = 7{,}8$ м.
Судно не имеет смещающихся грузов, допускается вход во 2-ю опасную зону диаграмм до скорости $V_{доп} = V_{рез} \pm 2{,}0$ уз.

Требуется определить:

МЦВ, при которой безопасная скорость судна на попутном волнении будет наибольшей.

При выборе наибольших значений скоростей в случае малой остойчивости судна лимитирующей может оказаться любая из первых трех опасных зон диаграмм или их сочетание.

Для приближенной оценки МЦВ выбираем основную диаграмму на рис. 2.2, соответствующую осадке $d = 6{,}57$ м. На ней в диапазоне $h = 0{,}4–0{,}6$ м при $h_{3\%} = 7{,}8$ м определяем точку, в которой безопасная скорость судна имеет наибольшее значение. Она находится в нижней безопасной зоне и соответствует $h = 0{,}46$ м и $V_б^{max} < 7{,}2$ уз. С учетом возможного входа во 2-ю опасную зону до скорости $V_{доп} = V_{рез} - 2$ уз получим $h = 0{,}51$ м и $V_{доп}^{max} < 8{,}5$ уз. Определение этой точки удобно производить измерителем, последовательно откладывая 2 уз вниз от кривой $V_{рез}$ до пересечения с кривой $V_{пред}(h_{3\%} = 7{,}8$ м).

Таким образом, оптимальными в данном случае могут считаться значения МЦВ в диапазоне h = 0,46–0,51 м. Им соответствуют наибольшие безопасные $V_{б}^{max}$ < 7,2 уз и допускаемые $V_{доп}^{max}$ < 8,5 уз скорости судна.

Для более точного определения оптимальной остойчивости при фактической осадке d = 6,45 м аналогичные действия выполним на основных диаграммах, соответствующих меньшей d_1 = 6,0 м (рис. 2.3) и большей d_2 = 6,57 м (рис. 2.2) осадкам. Затем линейной интерполяцией между осадками d_1 и d_2 по формулам

$$h = \frac{(h_1 - h_2)(d_2 - d)}{d_2 - d_1} + h_2$$

$$V = \frac{(V_1 - V_2)(d_2 - d)}{d_2 - d_1} + V_2$$

или графически найдем оптимальную МЦВ и наибольшую безопасную скорость судна для фактической осадки d.

Вычисления удобно производить в таблице (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Схема определения оптимальной МЦВ и скоростей $V_{б}^{max}$, $V_{доп}^{max}$ при загрузке судна перед выходом в рейс

Осадка		d_1 = 6,0 м	d_2 = 6,57 м	d = 6,45 м
Безопасные значения	h, м	0,31 →	0,46	0,43
	$V_{б}^{max}$	10,1 →	7,2	7,8
Допускаемые значения	h, м	0,34 →	0,51	0,47
	$V_{доп}^{max}$	10,8 →	8,5	9,0

Результаты показывают, что более точная оценка позволяет иметь судну меньшую остойчивость $h = 0{,}43-0{,}47$ м и более высокие значения безопасной $V_{б}^{max} = 7{,}8$ уз и допускаемой $V_{доп}^{max} = 9{,}0$ уз скоростей. Приближенная оценка дает ошибку в безопасную сторону.

Пример 2.

Судно с высокой остойчивостью

Известно:

То же, что и в примере 1, но диапазон возможного изменения начальной МЦВ $h = 1{,}2-1{,}6$ м.

Требуется определить:

Оптимальную МЦВ.

При высокой остойчивости плавание судна на попутном волнении возможно только в верхней безопасной зоне диаграмм, а лимитирующими факторами, как правило, являются амплитуды и ускорения при основном резонансе бортовой качки и брочинг. В верхней безопасной зоне оптимальными могут считаться такие значения МЦВ, которым соответствуют наименьшие значения минимальных безопасных и допускаемых скоростей, т. е. более широкий диапазон возможного варьирования скорости судна на попутном волнении. Этот диапазон расширяется с увеличением h. Следовательно, оптимальным будет наибольшее значение МЦВ из заданного диапазона.

Оценка выполняется по тем же диаграммам и в том же порядке, что и в примере 1.

В случае приближенной оценки получим $h = 1{,}6$ м, $V_{б}^{min} > 8{,}8$ уз и $V_{доп}^{min} > 3{,}9$ уз. По условиям брочинга максимальная безопасная скорость $V_{б}^{max} < 13{,}7$ уз.

Более точное определение скоростей $V_{б}^{min}$ и $V_{доп}^{min}$ при фактической осадке $d = 6{,}45$ м в данном примере приводит практически к такому же результату ($V_{б}^{min} > 8{,}8$ уз и $V_{доп}^{min} > 4{,}0$ уз), т.к. очень малое ее отличие от осадок d_1 и d_2 мало изменяет зоны основного резонанса бортовой качки. По условию брочинга $V_{б}^{min}$ также $< 13{,}7$ уз.

Оценив таким образом оптимальные параметры остойчивости, рекомендуется реализовать их при загрузке судна путем рационального приема и размещения груза по его длине и высоте, приема иди откачки балласта, изменения дифферента и свободных поверхностей жидких грузов или другими возможными мероприятиями.

Полученные в примерах 1 и 2 перед выходом судна в рейс значения оптимальных МЦВ, а также скоростей $V_б$ и $V_{доп}$ соответствуют КУВ $\varphi = 180°(\beta = 0)$, глубокой воде $H = \infty$ и длине волны $\lambda = L$. В течение рейса МЦВ, как правило, изменяется в небольших пределах и будет мало отличаться от оптимальной. В случае значительного изменения МЦВ в рейсе, а также для учета фактических параметров волн, глубины моря и изменения осадки рекомендуется контролировать безопасность судна при штормовом плавании на попутном волнении и при необходимости выбирать безопасные скорости и КУВ, как это показано в п.2.5.2.

2.5.2. В рейсе

Если в условиях шторма необходимо изменить курс судна на попутный, предварительно следует оценить безопасность его плавания на попутном волнении. Для этого известными способами (см. п.2.4.1) определяются фактические значения высоты волны $h_{3\%}$ или h_3, средней длины волны λ и соответствующая им точка наносится на рис. 2.1.

Если точка находится вне границ изображенной там области, то плавание судна при данных параметрах попутного волнения считается неопасным, если внутри области, то могут возникнуть неблагоприятные явления и требуется проверка безопасности плавания по диаграммам в соответствии с настоящей Инструкцией. В случае, если точка попадает внутрь заштрихованной части области, то неблагоприятные явления могут проявляться наиболее сильно и быть весьма опасными для судна.

Пример 3.

Судно с малой остойчивостью

Известно:

Длина судна	L = 96,0 м
Средняя осадка	d = 6,3 м
Начальная МЦВ с учетом поправки на свободные поверхности	h = 0,40 м
Скорость хода до изменения курса на попутный	V_S = 15 уз
Фактическая высота волн	$h_{3\%}$ = 6,4 м
Средняя длина этих волн	λ = 75 м
Высота расчетной волны	$h_{3\%расч}$ = 7,8 м
Минимальная скорость, при которой судно способно удовлетворительно управляться на попутном волнении	$V_{уп}$ = 3,5 уз
Судно не имеет смещающихся грузов, допустим вход во 2-ю опасную зону диаграмм до скорости	$V_{доп} = V_{рез} \pm 2{,}0$ уз

Требуется:

1. Оценить степень опасности штормового плавания при фактических параметрах попутного волнения, глубине моря, курсовом угле, характеристиках посадки и остойчивости судна.
2. При наличии опасности – выбрать безопасные режимы плавания и/или изменить характеристики посадки и остойчивости судна с целью уменьшения неблагоприятного влияния попутного волнения.

Для оценки степени опасности фактического волнения на рис. 2.1 наносим точку А, соответствующую значениям $h_{3\%}$ и λ. Точка находится в заштрихованной части области. Попутное волнение с заданными параметрами может представлять опасность для судна. Проверка безопасности его плавания по диаграммам необходима.

