РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

Электронный аналог печатного издания,
утвержденного 04.06.08

СБОРНИК НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Книга восемнадцатая

НД No 2-139902-023

Санкт-Петербург
2008

В настоящем Сборнике нормативно-методических материалов публикуются следующие материалы ИМО (на английском языке приведен текст официального документа ИМО, перевод на русский язык приведен в качестве справочного материала):

Пересмотренное руководство для капитана по избежанию опасных ситуаций при неблагоприятных ветро-волновых условиях, принятое циркуляром Комитета ИМО по безопасности на море MSC.1/Circ.1228 от 11 января 2007 г.;

Временное руководство по альтернативной оценке критерия погоды, принятое циркуляром Комитета ИМО по безопасности на море MSC.1/Circ.1200 от 24 мая 2006 г.;

Пояснительные примечания к Временному руководству по альтернативной оценке критерия погоды, принятые циркуляром Комитета ИМО по безопасности на море MSC.1/Circ.1227 от 11 января 2007 г.

ISBN 5-89331-119-1 © Российский морской регистр судоходства, 2008

СОДЕРЖАНИЕ

Пересмотренное руководство для капитана по избежанию опасных ситуаций при неблагоприятных ветро-волновых условиях 4

Временное руководство по альтернативной оценке критерия погоды 14

Пояснительные примечания к Временному руководству по альтернативной оценке критерия погоды 36

ПЕРЕСМОТРЕННОЕ РУКОВОДСТВО ДЛЯ КАПИТАНА ПО ИЗБЕЖАНИЮ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ УСЛОВИЯХ

Применяется для судов, на которые распространяются требования Правил классификации и постройки морских судов с 2008 г. по настоящее время

1 Комитет по безопасности на море на своей восемьдесят второй сессии (29 ноября – 8 декабря 2006 г.) одобрил Пересмотренное руководство для капитана по избежанию опасных ситуаций при неблагоприятных ветро-волновых условиях, изложенное в приложении, которое имеет своей целью предоставить капитанам базовую информацию для принятия решений по управлению судном в неблагоприятных ветро-волновых условиях и, таким образом, помочь им избежать опасных явлений, с которыми они могут столкнуться в подобных ситуациях.

2 Государствам-членам предлагается довести прилагаемое Пересмотренное руководство до сведения заинтересованных сторон на тех условиях, которые они сочтут приемлемыми.

3 Данное Пересмотренное руководство заменяет Руководство для капитана по избежанию опасных ситуаций при попутном и кормовом волнениях (MSC/Circ.707).

ПЕРЕСМОТРЕННОЕ РУКОВОДСТВО ДЛЯ КАПИТАНА ПО ИЗБЕЖАНИЮ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ УСЛОВИЯХ[1]

1 ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1.1 В рамках данного Руководства под неблагоприятными погодными условиями подразумевается ветровое волнение или сильная зыбь. Для судов, соответствующих Кодексу остойчивости неповреждённых судов, некоторые сочетания длин и высот волн могут при определённых условиях эксплуатации приводить к возникновению опасных ситуаций. Тем не менее, описание приведенных ниже неблагоприятных погодных условий не исключает выполнение капитаном необходимых действий и при менее суровых погодных условиях, если это необходимо.

1.2 При плавании в неблагоприятных погодных условиях судно может столкнуться с различными опасными явлениями, которые могут привести к опрокидыванию или сильной бортовой качке, в результате чего могут быть повреждёны груз, оборудование, а также могут пострадать люди, находящиеся на борту. Уязвимость судна в опасных ситуациях зависит от фактических параметров остойчивости, геометрии корпуса, размеров и скорости судна. Подразумевается, что степень защищённости судна от опасных последствий, включая опрокидывание, и вероятность возникновения таких последствий при конкретных параметрах волнения могут быть различны для разных судов.

1.3 На судах, оборудованных бортовым компьютером с программным обеспечением для оценки остойчивости, учитывающим главные размерения судна, фактические параметры статической и динамической остойчивости в реальных условиях рейса для конкретного судна, такое программное обеспечение должно быть одобрено Администрацией. Однако при принятии решений результаты подобных расчётов следует рассматривать лишь как вспомогательный материал.

---

[1] При пользовании документом следует руководствоваться текстом на английском языке, соответствующим тексту официального документа ИМО. Перевод на русский язык является справочным материалом.

1.4 Наблюдение за волнением следует проводить регулярно. В частности, период волны T_w следует измерить при помощи секундомера как отрезок времени между появлением полосы пены на прибойной волне до её повторного появления после прохождения подошвы волны. Длина волны λ определяется или путём визуального наблюдения в сопоставлении с длиной судна, или путём считывания среднего расстояния между гребнями последовательных волн на их радиолокационных изображениях.

1.5 Период волны и длина волны λ связаны следующей зависимостью:

$$\lambda = 1{,}56 \cdot T_W^2 \text{ [м] или } T_W = 0{,}8\sqrt{\lambda} \text{ [с]}.$$

1.6 Кажущийся период волны T_E можно измерить или при помощи секундомера как период килевой качки, или вычислить по следующей формуле:

$$T_E = \frac{3\,T_W^2}{3\,T_W + V\cos(\alpha)} \text{ [с]},$$

где V = скорость судна [узлы];
α = угол между направлением киля и направлением волны (α = 0 относится к встречному волнению).

1.7 График на рис. 1 также может использоваться для определения кажущегося периода волны.

1.8 Следует также оценивать характерную высоту волны.

2 ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

2.1 Следует отметить, что данное Руководство для капитана разработано применительно к торговым судам всех типов. Поэтому, в силу того, что Руководство носит общий характер, оно может содержать слишком жесткие ограничения для судов, имеющих более благоприятные динамические характеристики, или менее жесткие ограничения для других судов. Судну может угрожать опасность даже за пределами опасных зон, указанных в данном Руководстве, если его остойчивость недостаточна. Поэтому капитанам предлагается использовать данное Руководство с учетом особенностей судна и его поведения в штормовых условиях.

2.2 Следует отметить, что положения данного Руководства касаются лишь опасностей, возникающих в неблагоприятных погодных усло-

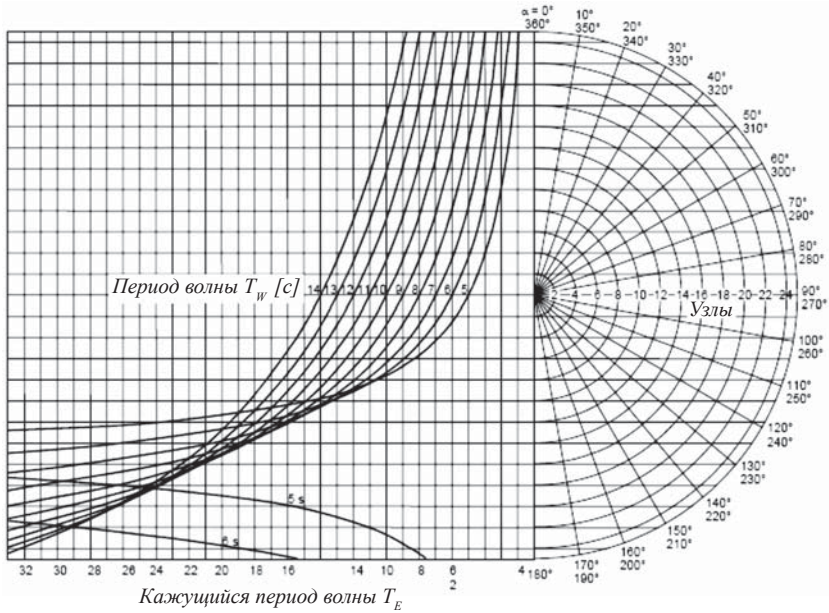

Рис.1
Определение кажущегося периода волны T_E

виях, когда может произойти опрокидывание или возникнуть сильная качка судна, при которых есть риск повреждений. В данном Руководстве не рассматриваются прочие опасности и риски, возникающие в неблагоприятных погодных условиях, такие, как повреждения судна от ударов волн при слемминге, продольные или крутильные напряжения, особые волновые явления, возникающие на мелководье и течении, риск столкновения или посадки на мель, которые следует учитывать дополнительно при выборе необходимых курса и скорости в неблагоприятных погодных условиях.

2.3 Капитан должен удостовериться, что его судно удовлетворяет критериям остойчивости, приведённым в Кодексе остойчивости неповрежденных судов, или эквивалентным критериям. Должны быть также приняты необходимые меры для обеспечения водонепроницаемости судна. Следует перепроверить крепление груза и оборудования. Необходимо выполнить оценку собственного периода бортовой качки судна T_R путём измерения бортовой качки судна на тихой воде.

3 ОПАСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

3.1 ЯВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ НА ПОПУТНОМ ВОЛНЕНИИ И ВОЛНЕНИИ В РАКОВИНУ

Во время плавания на попутном волнении или волнении в раковину на судно набегают волны с более длинным периодом, чем при лаговом, встречном волнении или волнении со встречных курсовых углов. В такой ситуации встречаются следующие основные опасности.

3.1.1 Движение судна на гребне волны (серфинг) и захват судна волной (брочинг).

Когда судно оказывается на гребне высокой волны при попутном волнении или волнении в раковину, ему может быть придано ускорение, достаточное для движения на гребне волны (серфинга). В такой ситуации может возникнуть явление захвата судна волной (брочинга), создающее опасность опрокидывания судна вследствие внезапного изменения курса и значительного крена.

2.2.2 Снижение остойчивости судна при движении на гребне волны.

При движении судна на гребне волны его остойчивость может значительно снижаться в зависимости от формы подводной части корпуса. Такое снижение может оказаться критическим при длине волны в диапазоне $0{,}6L$ – $2{,}3L$, где L – длина судна в метрах. В указанном диапазоне величина снижения остойчивости примерно пропорциональна высоте волны. Такая ситуация особенно опасна на попутных и курсовых углах, т.к. при этом возрастает время пребывания судна с пониженной остойчивостью на гребне волны.

2.3 РЕЗОНАНСНАЯ БОРТОВАЯ КАЧКА

При совпадении собственного периода бортовой качки судна с кажущимся периодом волны может возникать значительная бортовая качка. При плавании на попутном волнении и волнении в раковину это может происходить при низких значениях поперечной остойчивости судна, вследствие чего удлиняется собственный период бортовой качки.

2.4 ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ БОРТОВАЯ КАЧКА

1.1.1 Параметрическая бортовая качка со значительной и опасной амплитудой возникает вследствие периодического изменения остойчи-

вости судна при попадании на гребень волны и впадину волны. Она может проявляться в двух различных ситуациях:

.1 остойчивость изменяется с кажущимся периодом волны T_E, приблизительно равным собственному периоду бортовой качки судна T_R (соотношение 1:1). Остойчивость достигает минимума один раз за время каждого периода бортовой качки. Такая ситуация характеризуется появлением несимметричной бортовой качки, т.е. когда гребень волны приходится на район миделя судна, крен от качки на один борт оказывается значительно больше крена от качки на другой борт при прохождении судном впадины волны. Вследствие замедления процесса выравнивания судна при значительной амплитуде качки период бортовой качки T_R может приближаться к кажущемуся периоду волны таким образом, что такая параметрическая бортовая качка может находиться в широком диапазоне значений кажущегося периода волны. При волнении в раковину может стать заметным переход к гармоническому резонансу;

.2 остойчивость изменяется вместе с кажущимся периодом волны T_E, который приблизительно равен половине периода бортовой качки T_R судна (соотношение 1:0,5). Остойчивость достигает минимума дважды за время каждого периода бортовой качки. На попутном волнении или волнении в раковину, когда кажущийся период волны становится больше периода волны, это может происходить лишь при очень больших значениях собственного периода бортовой качки T_R, указывающих на крайне низкие значения поперечной остойчивости судна. Результатом этого является симметричная бортовая качка с большими амплитудами, опять характеризующаяся тенденцией сближения собственного периода бортовых колебаний судна и кажущегося периода волны из-за снижения остойчивости судна на гребне волны. Параметрическая бортовая качка с соотношением кажущегося периода волны к периоду бортовой каски судна 1:0,5 может также возникать на встречных курсовых углах.

3.3.2 Кроме случаев попутного волнения и волнения в раковину, когда изменение остойчивости судна происходит исключительно под влиянием волн, проходящих вдоль корпуса судна, часто достигающая большой величины вертикальная и/или килевая качка на встречном волнении или волнении со встречных курсовых углов может вносить вклад в периодическое изменение остойчивости, в частности, вследствие периодического погружения и выхода из воды кормовых шпангоутов в местах их развала, а также наличия развала носовых шпангоутов у современных судов. Это может стать причиной значительной параметрической бортовой качки даже при малом изменении остойчивости на волнении.

3.3.3 Периоды вертикальной и килевой качки судна обычно равны кажущемуся периоду волны. То, насколько килевая качка влияет на возникновение параметрической бортовой качки, зависит от продолжительности времени синхронизации килевой и бортовой качки.

3.4 СОЧЕТАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Динамика судна на волнении с попутных курсовых углов очень сложна. Движение судна представляет собой трёхмерное явление, и при этом в сочетании с вышеописанными явлениями одновременно или последовательно могут проявляться различные неблагоприятные факторы или опасные явления такие, как дополнительные кренящие моменты вследствие погружения в воду кромки палубы, заливание палубы волной и задержка воды на палубе или смещение груза в результате сильной бортовой качки. Всё это может привести к возникновению очень опасных сочетаний, которые могут стать причиной опрокидывания судна.

4 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Во избежание опасных ситуаций при плавании в неблагоприятных погодных условиях капитану при управлении судном рекомендуется выполнять нижеописанные действия.

4.1 СОСТОЯНИЕ СУДНА

Данные рекомендации применимы ко всем типам обычных судов, совершающих рейсы в штормовых условиях и соответствующих требованиям остойчивости, указанным в резолюции ИМО A.749(18), с поправками резолюции ИМО MSC.75(69).

4.2 КАК ИЗБЕЖАТЬ ОПАСНЫХ УСЛОВИЙ

1.1.1 При движении судна на гребне волны (серфинге) и захвате судна волной (брочинге).

Движение судна на гребне волны (серфинг) и захват судна волной (брочинг) могут возникнуть при курсовом угле волны в диапазоне $135° < \alpha < 225°$ и скорости судна, большей, чем $(1{,}8\sqrt{\lambda})/\cos(180 - \alpha)$ (узлы). Во избежание движения судна на гребне волны (серфинга) и возможного захвата

судна волной (брочинга) скорость судна, курс или оба параметра следует выбирать так, что бы они оказались за пределами опасного сектора, указанного на рисунке 2.

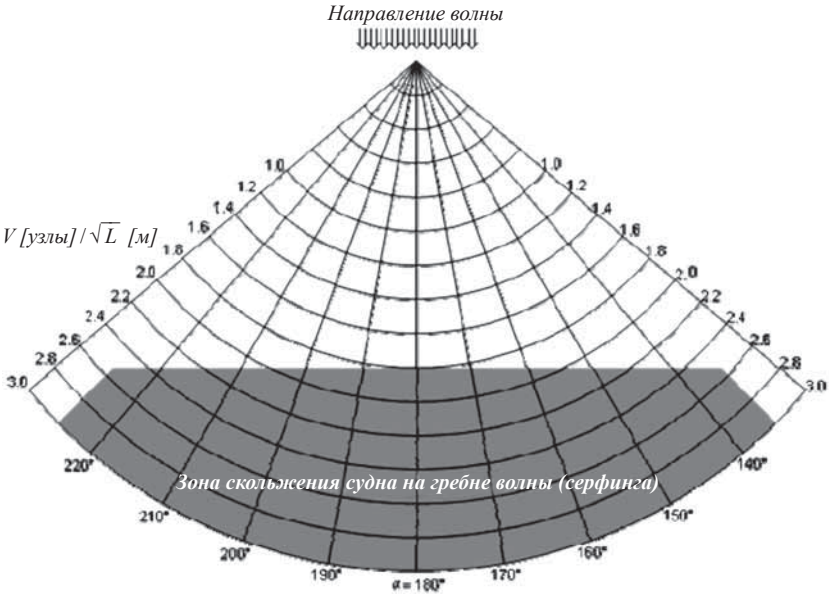

Рис. 2
Опасность возникновения движения судна на гребне волны
при набегании волн с попутных курсовых углов

4.1.2 При последовательных ударах высоких волн.