Полная проверка безопасности при фактических параметрах волнения, глубины моря, посадки и остойчивости судна осуществляется в несколько этапов. При этом рекомендуется вначале всегда выполнять ее для КУВ $\beta = 0°$ и глубины $H = \infty$, а затем, используя вертикальные оси диаграмм, переходить к фактическим значениям β и H.

На первом этапе при $\beta = 0°$ и $H = \infty$ **определяем положение точки V_s по отношению к границе 1-й опасной зоны – недостаточной остойчивости.**

Для этого выбираем две основные диаграммы на рис.2.2 и 2.3 для осадок меньше ($d_1 = 6{,}0$ м) и больше ($d_2 = 6{,}57$ м) фактической. Проводим на них вертикали, соответствующие фактической МЦВ $h = 0{,}40$ м, снимаем с них значения $V_{пред}$ для высот волн меньших ($h_{3\%1} = 5{,}8$ м) и больших ($h_{3\%2} = 7{,}8$ м), чем фактическая, и линейной интерполяцией по ним вычисляем скорость $V_{пред}$, соответствующую фактическим $h_{3\%}$ и d. Интерполяция выполняется вначале по высоте волны, а затем по осадке. Ее можно производить графически или по формулам:

$$V_{пред I(h_{3\%}, d_1)} = \frac{(V_{11} - V_{21})(h_{3\%2} - h_{3\%})}{h_{3\%2} - h_{3\%1}} + V_{21} =$$

$$= \frac{(15{,}6 - 12{,}9)(7{,}8 - 6{,}4)}{7{,}8 - 5{,}8} + 12{,}9 \approx 14{,}8 \text{ уз}$$

$$V_{пред II(h_{3\%}, d_2)} = \frac{(V_{12} - V_{22})(h_{3\%2} - h_{3\%})}{h_{3\%2} - h_{3\%1}} + V_{22} =$$

$$= \frac{(7{,}3 - 6{,}3)(7{,}8 - 6{,}4)}{7{,}8 - 5{,}8} + 6{,}3 \approx 7{,}0 \text{ уз}$$

$$V_{пред(h_{3\%}, d)} = \frac{(V_{пред II} - V_{пред I})(d_1 - d)}{d_1 - d_2} + V_{пред I} =$$

$$= \frac{(7{,}0 - 14{,}8)(6{,}0 - 6{,}3)}{6{,}0 - 6{,}57} + 14{,}8 \approx 11{,}1 \text{ уз},$$

где $V_{пред I}$, $V_{пред II}$ – вычисленные значения скоростей, соответствующие кривым $V_{пред}$ при фактической высоте волны $h_{3\%}$ и осадках d_1 и d_2;

V_{11}, V_{21}, V_{12}, V_{22} – снятые с диаграмм на вертикали $h = 0{,}4$ м значения скоростей $V_{пред}$ при высотах волн $h_{3\%1,2}$ и осадках $d_{1,2}$. Первый индекс обозначает номер волны, а второй – осадки.

Если вертикаль h = 0,4 м в поле диаграмм не пересекает кривых $V_{пред}$ для первой и/или второй высоты волны, то за точку пересечения следует условно принимать скорость полного хода судна на тихой воде либо определять ее на продолжении этих кривых вне поля диаграмм.

Схема вычислений приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Схема вычисления для 1-й опасной зоны – недостаточной остойчивости – скорости $V_{пред}$ при фактических параметрах волнения, осадки и остойчивости

Осадка, м	Высота волн, м		
	$h_{3\%1}$ 5,8	$h_{3\%2}$ 7,8	$h_{3\%}$ 6,4
d_1 = 6,0	V_{11} → 15,6	V_{21} → 12,9	$V_{пред I}$ 14,8
d_2 = 6,57	V_{12} → 7,3	V_{22} → 6,3	$V_{пред II}$ 7,0
d = 6,3	–	–	$V_{пред}(h_{3\%},d)$ 11,1

Если фактическая длина волны мало отличается от длины судна, а скорость V_s меньше вычисленного значения $V_{пред}(h_{3\%},d)$ и находится в безопасной зоне диаграммы для осадки d_2 и не вблизи ее границ, плавание судна в этих условиях может считаться безопасным. Иначе необходимо выполнить дальнейшую проверку.

В нашем случае $V_s > V_{пред}(h_{3\%},d)$, т.е. при скорости 15 уз судно будет иметь недостаточную остойчивость на фактическом попутном волнении. Чтобы обеспечить надлежащую остойчивость, ему перед сменой курса на попутный необходимо иметь скорость менее 11,1 уз. Точка $V(h_{3\%},d)$ = 11,1 уз не находится в безопасной зоне диаграммы на рис. 2.2. Необходимо дальнейшее уточнение безопасной скорости.

На втором этапе определяется положение полученной на 1-м этапе точки $V_{пред}(h_{3\%},d)$ по отношению к зонам основного и параметрического резонансов бортовой качки при фактической длине волны λ = 75 м.

Оценка производится по дополнительной диаграмме на рис. 2.4, построенной в диапазоне длин волн от 40 до 160 м. Для этого на нижних осях h(d) определяем точку h(d = 6,3м) = 0,4 м, из нее проводим вертикальную линию, на которой отмечаем точку V = 11,1 уз. Она находится во 2-й опасной зоне ниже кривых $V_{рез}$ для смежных длин волн $\lambda_{1,2}$ = 40 и 80 м. Следовательно, безопасное плавание возможно в нижней безопасной зоне.

Вначале определяются **безопасные и допускаемые скорости, соответствующие границам 2-й опасной зоны — основного резонанса бортовой качки.** Для этого с упомянутой вертикали h(d) = 0,4 м снимаем значения скоростей $V_{рез}$ при длине волн меньше (λ_1 = 40 м) и больше (λ_2 = 80 м) фактических ($V_{рез1}$ = = 10,5 уз, $V_{рез2}$ = 12,0 уз); безопасных скоростей, соответствующих нижним границам 2-й опасной зоны ($V_{б1}$ = 9,0 уз, $V_{б2}$ = 9,0 уз — в нашем примере они оказались равными), а также максимально допускаемых по условиям основного резонанса бортовой качки скоростей (приняв $V_{доп}$ = $V_{рез}$ — — 2,0 уз, получим $V^{max}_{доп1}$ = 8,5 уз и $V^{max}_{доп2}$ = 10,0 уз).

Затем линейной интерполяцией определяем значения $V_б$ и $V^{max}_{доп}$ при фактической длине волны (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Определение во 2-й опасной зоне — основного резонанса бортовой качки — скоростей $V_б$ и $V^{max}_{доп}$ для фактической длины волны λ = 75 м

Длина волн, м	λ_1	λ_2	λ
	40	80	75
$V_б$, уз	9,0	9,0	9,0
$V^{max}_{доп}$, уз	8,5	10,0	9,8
$V_{пред}$, уз	—	—	11,1
Вывод:	$V_б$ < 9,0 уз, $V^{max}_{доп}$ < 9,8 уз		

Таким образом, для избежания возникновения интенсивной бортовой качки в режиме основного резонанса судно перед поворотом на попутный курс должно уменьшить свою

скорость с 15 уз до безопасной $V_б < 9{,}0$ уз или до максимально допускаемой $V_{доп}^{max} < 9{,}8$ уз. Причем для скорости $V_{доп}$ в данном случае лимитирующим фактором является не остойчивость, а качка, т.к. скорость $V_{доп}^{max}$ оказалась меньше, чем $V_{пред}$.

Для судоводителя полезно знать безопасный диапазон изменения скоростей на попутном волнении, т.е. высоту нижней безопасной зоны диаграмм. С этой целью аналогичным образом определим **безопасные скорости, соответствующие нижней и верхней границам 3-й опасной зоны – параметрического резонанса бортовой качки**. Для этого на той же диаграмме (рис. 2.4) с упомянутой вертикали h(d = 6,3 м) = 0,4 м при смежных длинах волн $\lambda_{1,2} = 40$ м и 80 м снимаем соответствующие значения нижних ($V_{б1}^{н} = 5{,}0$ уз, $V_{б2}^{н} = 0{,}9$ уз) и верхних ($V_{б1}^{в} = 6{,}1$ уз, $V_{б2}^{н} = 2{,}9$ уз) безопасных скоростей. Затем аналогичной линейной интерполяцией определяем искомые значения этих скоростей для фактической длины волны (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Определение в 3-й опасной зоне – параметрического резонанса бортовой качки – скоростей $V_б^{н}$ и $V_б^{в}$ при фактической длине волны $\lambda = 75$ м

Длина волн, м	λ_1	λ_2	λ
	40	80	75
$V_б^{н}$, уз	5,0 →	0,9	1,4
$V_б^{в}$, уз	6,1 →	2,9	3,3
Вывод: $V_б^{н} < 1{,}4$ уз, $V_б^{в} > 3{,}3$ уз. Скорости не имеют практического значения. Из условия достаточной управляемости следует принять $V_б \geq 3{,}5$ уз			

В нашем примере интенсивная бортовая качка судна в режиме параметрического резонанса может возникнуть при скорости в интервале от 1,4 до 3,3 уз. Она не является лимитирующей, поскольку при малых скоростях судно будет плохо слушаться руля. Поэтому в качестве минимально безопасной следует принять такую скорость, при которой данное

судно еще способно удовлетворительно управляться в условиях шторма на попутном волнении, т.е. $V_б^{min} \geq V_{уп} = 3{,}5$ уз.

Таким образом, в результате проверки по трем опасным зонам Диаграмм можно сделать заключение: при заданных параметрах фактического волнения, посадки и остойчивости судно на глубокой воде и КУВ $\beta = 0°$ может безопасно плавать в диапазоне скоростей $V_б = 3{,}5–9{,}0$ уз. Максимально допускаемая скорость $V_{доп}^{max} < 9{,}8$ уз.

Судно не должно выходить из указанного диапазона скоростей также и в процессе поворота на попутный курс к волне, если ему для этого необходимо пройти КУВ $\varphi = 180°$ ($\beta = 0°$).

На 3-м этапе при необходимости можно определить, как изменятся полученные значения $V_б$ и $V_{доп}$ с изменением курсового угла β и глубины моря H.

Для оценки влияния **только КУВ** (например, $\beta = 15°$) при заданной скорости $V_б$ или $V_б^{max}$ на любой из диаграмм проводим горизонтальную прямую до пересечения с осью $V_s(\beta = 15°)$. Точка пересечения, снятая в масштабе этой оси, соответствует искомой скорости $V_s(\beta = 15°, H = \infty)$.

Для оценки влияния **только глубины моря** (например, $H = 30$ м) с осей $\Delta V_s(H, \lambda)$ дополнительной диаграммы (рис. 2.4) для фактической длины волны и глубины моря снимается значение поправки $\Delta V_s(H = 30$ м, $\lambda = 75$ м$) \approx 0{,}2$ уз. Искомые значения скоростей вычисляются по общей формуле

$$V_s(H, \lambda, \beta) = V_s(H = \infty, \lambda, \beta) - \Delta V_s(H, \lambda) \qquad (2.7)$$

В нашем случае получим:

$$V_s(H = 30\text{м}, \lambda = 75\text{м}, \beta = 0°) = V_s(H = \infty, \lambda = 75\text{м}, \beta = 0°) - \\ - \Delta V_s(H = 30\text{м}, \lambda = 75\text{м})$$

Для одновременной оценки влияния КУВ ($\beta = 15°$) и глубины моря ($H = 30$ м) найденные, как указано выше, скорости $V_s(\text{H},\lambda,\beta = 0°)$ отмечаются на вертикальной оси $V_s(\beta = 0°)$ и от них проводятся горизонтали до пересечения с осью $V_s(\beta = 15°)$. Полученные точки пересечения в масштабе оси $V_s(\beta = 15°)$ соответствуют искомым скоростям $V_s(H = 30$ м, $\lambda = 75$ м, $\beta = 15°)$. Их можно также определить по общей формуле (2.7):

$$V_s(H = 30\text{м}, \lambda = 75\text{м}, \beta = 15°) = V_s(H = \infty, \lambda = 75\text{м}, \beta = 15°) - \\ - \Delta V_s(H = 30\text{м}, \lambda = 75\text{м})$$

Результаты рассмотренных случаев оценки скоростей $V_б$ и $V_{доп}^{max}$ при λ = 75 м, β = 15° и H = 30 м приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Примеры оценки влияния курсового угла к волне и глубины моря на значение скоростей $V_б$ и $V_{доп}^{max}$

H, м	∞		30	
β, град	0	15	0	15
$\Delta V_s(H,\lambda)$, уз	–	–	0,2	0,2
$V_б^{min}$, уз	5,0	5,2	4,8	5,0
$V_б^{max}$, уз	9,0	9,3	8,8	9,1
$V_{доп}^{max}$, уз	9,8	10,2	9,6	10,0

Для судна, попавшего в условия, соответствующие табл. 2.6, плавание на попутном волнении может считаться безопасным в диапазоне скоростей от $V_б^{min}$ до $V_б^{max}$ и допустимым – до скоростей, соответствующих $V_{доп}^{max}$.

Пример 4.

Судно с высокой остойчивостью

Известно:

Все то же, что и в примере 3, но начальная МЦВ с учетом поправки на свободные поверхности h = 1,3 м.

В рассматриваемом примере плавание судна на попутном волнении возможно только в верхней безопасной зоне диаграмм и лимитирующими факторами могут являться амплитуды и ускорения при основном резонансе бортовой качки, а также брочинг. Оценка безопасности производится во 2-й опасной зоне. Она выполняется так же, как и в при-

мере 3, но начинается со второго этапа. Результаты представлены в табл. 2.7–2.8.

Таблица 2.7

Определение во 2-й опасной зоне – основного резонанса бортовой качки – скоростей $V_б^{min}$, $V_{доп}^{min}$ и $V_{доп}^{max}$ для фактической длины волны $\lambda = 75$ м при глубине моря $H = \infty$ и КУВ $\beta = 0°$

Длина волн, м	λ_1	λ_2	λ
	40	80	75
$V_б^{min}$, уз	9,7 →	10,3	10,2
$V_{доп}^{min}$, уз	7,2 →	5,4	5,6
$V_{доп}^{max}$, уз	Без ограничения		

Таблица 2.8

Оценка влияния курсового угла к волне и глубины моря на значение скоростей $V_б^{min}$, $V_{доп}^{min}$ и $V_{доп}^{max}$ для фактической длины волны $\lambda = 75$ м

H, м	∞		30	
β, град	0	15	0	15
$\Delta V_s(H,\lambda)$, уз	–	–	0,2	0,2
$V_б^{min}$, уз	10,2	10,7	10,0	10,5
$V_{доп}^{min}$, уз	5,6	5,9	5,4	5,7
$V_{доп}^{max}$, уз	Без ограничения			

Судно на заданном попутном волнении может безопасно эксплуатироваться в диапазоне скоростей от максимальной, соответствующей скорости его полного хода на тихой воде, до минимально безопасной $V_б$ или минимально допускаемой $V_{доп}$, указанных в табл. 2.8 для принятых значений H и β. Ограничения по брочингу в приведенном примере отсутст-

вуют, т.к. заданная длина волны $\lambda < 0{,}8L$ может считаться не опасной в отношении его возникновения.

Безопасные и допускаемые режимы плавания, полученные в Примерах 3 и 4, могут по каким-либо причинам не устраивать судоводителя. В этом случае следует так изменить характеристики посадки и остойчивости судна, чтобы безопасные режимы плавания были приемлемыми. Оценить эффективность принятого решения можно по диаграммам, выполнив аналогичную оценку безопасности при возможных в конкретной обстановке вариантах изменения осадки и остойчивости.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИАГРАММ ШТОРМОВОГО ПЛАВАНИЯ СУДНА НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ

3.1. Расчет зоны недостаточной остойчивости

3.1.1. Ограничения. Область применения

Построение 1-й опасной зоны в каждом конкретном случае нагрузки производится для ряда значений начальных МЦВ (h) судна на тихой воде в диапазоне от минимально ($h_{\text{доп}}$) до максимально ($h_{\text{доп}}^{\max}$) допускаемых по Правилам Регистра при трех значениях высот волн 3%-й обеспеченности, указываемых на диаграммах: $h_{3\%1} = h_{3\%\text{расч}}$, $h_{3\%2} = 0{,}75h_{3\%\text{расч}}$ и $h_{3\%3} = 0{,}5h_{3\%\text{расч}}$.