4.2.2.1 Если средняя длина волны превышает 0,8L, а значительная высота волны больше 0,04L, и при этом ясно проявляются какие-либо опасные признаки в поведении судна, капитан должен принять меры к тому, чтобы не входить в опасную зону, указанную на рисунке 3. При нахождении судна в этой опасной зоне должна быть снижена скорость или изменён курс для предотвращения последовательных ударов высоких волн, которые могут представлять опасность вследствие снижения остойчивости, возникновения резонансной бортовой качки, параметрической бортовой качки или сочетания различных опасных явлений.

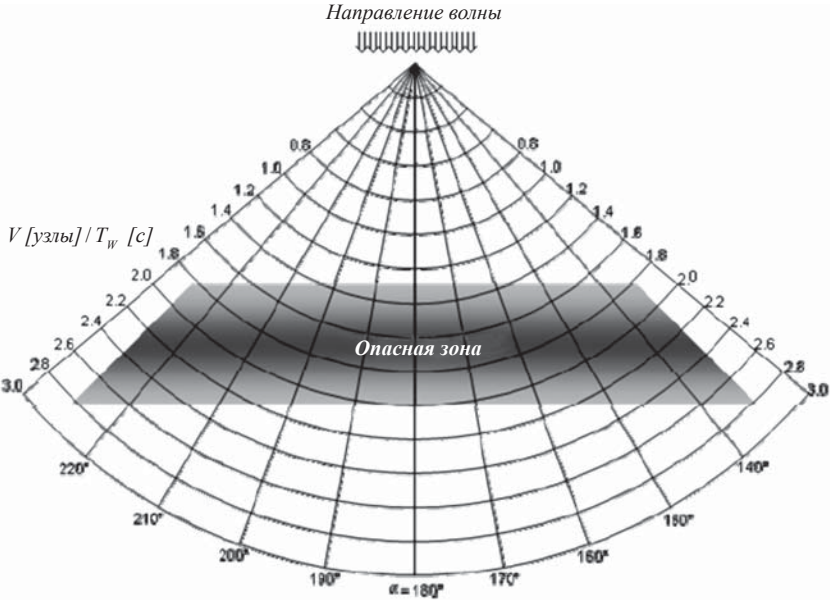

Рис. 3.
Риск появления последовательных ударов высоких волн
при набегании волн с попутных курсовых углов

4.2.2.2 Опасная зона, показанная на рис. 3, соответствует таким условиям, при которых кажущийся период волны (T_E) приближается к удвоенному значению (т.е., примерно 1,8 – 3,0) периода волны (T_W) (согласно рис. 1 или п. 1.4).

4.2.3 При резонансной бортовой качке и параметрической бортовой качке.

4.2.3.1 Капитан должен предотвратить резонансную бортовую качку, возникающую, когда кажущийся период волны (T_E) приближается к собственному периоду бортовой качки судна T_R.

4.2.3.2 Для предотвращения параметрической качки на попутных, встречных курсовых углах или лаговом волнении следует выбирать курс и скорость судна таким образом, чтобы избежать условий, при которых кажущийся период волны приближается к периоду бортовой качки судна ($T_E \approx T_R$) или кажущийся период волны приближается к значению собственного периода бортовой качки судна, уменьшенного вдвое ($T_E \approx 0{,}5 \cdot T_R$).

4.2.3.3 Кажущийся период волны T_E можно определить из рис. 1, выбирая на диаграмме скорость судна в узлах, курсовой угол волны α и период волны T_W.

Сокращения и обозначения

Обозначения	**Определение**	**Единица измерения**
T_W	период волны	с
λ	длина волны	м
T_E	кажущийся период волны	с
α	курсовой угол волны (α = 0° на встречном волнении, α = 90° при волнении с правого борта)	градусы
V	скорость судна	узлы
T_R	собственный период бортовой качки судна	с
L	длина судна (между перпендикулярами)	м

ВРЕМЕННОЕ РУКОВОДСТВО ПО АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ОЦЕНКЕ КРИТЕРИЯ ПОГОДЫ

Применяется для судов, на которые распространяются требования Правил классификации и постройки морских судов с 2011 г. по настоящее время

1 Комитет по безопасности на море на своей восемьдесят первой сессии (29 ноября – 8 декабря 2006 г.) одобрил Временное руководство по альтернативной оценке критерия погоды, изложенное в приложении, которое имеет своей целью предоставить участникам морской индустрии альтернативные средства (в частности, модельные испытания) для оценки критерия сильного ветра и бортовой качки, как указано в Кодексе остойчивости неповрежденных судов всех типов (резолюция ИМО A.749(18)). Данное Временное руководство должно применяться в тех случаях, когда необходимо определить плечо ветрового кренящего момента и/или угол крена при бортовой качке (как указано в 3.2.2.1.1 и 3.2.2.1.2 Кодекса) путем проведения модельных испытаний.

2 Странам-членам предлагается довести Временное руководство до сведения всех заинтересованных сторон, насколько они сочтут это необходимым.

ВРЕМЕННОЕ РУКОВОДСТВО ПО АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ОЦЕНКЕ КРИТЕРИЯ ПОГОДЫ[1]

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Целью настоящего Руководства является предоставление альтернативных средств для оценки критерия сильного ветра и бортовой качки (критерия погоды), как указано в 3.2 Кодекса остойчивости неповрежденных судов (резолюция ИМО А.749(18)). В Руководстве угол крена при бортовой качке обозначен как φ, а в Кодексе – как θ.

1.2 Руководство содержит процедуры для определения плеча ветрового кренящего момента l_{w1}, как указано в 3.2.2.1.1 Кодекса, путем выполнения прямых измерений.

1.3 Кроме того, данное Руководство предназначено для экспериментального определения угла крена при бортовой качке φ_1, как указано в 3.2.2.1.2 Кодекса.

1.4 Для величин, которые используются, но не определены далее, применяются определения, содержащиеся в Кодексе.

2 ПРИМЕНЕНИЕ

2.1 Таблицы и формулы, указанные в 3.2.2.3 Кодекса, основаны на данных судов, имеющих следующие основные характеристики:

.1 *B/d* – менее 3,5;

.2 *OG/d* между – 0,3 и 0,5;

.3 *T* – менее 20 с.

2.2 Для судов, характеристики которых находятся вне диапазона вышеуказанных предельных значений, угол крена при бортовой качке (φ_1) может быть определен путем проведения модельных испытаний судна в соответствии с процедурой, которая в Руководстве определена как аль-

---

[1] При использовании документа следует руководствоваться текстом на английском языке, соответствующим тексту официального документа ИМО. Перевод на русский язык является справочным материалом.

тернативная. Кроме того, Администрация может принять такие альтернативные определения для любого судна, если сочтет это необходимым.

2.3 К удовлетворению Администрации альтернативные средства для определения плеча ветрового кренящего момента (l_{w1}) могут быть приняты в качестве эквивалента расчетам, указанным в 3.2.2.2 Кодекса. При проведении такого рода альтернативных испытаний следует сделать ссылку на соответствующую часть Руководства. Скорость ветра, используемая для испытаний, должна составлять 26 м/с в масштабе натуры с постоянным профилем скорости. Значение скорости ветра применительно к судам ограниченного района плавания может быть уменьшено к удовлетворению Администрации.

2.4 Программа испытаний должна быть заранее одобрена Администрацией.

2.5 Результаты испытаний должны быть документально оформлены в виде отчета или видеозаписи, или другой визуальной записи, содержащей всю необходимую информацию о модели, процедуре и результатах испытаний, которые должны быть одобрены Администрацией.

2.6 Любая процедура, отличная от той, что содержится в Руководстве, должна быть представлена в Администрацию для одобрения.

3 РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПЛЕЧА ВЕТРОВОГО КРЕНЯЩЕГО МОМЕНТА L_{w1}

3.1 ЦЕЛИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

3.1.1 Целью испытаний, указанных в данном Разделе, является обеспечение единообразного применения модельных испытаний для определения плеча ветрового кренящего момента при постоянном ветре l_{w1} (3.2.2.2 Кодекса). Данная процедура позволяет рассматривать плечо ветрового кренящего момента при постоянном ветре как зависящее от угла крена (см. рис. 3.1.1).

3.1.2 Стандартная процедура модельных испытаний состоит из двух частей. Первая часть представляет собой процедуру для оценки кренящего момента M_{wind} при постоянном ветре в аэродинамической трубе. В качестве альтернативы может использоваться вентилятор при условии сравнимости постоянной скорости ветра. Вторая часть описывает расчет кренящего момента M_{water} при равномерном дрейфе в опытовом бассейне.

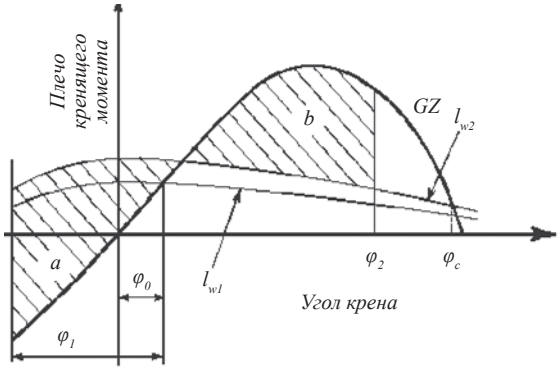

Рис. 3.1.1
Критерий погоды, когда плечо ветрового кренящего момента зависит от угла крена

3.1.3 Плечо ветрового кренящего момента при постоянном ветре l_{w1} определяется при помощи следующего уравнения:

$$l_{w1}(\varphi) = \frac{M_w(\varphi)}{\Delta} = \frac{M_{wind}(\varphi) + M_{water}(\varphi)}{\Delta}, \qquad (3.1.1)$$

где M_w (φ) = суммарный кренящий момент (N·m), когда судно дрейфует лагом к постоянному ветру (курсовой угол – 90°) с углом крена φ;
Δ = водоизмещение (N) судна; и
предполагается, что сила дрейфа равна горизонтальной силе F_{wind} вследствие действия постоянного ветра.

В уравнении 3.1.3 предполагается, что сила ветра и сила дрейфа действуют совместно. В этом случае, кренящий момент M_w не зависит от перераспределения сил в системе сил. Однако, вследствие неизбежного дисбаланса вертикальных сил, возникающего в результате прямых измерений, суммарный кренящий момент M_w может зависеть от перераспределения сил. Предполагается, что для практических целей достаточно рассчитать все моменты относительно точки О, находящейся на пересечении диаметральной плоскости судна и плоскости ватерлинии.

3.1.4 Отношение F_{wind} к коэффициенту сопротивления ветра C_D можно выразить следующим уравнением:

$$F_{wind}(\varphi) = 1/2 \cdot \rho_{air} \cdot U^2 \cdot A_L \cdot C_D(\varphi), \qquad (3.1.4)$$

где ρ = плотность воздуха (1,222 кг/м^3 для натуры);

U = скорость ветра (м/с); и

A_L = площадь проекции боковой поверхности судна (м^2), находящегося под действием ветра в ненакрененном положении.

3.1.5 M_{wind} определяется для натуры путем соответствующего пересчета результатов аэродинамических испытаний, проводимых в соответствии с процедурой, указанной в 3.3. M_{water} определяется для натуры путем соответствующего пересчета результатов испытаний по определению величины дрейфа, проводимых в соответствии с процедурой, указанной в 3.4.

3.2 МОДЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

3.2.1 Модель судна, используемая для аэродинамических испытаний.

Модель должна представлять собой копию формы конкретного судна выше ватерлинии и соответствовать следующим параметрам:

.1 общая длина должна быть не менее 1,25 м;

.2 все острые углы конкретного судна должны быть острыми и на модели для моделирования отрывного течения;

.3 основное оборудование на открытых палубах и надстройках, например, краны, мачты, фальшборты должны быть точно смоделированы;

.4 размер модели должен определяться таким образом, чтобы коэффициент заполнения рабочего сечения в аэродинамической трубе составлял менее 5 %, при этом коэффициент заполнения рабочего сечения определяется как отношение площади проекции боковой поверхности модели выше ватерлинии к площади рабочего участка аэродинамической трубы; и

.5 если используется вентилятор, судно должно находиться в пределах площади равномерной скорости ветра.

3.2.2 Модель судна, используемая для испытаний в условиях дрейфа.

Модель должна представлять собой копию формы конкретного судна ниже ватерлинии и соответствовать следующим параметрам:

.1 размер модели должен соответствовать размеру, указанному в 4.3.2;

.2 не только подводные выступающие части (например, скуловые кили, рули и т.п.), но также те части, которые могут оказаться под водой в случае крена судна (например, фальшборты, штормовые шпигаты и т.п.) должны быть точно смоделированы.

3.3 АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

3.3.1 Аэродинамические характеристики.

Скорость ветра должна соответствовать следующим параметрам:

.1 минимальная скорость ветра должна быть больше критического числа Рейнольдса, выше которого величина C_D сохраняется постоянной;

.2 профиль скорости ветра должен быть максимально равномерным. За исключением пограничного слоя в непосредственной близости от концевой пластины (рис. 3.3.1), пространственное отклонение[1] скорости ветра должно быть менее 1 %;

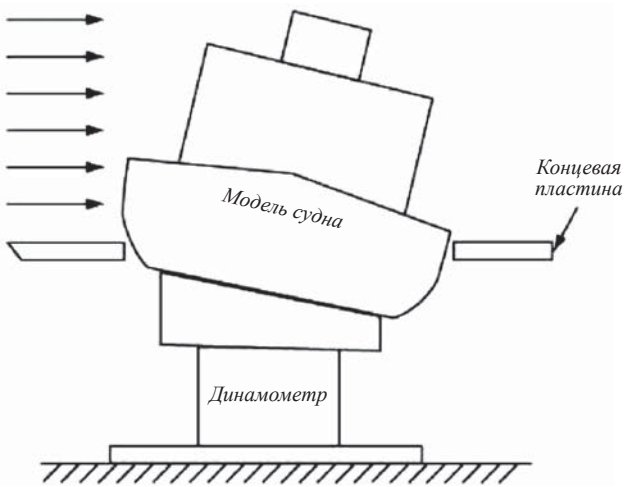

Рис. 3.3.1
Пример размещения судна для испытаний в аэродинамической трубе

.3 влияние концевого листа (из-за его формы, размеров, шероховатости и пр.), а также зазора между концевой пластиной и моделью должно быть минимальным.

---

[1] Пространственное отклонение означает изменение скорости ветра в продольном направлении относительно основного потока и должно измеряться для рабочего участка без модели.

3.3.2 Полная процедура испытаний.

Боковая горизонтальная сила F_{wind} (и соответствующий коэффициент сопротивления C_D) и кренящий момент, возникающий под действием ветра M_{wind} относительно точки O, определяются посредством испытаний в аэродинамической трубе или с использованием вентилятора.

При расчетах C_D в соответствии с уравнением (3.1.4) должно быть использовано фактическое значение плотности воздуха, полученное во время испытания. Пример размещения судна для модельных испытаний приведен на рис. 3.3.1. Модельные испытания должны проводиться следующим образом:

.1 до проведения испытаний должно быть установлено вертикальное и горизонтальное распределение скорости ветра относительно положения модели;

.2 испытания должны проводиться при нахождении судна в ненакрененном положении, а также при ряде углов крена на подветренный и наветренный борт, при этом диапазон значений угла крена должен быть достаточным для удовлетворения Администрации;

.3 в накрененном положении форма модели, находящейся под действием ветра, должна быть такой же, как и форма модели в надводном положении, когда судно свободно плавает. Изменения дифферента в результате крена могут не учитываться.

3.3.3 Упрощенная процедура испытаний.

При использовании альтернативной упрощенной процедуры допускается определять только значение боковой горизонтальной силы F_{wind} (и соответствующий коэффициент сопротивления C_D) и значение кренящего момента, возникающего под действием ветра M_{wind} относительно точки O, при ненакрененном положении судна, которые будут рассматриваться как постоянные (независимо от угла крена).