Шаг изменения МЦВ выбирается таким, чтобы получить плавные кривые предельно допускаемых в отношении достаточной остойчивости судна скоростей $V_{\text{пред}}$.

Расчет прекращается при таком значении МЦВ, при котором $V_{\text{пред}}$ для КУВ $\varphi = 180°(\beta = 0)$ окажется больше скорости полного хода судна на тихой воде.

Все расчеты выполняются для случая глубокой воды и КУВ $\varphi = 180°(\beta = 0°)$. Переход к ограниченной глубине моря и произвольным КУВ ($0° \le \beta \le \pm 45°$) осуществляется с помощью вертикальных осей диаграмм $V_s(\beta)$ и $V_s(H)$, как это показано в разделе 2. Правила построения этих осей описаны в п.3.3.

3.1.2. Параметры расчетной волны

При построении 1-й опасной зоны диаграмм за расчетную волну 3%-й обеспеченности принята волна, имеющая среднюю длину λ, равную длине судна L между перпендикулярами, и высоту

$$h_{3\%расч} = k_h \times h_{расч}, \text{ м} \qquad (3.1)$$

Высота фактического волнения 3%-й обеспеченности считается равной $h_{3\%расч}$ и указывается на диаграммах:

$$h_{расч} = 0{,}22\lambda^{0{,}715}, \text{ м} \qquad (3.2)$$

где $h_{расч}$ — высота расчетной регулярной волны, имеющей правильную косинусоидальную форму и длину $\lambda = L$. Для этой волны рассчитываются «мгновенные» диаграммы остойчивости судна и определяются коэффициенты k_τ. На диаграммах она может быть указана вместе с $h_{3\%}$ как высота волн зыби $h_з$ для оценки безопасности при попадании судна на волнение, близкое к регулярному;

$k = 1{,}336$ — условный расчетный коэффициент перехода от высоты расчетной регулярной волны к эквивалентной ей по периоду высоте нерегулярной волны 3%-й обеспеченности.

В расчетах используются следующие параметры расчетной волны:

$$\tau_к = \frac{\lambda}{c - V\cos\beta} \qquad (3.3)$$

где τ_k — кажущийся период, с;

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} th \frac{2\pi H}{\lambda}} \qquad (3.4)$$

c — скорость распространения волны. При $H = \infty$ и $\lambda = L$

$$c = 1{,}25\sqrt{L}, \text{ м/с};$$

H — глубина моря, м;

V — скорость судна, м/с;

β — угол между направлением распространения волны и скоростью судна. Положителен по часовой стрелке (рис. 3.1).

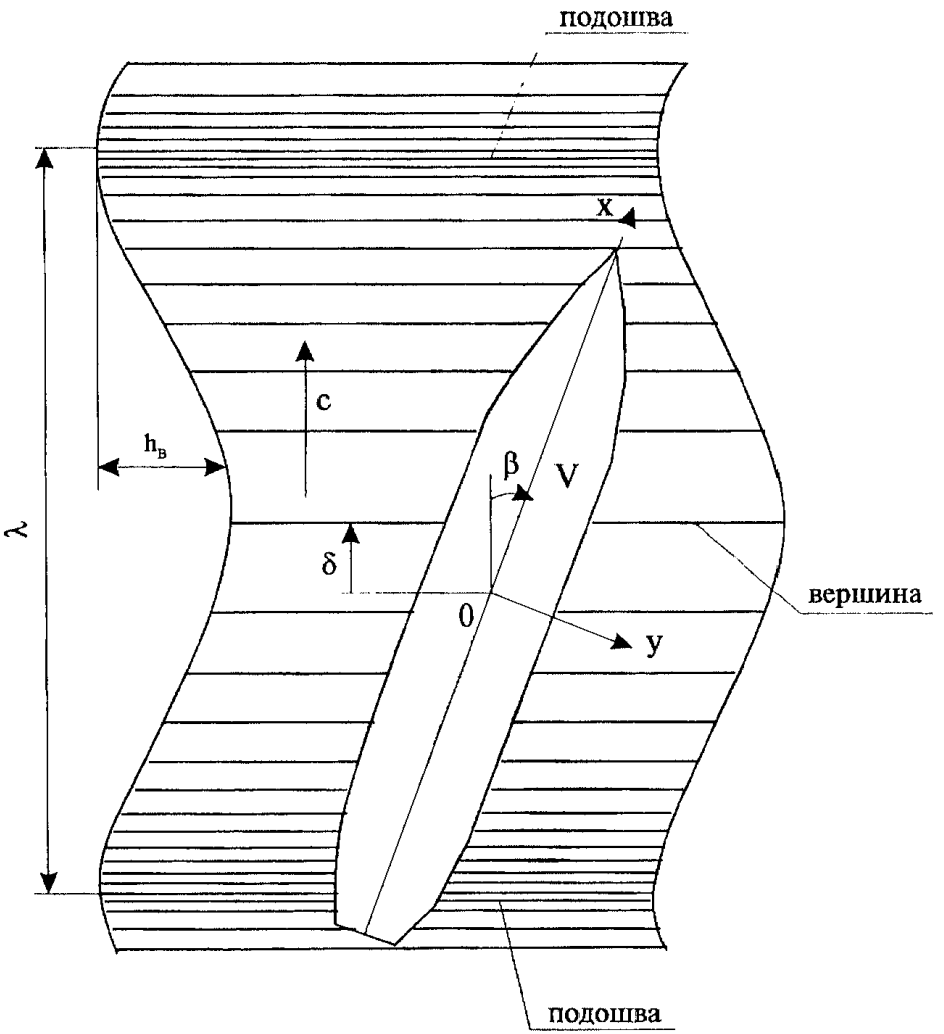

Рис. 3.1. Положение судна относительно волны при движении на попутном волнении

3.1.3. Нормативы обеспечения остойчивости при штормовом плавании судна на попутном волнении

Остойчивость судна считается достаточной, если при скорости V за кажущийся период τ_k расчетной попутной волны время $t_{(-)}$, в течение которого плечи его остойчивости в диапазоне углов крена от 10 до 40° падают ниже нормированного критического значения $l_{кр}$, не превышает четверти его собственного периода бортовой качки на тихой воде τ_c.

Это условие выполняется, если будет удовлетворен основной критерий

$$Kfw = \frac{\tau_c}{4k_\tau \times \tau_k} > 1{,}0 \qquad (3.5)$$

где $k_\tau = \frac{t_{(-)}}{\tau_k}$ — безразмерный расчетный коэффициент;

$$\tau_c = \frac{aB}{\sqrt{h_f}} \qquad (3.6)$$

τ_c — собственный период бортовой качки судна на тихой воде, с;

$$a = 0{,}7487 + 0{,}0456\frac{B}{d} - 0{,}000864L \qquad (3.7)$$

a — безразмерный коэффициент (по согласованию с Регистром для некоторых типов судов могут приниматься другие значения коэффициента a);

B, d — соответственно ширина и осадка судна на миделе, м;

h_f — расчётная метацентрическая высота, м. Для судов с S-образной диаграммой статической остойчивости $h_f = h_{10}$, для остальных судов $h_f = h$;

h — начальная метацентрическая высота, м;

$$h_{10} = (l_{10} - l_9)57{,}3$$

h_{10} — обобщенная расчетная метацентрическая высота при угле крена 10°;

l_9, l_{10} — плечи диаграммы статической остойчивости судна на тихой воде при углах крена 9° и 10° соответственно.

Если для заданной осадки судна при скорости полного хода на тихой воде, значениях h, H, β и $h_{3\%1}$, соответствующих п.3.1.1, критерий Kfw удовлетворяется, его остойчивость на попутном волнении считается обеспеченной, дальнейший расчет по п.3.1 не производится, а выполняется только расчет опасных зон основного и параметрического резонансов бортовой качки по п.3.2.

Из основного критерия Kfw получены выражения для определения предельных безопасных скоростей судна. Возможны два случая: когда волна обгоняет судно

$$V_{\text{пред}} < \frac{\left(c - \dfrac{4k_\tau\lambda}{\tau_c}\right)}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз} \qquad (3.8)$$

и когда судно обгоняет волну

$$V_{\text{пред}} > \frac{\left(c - \dfrac{4k_\tau\lambda}{\tau_c}\right)}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз} \qquad (3.9)$$

Для большинства транспортных судов второй случай не имеет практического значения, поскольку скорость их полного хода обычно меньше скорости расчетной волны.

Значения скоростей $V_{\text{пред}}$ наносятся на диаграммы при различных $h_{3\%}$, h, H и β. Они устанавливают границы первой опасной зоны – недостаточной остойчивости.

3.1.4. Нормируемое значение критического плеча остойчивости $l_{\text{кр}}$

Критическое плечо остойчивости $l_{\text{кр}}$ в зависимости от типа судна и конкретного случая его нагрузки выбирается наибольшим из следующих значений:

$$0{,}1 \text{ м}; \ 0{,}6l_w; \ l_{\text{ц}} \qquad (3.10)$$

где l_w – плечо кренящего момента от давления бокового ветра, определяемого для неограниченного района плавания, м;

0,6 – коэффициент, учитывающий изменение ветровой нагрузки на судно из-за возможного отклонения на 30–40° направления ветра от направления движения судна;

$l_ц$ – плечо кренящего момента на установившейся циркуляции, м.

Значения l_w и $l_ц$ определяются по Правилам Регистра для судов, подлежащих проверке остойчивости по критерию погоды или крену на циркуляции.

3.1.5. Методика определения коэффициента k_τ

В общем случае движения судна на попутном волнении коэффициент $k_\tau = t_{(-)}/\tau_k$ показывает, какую долю от кажущегося периода волны τ_k судно, имеющее крен θ, при скорости V, курсовом угле $\varphi = 180° \pm \beta$ и параметрах волны $h_в$, λ и c будет иметь плечи остойчивости l_θ ниже, чем $l_{кр}$. Он зависит от следующих факторов:

$k_\tau = f$ (форма корпуса судна, d, Xg, Zg, θ, β, $h_в/\lambda$, λ/L).

Время $t_{(-)}$ и коэффициент k_τ имеют максимальные значения при $\varphi = 180°(\beta = 0°)$. С целью упрощения методики расчета и обеспечения некоторого запаса остойчивости коэффициент k_τ определяется при $\beta = 0°$, а зависимость τ_k от β в критерии Kfw учитывается по полной формуле (3.3).

Согласно пп. 3.1.1–3.1.3 кривые $V_{пред}$, а следовательно, и коэффициенты k_τ определяются для трех значений высоты регулярной волны [формула (3.2)]: $h_{в1} = h_{расч}$, $h_{в2} = 0{,}75h_{расч}$, $h_{в3} = 0{,}5h_{расч}$, которым на диаграммах соответствуют высоты волн 3%-й обеспеченности $h_{3\%1}$, $h_{3\%2}$ и $h_{3\%3}$. [Для удобства пользования диаграммами допускается полученные по формуле (3.1) значения $h_{3\%1,2,3}$ округлять в бóльшую сторону до ближайшего целого значения. В этом случае соответствующие значения $h_{в1,2,3}$ следует получить обратным пересчетом $h_{в1,2,3} = h_{3\%1,2,3}/1{,}336$.]

Программное обеспечение судового компьютера, разработанное в соответствии с РД, может предусматривать расчет скоростей $V_{пред}$ в рейсе для фактических значений средней длины λ и высоты волн 3%-й обеспеченности $h_{3\%}$ либо высоты волн зыби $h_з$. В этом случае при вычислении коэффициента k_τ за расчетную должна приниматься регулярная волна с длиной λ и высотой $h_{расч} = h_{3\%}/1{,}336$, а для волн зыби – высотой $h_{расч} = h_з$.

Для определения коэффициента k_τ используются плечи «мгновенных» диаграмм остойчивости $l_{\bar{\delta}}(\theta)$, полученных при

статической постановке судна на расчетную волну при различных положениях ее вершины по длине судна, определяемых параметром $\bar{\delta} = \delta / L$ (рис. 3.2) (δ — смещение (фазовый сдвиг) вершины волны относительно миделя. Положительное значение — в нос судна.)

Расчет таких диаграмм производится в диапазоне углов крена от 10 до 40° с учетом влияния свободного дифферента и изменения осадки в предположении о гидростатическом распределении давления в волне.

За исходную принимается посадка судна на тихой воде без крена с осадкой и дифферентом, отвечающими выбранному наихудшему случаю нагрузки.

Шаг изменения угла крена (рекомендуется 5°) должен обеспечивать достаточно точное построение кривых плеч «мгновенных» диаграмм остойчивости $l_{\bar{\delta}}(\theta)$ в заданном диапазоне θ.

Количество фазовых сдвигов δ должно быть таким, чтобы погрешность определения по оси $\bar{\delta}$ на рис. 3.3 точек пересечения кривых $l_{\theta}(\bar{\delta})$ с прямой $l_{кр}$ не превышала 0,01.

Методика и программа расчета на ЭВМ «мгновенных» диаграмм остойчивости должны иметь допуск Регистра.

Расчет коэффициента k_{τ} выполняется в следующем порядке.

1. По «мгновенным» диаграммам $l_{\bar{\delta}}(\theta)$ для каждого из заданных углов крена θ определяются значения плеч остойчивости l_{θ} при различных $\bar{\delta}$ и строятся кривые $l_{\theta}(\bar{\delta})$ (см. рис. 3.3).

2. На рис. 3.3 отмечаются точки пересечения кривых $l_{\theta}(\bar{\delta})$ с горизонтальной прямой плеча $l_{кр}$, определенного в соответствии с п.3.1.4.

3. В масштабе оси $\bar{\delta}$ при одинаковых θ измеряются расстояния между этими точками $t_{(-)10}$, ..., $t_{(-)40}$. Среднее арифметическое полученных величин определяет значение коэффициента k_{τ}:

$$k_{\tau} = \frac{t_{(-)10} \cdots + t_{(-)40}}{n} \qquad (3.11)$$

где n — число заданных углов крена.