3.4 ИСПЫТАНИЯ В УСЛОВИЯХ ДРЕЙФА

3.4.1 Полная процедура испытаний.

Кренящий момент M_{water} относительно точки O, возникающий вследствие дрейфа, определяется при помощи испытаний в опытовом бассейне. Пример размещения экспериментальной установки показан на рис. 3.4.1. Модельные испытания должны проводиться следующим образом:

.1 модель судна должна быть прикреплена к системе управления, которая позволяет модели свободно погружаться (схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.4.1);

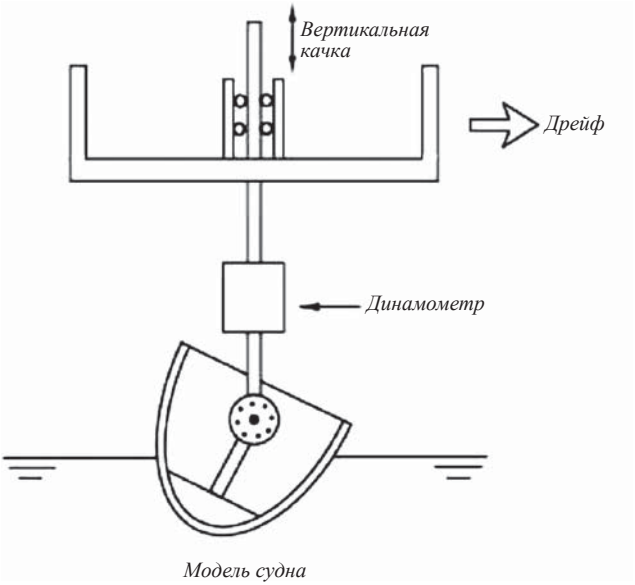

Рис. 3.4.1
Пример схемы экспериментальной установки
для проведения испытания в условиях дрейфа

.2 направление буксировки должно быть перпендикулярно диаметральной плоскости модели (курсовой угол 90°);

.3 скорость буксировки должна быть такова, чтобы измеренная горизонтальная поперечная сила была равна значению F_{wind}, пересчитанному в соответствии с законом подобия. Значение F_{wind} должно рассчитываться по уравнению (3.1.4) с использованием измеренного коэффициента сопротивления, как указано в 3.3, а предполагаемая скорость ветра должна соответствовать значению, указанному в 2.3; и

.4 испытания должны проводиться при нахождении судна в ненакрененном положении, а также при ряде углов крена на подветренный и наветренный борт, при этом диапазон значений угла крена должен быть достаточным для удовлетворения Администрации.

3.4.2 Упрощенная процедура испытаний.

При использовании альтернативной упрощенной процедуры кренящий момент M_{water}, возникающий вследствие дрейфа, может рассматриваться как равный, но противоположный по знаку силе F_{wind} (φ)

(как следует из 3.3.2 или 3.3.3), действующей на расстоянии ниже ватерлинии, равном 0,5d (где d – осадка судна в ненакрененном положении).

3.5 СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ УПРОЩЕННОЙ И ПОЛНОЙ ПРОЦЕДУР

Может быть использована комбинация упрощенной и полной процедур.

3.6 ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ

Плечо ветрового кренящего момента при постоянном ветре l_{w1} определяется при помощи уравнения (3.1.3). Если вне испытываемого диапазона значений углов крена требуется экстраполяция, такая экстраполяция должна выполняться для удовлетворения Администрации.

4 РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМУ ОПРЕДЕЛЕНИЮ УГЛА Φ_1

4.1 ЦЕЛИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

4.1.1 Целью испытаний, описанных в данной Главе, является определение φ_1 (3.2.2.3 Кодекса). «Угол бортовой качки на наветренный борт вследствие волнового воздействия» φ_1 определяется в соответствии с критерием погоды следующим образом:

$$\varphi_1 = 0{,}7\varphi_{1r}, \qquad (4.1.1)$$

где φ_{1r} – «амплитуда бортовой качки на регулярном волнении», т.е. резонансная амплитуда бортовой качки на регулярном лаговом волнении (курсовой угол 90°) с крутизной волны, которая определена в следующих разделах. Редукционный коэффициент 0,7 учитывает нерегулярность морского волнения.

4.1.2 Стандартная процедура по определению φ_{1r} применяется путем проведения испытаний на регулярном волнении. Допускается использование альтернативных процедур. Достаточное обоснование выбора процедуры должно быть представлено в Администрацию.

4.1.3 В качестве рекомендации при выборе наиболее подходящей процедуры, следует учитывать следующее:

.1 прямое измерение φ_{1r} (см. 4.5) может привести к необходимости создания очень крутых волн, близких к разрушению, если период бортовой качки судна будет очень коротким (см. табл. 4.5.1). Создание волн такой крутизны и надлежащего качества может иногда представлять трудность вследствие возникновения разрушающихся волн близко к волнопродуктору. Кроме того, при проведении испытаний для определения амплитуды бортовой качки на лаговом волнении следует уделить особое внимание переходному режиму качки судна до достижения им стационарного режима, поскольку могут возникнуть большие углы крена (которые иногда в итоге приводят к опрокидыванию судна). Следует особо подчеркнуть, что φ_{1r} является максимальным углом крена при стационарной бортовой качке судна. По этой причине опрокидывание судна во время начального переходного состояния не обязательно ведет к невыполнению критерия погоды. Следует отметить, что этот метод не позволяет учесть влияние масштабного эффекта на демпфирование бортовой качки, и по этой причине при выполнении прямых измерений следует отдавать предпочтение крупномасштабным моделям;

.2 трехэтапная процедура (см. 4.6.1) является самой простой из двух предложенных альтернативных процедур. Данная методика была предложена при первоначальной разработке критерия погоды. Данная процедура чувствительна к качеству проведения эксперимента и анализу результатов испытаний по определению демпфирования бортовой качки методом затухающих колебаний. Данная процедура позволяет проводить испытания по определению коэффициента эффективной крутизны волны r с относительно небольшой крутизной, что позволяет проводить достаточно простые испытания. Данная методика позволяет, в принципе, учесть влияние масштабного эффекта на демпфирование бортовой качки;

.3 метод параметрической идентификации (МПИ) (см. 4.6.2) представляет собой процедуру высокой степени гибкости, что позволяет учитывать нелинейности демпфирующего и восстанавливающего моментов, и обеспечивает возможность получения частотной зависимости «функции эффективной крутизны волны». Этот метод позволяет, в принципе, учесть влияние масштабного эффекта на демпфирование бортовой качки. При проведении только одной серии испытаний при одной крутизне волн количество свободных параметров должно быть снижено для обеспечения устойчивости метода. При использовании данного метода можно получить значительные преимущества (в отношении устойчивости и точности), если применять более одной серии испытаний при различной крутизне волн: поэтому настоятельно рекомендуется проводить испытания, по крайней мере, при двух различных значениях крутизны волн. Для

обеспечения правильного применения метода необходима достаточная базовая подготовка персонала по тем теоретическим аспектам, на которых основан данный метод.

4.2 ОПЫТОВЫЙ БАССЕЙН

Опытовый бассейн должен быть оборудован таким образом, чтобы избежать возникновения эффектов отраженной волны и мелководья. Ширина бассейна должна быть больше общей длины модели плюс два метра. Качество бассейна должно удовлетворять Администрацию.

4.3 МОДЕЛЬ

4.3.1 Изготовление.

4.3.1.1 Модель должна быть изготовлена с соблюдением масштаба до верхней открытой палубы, включая бак и фальшборты, и должна быть достаточно жесткой и отшлифованной. Модель в целом (за исключением свободно затопляемых пространств) должна быть водонепроницаемой для обеспечения требуемых гидростатических характеристик.

4.3.1.2 Все надстройки, включенные в расчеты остойчивости, или те надстройки, которые погружаются под воду в процессе испытаний, должны быть воспроизведены с соблюдением масштаба для обеспечения заданной диаграммы статической остойчивости судна. Надстройки, которые не будут погружаться под воду в процессе испытаний, могут не учитываться.

4.3.1.3 Выступающие части судна, такие как скуловые кили или рули, должны быть установлены на модели с соблюдением масштаба, и в отчете должно быть указано, какие именно выступающие части были установлены в процессе проведения испытаний.

4.3.2 Масштаб.

Во избежание влияния масштабного эффекта в процессе проведения испытаний общая длина модели должна составлять не менее 2 м. Тем не менее, если потребуется, модель должна быть воспроизведена в увеличенном масштабе, чтобы ширина скуловых килей была более 7 мм. Тем не менее, для однокорпусных судов, не имеющих скуловых килей или острых скул[1], общая длина модели должна составлять, по крайней мере,

---

[1] В данном контексте термин «острые скулы» означает, что радиус закругления скулы меньше 1 % ширины судна, а угол между линейно-ломаными кривыми, изображающими скулу, меньше 120º.

4 м, если только эффект трения при определении демпфирования качки не учтен при помощи теоретических методов, речь о которых пойдет ниже; но, в любом случае, общая длина модели должна быть не менее 2 м или иметь масштаб 1:75, в зависимости от того, что больше.

4.3.3 Распределение балласта и весовой нагрузки.

4.3.3.1 Модель должна быть нагружена балластом для достижения надлежащего водоизмещения и случая нагрузки судна. Для обеспечения правильного водоизмещения и посадки следует применять марки осадки или соответствующие измерительные приборы. Весовые нагрузки должны быть установлены таким образом, чтобы можно было добиться правильного положения центра тяжести.

4.3.3.2 Весовая нагрузка должна быть распределена таким образом, чтобы обеспечить приемлемый продольный радиус инерции. Следует избегать асимметричного распределения весовых нагрузок, насколько это возможно.

4.3.3.3 Опыт кренования должен проводиться для того, чтобы определить метацентрическую высоту судна *GM*, соответствующую метацентрической высоте реального судна с погрешностью 2 % или 1 мм в масштабе модели, в зависимости от того, что больше.

4.3.3.4 Кроме того, исходя из представленных данных испытаний по опытовому бассейну, следует проверить, чтобы собственный период бортовой качки T_φ в воде или поперечный радиус инерции в воздухе не превышал погрешности 2 %.

4.3.4 Собственный период бортовой качки T_φ.

Испытания должны проводиться на волнении с периодом, соответствующим собственному периоду бортовой качки судна. В том случае, если достаточно точное определение T_φ невозможно на момент проведения испытаний, испытания должны проводиться с применением, как минимум, трех различных периодов бортовой качки. Результаты этих испытаний могут быть интерполированы для собственного периода бортовой качки реального судна.

4.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

4.4.1 Контрольно-измерительные приборы.

Контрольно-измерительная система должна соответствовать модели и типу проводимых испытаний. Рекомендуется использование систем с постоянной настройкой при проведении измерений, где это возможно. В том случае, когда к модели требуется подключить кабели, воздействие помех должно быть минимизировано.

4.4.2 Калибровка.

Чтобы обеспечить точную работу контрольно-измерительных приборов, должна быть выполнена их калибровка, о чем должен быть составлен отчет.

4.4.3 Измерения.

Углы бортовой качки и рыскания, если необходимо, должны измеряться одновременно и отражаться в отчетных документах в соответствии с целями проведения испытаний. Измерение высоты волны должно проводиться для всех испытаний путем установки волнографов в опытовом бассейне.

4.4.4 Качество волны.

Качество генерирования волн должно оцениваться для волн, соответствующих минимальной и максимальной частоте, используемой при испытаниях. Подъем волны должен измеряться при помощи волнографов, установленных, по крайней мере, на трех участках по всей длине бассейна, охватывающих зону дрейфа модели. Измерение должно производиться без модели, поскольку модель может исказить исходную волну. Если измеренная двойная амплитуда волны сходится к одному значению, это значение должно рассматриваться, как высота волны H для каждого положения волнографа. Изменения высоты волны и периода волн должны находиться в диапазоне ± 5 % для различных местоположений волнографов для одного и того же сигнала.

4.5 ИСПЫТАНИЯ НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Испытания на регулярном волнении представляют собой стандартную процедуру по определению «амплитуды бортовой качки на регулярном волнении» φ_{1r}. В некоторых случаях, прямое определение φ_{1r} является невозможным, как, например, в случае с крупномасштабными моделями, имеющими большой собственный период бортовой качки T_{φ}. В таких случаях могут применяться альтернативные процедуры, которые описаны в 4.6.

4.5.1 Условия проведения испытаний.

Крутизна волны (коэффициент «s») определяется по таблице 4.5.1.

Таблица 4.5.1

Крутизна волны как функция собственного периода бортовой качки судна в масштабе натуры

Период бортовой качки судна T, [с]	Крутизна волн $s = H/\lambda$
< 6	0,100
6	0,100
7	0,098
8	0,093
12	0,065
14	0,053
16	0,044
18	0,038
20	0,032
22	0,028
24	0,025
26	0,023
28	0,021
30	0,020
> 30	0,020

4.5.2 Процедура прямого измерения.

4.5.2.1 Испытания на регулярном волнении могут использоваться для прямого определения «амплитуды бортовой качки на регулярном волнении» φ_{1r}. Значение φ_{1r} представляет собой пиковое значение амплитудно-частотной характеристики бортовой качки судна на регулярном волнении с крутизной волны в соответствии с таблицей 4.5.1. Для определения φ_{1r} амплитуда установившейся бортовой качки должна измеряться для достаточного количества частот в диапазоне вокруг собственной частоты бортовой качки $\omega_0 = 2\pi/T_\varphi$. Рекомендуется следующий минимальный набор контрольных точек ω/ω_0 = 0,8; 0,9; 0,95; 0,975; 1,0; 1,05; 1,2, где ω – частота регулярного волнения, в рад/с. Могут потребоваться дополнительные измерения значений амплитуды бортовой качки, близких к пиковому значению, для точного определения φ_{1r}, особенно в случае сильного влияния нелинейности диаграммы статической остойчивости.

4.5.2.2 В процессе проведения испытаний модель судна должна быть установлена перпендикулярно направлению движения волн (курсовой угол 90°). Курсовой угол модели должен быть или:

.1 постоянным, с направляющей, закрепленной на тележке в опытовом бассейне и обеспечивающей свободное движение модели в направлениях поперечно-горизонтальных колебаний, вертикальной и бортовой качки. Пример расположения экспериментальной установки показан на рис. 4.5.2.2. Тележка должна отслеживать дрейф модели, вызванный волновым воздействием. Осадка, GM и T_φ должны корректироваться с учетом воздействия направляющей; или

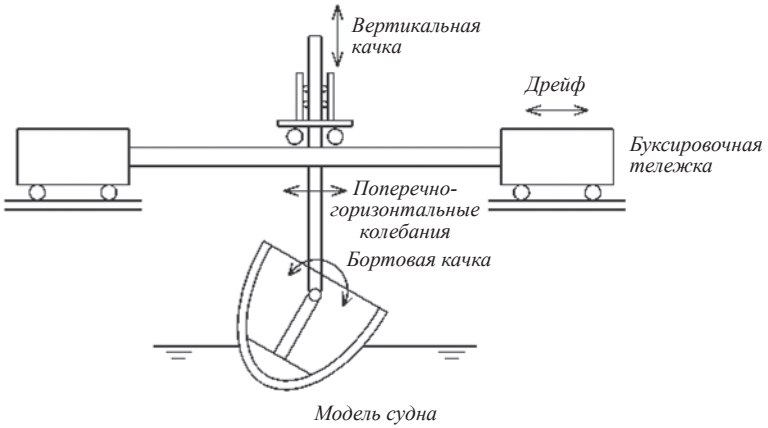

Рис. 4.5.2.2
Пример применения направляющих при проведении испытаний для определения амплитуды бортовой качки на боковом волнении

.2 изменяемым при помощи направляющих тросов, которые симметрично закреплены на модели в диаметральной плоскости на носу и корме, на высоте между ватерлинией и центром тяжести. Эти тросы могут использоваться для коррекции модели по углу рыскания при свободных дрейфе и поперечно-горизонтальных колебаниях при условии, что курсовой угол во время испытаний не отклоняется от положения лагом больше чем на 15°. Тем не менее, когда рыскание корректируется при помощи тросов, соответствующая часть результатов замеров не должна учитываться при последующем анализе, если только влияние коррекции на интересующее значение параметра не будет ничтожно малым.