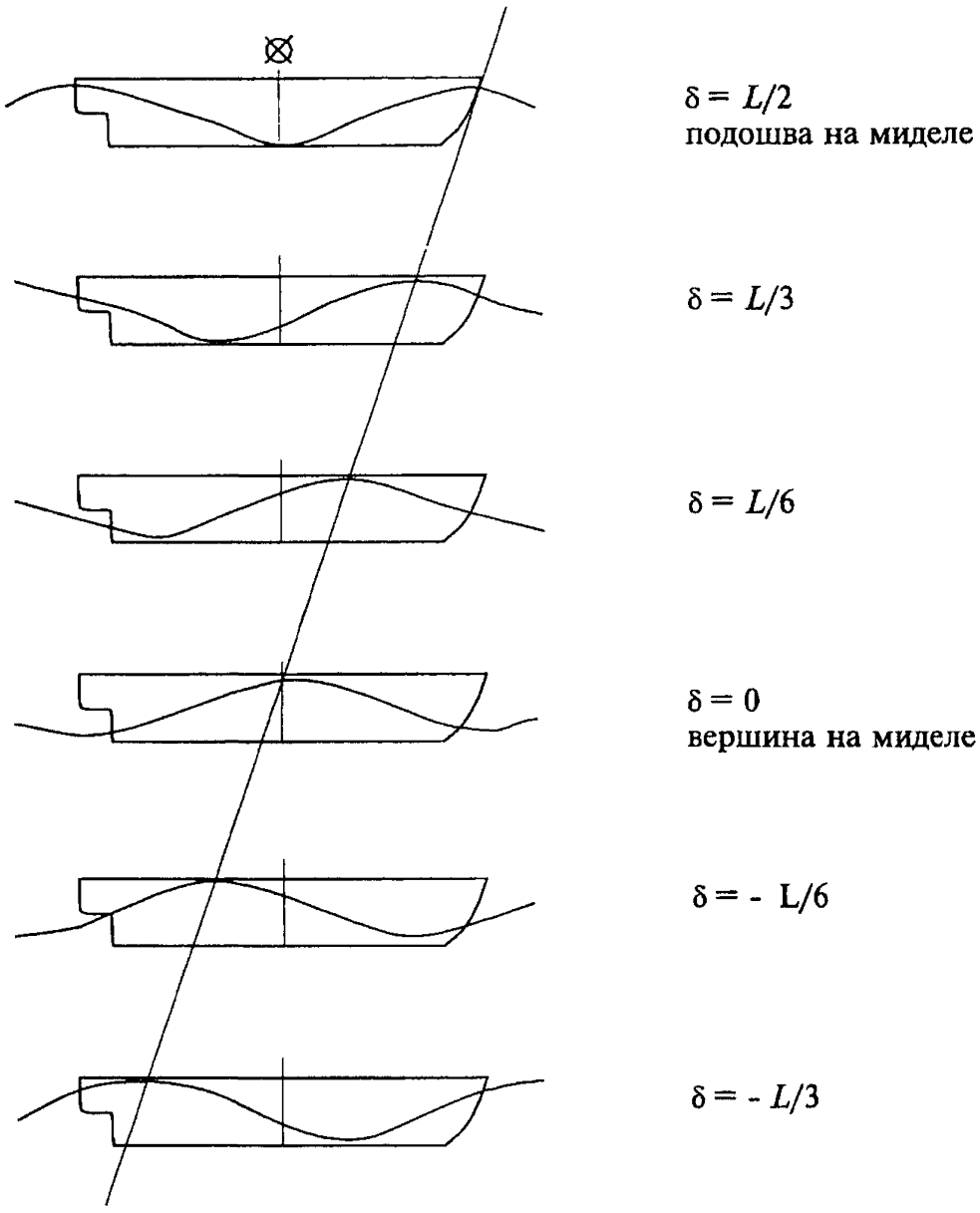

Рис. 3.2. Фазы смещения вершины волны относительно миделя

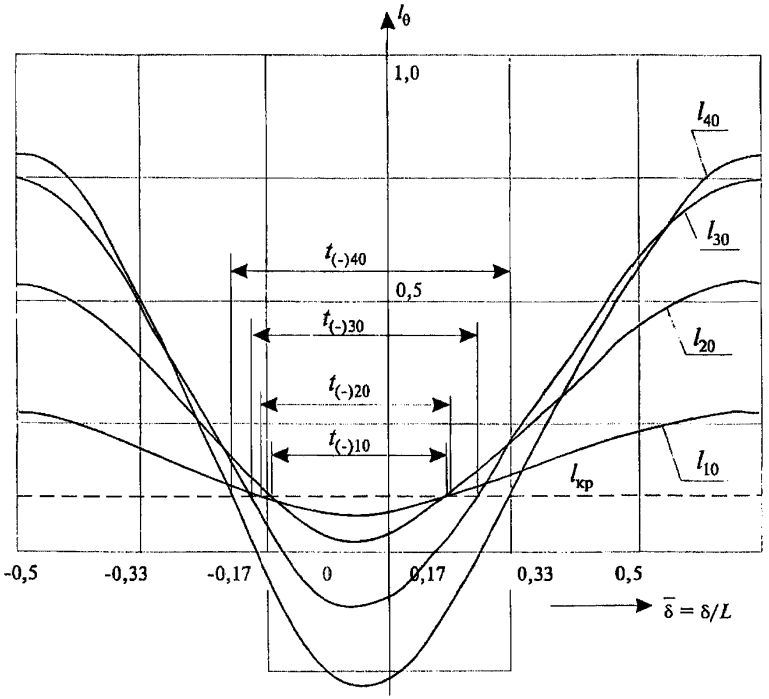

Рис. 3.3. Иллюстрация к способу определения коэффициента k_τ

Если для какого-либо угла крена θ кривая $l_\theta(\bar{\delta})$ целиком расположена выше $l_{кр}$, то $t_{(-)\theta} = 0$, а если ниже, то $t_{(-)\theta} = 1{,}0$. В случае, если $l_\theta(\bar{\delta})$ имеет более двух точек пересечения с $l_{кр}$, то $t_{(-)\theta}$ определяется суммированием отрезков, соединяющих точки пересечения, между которыми $l_\theta(\bar{\delta}) < l_{кр}$.

3.1.6. Расчет предельно допускаемых скоростей $V_{пред}$ и построение границ зоны недостаточной остойчивости

Расчет k_τ и $V_{пред}$ может быть выполнен в табличной форме. Пример такого расчета для судна с S-образной ДСО на тихой воде при двух случаях нагрузки (d_1 = 6,0 м, d_2 = = 6,57 м), высоте волны $h_{в1}$ = 5,8 м ($h_{3\%1}$ = 7,8 м) и КУВ $\beta = 0°$ представлен в табл. 3.1 и 3.2. Он соответствует приведенным в разделе 2.5 примерам и является расчетом зон недостаточной остойчивости основных диаграмм на рис. 2.2, 2.3. Построение границ этих зон понятно из рисунков.

Следует обратить внимание на то, что в формуле (3.6) для вычисления собственного периода бортовой качки τ_c судов с S-образной ДСО используется не начальная h, а обобщенная расчетная МЦВ h_{10}, определяемая при угле крена 10°, соответствующем началу диапазона θ, в котором рассчитывается коэффициент k_τ. Это позволяет применить формулу (3.6) для судов с малой начальной остойчивостью, учесть нелинейный характер ДСО и избежать в расчете $V_{пред}$ необоснованно больших периодов, которые не соответсвуют фактически наблюдаемым периодам бортовой качки конечной амплитуды.

При эксплуатации судна известна только начальная МЦВ h. Поэтому именно она наносится на горизонтальные оси диаграмм. В случае S-образной ДСО соответствие между h_{10} и h должно быть установлено предварительным расчетом. Для этого достаточно на каждой осадке d при возвышении центра тяжести Zg равном, например, $h_{доп}$ вычислить ДСО на тихой воде и определить $\Delta h = h_{10} - h_{доп}$. Тогда при данной осадке для любых значений Zg имеем $h_{10} = h + \Delta h$ или $h = h_{10} - \Delta h$. Эти же соотношения используются для построения резонансных зон бортовой качки по п.3.2.

В некоторых случаях расчетные значения скоростей $V_{пред}$ судов с S-образной ДСО по мере уменьшения МЦВ могут достигать минимума, а затем снова возрастать. В этом случае отрезок кривой $V_{пред}$ слева от точки минимума следует заменить горизонтальной прямой, касательной к кривой $V_{пред}$ в этой точке, как показано на рис. 3.4.

Таблица 3.1

Расчет скоростей $V_{пред}$ зоны недостаточной остойчивости при КУВ $\varphi = 180°$ ($\beta = 0°$), осадке $d_1 = 6{,}0$ м и высоте волны $h_{s1} = 5{,}8$ м ($h_{3\%1} = 7{,}8$ м). Судно имеет S-образную диаграмму статической остойчивости на тихой воде

Возвышение ЦТ Zg, м	Начальная МЦВ h, м	Обобщенная МЦВ h_{10}, м	Длины отрезков $l_{(-)\theta}$							Сумма $l_{(-)\theta}$	Коэффициент k_τ	Скорость волны c, м/с	Собственный период τ_c, с	Скорость $V_{пред}$, уз
			Углы крена, град											
			10	15	20	25	30	35	40					
5,90	0,219	0,344	0,605	0,461	0,394	0,342	0,304	0,273	0,251	2,630	0,376	12,25	19,32	9,31
5,80	0,319	0,444	0,542	0,396	0,326	0,272	0,226	0,192	0,168	2,122	0,303	12,25	17,01	10,51
5,70	0,419	0,544	0,465	0,323	0,244	0,172	0,111	0	0	1,315	0,188	12,25	15,37	14,69
5,65	0,469	0,591	0,426	0,283	0,190	0,093	0	0	0	0,993	0,142	12,25	14,75	16,65
5,60	0,519	0,644	0,386	0,234	0,128	0	0	0	0	0,749	0,107	12,25	14,13	18,17
5,50	0,619	0,744	0,292	0,112	0	0	0	0	0	0,404	0,058	12,25	13,14	20,55

Таблица 3.2

Расчет скоростей $V_{пред}$ зоны недостаточной остойчивости при КУВ $\varphi = 180°$ ($\beta = 0°$), осадке $d_2 = 6{,}57$ м и высоте волны $h_{31} = 5{,}8$ м ($h_{3\%1} = 7{,}8$ м). Судно имеет S-образную диаграмму статической остойчивости на тихой воде

Возвышение ЦТ Zg, м	Начальная МЦВ h, м	Обобщенная МЦВ h_{10}, м	Длины отрезков $l_{(-)\theta}$							Сумма $l_{(-)\theta}$	Коэффициент $k_т$	Скорость волны c, м/с	Собственный период τ_c, с	Скорость $V_{пред}$, уз
			Углы крена, град											
			10	15	20	25	30	35	40					
5,97	0,232	0,352	0,634	0,517	0,461	0,429	0,408	0,391	0,382	3,223	0,460	12,25	18,87	5,60
5,87	0,332	0,452	0,574	0,461	0,406	0,372	0,352	0,332	0,324	2,822	0,403	12,25	16,65	5,74
5,77	0,432	0,552	0,511	0,404	0,346	0,313	0,293	0,268	0,262	2,398	0,343	12,25	15,07	6,85
5,67	0,532	0,652	0,447	0,342	0,282	0,242	0,212	0,195	0,187	1,907	0,272	12,25	13,87	9,15
5,57	0,632	0,752	0,386	0,277	0,200	0,133	0,069	0	0	1,067	0,152	12,25	12,91	15,01
5,47	0,732	0,852	0,328	0,199	0,041	0	0	0	0	0,568	0,081	12,25	12,13	18,83

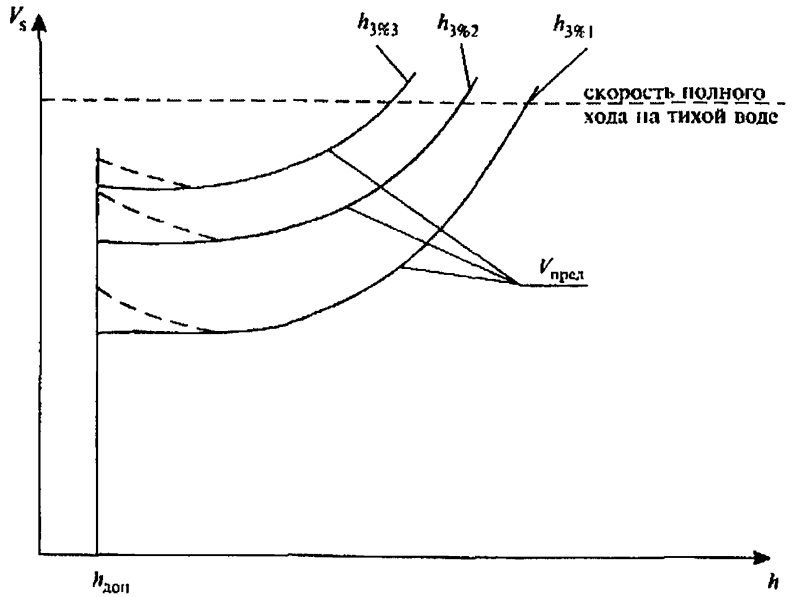

Рис. 3.4. Определение скоростей $V_{пред}$ для судов S-образной ДСО

3.2. Расчет зон основного и параметрического резонансов бортовой качки

3.2.1. Ограничения. Область применения

Условия возникновения бортовой качки судна в режимах ее основного и параметрического резонансов определяются соотношением периодов $\tau_к$ и $\tau_с$, которые при постоянных КУВ, H и d содержат только два независимых параметра λ и h.

Основные диаграммы на рис. 2.2, 2.3 строятся при одной длине волны $\lambda = L$ для наиболее опасного случая сочетания максимального понижения остойчивости и резонансных видов бортовой качки, что при заданной осадке позволяет расчет резонансных зон качки выполнить один раз в широком диапазоне МЦВ от $h_{доп}^{min}$ до $h_{доп}^{max}$ и применять их при любых $h_{3\%}$, H и β.

Дополнительные диаграммы на рис. 2.4 включают только резонансные зоны качки, не зависят от $h_{3\%}$, рассчитываются и строятся в том же диапазоне МЦВ для различных осадок и ряда выбранных длин волн, $\lambda \neq L$.

Резонансные зоны бортовой качки на диаграммах рассчитываются только для случая $H = \infty$ и $\beta = 0°$. Переход к ограниченной глубине моря и произвольным КУВ осуществляется с помощью вертикальных осей диаграмм $V_s(\beta)$, $V_s(H)$ и $\Delta V_s(H,\lambda)$, как это показано в разделе 2. Правила построения этих осей, а также горизонтальных осей $h(d)$ дополнительных диаграмм описаны в п. 3.3.

3.2.2. Основной резонанс бортовой качки

Условию возникновения основного резонанса соответствует равенство

$$\tau_k = \tau_c \tag{3.12}$$

из которого получено выражение для расчета резонансной скорости судна, при которой амплитуды его бортовой качки будут максимально возможными в этих условиях плавания:

$$V_{рез} = \frac{\left(c - \frac{\lambda}{\tau_c}\right)}{0{,}514\cos\beta},\ \text{уз} \tag{3.13}$$

Кривые, соответствующие $V_{рез}$ при $\beta = 0°$, нанесены на диаграммах (рис. 2.2, 2.3, 2.4) сплошными линиями.

3.2.3. Границы околорезонансной зоны основного резонанса бортовой качки

За опасные режимы бортовой качки судна вблизи ее основного резонанса приняты такие, при которых кажущийся период лежит в пределах

$$\frac{\tau_c}{1{,}3} \leq \tau_k \leq \frac{\tau_c}{0{,}7} \tag{3.14}$$

Из 3.13 получены выражения для расчета нижней границы скоростей околорезонансной зоны

$$V_s = \frac{\left(c - \frac{1{,}3\lambda}{\tau_c}\right)}{0{,}514\cos\beta},\ \text{уз} \tag{3.15}$$

и ее верхней границы

$$V_s = \frac{\left(c - \frac{0{,}7\lambda}{\tau_c}\right)}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз} \qquad (3.16)$$

Эти границы нанесены на диаграммах (рис. 2.2, 2.3, 2.4) при $\beta = 0°$ пунктирными линиями, показывающими, что границы не являются жесткими и вход судна в околорезонансную зону допустим при выполнении условий п. 2.4.3.

3.2.4. Параметрический резонанс бортовой качки

Условию возникновения параметрического резонанса бортовой качки судна соответствует равенство

$$\tau_k = \frac{\tau_c}{2} \qquad (3.17)$$

а опасным режимам бортовой качки вблизи этого резонанса – условие

$$\frac{\tau_c}{2{,}1} \le \tau_k \le \frac{\tau_c}{1{,}9} \qquad (3.18)$$

Учитывая то обстоятельство, что околорезонансная зона качки судна в этом случае весьма узка, расчет выполняется только для скоростей, ограничивающих эту зону сверху

$$V_s = \frac{\left(c - \frac{1{,}9\lambda}{\tau_c}\right)}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз} \qquad (3.19)$$

и снизу

$$V_s = \frac{\left(c - \frac{2{,}1\lambda}{\tau_c}\right)}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз} \qquad (3.20)$$

На диаграммах (рис. 2.2, 2.3, 2.4) эти границы нанесены при $\beta = 0°$ сплошными линиями. Плавание судов в этой зоне не рекомендуется по причинам, указанным в п. 2.4.3.