4.5.2.3 В процессе проведения испытаний следует соблюдать соответствующие временные интервалы между измерениями, чтобы ампли-

туда установившейся бортовой качки измерялась без влияния отраженных волн между моделью и волнопродуктором или между моделью и волногасителем.

4.5.2.4 Регистрируемые данные представляют собой движение модели со всеми измеренными степенями свободы и высотой волны.

4.6 АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

Если прямые измерения φ_{1r} представляются нецелесообразными, могут применяться альтернативные процедуры для расчета амплитуды бортовой качки на наветренный борт, возникающей при волновом воздействии φ_1 при крутизне волн, указанной в 4.5.1, с использованием данных, полученных при проведении испытаний на регулярном волнении с различной степенью крутизны и/или других типов испытаний.

Принимая во внимание наличие сильного взаимодействия между многими элементами, входящими в оценку критерия погоды, определение отдельных параметров, значимых для расчетной формулы угла бортовой качки на наветренный борт, возникающей при волновом воздействии φ_1, допускается только в том случае, если все параметры определены экспериментально или соответствующими расчетами. В дальнейшем данные процедуры будут рассматриваться как альтернативные по отношению к прямым измерениям φ_{1r} (см. 4.5).

4.6.1 Альтернативная процедура 1: трехэтапная процедура.

Эта процедура состоит из последовательной оценки:

.1 демпфирования бортовой качки (коэффициент Бертена *N*) методом затухающих колебаний на тихой воде;

.2 коэффициента эффективной крутизны волны *r* посредством проведения испытаний по определению амплитуды бортовой качки на лаговом волнении; и

.3 амплитуды бортовой качки на регулярном волнении φ_{1r}.

4.6.1.1 Проведение испытаний по определению демпфирования бортовой качки методом затухающих колебаний

4.6.1.1.1 Для определения демпфирования бортовой качки судна следует провести серию испытаний методом затухающих колебаний масштабированной модели на тихой воде. Первоначально модель кренится на определенный угол. Этот первоначальный угол крена должен быть больше примерно 25°. Если средний угол бортовой качки между первоначально заданным углом и следующим максимальным углом составляет менее 20°, то первоначально заданный угол должен быть увеличен, чтобы получить средний угол, равный 20° или более. После того, как модели задан

первоначальный угол крена, дополнительное погружение и дифферент должны быть минимальными. Модель должна быть отпущена с нулевой угловой скоростью. Во время данного испытания модель не должна испытывать никакого воздействия, включая распространение волн в продольном направлении бассейна, а также их отражение от края бассейна. Требуется проведение, как минимум, четырех испытаний с различными первоначально заданными углами крена. Если демпфирование бортовой качки является значительным, количество испытаний следует увеличить, чтобы получить достаточное количество максимальных значений угла бортовой качки. Регистрацию изменения значений углов крена в процессе колебаний следует начать еще до отпускания модели, чтобы убедиться в том, что при отпускании модель имеет нулевую угловую скорость. Процесс регистрации должен продолжаться до тех пор, пока угол бортовой качки модели не достигнет 0,5°. Для этого, в конечном итоге, необходимо, чтобы длина испытательного бассейна была достаточно большой.

4.6.1.1.2 Вся подробная информация по проведению испытаний, включая регистрацию изменения значений угла бортовой качки во времени, должна быть включена в отчет.

4.6.1.2 Определение φ_{1r}.

4.6.1.2.1 Первый этап.

Целью данного этапа является определение кривой коэффициента затухания Бертена и периода бортовой качки как функции амплитуды бортовой качки. Исходя из того, что абсолютными значениями измеренных последовательных предельных значений (одно максимальное значение и следующее за ним одно минимальное значение или наоборот) угла бортовой качки в процессе затухания колебаний являются φ_1, φ_2, …(град.), рассчитывают средний угол бортовой качки $\varphi_{m_i} = (\varphi_i + \varphi_{i-1})/2$ и декремент затухания $\delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1}$. Коэффициент затухания Бертена, N, как функция φ_m определяется по формуле

$$N_i = N(\varphi_{m_i}) = \delta\,\varphi_i/(\varphi_{m_i})^2.$$

Следует отметить, что N зависит от амплитуды бортовой качки. Полученные исходные данные для $N(\varphi_{m_i})$ аппроксимируются гладкой кривой. Кроме того, периоды между пиковыми значениями должны рассчитываться в виде функции среднего угла бортовой качки, который необходим для второго этапа.

Эквивалентный линейный коэффициент демпфирования v_e (φ) определяется следующим образом:

$$v_e(\varphi) = 1/\pi \cdot N(\varphi) \cdot \varphi,$$

где значение φ, в град., может быть использовано в качестве альтернативы коэффициенту Бертена. При использовании эквивалентного линейного коэффициента демпфирования все формулы, содержащие $N(\varphi)$, должны быть, соответственно, преобразованы.

В случае необходимости использования поправки на трение при демпфировании бортовой качки, как указано в 4.3.2, вышеуказанное значение N должно быть уменьшено на значение, полученное по следующей формуле, которое выражает корреляцию модель-судно для демпфирования трения:

$$\delta N = \frac{2{,}11 \cdot S \cdot r_S^2}{\varphi_r \cdot \Delta \cdot GM \cdot T_\varphi^{1{,}5}}, \qquad (4.6.1.2.1\text{-}1)$$

где $S = L \cdot (1{,}7 \cdot d + C_B \cdot B)$; (4.6.1.2.1-2)

$r_S = 1/\pi \ \{(0{,}877 + 0{,}145 \cdot C_B)\ (1{,}7 \cdot d + C_B \cdot B) + 2 \cdot (KG - d)\}$. (4.6.1.2.1-3)

Все переменные должны быть в масштабе модели, и символы, используемые в вышеуказанных формулах, имеют следующие определения:

L = длина судна по ватерлинии (м);

B = теоретическая ширина судна (м);

d = средняя теоретическая осадка судна (м);

C_B = коэффициент общей полноты;

GM = метацентрическая высота, скорректированная на влияние свободной поверхности (м);

Δ = водоизмещение (кг);

T_φ = период бортовой качки (с);

φ_r = угол бортовой качки (град.).

В качестве альтернативы могут использоваться численные расчеты с нестационарным пограничным слоем для удовлетворения Администрации.

В качестве альтернативы для определения коэффициента $N(\varphi)$ могут проводиться испытания по определению амплитуды вынужденной бортовой качки на лаговом волнении с использованием внутреннего или внешнего генератора бортовой качки.

При первом варианте измеряются углы бортовой качки, а при втором – измеряется кренящий момент при бортовой качке. Методика испытаний и последующий анализ данных должны удовлетворять Администрацию.

Чтобы принять решение о приемлемости методики испытаний и последующего анализа, в качестве рекомендации можно рассматривать достаточное согласие между результатами испытаний методом вынужденной бортовой качки и $N(\varphi)$, полученному из испытаний методом затухающих колебаний.

4.6.1.2.2 Второй этап.

Целью данного этапа является определение коэффициента эффективной крутизны волны r. Предусмотрены следующие два метода:

.1 резонансная амплитуда бортовой качки на регулярном волнении определяется в соответствии с процедурой, описанной в 4.5.2, но с использованием крутизны волны менее 1/20. Независимо от требований 4.5.2, используемый период волны должен быть таким же, как и заданный собственный период бортовой качки. После определения установившейся амплитуды бортовой качки должен определяться собственный период бортовой качки для данной амплитуды по данным опыта по измерению затухающих колебаний. Если этот период значительно отличается от периода волны, измерения угла бортовой качки должны быть проведены повторно с использованием заново определенного периода для волнопродуктора. Затем эффективный коэффициент крутизны волны, r, определяется по следующей формуле:

$$r = \frac{g \cdot T^2_{wave,r} \cdot \varphi_r^2 \cdot N(\varphi_r)}{180\,\pi^2 \cdot H_r}, \qquad (4.6.1.2.2\text{-}1)$$

где $T_{wave,r}$ и H_r обозначают соответственно период волны (с) и высоту волны (м), которые используются в данных испытаниях, а g – ускорение свободного падения (м/с^2).

Предполагается, что в уравнении (4.6.1.2.2-1) крутизна волны соотносится с высотой волны и периодом волны следующим образом: $s = 2\pi \cdot H / (g \cdot T^2_{wave})$. Предполагается, что эффективная крутизна волны не зависит от φ_r.

.2 в качестве альтернативы является возможным определить возмущающий момент при бортовой качке M_{exc} путем прямых измерений с использованием динамометра. Модель должна быть подсоединена к тележке при помощи направляющей, допускающей дрейф, поперечно-горизонтальные колебания, вертикальную и килевую качку, но фиксирующей продольные перемещения, бортовую качку и рыскание. При помощи динамометра следует измерить этот момент относительно центра тяжести между моделью и тележкой. Конструкция динамометра должна обеспечивать ограничение взаимовлияния между определяемыми составляю-

щими сил в пределах 2 % от результирующих значений. Таким образом, коэффициент r определяется по следующей формуле:

$$r = \frac{M_{exc}}{\Delta \cdot \overline{GM} \cdot \pi \cdot s}. \qquad (4.6.1.2.2\text{-}2)$$

4.6.1.2.3 Третий этап.

Целью данного этапа является прогнозирование максимального значения амплитуды бортовой качки для крутизны волны, указанной в таблице 4.5.1. Используя кривую для $N(\varphi)$ и вычисленное значение для r, полученное на предыдущих этапах, а также крутизну волны s, взятую из таблицы 4.5.1, прогнозируемый угол бортовой качки φ_{1r} можно рассчитать по следующей формуле:

$$\varphi_{1r} = \sqrt{\frac{90\,\pi r s}{N(\varphi_{1r})}} \quad \text{(град.)}. \qquad (4.6.1.2.3)$$

Поскольку данная формула включает φ_{1r} на правый и левый борта, расчет должен производиться по следующей итерационной процедуре:

.1 φ_{1r} изначально принимается равным 20°;

.2 рассчитывается правая сторона данной формулы;

.3 полученное значение φ_{1r} должно подставляться в правую часть формулы; и

.4 после сведения φ_{1r} к определенному значению это значение должно рассматриваться как окончательное.

4.6.2 Альтернативная процедура 2: метод параметрической идентификации (МПИ).

МПИ представлен ниже с учетом линейных и нелинейных особенностей математической модели, описывающей бортовую качку на лаговом волнении при наличии других источников сил или демпфирования бортовой качки методом затухающих колебаний. Основная идея МПИ заключается в регрессии решения (точного или приблизительного, аналитического или численного) системы дифференциальных уравнений, описывающей временную эволюцию анализируемой системы и включающей в качестве неизвестных величин характерные параметры (коэффициенты математической модели, описывающие демпфирование, восстанавливающий момент и силовые компоненты). Регрессия рассматривается для экспериментальных значений амплитуды установившейся бортовой качки в

функции частоты вынужденной бортовой качки. Основная идея МПИ заключается в следующем: решение уравнения (4.6.2.1.1) для любого полного набора параметров и различных частот волны позволяет получить амплитудно-частотную характеристику бортовой качки. Параметры модели систематически изменяются посредством процедуры минимизации с целью получения совпадения между прогнозируемыми значениями, полученными при помощи математической модели, и экспериментальными данными. «Оптимальный» набор параметров, таким образом, получается при решении уравнения (4.6.2.1.1) для крутизны волны, указанной в таблице 4.5.1, и различными значениями частоты волны, чтобы, в конечном итоге, получить максимальное значение φ_{1r} амплитудно-частотной характеристики бортовой качки. Угол бортовой качки на наветренный борт φ_1 рассчитывается в соответствии с 4.1.

При использовании МПИ настоятельно рекомендуется определять, по крайней мере, две амплитудно-частотные характеристики бортовой качки, полученные для двух различных значений крутизны волны.

4.6.2.1 Моделирование бортовой качки на боковом волнении и определение параметров модели.

4.6.2.1.1 Рекомендуемая математическая модель на лаговом волнении.

Следующее дифференциальное уравнение рекомендуется в качестве приемлемой модели для описания бортовой качки судна на регулярном лаговом волнении:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + d(\dot{\varphi}) + \omega_0^2 \cdot r(\varphi) = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot s \cdot \xi(\omega/\omega_0) \cdot \cos(\omega \cdot t); \\ d(\dot{\varphi}) = 2\mu \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + \delta \cdot \dot{\varphi}^3; \\ r(\varphi) = \varphi + \gamma_3 \cdot \varphi^3 + \gamma_5 \cdot \varphi^5; \\ \xi(\omega/\omega_0) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \omega/\omega_0 + \alpha_2 \cdot (\omega/\omega_0)^2. \end{cases} \qquad (4.6.1.1)$$

В рекомендуемой математической модели (4.6.2.1.1) нижеуказанные параметры должны, в принципе, рассматриваться как определенные посредством МПИ: ω_0, μ, β, δ, γ_3, γ_5, α_0, α_1, α_2. Тем не менее, в определенных случаях некоторые из этих параметров могут рассматриваться как постоянные и/или равные нулю.

4.6.2.1.2 Определение χ^2.

4.6.2.1.2.1 Из серии экспериментов на лаговом волнении в соответствии с 4.5.2 (помимо требуемой крутизны волны), определяется значение амплитуды бортовой качки $C_{\exp,ij}$ для каждой опытной частоты волны ω_i и крутизны волны s_i. Рекомендуется определить амплитудно-частотную характеристику бортовой качки, по крайней мере, для двух значений крутизны волны и набора частот для каждого значения крутиз-

ны волны, как указано в 4.5.2. С учетом предварительного набора параметров (ω_0, μ, β, δ, γ_3, γ_5, α_0, α_1, α_2) можно получить значение амплитуды бортовой качки $C_{mod,ij}$ (посредством численного интегрирования или аналитического решения), как спрогнозировано математической моделью в уравнении (4.6.2.1.1) для каждой опытной частоты волны ω_i и крутизны волны s_j в эксперименте.

4.6.2.1.2.2 Следующая функция используется в качестве меры соответствия модели:

$$\chi^2(\{\omega_0, \mu, \beta, \delta, \gamma_3, \gamma_5, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2\}) = \sum_{i,j}(C_{mod,ij} - C_{\exp,ij})^2. \qquad (4.6.2.1.2.2)$$

Как видно из уравнения (4.6.2.1.2.2), χ^2 зависит от предполагаемых значений параметров модели.

4.6.2.1.3 Подбор модели.

МПИ используется с целью определения набора «оптимальных» параметров $(\omega_0, \mu, \beta, \delta, \gamma_3, \gamma_5, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)_{opt}$ для минимизации χ^2:

$$\chi^2(\{\omega_0, \mu, \beta, \delta, \gamma_3, \gamma_5, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2\}_{opt}) = \min(\chi^2).$$

Может использоваться любая численная или аналитическая процедура минимизации, удовлетворяющая Администрацию.

4.6.2.1.4 Расчет максимального значения амплитудно-частотной характеристики бортовой качки φ_{1r}.

4.6.2.1.4.1 После определения «оптимального» набора параметров (ω_0, μ, β, δ, γ_3, γ_5, α_0, α_1, α_2) при помощи процедуры минимизации амплитудно-частотная характеристика бортовой качки для крутизны волны, указанной в таблице 4.5.1, может быть получена следующим способом.

4.6.2.1.4.2 Уравнение (4.6.2.1.1) решается посредством стандартных алгоритмов численного интегрирования или аналитического решения для различных частот, чтобы получить амплитудно-частотную характеристику бортовой качки. Максимальное значение такой характеристики и есть φ_{1r}.

4.6.2.2 Дополнительные комментарии.

В целом, для получения параметров на основании коэффициента демпфирования бортовой качки, полученного методом затухающих колебаний, или вынужденной бортовой качки, создаваемой при помощи генератора кренящего момента, может использоваться методика, описанная в 4.6.2.1. В частности, может потребоваться различное моделирование и/или определение χ^2, которое может затем использоваться к удовлетворению Администрации.

ПОЯСНИТЕЛЬНЫЕ ПРИМЕЧАНИЯ К ВРЕМЕННОМУ РУКОВОДСТВУ ПО АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ОЦЕНКЕ КРИТЕРИЯ ПОГОДЫ

Вспомогательная информация необязательного характера

1 Комитет по безопасности на море на своей восемьдесят второй сессии (29 ноября – 8 декабря 2006 г.) одобрил Пояснительные примечания к Временному руководству по альтернативной оценке критерия погоды, изложенную в приложении, которые имеют своей целью предоставить участникам морской индустрии альтернативные средства (в частности, модельные испытания) для оценки критерия сильного ветра и бортовой качки (критерия погоды), как указано в Кодексе остойчивости неповрежденных судов (резолюция ИМО A.749(18)).

2 Странам-членам предлагается довести прилагаемые Пояснительные примечания к Временному руководству до сведения всех заинтересованных сторон, насколько они сочтут это необходимым.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНЫЕ ПРИМЕЧАНИЯ К ВРЕМЕННОМУ РУКОВОДСТВУ ПО АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ОЦЕНКЕ КРИТЕРИЯ ПОГОДЫ[1]

1 ВВЕДЕНИЕ

В данных Пояснительных примечаниях дан пример альтернативной оценки критерия сильного ветра и бортовой качки (критерия погоды) на основании серии модельных испытаний, соответствующих Временному руководству по альтернативной оценке критерия погоды, который содержится в MSC.1/Circ.1200, для лучшего понимания альтернативных процедур. В данном документе критерий погоды, указанный в 3.2 Кодекса[2], именуется «стандартным критерием погоды», а Временное руководство (MSC.1/Circ.1200) – «Руководством».

2 ИСПЫТЫВАЕМОЕ СУДНО

Главные размерения, общее расположение и плечо статической остойчивости парома RoPax, который используется в данном примере, указаны в таблице 2.1, рис. 2.1 и 2.2, соответственно.

---

[1] При использовании документа следует руководствоваться текстом на английском языке, соответствующим тексту официального документа ИМО. Перевод на русский язык является справочным материалом.

[2] Для цели данных Пояснительных примечаний ссылка на Кодекс означает ссылку на Кодекс остойчивости неповрежденных судов всех типов (резолюция ИМО A.749(18)), с поправками.

Таблица 2.1

Главные размерения

Длина между перпендикулярами: L_{pp}	[м]	170,0	Площадь скуловых килей: A_{bk}	[м^2]	61,32
Ширина: B	[м]	25,0	Возвышение центра тяжести: KG	[м]	10,63
Высота борта: D	[м]	14,8	Метацентрическая высота: GM	[м]	1,41
Осадка: d	[м]	6,6	Угол заливания: φ_f	[град.]	39,5
Водоизмещение: W	[т]	14983	Период бортовой качки: T_r	[с]	17,90
Коэффициент общей полноты: C_b		0,521	Площадь боковой проекции: A_L	[м^2]	3433,0
B/d		3,79	Высота до центра A_L выше ВЛ: H_c	[м]	9,71

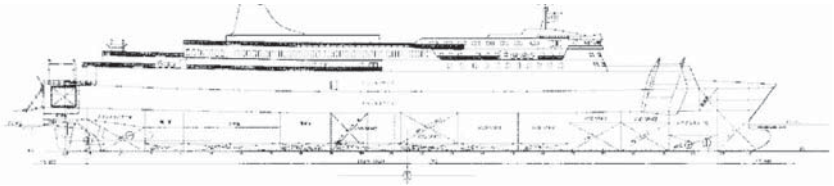

Рис. 2.1
Общее расположение

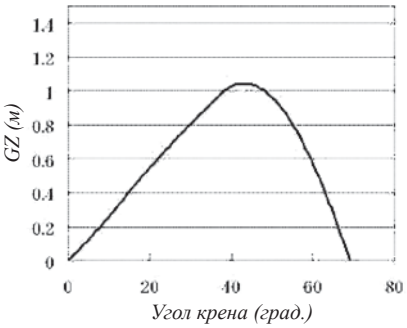

Рис. 2.2
Диаграмма статической остойчивости

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛЕЧА ВЕТРОВОГО КРЕНЯЩЕГО МОМЕНТА L_{w1}

3.1 МОДЕЛЬ

3.1.1 Модель судна, используемая для аэродинамических испытаний.

Модель для аэродинамических испытаний была построена в соответствии с 1.2.1 Руководства. Длина модели (L_{pp}) составила 1,5 м (в масштабе 1:113). Площадь боковой проекции судна в ненакрененном положении составила 0,267 м^2. По сравнению с поперечным сечением аэродинамической трубы (3 м в ширину и 2 м в высоту) коэффициент загрузки рабочего сечения в аэродинамической трубе составил 4,5 %.

3.1.2 Модель судна, используемая для испытаний по определению величины дрейфа.

Модель, используемая для испытаний по определению величины дрейфа, была построена в соответствии с 1.2.2 Руководства со скуловыми килями, ширина которых превышала 10 мм. Длина модели составила 2 м (в масштабе 1:85).

3.2 АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

3.2.1 Размещение судна для испытаний в аэродинамической трубе показано на рис. 3.1. В месте соединения модели с динамометром установлено вращающееся устройство для испытаний модели в накрененном положении. В накрененном положении высота модели была откорректирована при помощи регулировочной плиты для поддержания постоянного водоизмещения в свободном плавании. Изменение угла дифферента в результате крена не учитывалось.

3.2.2 Чтобы коэффициент загрузки рабочего сечения в аэродинамической трубе был меньше 5 %, листы настила были установлены на уровне настила аэродинамической трубы. Зазор между моделью и листом настила составил примерно 3 мм и был заполнен мягким материалом во избежание влияния нисходящего потока, проходящего через зазор[1].

---

[1] С целью облегчения проведения испытаний и во избежание необходимости установки соответствующих листов настила для каждого угла крена зазор может заполняться водой. Однако в этом случае при возникновении эффекта плавучести в модели вследствие определенной установки модели такой эффект должен учитываться в процессе последующего анализа данных.

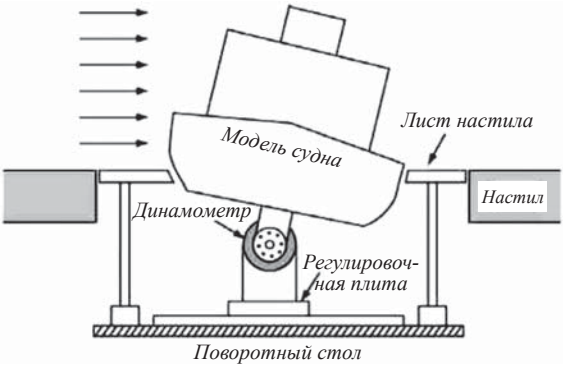

Рис. 3.1
Размещение судна для испытаний в аэродинамической трубе

3.2.3 Распределение скорости ветра в вертикальной плоскости показано на рис. 3.2. Для проведения испытаний (рис. 3.1) высота модели судна от листа настила составила примерно 19 см в вертикальном положении. Это означает, что нижняя часть модели размещалась в пограничном слое. Распределение скорости потока воздуха в поперечном и продольном направлениях было приблизительно одинаковым (отклонение менее 1 %) по всей модели.

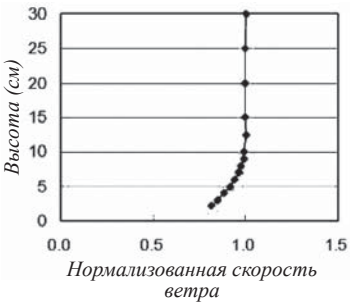

Рис. 3.2
Распределение скорости ветра в вертикальной плоскости

3.2.4 Скорость ветра изменялась от 5 м/с до 15 м/с в ненакрененном положении модели, и было получено подтверждение того, что коэффици-

ент сопротивления является практически постоянным в данном диапазоне значений скорости. Для испытаний использовалась скорость потока, равная 10 м/с, соответствующая числу Рейнольдса 1,52 x 10^5, определяемому в соответствии со следующим уравнением:

$$Re = U_\infty B/\nu, \qquad \text{(N-3.1)}$$

где U_∞ – однородная скорость ветра за пределами пограничного слоя,
B – ширина модели и ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

3.2.5 Горизонтальная сила F_{wind}, кренящий момент M и подъемная сила L измерялись при помощи динамометра. Кренящий момент M был преобразован в кренящий момент относительно точки O, определяемый как M_{wind}, при помощи следующего уравнения:

$$M_{wind} = M - F_{wind}\, l \cdot \cos\varphi + L \cdot l \cdot \sin\varphi, \qquad \text{(N-3.2)}$$

где l – расстояние от центра динамометра до точки O. Точка O определяется как точка пересечения диаметральной плоскости судна и ватерлинии при нахождении судна в ненакрененном положении.

3.3 ИСПЫТАНИЯ В УСЛОВИЯХ ДРЕЙФА

3.3.1 Испытания в условиях дрейфа проводились в бассейне размером 50 м в длину, 8 м в ширину и 4,5 м в глубину. Размещение модели судна показано на рис. 3.3. Для соединения модели, динамометра и пилона для перемещения по вертикали использовалась та же схема, что и в аэродинамической трубе. Горизонтальная сила F_{water} и кренящий момент M измерялись при помощи динамометра и определялись как осредненные по времени значения в стационарных условиях после переходной фазы, которая возникает после начала движения тележки. Кренящий момент относительно точки O, определенный как M_{water}, рассчитывался таким же образом, как и во время испытаний в аэродинамической трубе. Тем не менее, последний член уравнения (N-3.2) не является обязательным, поскольку вертикальная сила, в целом, равна нулю, так как условия эксперимента предполагают свободу вертикальных перемещений.

3.3.2 Скорость дрейфа должна быть определена для того, чтобы сила дрейфа была равна F_{wind}, как указано в уравнении (1.2) Руководства в масштабе модели. Скорость ветра должна приниматься равной 26 м/с в масштабе натуры. Тем не менее, для целей настоящего эксперимента скорость изменялась, чтобы перекрыть предполагаемый диапазон значений

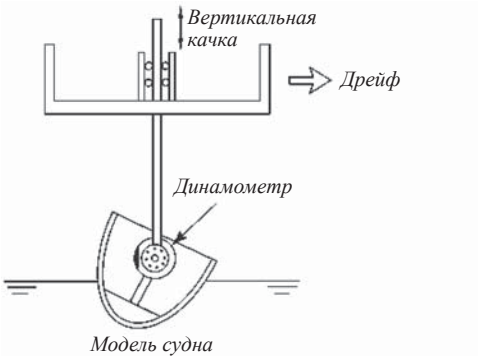

Рис. 3.3
Размещение модели при испытаниях в условиях дрейфа

коэффициента сопротивления ветра C_D, поскольку испытания в аэродинамической трубе проводились после испытаний по определению величины дрейфа.

3.4 РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

3.4.1 Измеренные значения коэффициента сопротивления (C_D), коэффициента подъемной силы (C_L) и кренящего момента (C_M) показаны на рис. 3.4. Они обезразмерены в соответствии со следующими уравнениями:

$$(C_D / C_L) = (F_{wind} / L) / (1/2\ \rho_{air}\ U^2\ A_L); \qquad \text{(N-3.3)}$$

$$C_M = M_{wind} / [1/2\ \rho_{air}\ U^2 (A_L / L_{pp})]. \qquad \text{(N-3.4)}$$

3.4.2 На рисунке угол крена определен как положительный, когда судно кренится на подветренный борт (см. рис. 3.1). Пунктирной линией обозначен коэффициент кренящего момента стандартного критерия погоды, рассчитанного по уравнению (N-3.5), которое, в свою очередь, выведено из уравнения, указанного в 3.2.2.2 Кодекса. Однако для сравнения с результатами испытаний Z заменяется высотой центра площади боковой проекции выше ватерлинии, то есть, значением H_c, указанным в таблице 2.1.

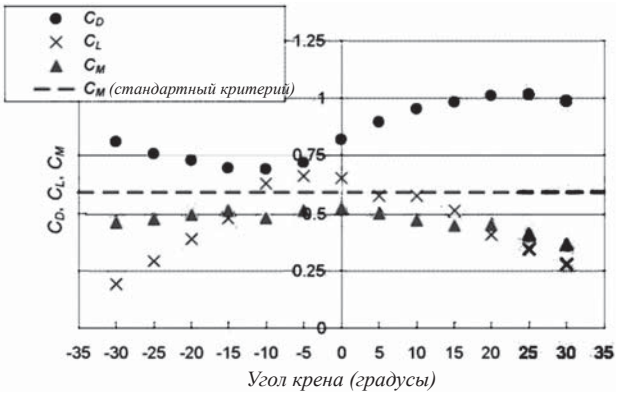

Рис. 3.4
Измеренные коэффициент сопротивления (C_D),
коэффициент подъемной силы (C_L) и кренящий момент (C_M)

$$M_{wind} = P \cdot A \cdot Z \text{ [Н-м]}. \qquad \text{(N-3.5)}$$

3.4.3 Для данного рисунка характерно, что все указанные значения (C_D, C_L и C_M) значительно изменяются при изменении угла крена. Что касается кренящего момента, то он меньше, чем в стандартном критерии и уменьшается по мере увеличения крена судна, особенно на подветренный борт. Подъемная сила не столь мала, и её значение близко к силе сопротивления при угле крена – 5° (на наветренный борт). Однако корректировка вертикального положения модели не требуется, поскольку подъемная сила составляет 0,7 % водоизмещения судна при скорости ветра 26 м/с.

3.4.4 Для сравнения результатов испытаний со значением Z в уравнении (N-3.5) измеренный кренящий момент был заменен высотой центра ветрового усилия выше ватерлинии l_{wind} по следующей формуле:

$$l_{wind} = M_{wind} / F_{wind}. \qquad \text{(N-3.6)}$$

3.4.5 Результат показан на рис. 3.5. Можно заметить, что центр силы ветра также является функцией угла крена.

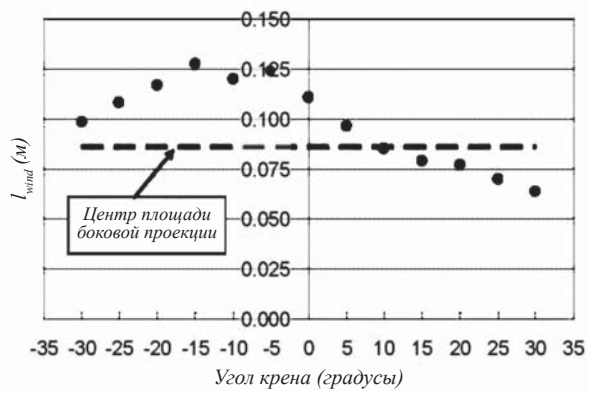

Рис. 3.5
Высота центра силы ветра выше ватерлинии (в масштабе модели)

3.5 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ В УСЛОВИЯХ ДРЕЙФА

3.5.1 Таким же способом, как и для уравнения (N-3.6), измеренный кренящий момент, вызванный дрейфом M_{water}, был заменен высотой центра силы дрейфа над ватерлинией l_{water}. Эти значения, нормированные осадкой, показаны на рис. 3.6, где угол крена положительный при крене судна в направлении дрейфа, как показано на рис. 3.3.

3.5.2 Можно заметить, что в рассматриваемом случае центр силы дрейфа расположен выше половины осадки судна (что является допущением для стандартного критерия) и, как правило, выше ватерлинии. Это явление возникает в результате перераспределения давления по днищу судна в том случае, если отношение ширины судна к осадке является достаточно большим.

3.6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ L_{w1}

3.6.1 Кренящие моменты, определяемые в процессе аэродинамических испытаний M_{wind} и испытаний в условиях дрейфа M_{water} были подставлены в уравнение (N-3.7) (так же, как и в уравнении (1.1) Руководства), и ветровой кренящий момент l_{w1} рассчитывался как функция угла крена, как показано на рис. 3.7 и 3.8.

$$l_{w1} = (M_{wind} + M_{water}) / \Delta. \qquad \text{(N-3.7)}$$

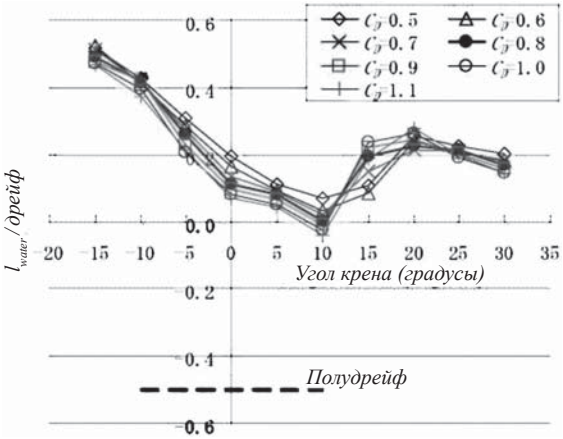

Рис. 3.6
Высота центра силы дрейфа
для принятых коэффициентов аэродинамического сопротивления

3.6.2 На рис. 3.7 показаны также плечо ветрового кренящего момента (M_{wind}/Δ) и плечо момента вследствие дрейфа (M_{water}/Δ). Предполагается, что на обоих рисунках значение l_{w1} при угле больше 30° остается таким же, как и при угле 30° (см. 1.6 Руководства). На рис. 3.7 видно, что в рас-

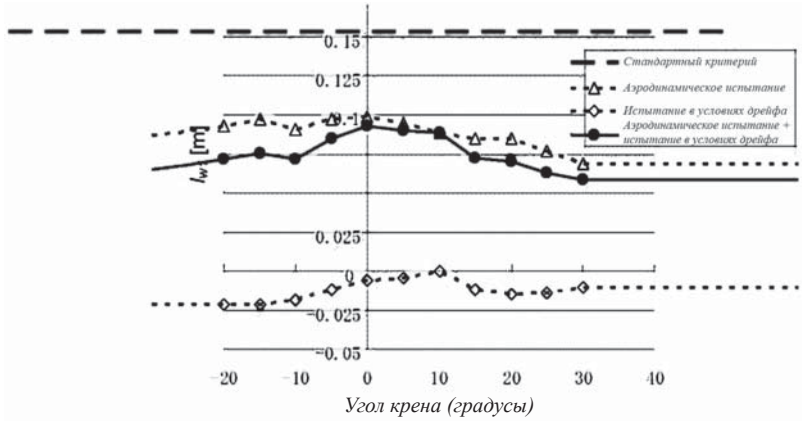

Рис. 3.7
Плечо ветрового кренящего момента l_{w1}, определенное при испытаниях

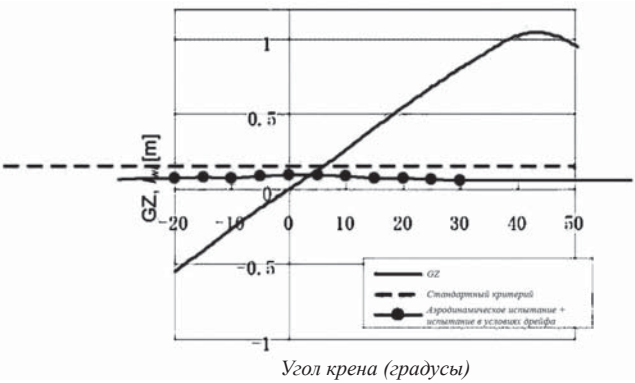

Рис. 3.8
Плечо ветрового кренящего момента l_{w1}
в сравнении с диаграммой статической остойчивости

сматриваемом случае, ветровой кренящий момент, рассчитанный на основе общей процедуры, т.е. посредством аэродинамических испытаний и испытаний в условиях дрейфа, значительно меньше ветрового кренящего момента, указанного в стандартном критерии погоды.

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА БОРТОВОЙ КАЧКИ φ_1

4.1 ОПЫТОВЫЙ БАССЕЙН

Опытовый бассейн, использованный для определения демпфирования бортовой качки методом затухающих колебаний и испытаний для определения амплитуды бортовой качки на волнении, был такой же, как и для испытаний в условиях дрейфа (50 м в длину, 8 м в ширину и 4,5 м в глубину). Общая длина модели (2,14 м) была довольно мала по сравнению с шириной бассейна.

4.2 МОДЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

4.2.1 Использовалась та же модель, что и для испытаний по определению величины дрейфа (L_{pp} = 2 м, в масштабе 1:85). Модель судна была достроена до верхней автомобильной палубы, плавучесть которой была

включена в расчет остойчивости. Верхняя часть модели была спроектирована открытой, но вода не попадала внутрь при самых крутых волнах.

4.2.2 Модель была нагружена балластом до достижения требуемого случая нагрузки судна, как показано в таблице 2.1. Для контроля правильного водоизмещения и посадки модель была окрашена в разные цвета выше и ниже ватерлинии. В результате опыта кренования измеренная метацентрическая высота *GM* составила 1,67 см с погрешностью 0,7 % относительно метацентрической высоты *GM* натурного судна. Собственный период бортовой качки согласно измерениям составил 1,92 с с погрешностью 1,2 %.

4.3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

4.3.1 Бортовая качка измерялась при помощи креномера, для которого была подтверждена постоянная частотная характеристика. Гибкие и ненатянутые кабели были подсоединены к модели для подачи питания и регистрации сигналов. Движение судна записывалось на видеокамеру.

4.3.2 Высота волны измерялась при помощи волнографов при минимальной и максимальной частотах волнения, используемого в испытаниях. Эти измерения проводились при отсутствии модели в трех точках по длине бассейна, перекрывая диапазон предполагаемого дрейфа модели, т.е. 7,1 м. Наибольшая разница между тремя контрольными точками относительно требуемых значений высоты и периода волны составила, соответственно, 4 % и 1 %.

4.4 ПРОЦЕДУРА ПРЯМОГО ИЗМЕРЕНИЯ

4.4.1 Согласно таблице, показывающей крутизну волны (таблица 2.1 Руководства), принятая крутизна волны *s* для данного судна составляет 0,0383 (1/26,1). Амплитуда бортовой качки измерялась на лаговом волнении с данной степенью крутизны. Кроме того, были использованы волны с крутизной волны $s = 1/40$ и 1/60 для альтернативных процедур, которые будут описаны ниже. Максимальная высота волны достигала 27,8 см, что близко к предельной возможности волнопродуктора.

4.4.2 Модель находилась в свободном дрейфе во избежание влияния системы направляющих, и направляющие тросы были закреплены на модели в диаметральной плоскости на носу и корме, на высоте около центра тяжести. Периодическое рыскание было незначительным, но изменения среднего угла курса тщательно корректировались вручную при помощи тросов, не допуская отклонения более, чем на 15°. Буксировоч-

ная тележка двигалась со средней скоростью дрейфа. Если направление курса корректировалось при помощи значительного натяжения тросов, то соответствующая часть результатов замеров не учитывалась в процессе анализа. При небольшом волнении требовалась незначительная коррекция, однако в некоторых случаях на сильном волнении для выполнения коррекции приходилось прилагать значительные усилия.

4.4.3 В отношении измеренных значений амплитудно-частотной характеристики бортовой качки был проведен анализ Фурье для выделения составляющих на частоте кажущегося периода волны. Результаты для всех значений крутизны волны показаны на рис. 4.1. Вследствие нелинейности демпфирования бортовой качки безразмерные значения амплитуды бортовой качки тем больше, чем меньше крутизна волны. С другой стороны, вследствие линейности диаграммы статической остойчивости (см. рис. 2.2) частоты максимальных значений качки изменяются незначительно даже при крутых волнах. В условиях эксперимента максимальные значения амплитуды бортовой качки при требуемой крутизне волны, т.е. s = 1/26,1, составили φ_{1r} = 27,6 °. В соответствии с формулой (2.1) Руководства «амплитуда бортовой качки на наветренный борт» φ_1, таким образом, определяется как $\varphi_1 = 0{,}7\varphi_{1r} = 19{,}3°$.

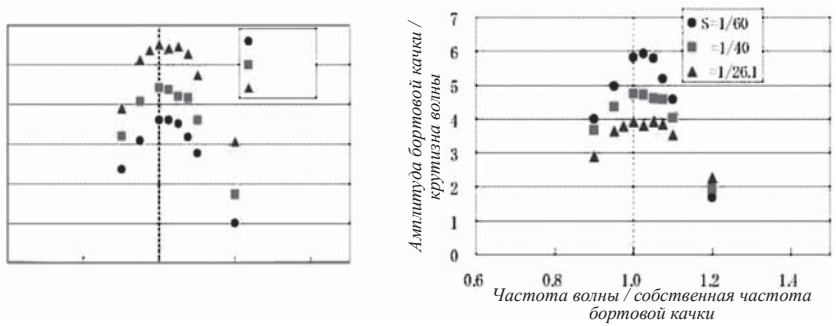

Рис. 4.1
Амплитуда бортовой качки на лаговом регулярном волнении
(слева: в градусах, справа: безразмерные)

4.5 АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ

В данном разделе описана альтернативная процедура 1 (3-этапная процедура).

4.5.1 Испытания по определению демпфирования бортовой качки методом затухающих колебаний.

4.5.1.1 На тихой воде модель первоначально накренялась на угол крена 25° и затем отпускалась с нулевой угловой скоростью. Было проведено четыре испытания с различными первоначальными углами накренения. В качестве примера, соотношение φ_m (средний угол бортовой качки) и $\delta\varphi$ (декремент угла бортовой качки на половине цикла) для испытаний показано на рис. 4.2.

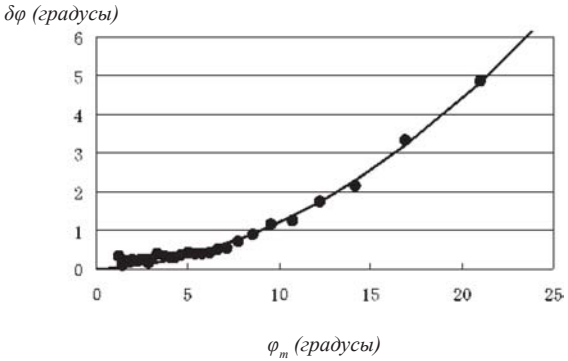

Рис. 4.2
Пример демпфирования бортовой качки методом затухающих колебаний

4.5.1.2 Измеренный нелинейный коэффициент демпфирования бортовой качки N в качестве функции амплитуды бортовой качки указан в таблице 4.1. Зависимость коэффициента N от амплитуды бортовой качки незначительна, поскольку линейная составляющая (волновое демпфирование) мала для данного судна.

Таблица 4.1

Коэффициент демпфирования бортовой качки *N*

Амплитуда бортовой качки	*N* [1/град.]
1	2
10,0	0,0122
12,5	0,0117
15,0	0,0113
17,5	0,0111
20,0	0,0109
22,5	0,0108
25,0	0,0106

4.5.2 Коэффициент эффективной крутизны волны *r*.

Для измерения коэффициента эффективной крутизны волны, *r*, в 2.6.1.2 Руководства описаны два варианта. В данном случае, результаты испытаний для определения амплитуды бортовой качки, указанные в 4.4, были использованы для $s = 1/60$, и было получено значение $r = 0{,}759$.

4.5.3 Определение угла бортовой качки φ_1.

При помощи итерационных расчетов, ход которых описан в 2.6.1.2 Руководства (третий этап), значение φ_{1r} было определено как 27,9° и, таким образом, $\varphi_1 = 0{,}7\varphi_{1r} = 19{,}5°$, что очень близко к данным по процедуре прямого измерения (см. вышеуказанный раздел 4.4). Одной из причин такого соответствия являются почти линейные характеристики, показанные на диаграмме статической остойчивости до 20° (см. рис. 2.2).

5 ОЦЕНКА КРИТЕРИЯ ПОГОДЫ

5.1 Результаты сравнения различных оценок критерия погоды, где были использованы экспериментальные данные, суммированы в таблице 5.1. В таблицу включены все возможные сочетания аэродинамических испытаний и испытаний по определению величины дрейфа для оценки l_{w1} (см. 1.5 Руководства). Что касается φ_1, в таблицу включены стандартный критерий (3.2.2.3 Кодекса) и результаты прямых измерений. Результаты трехэтапной процедуры в данном случае могут не учитываться, поскольку расчетное значение φ_1 было практически равно значению, полученному посредством прямых измерений для данного судна. Оценка, осуществляемая при помощи метода параметрической идентификации (МПИ), изло-

Таблица 5.1

Оценка критерия погоды

l_{wl}	Стандартный критерий погоды	Аэродинамические испытания + испытания по определению величины дрейфа	Аэродинамические испытания + осадка/2	Аэродинамические испытания (ненакренное положение) + испытания по определению величины дрейфа	Аэродинамические испытания (ненакренное положение) + осадка/2	Стандартный критерий погоды	Аэродинамические испытания + испытания по определению величины дрейфа	Аэродинамические испытания + осадка/2	Аэродинамические испытания (ненакренное положение) + испытания по определению величины дрейфа	Аэродинамические испытания (ненакренное положение) + осадка/2
φ_1	Стандартный критерий погоды					Процедура прямых измерений (или трехэтапная процедура)				
l_{wl} [м]	0,153	Функция угла крена			0,125	0,153	Функция угла крена			0,125
r [-]	1,096					0,759 (3-х этапная процедура)				
T_r [с]	16,3					17,9				
s [-]	0,0431					0,0383				
φ_1 [град.]	15,4					19,3				
φ_0 [град.]	6,1	3,7	4,9	3,8	5,0	6,1	3,7	4,9	3,8	5,0
$\varphi_0 - \varphi_1$ [град] [град.]	– 9,3	– 11,7	– 10,4	– 11,6	– 10,4	– 13,2	– 15,7	– 14,4	– 15,5	– 14,3
φ_f [град.]	39,5									
Площадь a [рад-м]	0,075	0,063	0,069	0,063	0,070	0,111	0,096	0,103	0,095	0,106
Площадь b [рад-м]	0,224	0,295	0,259	0,276	0,247	0,224	0,295	0,259	0,276	0,247
b/a [-]	2,99	4,71	3,76	4,41	3,51	2,02	3,09	2,51	2,90	2,34
Критерий KG [м]	11,48	11,88	11,68	11,79	11,62	11,35	11,82	11,59	11,73	11,52

жена в нижеуказанном разделе 6. В последней строке таблицы 5.1 указаны критические значения возвышения центра тяжести *KG*, где $b/a = 1$. Эти последние результаты следует использовать с некоторой осторожностью, поскольку влияние изменения возвышения центра тяжести на значение T_r и другие значения, относящиеся к бортовой качке, включая φ_1, в данном случае не учитывалось. Для правильной оценки предельной кривой *KG* требуются более расширенные экспериментальные испытания.

5.2 В таблице 5.1 показано, что альтернативная оценка посредством модельных испытаний может значительно изменить соотношение площадей *b/a* относительно стандартного критерия, в то время как изменения предельного значения возвышения центра тяжести менее заметны. Для данного судна увеличенное значение φ_1, полученное в результате экспериментальных испытаний, уменьшает соотношение *b/a*, а значение l_{w1}, оцененное посредством выполнения всех сочетаний аэродинамических испытаний и испытаний по определению величины дрейфа, полномасштабных процедур и упрощенных процедур, имеет тенденцию увеличивать соотношение *b/a* по сравнению со стандартным критерием погоды, указанном в 3.2 Кодекса. Следует, тем не менее, заметить, что эти колебания связаны со значительными отклонениями возвышения центра гидродинамического давления при дрейфе данного судна. Более полное подтверждение этого должно быть получено из опыта применения Временного руководства.

6 АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ПРОЦЕДУРА 2: МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ (МПИ)

6.1 ВВЕДЕНИЕ

6.1.1 МПИ представляет собой обобщенную методику определения численных значений определенного числа параметров в данной аналитической модели таким образом, чтобы с помощью модели можно было описать поведение анализируемой системы при заданных условиях. Хотя МПИ также пригоден для выполнения прямого анализа демпфирования бортовой качки на тихой воде с целью определения собственной частоты судна и параметров демпфирования, в данном документе описывается бортовая качка судна на лаговом волнении.

6.1.2 Общая идея, на которой основан МПИ, заключается в том, что, как предполагается, данная аналитическая модель способна прогнозировать амплитуду бортовой качки на лаговом волнении, и данная математи-

ческая модель характеризуется общей формой с определенным количеством свободных параметров. Свободные параметры должны быть заданы для того, чтобы обеспечить оптимальное сходство между имеющимися экспериментальными данными и результатами расчета с использованием математической модели. Если указанные параметры определены, то предполагается, что модель подходит для экстраполяции. В случае бортовой качки судна на лаговом волнении параметры математической модели устанавливаются на основании амплитудно-частотной характеристики бортовой качки при небольшой крутизне волны для того, чтобы спрогнозировать поведение судна при большей крутизне волны в случае, когда невозможно проведение прямых экспериментальных измерений, или в случае, когда результаты прямых экспериментальных измерений отсутствуют.

6.1.3 На основании Руководства предполагается, что нижеприведенное общее уравнение может применяться для моделирования бортовой качки судна на лаговом волнении:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + d(\dot{\varphi}) + \omega_0^2 \cdot r(\varphi) = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot s \cdot \xi(\omega/\omega_0) \cdot \cos(\omega \cdot t); \\ d(\dot{\varphi}) = 2\mu \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi}|\dot{\varphi}| + \delta \cdot \dot{\varphi}^3; \\ r(\varphi) = \varphi + \gamma_3 \cdot \varphi^3 + \gamma_5 \cdot \varphi^5; \\ \xi(\omega/\omega_0) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \omega/\omega_0 + \alpha_2 \cdot (\omega/\omega_0)^2. \end{cases} \qquad \text{(N-6.1)}$$

6.1.4 Нижеуказанные параметры, в целом, рассматриваются как свободные параметры (предполагается, что угол бортовой качки измеряется в радианах):

коэффициенты демпфирования: μ (линейное демпфирование (1/с)), β (квадратичное демпфирование (1/рад)), δ (кубическое демпфирование (с/рад^2));

собственная частота ω_0 (рад/с);

нелинейные коэффициенты восстанавливающего момента: γ_3 (кубический член (безразмерный)), γ_5 (член пятой степени (безразмерный));

коэффициенты эффективной крутизны волны: α_0 (постоянный (безразмерный)), α_1 (линейный член (безразмерный)), α_2 (квадратический член (безразмерный)).

6.1.5 Крутизна волны s, а также частота вынужденных колебаний ω (измеренная непосредственно на временной записи бортовой качки с целью учета доплеровского эффекта в случае высокой скорости дрейфа) представляют собой данные, полученные в ходе экспериментов.

6.1.6 Общее количество свободных параметров, таким образом, равно 9. Такое большое число параметров можно эффективно определить на основе экспериментальных данных только при большом количестве

проведенных экспериментов, т.е., по крайней мере, двух (но лучше, трех) значений крутизны волны для определения амплитудно-частотной характеристики для охвата большого диапазона значений амплитуды бортовой качки от линейного диапазона (менее 10°) до нелинейного диапазона (как минимум, 40°). Кроме того, на основании экспериментальных данных следует охватить широкий диапазон частот от низких до высоких частот (ω/ω_0 от примерно 0,8 или ниже до 1,2 или выше).

Необходимость охвата столь широкого диапазона возникает из-за того, что различные параметры имеют различную степень важности в различных диапазонах.

6.1.7 Если демпфирование играет важную роль, главным образом, в области максимальных значений, то эффективную крутизну волны лучше определять в области низких частот амплитудно-частотной характеристики. Линейные члены, как при демпфировании, так и при восстанавливающем моменте являются доминирующими в области небольших амплитуд бортовой качки, а влияние нелинейных членов особенно заметно только в области больших амплитуд бортовой качки. Амплитудно-частотная характеристика бортовой качки стремится к изгибу в область низких частот при мягкой характеристике диаграммы статической остойчивости или к изгибу в область высоких частот при жесткой характеристике диаграммы статической остойчивости. Обе тенденции могут иметь значение при S-образном типе диаграммы статической остойчивости.

6.1.8 Общее использование МПИ в рамках экспериментального определения угла бортовой качки φ_{1r} (см. Руководство) будет вероятно, аналогично применению трехэтапной процедуры, т.е.:

.1 проведение экспериментов при *одной* крутизне волны s_{exp}, меньшей, чем требуемая крутизна волны s_{req};

.2 определение параметров модели с целью соответствия экспериментальным данным при s_{exp};

.3 использование полученных параметров для прогнозирования максимального значения амплитудно-частотной характеристики бортовой качки при s_{req}.

6.1.9 Поскольку, скорее всего, будет использоваться только одна крутизна волны, число параметров следует уменьшить, чтобы получить сходимость решения математической модели без побочного влияния на неопределяемые параметры. В таком случае, должен использоваться упрощенный вариант математической модели.

6.1.10 На основании серии исследований и прошлого опыта (см., например, [1][2]) можно предложить следующую упрощенную модель при использовании одной крутизны волны:

упрощенная модель с одной крутизной волны:

$$\ddot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi}\,|\dot{\varphi}| + \omega_0^2 \cdot (\varphi + \gamma_3 \cdot \varphi^3) = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot s \cdot \alpha_0 \cdot \cos(\omega \cdot t), \qquad \text{(N-6.2)}$$

при этом считается, что демпфирование является чисто квадратическим вследствие того, что используется только одна амплитудно-частотная характеристика. Частотная зависимость эффективной крутизны волны не учитывалась, поскольку в данном случае нас, главным образом, интересует амплитудно-частотная характеристика бортовой качки судна при максимальном значении, и поэтому «хвосты» амплитудно-частотной характеристики являются менее важными (или совсем не важными) для окончательной оценки φ_{1r} (даже если остаточная низкочастотная часть амплитудно-частотной характеристики является основополагающей для определения значения α_0). В качестве пояснения, коэффициент α_0 в упрощенной модели (N-6.2) соответствует эффективной крутизне волны r трехэтапной процедуры. Кубический нелинейный член восстанавливающего момента был сохранен, но им можно пренебречь, если диаграмма статической остойчивости является достаточно линейной в предполагаемом диапазоне значений амплитуды качки или если отсутствуют признаки отклонения от экспериментальной кривой амплитудно-частотной характеристики (при условии, что максимальное экспериментальное значение достаточно велико, чтобы была возможность определить возможные нелинейные свойства качки).

6.1.11 В случае наличия двух кривых амплитудно-частотной характеристики, которые были определены при двух различных значениях крутизны волны, возможно введение дополнительного линейного члена демпфирования и дополнительного члена восстанавливающего момента с пятью степенями:

упрощенная модель с двумя различными значениями крутизны волны:

$$\ddot{\varphi} + 2\mu \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi}\,|\dot{\varphi}| + \omega_0^2 \cdot (\varphi + \gamma_3 \cdot \varphi^3 + \gamma_5 \cdot \varphi^5) = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot s \cdot \alpha_0 \cdot \cos(\omega \cdot t). \quad \text{(N-6.3)}$$

6.1.12 С учетом члена демпфирования, использованного в предыдущих упрощенных моделях, в целом, квадратичная составляющая демпфирования кажется более приемлемой для анализа корпусов судов со скуловыми килями или с предполагаемым значительным вихреобразованием. С другой стороны, замена квадратичного члена демпфирования $\beta \cdot \dot{\varphi}\,|\dot{\varphi}|$ кубическим членом $\delta \cdot \dot{\varphi}^3$ может быть более приемлема для корпусов судов без скуловых килей.

6.1.13 Использование различных нелинейных моделей демпфирования может привести к различным результатам при прогнозировании окончательной амплитуды бортовой качки. По этой причине, в отсутствие убедительного свидетельства предпочтения одной нелинейной модели перед другой, рекомендуется использовать среднее из двух прогнозируемых резонансных значений амплитуды бортовой качки. С другой стороны, чисто линейная модель почти всегда является недостаточной для представления демпфирования бортовой качки при нулевой скорости судна.

6.2 ОБЩИЕ КОММЕНТАРИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МПИ

6.2.1 МПИ следует реализовать в виде соответствующей компьютерной программы, и она не пригодна для выполнения расчетов вручную. На рис. 6.2 показана блок-схема применения МПИ. Как видно из рисунка, процедура основана на двух главных компонентах:

.1 программа решения дифференциальных уравнений, используемая для определения амплитудно-частотной характеристики бортовой качки, спрогнозированная при помощи модели для различных экспериментальных наборов параметров; и

.2 соответствующий алгоритм минимизации, используемый для получения оптимального набора параметров за счет уменьшения суммы квадратов разности между экспериментальным и прогнозируемым значениями амплитуды бортовой качки.

6.2.2 Программа решения дифференциальных уравнений может быть, в основном, двух типов:

.1 точное численное решение во временной области: общее дифференциальное уравнение (N-6.1) решается численно при помощи алгоритмов дискретных временных интервалов (аналогично методу Рунге-Кутта) для определенного числа периодов возмущения до достижения стационарного режима бортовой качки. В итоге анализируется изменение амплитуд качки во времени для определения установившейся амплитуды бортовой качки; и

.2 приближенное решение уравнений в частотной области: используется аналитическое приближенное решение дифференциального уравнения (N-6.1) для определения нелинейной амплитудно-частотной характеристики бортовой качки. Обычно используемыми аналитическими методами являются метод гармонического баланса, метод многих масштабов и метод усреднения [3].

6.2.3 Оба указанных типа имеют свои преимущества и недостатки.

6.2.4 Интегрирование во временной области требует больше расчетного времени, но при этом решает исходное дифференциальное уравнение без аппроксимации (за исключением точности численного интегрирования). С другой стороны, в случае сильного изгиба кривой амплитудно-частотной характеристики, когда возможны множественные решения для одной и той же частоты вынужденных колебаний, следует уделить особое внимание численному определению амплитуды бортовой качки, чтобы правильно изучить все имеющиеся решения (см. рис. 6.1).

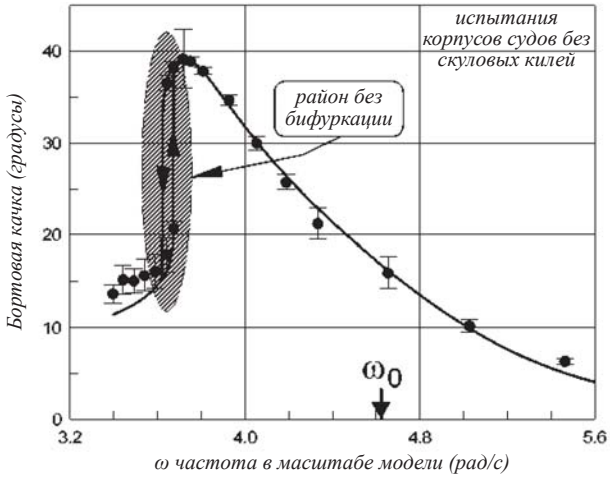

Рис. 6.1
Пример экспериментальной и вычисленной кривых амплитудно-частотной характеристики в случае мягкой характеристики диаграммы статической остойчивости

6.2.5 Стандартный численный метод, который может использоваться для решения данной проблемы, основан на концепции «вариации частоты», когда при интегрировании во временной области частота вынужденных колебаний медленно изменяется с наибольшего до наименьшего значения, а затем наоборот, для определения скачков амплитуд качки, возникающих вследствие бифуркации (см. рис. 6.1).

6.2.6 Аналитические методы представляют собой приближенные решения, и это является главным недостатком. Тем не менее, решения численного моделирования и аналитические решения, на удивление, часто совпадают и являются более чем приемлемыми для практического приме-

нения. Кроме того, если применение экспериментальных данных основано на аналитическом методе, и этот же метод применяется для экстраполяции, т.е. используется непротиворечивый метод без смешения аналитического и численного методов, то можно прогнозировать значительное совпадение между численным и аналитическим методами. Аналитические методы обычно требуют меньше времени, чем прямое интегрирование во времен-

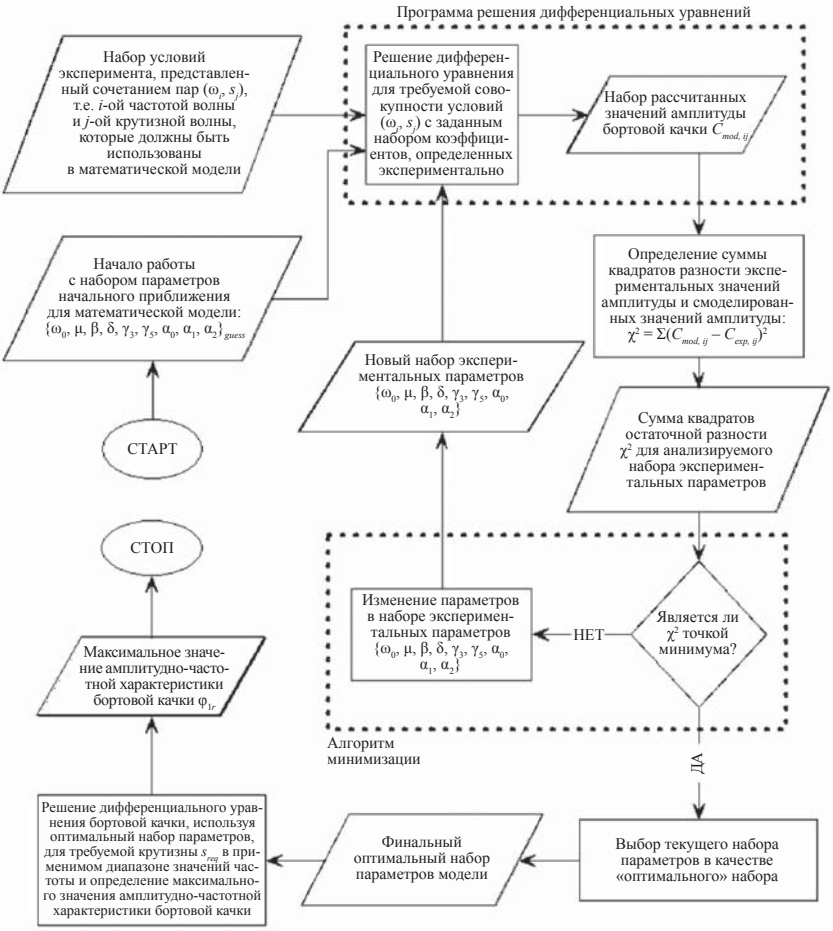

Рис. 6.2
Блок-схема МПИ

ной области, и с их помощью можно найти множественные устойчивые решения в той области, где высока вероятность наличия более одного решения, упрощая, таким образом, решение такого рода проблем.

6.2.7 Предполагается, что разница в прогнозируемом значении бортовой качки φ_{1r} при применении аналитического и численного методов будет меньше обычной экспериментальной погрешности (которая может составить ± 2°).

6.2.8 Алгоритмом минимизации может быть любой надежный метод минимизации (например, метод Левенберга-Маркардта или другой более перспективный стохастический/детерминистский метод).

6.3 ПРИМЕНЕНИЕ МПИ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

6.3.1 Те же экспериментальные данные, которые использовались в альтернативной процедуре 1, были использованы при применении МПИ. Объем такого применения сводится к прогнозированию пикового значения амплитудно-частотной характеристики бортовой качки при требуемой крутизне волны, полученной в результате испытаний s = 0,0383, начиная с имеющихся данных при незначительной крутизне, т.е. с 1/40 и 1/60. Были проведены следующие расчеты:

.1 расчет 1: прогнозирование φ_{1r} путем подбора модели к крутизне волны s = 1/60;

.2 расчет 2: прогнозирование φ_{1r} путем подбора модели к крутизне волны s = 1/40;

.3 расчет 3: прогнозирование φ_{1r} путем подбора модели к крутизне волны s = 1/40 и s = 1/60;

6.3.2 В случае с расчетами 1 и 2, где используется только одно значение крутизны волны, применялась упрощенная модель (N-6.2), и благодаря линейности диаграммы статической остойчивости *GZ* и вследствие отсутствия видимого изгиба кривой амплитудно-частотной характеристики, было сделано допущение, что $\gamma_3 = 0$.

6.3.3 В случае с расчетом 3, где имеются два значения крутизны волны, были введены дополнительные члены. Использовались две различные аналитические модели: первая модель была точно такой же, какая применялась для расчетов 1 и 2, в то время как для второй модели линейный коэффициент демпфирования μ оставался незаданным (см. (N-6.3)). Тем не менее, в обоих случаях, было сохранено допущение о линейном восстановлении, т.е. $\gamma_3 = 0$ and $\gamma_5 = 0$.

6.3.4 Во всех случаях амплитудно-частотная характеристика бортовой качки была определена путем приближенного нелинейного аналитичес-

кого метода с представлением в частотной области, где амплитудно-частотная характеристика была получена при помощи метода гармонического баланса [3].

6.3.5 Используемая аналитическая модель и результаты, полученные путем применения МПИ, суммированы в таблице 6.1, а общее представление кривой амплитудно-частотной характеристики бортовой качки дано на рис. 6.3 – 6.6.

6.3.6 На основе анализа полученных результатов можно утверждать, что МПИ наряду с предлагаемыми аналитическими упрощенными моделями может быть использован для надлежащего прогнозирования амплитудно-частотной характеристики бортовой качки судна при наибольшем значении крутизны волны, начиная с подбора амплитудно-частотной характеристики, полученной экспериментальным путем при меньших значениях крутизны волны. Чисто квадратичная модель демпфирования позволяет делать достаточно хорошие прогнозы в отношении максимальных экспериментальных значений, возможно, благодаря наличию скуловых килей. В случае с линейной + квадратичной моделью демпфирования был получен отрицательный линейный коэффициент демпфирования, что является, разумеется, бессмысленным с физической точки зрения. Тем не менее, эквивалентное линейное демпфирование в диапазоне значений исследуемых углов, полученных посредством подобранной модели для расчета 3-LQ является, конечно, положительным. Отрицательное значение коэффициента линейного демпфирования возникло, таким образом, вследствие того, что эквивалентное линейное демпфирование, полученное из подобранной модели в диапазоне значений исследуемых амплитуд качки, лучше соответствует экспериментальным данным в соответствии с процедурой минимизации. Если бы серия экспериментов проводилась при меньшем значении крутизны с последующим подбором, это бы увеличило коэффициент линейного демпфирования, возможно, сделав его положительным. Учитывая теоретический подход, использованный в методе параметрической идентификации, отрицательные линейные коэффициенты демпфирования часто не являются реальной практической проблемой, даже если их присутствие обычно указывает на то, что различные типы аналитических моделей для функции демпфирования могли бы привести к более четкому представлению демпфирования существующего судна.

Таблица 6.1

Аналитические модели, использованные для подбора, и подобранные параметры (масштабная модель)

	Расчет 1	Расчет 2	Расчет 3-Q	Расчет 3-LQ
Крутизна волны, используемая при подборе	1/60	1/40	1/60 и 1/40	
Аналитическая модель	$\ddot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi}\,\lvert\dot{\varphi}\rvert + \omega_0^2 \cdot \varphi = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot s \cdot \alpha_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$			$\ddot{\varphi} + 2\mu \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi}\,\lvert\dot{\varphi}\rvert + \omega_0^2 \cdot \varphi = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot s \cdot \alpha_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$
Коэффициенты подбора	$\omega_0 = 3{,}344 rad/s$ $\beta = 0{,}520 rad^{-1}$ $\alpha_0 = 0{,}873$	$\omega_0 = 3{,}348 rad/s$ $\beta = 0{,}518 rad^{-1}$ $\alpha_0 = 0{,}857$	$\omega_0 = 3{,}346 rad/s$ $\beta = 0{,}519 rad^{-1}$ $\alpha_0 = 0{,}864$	$\omega_0 = 3{,}345 rad/s$ $\mu/\omega_0 = -0{,}028$ $\beta = 0{,}684 rad^{-1}$ $\alpha_0 = 0{,}833$
Прогнозируемое значение в градусах φ_{1r} при $s = 0{,}0383$	28,3	28,1	28,2	27,0
Соответствующее значение $\varphi_1 = 0{,}7\varphi_{1r}$	19,8	19,7	19,7	18,9
Значение φ_1, полученное экспериментальным путем, в градусах	19,3			

6.3.7 Для более точного разъяснения последнего пункта был выполнен дополнительный расчет (расчет 3-LQC) с использованием экспериментальных данных для значений крутизны волны $s = 1/60$ и $s = 1/40$ в процедуре подбора вместе с более гибкой линейной + квадратичной + кубической моделью демпфирования с учетом допущения линейности восстанавливающего момента, а именно:

$$\ddot{\varphi} + 2\mu \cdot \dot{\varphi} + \beta \cdot \dot{\varphi}\,\lvert\dot{\varphi}\rvert + \delta \cdot \dot{\varphi}^3 + \omega_0^2 \cdot \varphi = \omega_0^2 \cdot \pi \cdot s \cdot \alpha_0 \cdot \cos(\omega \cdot t). \qquad \text{(N-6.4)}$$

6.3.8 Полученные параметры следующие:

$$\omega_0 = 3{,}345 rad/s;$$
$$\mu/\omega_0 = -0{,}013;$$
$$\beta = 0{,}126 rad^{-1};$$
$$\delta \cdot \omega_0 = 0{,}929 rad^{-2};$$
$$\alpha_0 = 0{,}844.$$

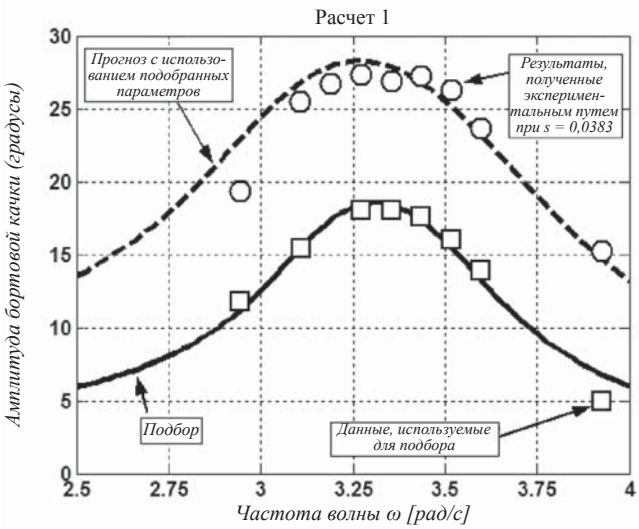

Рис. 6.3
Амплитудно-частотные характеристики для расчета 1

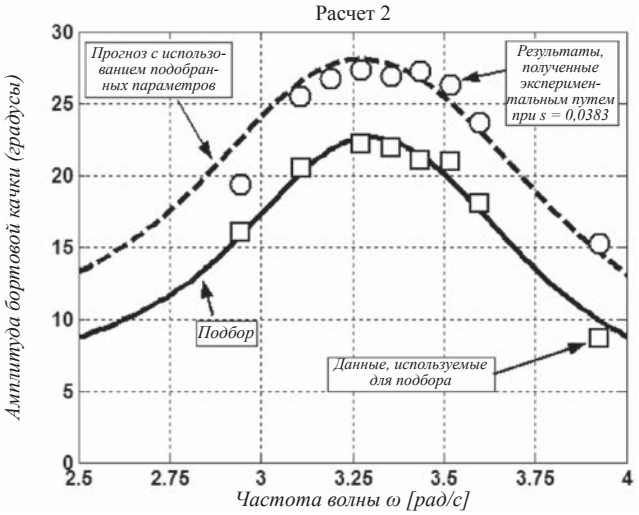

Рис. 6.4
Амплитудно-частотные характеристики для расчета 2

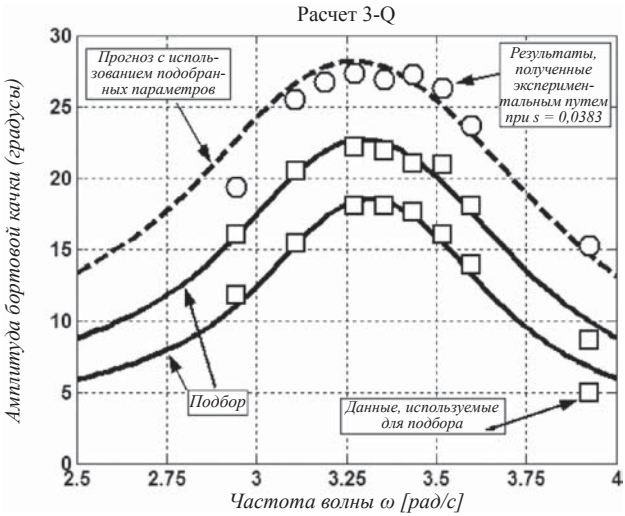

Рис. 6.5
Амплитудно-частотные характеристики для расчета 3-Q

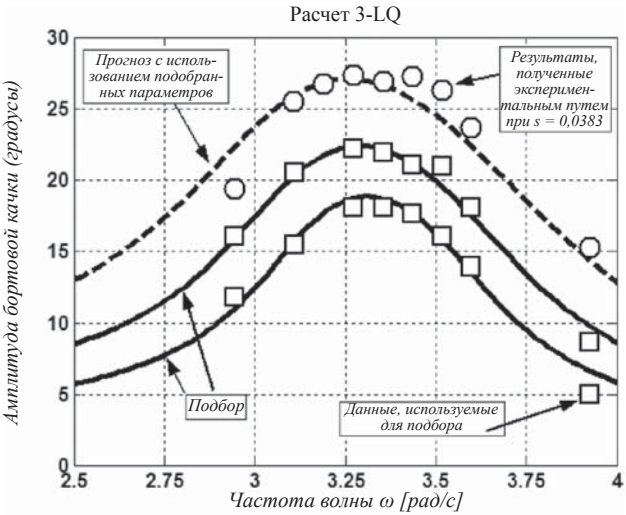

Рис. 6.6
Амплитудно-частотные характеристики для расчета 3-LQ

6.3.9 Можно видеть, что теперь отрицательное линейное демпфирование исчезло, а нелинейная составляющая демпфирования распределена между членами квадратичной и кубической модели. Хотя этот результат более приемлем с физической точки зрения, он не обязательно является наиболее оптимальным в отношении прогнозируемого максимального значения бортовой качки при s = 0,0383. Прогнозируемое максимальное значение амплитудно-частотной характеристики бортовой качки действительно составляет φ_{1r} = 26,6°, что дает φ_1 = 18,6°. Уменьшение прогнозируемого максимального значения бортовой качки, вероятно, обусловлено введением кубического члена в представление демпфирующего момента. Суммарное представление данных показано на рис. 6.7.

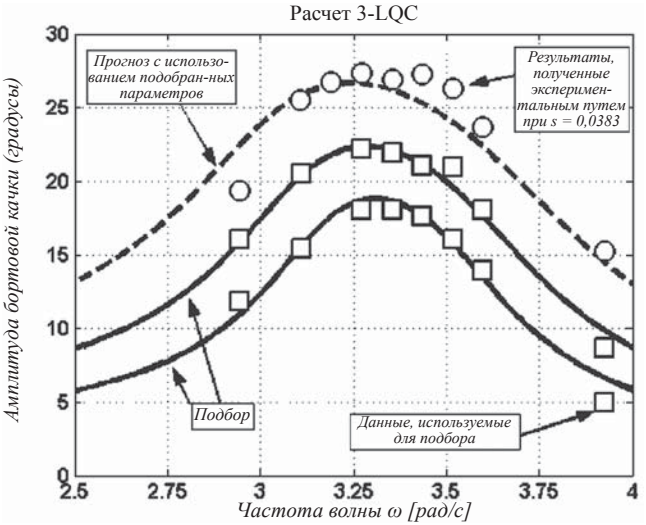

Рис. 6.7
Амплитудно-частотные характеристики для расчета 3-LQC

6.4 ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

6.4.1 МПИ был успешно применен к экспериментальным данным, которые использовались в предыдущих разделах для применения 3-этапной процедуры.

6.4.2 Можно сделать вывод, что для анализируемого судна чисто квадратичная модель демпфирования вместе с чисто линейной моделью для восстанавливающего момента является достаточной для практических целей, чтобы спрогнозировать резонансное значение бортовой качки φ_{1r} при значении крутизны, которое требуется для альтернативной оценки критерия погоды.

6.4.3 Тем не менее, важно подчеркнуть, что для судов, имеющих значительную нелинейность диаграммы статической остойчивости, необходимо ввести нелинейную коррекцию для восстанавливающего момента с целью учета изгиба кривой амплитудно-частотной характеристики, а также соответствующий сдвиг максимального значения по частоте. Кроме того, на основании опыта, приобретенного в процессе данных испытаний, можно предположить, что дополнительные испытания в области низких частот вынужденных колебаний (допустим, $\omega = 0{,}75\omega_0$) могут помочь при подборе эффективной крутизны волны, что позволит учитывать частотную зависимость данного коэффициента. Эта частотная зависимость может быть очень важна в том случае, если изгиб кривой амплитудно-частотной характеристики будет значительным.

6.4.4 В качестве дополнительного замечания можно сказать, что применение различных приближенных моделей в МПИ позволит определить возможный уровень неопределенности, связанный с экстраполяцией.

6.4.5 В анализируемом случае уровень неопределенности составляет приблизительно ± 2°, однако, эта цифра сильно зависит от конкретного анализируемого случая.

6.4.6 Значение эффективной крутизны волны, полученное МПИ (в среднем 0,85), немного отличается от значения, полученного при помощи 3-этапной процедуры (r = 0,759). Это отличие можно легко объяснить, вспомнив, что в случае использования 3-этапной процедуры, демпфирование оценивалось в процессе испытаний по демпфированию бортовой качки, в то время как эффективная крутизна волны – во время испытаний бортовой качки на лаговом волнении с использованием предварительно полученного коэффициента демпфирования. При использовании МПИ, напротив, как демпфирование, так и эффективная крутизна волны определялись на основе одних и тех же экспериментальных данных на лаговом волнении, и по этой причине конечные результаты могут отличаться применительно к отдельным компонентам. Окончательные прогнозы угла φ_{1r}, полученные при использовании МПИ и 3-этапной процедуры, тем не менее, очень близки по своему значению: таким образом, для данного конкретного случая могут рассматриваться две альтернативные процедуры, эквивалентные с практической точки зрения.

6.5 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Francescutto, A., Contento, G., “Bifurcations in Ship Rolling: Experimental Results and Parameter Identification Technique”, Ocean Engineering, Vol. 26, 1999, pp. 1095-1123.

[2] Tzamtzis, S., Francescutto, A., Bulian, G. and Spyrou, K., “Development and testing of a procedure for the alternative assessment of Weather Criterion on experimental basis”, Technical Report, University of Trieste, Dept. Naval Architecture & Environmental Engineering, 2005.

[3] Nayfeh, A.H., Moot, D.T., “Nonlinear Oscillations”, John Wiley & Sons, Inc., 1979.

[4] IMO Document, SLF 47/6/18, “Proposal of Guidelines for a standard model test procedure to determine the steady wind heeling lever”, Submitted by Italy and Japan, 7 July 2004.

[5] IMO Document, SLF 47/6/19, “Proposal of Guidelines for model tests to determine the roll angle for the weather creterion”, Submitted by Japan, 7 July 2004.

[6] IMO Document, SLF 48/4/15, “Comments on draft guidelines for alternative assessment of weather criterion based on trial experiment results”, Submitted by Japan, 8 July 2005.

Российский морской регистр судоходства

СБОРНИК НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Книга восемнадцатая

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства
Ответственный за выпуск *Е. Б. Мюллер*
Главный редактор *М. Ф. Ковзова*
Редактор *М. Р. Маркушина*
Компьютерная верстка *Д. Г. Иванова*

Подписано в печать 04.06.08. Формат 60 × 84/16. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л.: 3,8. Уч.-изд. л.: 3,5. Тираж 200. Заказ 2347.

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8