3.3. Построение вертикальных $V_s(\beta)$, $V_s(H)$, $\Delta V_s(H,\lambda)$ и горизонтальных $h(d)$ осей диаграммы

Применяемые в РД для расчета трех опасных зон формулы дают возможность выделить отдельно влияние таких важных параметров, как β, H и d, что позволяет значительно сократить объем расчетов, выполняя их только для случая $\beta = 0°$ и $H = \infty$, и упростить сами диаграммы, нанося в их поле только кривые при $\beta = 0°$, $H = \infty$ и какой-либо одной осадке (например, по грузовую марку). При этом оценка влияния β, H и d может быть произведена снесением любой точки из поля диаграмм на специальным образом построенные оси координат, описанные в п. 2.4.2. Все вертикальные оси диаграмм имеют один масштаб – оси $V_s(\beta = 0°)$.

Вертикальные оси $V_s(\beta)$ строятся на всех диаграммах. Они показывают, как должны измениться скорости судна из поля диаграмм с изменением КУВ. Апликаты этих осей рассчитываются по формуле

$$V_s(\beta) = V_s(\beta = 0°)\cos\beta, \text{ уз} \qquad (3.21)$$

Вертикальные оси $V_s(H)$ строятся только на основных диаграммах для одной конкретной длины волны $\lambda = L$. Они показывают, как должны измениться скорости судна из поля диаграмм с изменением глубины моря. Аппликаты этих осей рассчитываются по формуле

$$V_s(H) = V_s(H = \infty) + \Delta V_s(H, \lambda), \text{ уз} \qquad (3.22)$$

где $$\Delta V_s(H, \lambda) = \frac{C_\infty - C_H}{0{,}514\cos\beta}, \text{ уз} \qquad (3.23)$$

– поправка к скорости судна, учитывающая влияние глубины моря;

C_∞, C_H – соответственно скорости распространения волны длиной λ на глубокой воде и при глубине H, м/с (формула для расчета приведена в п. 2.4.3).

Вертикальные оси $\Delta V_s(H, \lambda)$ строятся только на дополнительных диаграммах для ряда выбранных длин волн $\lambda \neq L$. Они показывают, какую поправку $\Delta Vs(H, \lambda)$ надо вычесть из скоростей судна $V_s(H = \infty, \lambda, \beta)$, чтобы учесть влияние глубины моря H и длины волны λ. Аппликаты этих осей рассчитываются по формуле (3.23).

Горизонтальные оси $h(d)$ строятся на дополнительных диаграммах для n осадок (водоизмещений) судна, выбранных в соответствии с разделом 1 РД. Построение производится, когда для этих осадок при $\beta = 0°$ и одинаковых λ и H выполнены расчеты хотя бы одной из кривых, принадлежащих 2-й или 3-й опасной зоне. Для этих целей удобно считать $H = \infty$ и использовать кривую $V_{рез}$ [формула (3.13)] при $\lambda \cong L$ или кривую верхней границы околорезонансной зоны [формула (3.16)] при $\lambda > L$, поскольку они не пересекаются с осью $h(d)$ и наклонены к ней под достаточным углом.

Ось, соответствующая одной из осадок (например, по грузовую марку d_1), принимается за главную и на ней устанавливается масштаб МЦВ. Параллельно ей на расстоянии, пропорциональном уменьшению осадок, проводятся горизонтальные оси для других осадок (d_2, d_3, ..., d_n). Затем для осадки d_1 в поле диаграмм строится одна из кривых, например $V_{рез}(d_1)$ (рис. 3.5).

Чтобы на оси $h(d_2)$ определить точку, соответствующую заданной МЦВ (например, h = 0,8 м), необходимо значение $V_{рез}(d_2, h = 0{,}8$ м) отметить на вертикальной оси $V_s(\beta = 0°)$, провести горизонталь до пересечения с кривой $V_{рез}(\beta = 0°, d_1)$ и из этой точки опустить перпендикуляр на горизонтальную ось $h(d_2)$. Полученная точка на оси $h(d_2)$ соответствует заданной МЦВ h = 0,8 м.

Выполнив аналогичные операции для остальных осадок при разных значениях МЦВ, получим на каждой из осей $h(d_n)$ ряд точек, соответствующих заданным МЦВ. Проведя по ним плавные кривые, получим серию линий, равных МЦВ $h(d)$ = const, удобных для определения резонансных зон диаграмм при произвольной осадке. Схема построения горизонтальных осей показана на рис. 3.5.

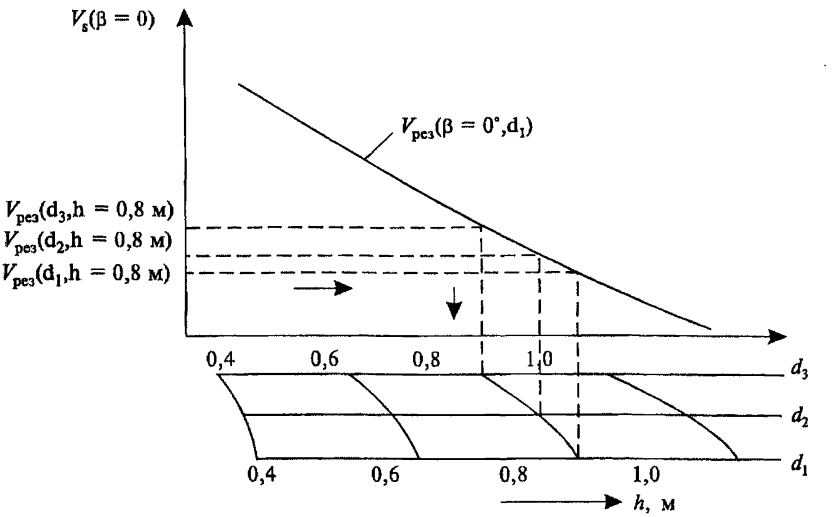

Рис. 3.5. Схема построения горизонтальных осей h(d)

3.4. Построение зоны брочинга

Зона брочинга строится на основных диаграммах для судов, относительная скорость которых на тихой воде $Fr \geq 0{,}23$. Она существует при длинах волн $\lambda > 0{,}8L$ и КУВ $\beta = 0 \pm 45°$. Нижняя граница зоны брочинга рассчитывается по формуле

$$V = \frac{k_б \sqrt{L}}{\cos\beta}, \text{ уз},$$

где $k_б$ – коэффициент, характеризующий опасность возникновения брочинга и зависящий от относительной скорости и длины судна. Рекомендуется принимать $k_б = 1{,}4$. По согласованию с Регистром для судов длиной $L > 40$ м могут приниматься большие значения коэффициента $k_б$, но не более 1,8.

Граница зоны брочинга наносится на основные диаграммы при $\beta = 0°$ сплошной линией. Плавание судов в этой зоне не рекомендуется.

4. СОГЛАСОВАНИЕ ДОКУМЕНТАЦИИ

Дополнения к ИО, разработанные в соответствии с РД, подлежат согласованию с Регистром.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Экономический эффект от применения настоящего РД может быть определен в процессе разработки ДИО для конкретной серии судов с учетом его требований.

Экономический эффект рассчитывается как результат сокращения убытков от оплаты спасательных работ или гибели судна данного типа.

Для приближенной оценки экономической эффективности может быть принят норматив 2,5 руб. на каждую тонну полного водоизмещения всех судов серии данного типа. Этот норматив введен как средний по флоту (получен в результате пересчета по строительной стоимости, исходя из экономической эффективности применения РД на сухогрузных судах, в ценах 1987 г.).

При этом не учитывается, что применение РД позволит капитану до выхода в рейс так загрузить судно, чтобы его остойчивость на попутном волнении была обеспечена и не было необходимости снижать скорость или изменять выгодный курс судна в рейсе, т.е. не учитывается повышение провозоспособности судна.

Подписано в печать 22.08.2002
ЗАО ЦНИИМФ

191015, Санкт-Петербург, ул. Кавалергардская, 6
Отдел безопасности мореплавания
тел. (812) 2718196 тел./факс (812) 2747970

gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru