# ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования



альневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет

С. В. Самсонов

ТЕОРИЯ СУДНА для судоводителя

Учебное пособие для курсантов и студентов направления подготовки 26.05.05. «Судовождение» по дисциплине «Теория и устройство судна»

Владивосток 2021 ДК 629.12.073 ББК 39.42 С 178

### Рецензенты:

Д.т.н., профессор Азовцев А.И. Капитан Стрижнев М.В.

ББК 39.42

С 178 Самсонов С.В. Теория судна для судоводителя: уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2021. 133 с.

В учебном пособии, составленном в соответствии с программой обучения курсантов и студентов судоводительской специальности, приводятся основы теории судна, обеспечивающие компетентность вахтенного помощника капитана морского судна по соответствующим функциям кодекса ПДМНВ и отвечающие требованиям государственного образовательного стандарта.

Пособие предназначено для курсантов и студентов морских учебных заведений и судоводителей.

Ил. 68, табл. 10, библиогр. список – 12 назв.

-		
	Введение	6
1	Основы геометрии корпуса и посадка судна	8
1.1	Система координат	8
1.2	Основные размерения судна	9
1.3	Форма корпуса судна	10
1.4	Посадка судна	12
2	Плавучесть	16
2.1	Условия вертикального равновесия судна	17
2.2	Расчет водоизмещения и координат центра масс судна	17
2.3	Расчет объемного водоизмещения и координат центра вел	
	чины судна	22
2.4	Гидростатические кривые	24
2.5	Изменение осадки при приеме и снятии груза	25
2.6	Изменение осадки при перемене плотности забортной	
	воды	26
3	Остойчивость	27
3.1	Начальная остойчивость	27
3.1.1	Схема образования восстанавливающего момента	27
3.1.2	Расчет метацентрических радиусов	31
3.2	Остойчивость при больших наклонениях	34
3.3	Диаграмма статической остойчивости	36
3.3.1	Параметры диаграммы статической остойчивости	36
3.3.2	Метацентрическая высота на ДСО	38
3.3.3	Построение диаграммы статической остойчивости	39
3.4	Динамическая остойчивость судна	42
3.4.1	Диаграмма динамической остойчивости	44
3.4.2	Опрокидывающий момент судна, испытывающего качку	47
3.5	Нормирование остойчивости	49
3.5.1	Общие требования к остойчивости	49
3.5.2	Учет обледенения	53
3.5.3	Дополнительные требования к остойчивости	54
3.5.4	Предыдущая версия нормирования остойчивости	56
3.6	Проверка остойчивости	57
3.7	Информация об остойчивости	59
3.8	Применение теории остойчивости для оценки эксплуата-	
	ционных ситуаций	61
3.8.1	Перемещение груза	61

Содержание

3.8.2	2Прием/снятие малого груза				
3.8.3	Подвешенный груз	66			
3.8.4	4Жидки й груз со свободной поверхностью				
3.8.5	.5Плавание на попутной волне				
3.8.6	8.6Посадка судна на мель				
3.8.7	<ol> <li>3.7Крен судна на циркуляции</li> </ol>				
3.8.8	8.8Перевозка сыпучих грузов				
3.9	Практическое использование ДСО	77			
3.9.1	Смещение груза	77			
3.9.2Спрямление судна с несимметричной загрузкой					
3.9.3	Спрямление судна с отрицательной начальной МЦВ	79			
3.10	Оперативный контроль остойчивости	80			
4	Непотопляемость	81			
4.1	Нормирование аварийной посадки и остойчивости	81			
4.2	Расчеты аварийной посадки и остойчивости	82			
4.2.1	Категории затопленных отсеков	82			
4.2.2	Коэффициенты проницаемости	83			
4.2.3	Метод приема груза для расчета затопления отсека	84			
4.2.4	Метод постоянного водоизмещения для расчета затопле-				
	ния малого отсека	84			
4.3	Обеспечение непотопляемости судна	85			
4.4	Спрямление аварийного судна				
4.5	Фактор балластировки цистерны	89			
4.6	Информация о непотопляемости судна	89			
	Таблица величин, принятых в части IV «Остойчивость»				
	Правил классификации и постройки морских судов				
	Российского морского регистра судоходства	90			
5	Качка судна	91			
5.1	Характеристики качки судна	91			
5.2	Качка судна на тихой воде	93			
5.3	Качка судна на волнении	97			
5.3.1	Бортовая качка судна на волнении	97			
5.3.2	Нелинейный резонанс бортовой качки	99			
5.3.3	Вертикальная и килевая качка	101			
5.3.4	Качка судна на нерегулярном волнении	101			
5.3.5	Влияние на качку курса и скорости судна	102			
5.3.6	Успокоители качки	104			
6	Управляемость судна	105			

6.1	Поворотливость судна	106
6.2	Устойчивость судна на курсе	108
6.3	Влияние основных элементов судна на управляемость	108
6.4	Влияние условий плавания на управляемость	109
7	Ходкость	111
7.1	Основы гидромеханики	111
7.2	Сопротивление среды движению судна	118
7.2.1	Буксировочное сопротивление и буксировочная мощность	118
7.2.2	Составляющие гидродинамического сопротивления	1198
7.2.3	Практический расчет сопротивления воды движению	
	судна	121
7.3	Движители	122
8	Прочность	126
8.1.8	Общая продольная прочность	126
7.2	Контроль прочности в судовых условиях	129

# ВВЕДЕНИЕ

Безопасность судна, здоровье экипажа и сохранная перевозка груза обеспечиваются в первую очередь надлежащим контролем мореходных качеств судна.

Важнейшим мореходным качеством судна является остойчивость, поскольку потеря остойчивости приводит практически к мгновенной гибели судна, поэтому контроль остойчивости и ее поддержание на надлежащем уровне является важнейшей задачей судоводителя. Контроль и поддержание остойчивости необходимо осуществлять не только на ходу, но и на стоянке, включая стоянку у причала, поскольку известны случаи опрокидывания судов не только в море, но и у причала (например, п/б «Обухов», т/х «Паллада»).

Остойчивость судна взаимосвязана с другими мореходными качествами и, прежде всего, с плавучестью судна. В свою очередь, изменение плавучести и остойчивости при аварийном затоплении отсека судна определяют непотопляемость судна.

Выбор оптимальных курса и скорости, а также грамотная загрузка судна, условиях позволяет иметь приемлемые параметры качки при плавании в штормовых.

Контроль за состоянием поверхности корпуса и винто-рулевой группы позволяет обеспечивать приемлемую ходкость и избегать излишнего расхода топлива.

Управляемость судна обеспечивает надлежащее маневрирование в любых обстоятельствах.

Таким образом, в учебном пособии рассматриваются плавучесть, остойчивость, качка и ходкость судна, а также связанная с мореходными качествами, но не относящаяся к ним прочность судна.

В данное учебное пособие включены все разделы теории судна. Объем материала соответствует требованиям к компетентности вахтенного помощника капитана по функции Судовождение на уровне эксплуатации по разделам Наблюдение за погрузкой, размещением, креплением и выгрузкой грузов, а также меры предосторожности по отношению к ним во время плавания; по функции Управление операциями судна и забота о людях на уровне эксплуатации, раздел Поддержание судна в мореходном состоянии и требованиям к компетентности капитанов и старших помощников по функции обработки и размещения груза на уровне управления по разделам Планирование и обеспечение безопасной погрузки, размещения, крепления и ухода за грузом в течении рейса и выгрузки, Контроль за посадкой, остойчивостью и напряжениями корпуса Кодекса по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты. Материал пособия составляет курс лекций по теории и устройству судна, читаемых курсантам-судоводителям Государственного технического рыбохозяйственного университета.

### 1 Основы геометрии корпуса и посадка судна

### 1.1 Система судовых координат

Мореходные качества судна определяются формой погруженной части его корпуса и положением точек приложения вертикальных сил, действующих на судно, центра масс и центра величины. Форма корпуса определяется точками, составляющими его внешнюю поверхность. Положение любой точки в пространстве определяются ее координатами.

Система координат, используемая для описания геометрии корпуса и решения задач статики судна, решаемых судоводителем в процессе его эксплуатации, образуется линиями пересечении трех взаимно перпендикулярных плоскостей – основной, диаметральной и плоскости мидель-шпангоута. Эти плоскости называются плоскостями теоретического чертежа.

Основная плоскость (ОП) – горизонтальная плоскость, проходящая по внутренней поверхности горизонтального киля. У судов, имеющих так называемый построечный дифферент (например, СТР-503), основная плоскость проходит через линию пересечения внутренней поверхности горизонтального киля с плоскостью мидель-шпангоута.

*Диаметральная плоскость (ДП)* – продольная вертикальная плоскость симметрии корпуса судна.

Плоскость мидель-шпангоута ( $\otimes$ ) – поперечная вертикальная плоскость, равноудаленная от носового и кормового перпендикуляров, рис. 1.1.

Проекция основной плоскости на диаметральную называется основной линией (ОЛ).

Носовой перпендикуляр (НП) – линия, перпендикулярная основной плоскости, проходящая через крайнюю носовую точку конструктивной ватерлинии (КВЛ).

Кормовой перпендикуляр (КП) – проходит по оси баллера руля или через точку, отстоящую от НП на 96 % длины судна по конструктивную ватерлинию (выбирается точка, более отдаленная от НП).

Ватерлинией (ВЛ) называется сечение корпуса судна плоскостью, совпадающей с невзволнованной поверхностью воды – плоскостью ватерлинии. Конструктивная ватерлиния (КВЛ) соответствует посадке судна, имеющего расчетную (при проектировании) нагрузку. Обычно, КВЛ соответствует летней грузовой ватерлинии.

Линия пересечения  $O\Pi$  и  $Д\Pi$  образует *ось абсцисс* OX (положительное направление - в нос судна, абсциссы отсчитываются от  $\otimes$ ); линия пересечения  $O\Pi$  и  $\otimes$  - *ось ординат* OY (положительное направление – в правый борт, ординаты отсчитываются от  $Д\Pi$ ); линия пересечения  $Д\Pi$  и  $\otimes$  - ось *аппликат* OZ (положительное направление – вверх, аппликаты отсчитываются от  $O\Pi$ ). В судовых документах часто аппликаты называются возвышением над  $O\Pi$  или  $O\Pi$ .

Уравнения плоскостей, параллельных плоскостям теоретического чертежа имеют вид:

X = 5 - плоскость, параллельная плоскости мидель-шпангоута, отстоящая от  $\otimes$  на 5 м в нос судна, т.е. плоскость соответствующего теоретического шпангоута;

Y = -2 - плоскость, параллельная ДП, отстоящая от ДП на 2 м влево;

Z = 6 – плоскость, параллельная ОП, т.е. плоскость теоретической ватерлинии, соответствующей осадке 6 м.

Плоскости теоретического чертежа показаны на Рис. 1.1.



Рис. 1.1. Судовые координаты и основные размерения

# 1.2 Основные размерения судна

На рис. 1.1 показаны основные размерения судна. По тексту ниже в скобках указаны обозначения указанных параметров в документах IMO. *L*<sub>нб</sub> (*L*<sub>OA</sub>) – *длина наибольшая* – расстояние между крайними точками корпуса судна;

 $L_{nn}$  ( $L_{PP}$ ) – *длина между перпендикулярами* – расстояние от *НП* до *КП*, используется в качестве теоретической (расчетной) длины *L*;

*В – ширина судна* (теоретическая) – расстояние от борта до борта по линии пересечения плоскости мидель-шпангоута с плоскостью конструктивной ватерлинии (для судна с прямостенными бортами – расстояние между бортами (внутренними поверхностями бортовой обшивки) в плоскости мидель-шпангоута);

 $d - ocad\kappa a$  (для теоретического чертежа) – расстояние между основной плоскостью и плоскостью  $B\Pi$ ;

D – высота борта – расстояние между основной плоскостью и палубой переборок (самой верхней непрерывной палубой, до которой доходят поперечные водонепроницаемые переборки, разделяющие судно на отсеки непотопляемости);

*F* – *высота надводного борта* – наименьшее расстояние от палубы переборок до плоскости *ВЛ*.

1.3 Форма корпуса судна

Форма корпуса, как было указано, определяет большинство мореходных качеств судна. В общем случае, форму корпуса судна невозможно описать аналитически. Для описания формы корпуса судна используется *теоретический чертеж* – совокупность проекций сечений корпуса судна плоскостями, параллельными диаметральной, основной и плоскости мидель-шпангоута (рис. 1.2). Теоретический чертеж описывает форму корпуса внутри наружной обшивки.

Проекция теоретического чертежа *Бок* образована проекциями сечений корпуса плоскостями, параллельными ДП, на ДП. Кривые на проекции *Бок – батоксы*. Всего используется 5...7 сечений.

Проекция *Корпус* образована плоскостями, параллельными Ø, на Ø, кривые – шпангоуты. В силу симметрии корпуса судна изображаются половины шпангоутов: справа – от мидель-шпангоута в нос и слева – от мидель-шпангоута в корму. Всего используется 11 или 21 *теоретический шпангоута*, начиная с нулевого, соответствующего носовому перпендикуляру. Расстояние между соседними теоретическими шпангоутами называется *теоретической шпацией*. Если используется 11 теоретических щпангоутов, то длина шпации равна *L*/10, если 21, то - *L*/20.



Рис. 1.2. Теоретический чертеж судна

Помимо теоретического чертежа для описания формы погруженной части корпуса используются коэффициенты полноты:

-  $C_B = \frac{\nabla}{LBd}$  - коэффициент общей полноты – отношение объ-

*емного водоизмещения*  $\nabla$  (объема погруженной части корпуса) к объему параллелепипеда со сторонами, равными длине *L*, ширине *B* и осадке судна *d*;

-  $\alpha = \frac{S}{LB}$  - коэффициент полноты ватерлинии – отношение

*площади ватерлинии S* к площади прямоугольника со сторонами, равными длине *L* и ширине судна *B*;

-  $\beta = \frac{A_{\odot}}{Bd}$  - коэффициент полноты мидель-шпангоута - отно-

шение *площади мидель-шпангоута*  $A_{\otimes}$  к площади прямоугольника со сторонами, равными осадке d и ширине судна B;

-  $\varphi = \frac{\nabla}{LA_{\otimes}}$  - коэффициент продольной полноты – отношение

объемного водоизмещения к объему призмы с основанием, равным площади мидель-шпангоута и высотой, равной длине судна;

-  $\chi = \frac{\nabla}{Sd}$  - коэффициент вертикальной полноты – отношение

объемного водоизмещения  $\nabla$  к объему призмы с основанием, равным площади ватерлинии *S* и высотой, равной осадке судна *d*.

В приведенных формулах в качестве длины и ширины судна используются длина и ширина действующей ватерлинии.

1.4 Посадка судна

*Посадкой* называется положение судна относительно поверхности воды.

Параметры посадки:

 $\theta$ - *угол крена* – угол между ДП и вертикалью (линией отвеса), рис. 1.3, а;

*ψ* - *угол дифферента* – угол между плоскостью мидель-шпангоута и вертикалью, рис. 1.3, б.

а) угол крена

б) угол дифферента



Рис. 1.3. угол крена и угол дифферента

*Осадки на перпендикулярах* – рассчитываются по формулам либо определяются по специальным диаграммам:

 $d_{Hn}$  – *осадка на носовом перпендикуляре* – длина отрезка *НП* от *ОП* до *ВЛ*;

 $d_{\kappa n}$  – *осадка на кормовом перпендикуляре* – длина отрезка *КП* от *ОП до ВЛ*;

 $d_{\otimes} = \frac{d_{_{\rm HI}} + d_{_{\rm HI}}}{2} - ocad\kappa a на миделе - расстояние от ОП до ВЛ в$ 

плоскости мидель-шпангоута.

Осадки по шкалам марок углубления – снимаются со шкал марок углубления.

На бортах судна для снятия (визуального определения) осадки наносятся марки углублений, выполненные в виде чисел, выполненных арабскими цифрами, высотой 0,1 м, рис. 1.4. Располагаются марки максимально близко к прохождению соответствующих перпендикуляров и мидель-шпангоута, но доступно к снятию. Нижняя кромка числа показывает углубление – расстояние до нижени кромки киля (НКК) в соответствующем месте.



Рис. 1.4. Носовая шкала марок углубления

Погрешность, вносимая в расчеты в результате использования значений осадки, снятой по маркам углублений, вполне приемлема для большинства эксплуатационных ситуаций, поэтому в практике используется общее понятие осадки, которое в одном случае (при снятии осадки) предполагает соответствующее углубление, в другом (при расчете) – осадку на перпендикуляре. Поскольку значения осадки в основном используются для определения водоизмещения, то для получения наиболее точного результата необходимо определять осадку на перпендикулярах. Суда, для которых важным является точность определения водоизмещения по снятым осадкам (например, балкеры) снабжаются *схемой марок углублений*, позволяющей определить осадки на перпендикулярах по снятым со шкал углублений осадкам, рис. 1.5.

При существенных размерах судна и неравномерной загрузке корпус судна может иметь изгиб, называемый *прогибом*, если более

загружена средняя часть, рис. 1.6, а, и *перегибом*, если более загружены оконечности, рис. 1.6, б. Максимальное отклонение нейтральной оси от своего положения в ненапряженном состоянии называется стрелкой прогиба/перегиба *f*. Прогиб увеличивает фактическую среднюю осадку, перегиб – уменьшает. У судна, на котором возникает необходимость учета прогиба/перегиба корпуса, в Информации об остойчивости приводится соответствующая схема расчета.



Рис. 1.5. Схема марок углублений

На практике для определения посадки используются следующие параметры:

heta - угол крена;  $d_{\mu}$  - осадка носом;  $d_{\kappa}$  - осадка кормой;  $d_{cp} = \frac{d_{\mathrm{H}} + d_{\kappa}}{2}$  - средняя осадка;  $D_{f} = d_{\mu} - d_{\kappa} - \partial u \phi \phi e p e h m.$ 

Для определения посадки необходимо задать три независимых параметра -  $d_{n}$ ,  $d_{\kappa}$ ,  $\theta$  или  $d_{cp}$ ,  $D_{f}$ ,  $\theta$ .

Осадки и дифферент определяются и фиксируются с точностью до 0,01 м, угол крена – с точностью до 1°.

а) прогиб судна



б) перегиб судна



Рис. 1.6. Изгиб корпуса судна: а) прогиб судна; б) перегиб судна

### 2 Плавучесть

Плавучестью называется способность судна поддерживать вертикальное равновесие с заданной посадкой под действием приложенных к судну силы тяжести и силы плавучести (поддержания или выталкивающей силы). Плавучесть судна обеспечивается погруженным объемом водонепроницаемого корпуса. При заданной загрузке судна надводный объем корпуса (объем корпуса выше ватерлинии) определяет запас плавучести. Запасом плавучести называется дополнительная масса груза, который можно принять на судно, для его погружения по палубу переборок. В свою очередь, запас плавучести определяется высотой надводного борта. Минимальная высота надводного борта, а, следовательно, и минимальный запас плавучести для каждого судна ограничивается грузовой маркой, наносимой на борта судна в районе мидель-шпангоута в соответствии с требованиями Международной конвенции о грузовой марке (КГМ-66). Требования КГМ-66 и зоны и время действия зимней и тропической марок приведены в Правилах Регистра [4]. Грузовая марка представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Грузовая марка

Разница между зимней и летней, а также летней и тропической марками равна 1/48 осадки по летнюю грузовую марку.

Таким образом, действующая грузовая марка определяет максимальную осадку судна для действующих условий плавания и соответствующие этой осадке *водоизмещение* и *дедвейт*.

# 2.1 Условия вертикального равновесия судна

Судно как всякое тело находится в равновесии, если сумма приложенных к нему внешних сил равна нулю и сумма моментов этих сил равна нулю. Соответственно, вертикальное равновесие выражается равенством нулю сумм вертикальных сил и моментов вертикальных сил.

При рассмотрении условий вертикального равновесия все приложенные к судну силы сводятся к двум равнодействующим – силе *тяжести g* $\Delta$  и силе *плавучести (поддержания)*  $\gamma$  *g* $\nabla$ . Условие равновесия выражается равенством

$$g\Delta = \gamma g \nabla, \ \kappa \mathrm{H};$$
  
 $\Delta = \gamma \nabla, \ \tau,$ 
(2.1)

в масштабе масс

где  $\Delta$  - водоизмещение (полная масса) судна;  $\nabla$  - объемное водоизмещение судна (объем погруженной части корпуса судна, равный объему вытесненной судном воды);  $\gamma$  - плотность забортной воды (плотность воды зависит от ее солености; стандартное значение плотности для морской воды принимается  $\gamma = 1,025$  т/м<sup>3</sup>, для пресной -  $\gamma = 1,000$  т/м<sup>3</sup>); g = 9,81 м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения.

Сила тяжести действует вертикально вниз (перпендикулярно действующей ватерлинии) и приложена к точке G – центру масс (тяжести) судна (ЦМ); сила поддержания действует вертикально вверх и приложена к точке C – центру величины (центру плавучести) судна (ЦВ). ЦВ находится в центре объема судна (в центре тяжести погруженного объема корпуса). Схема действующих сил представлена на рис. 2.2.

Выражение (2.1) называется основным уравнением плавучести и выражает закон Архимеда.

Основное уравнение плавучести выражает условие равенства сил. Равенство моментов этих сил при отсутствии крена и дифферента выражается нахождением точек *G* и *C* на одной вертикали (поскольку силы тяжести и поддержания являются вертикальными, то нахождение на одной вертикали точек их приложения свидетельствует о совпадении их линий действия, следовательно плечо этой пары сил и момент равны нулю).



Рис. 2.2. Схема вертикальных сил

## 2.2 Расчет водоизмещения и координат центра масс судна

Расчет водоизмещения судна и координат его ЦМ производится на основании известной из курса теоретической механики *теоремы* о координатах центра масс системы материальных тел.

На судне расчет водоизмещения и координат *ЦМ* производится перед каждым рейсом для состояния судовых запасов «на отход» и «на приход», а также в рейсе, если загрузка изменяется.

Для расчета водоизмещения и координат ЦМ судна используются специальный бланк, называемый *таблицей нагрузок*, образец которого представлен на рис. 2.3.

В первый столбец таблицы нагрузок вносятся все составляющие водоизмещения судна. Строки таблицы, в которые внесены составляющие водоизмещения называются статьями нагрузки.

Первая составляющая водоизмещения – порожнее судно; водоизмещение судна порожнем  $\Delta_0$  и координаты ЦМ порожнего судна приведены в специальном разделе Информации об остойчивости.

Вторая составляющая - *суммарная масса экипажа, провизии и снабжения*  $P_3$ . Поскольку эта статья нагрузки невелика и изменяется от рейса к рейсу мало, то иногда масса экипажа, провизии и снабжения включается в водоизмещение порожнего судна.

Третья составляющая – *судовые запасы*  $P_3$ ; для каждого вида запасов – тяжелого и дизельного топлива, смазочных масел и пресной воды, а так же загрязненные воды, вносятся цистерны,

содержащие соответствующие запасы. Цистерны объединяются в группы по виду запасов.

Четвертая составляющая соответствует *перевозимому грузу*  $P_{cp}$ ; если в грузовых помещениях груз однородный, то в строки таблицы вносятся грузовые помещения, если груз неоднородный, то каждой партии груза будет соответствовать своя строка. В таблицу также вносится палубный груз и груз в танках.

Пятая составляющая – жидкий балласт  $P_{\delta}$  – забортная вода, принимаемая в специальные (балластные) танки для изменения параметров посадки и остойчивости.

Ниже располагается итоговая статья таблицы нагрузок, обычно имеющая название *Водоизмещение*.

Во второй столбец таблицы нагрузок в каждую строку вносятся массы соответствующих статей. Сумма масс всех статей нагрузки (сумма чисел в столбце 3) составляет водоизмещение судна  $\Delta = \Delta_0 + P_3 + P_3 + P_2 + P_6$ , состоящее из постоянной величины ( $\Delta_0$ ) и суммы переменных грузов, называемой дедвейтом судна  $Dw = P_3$  $+ P_3 + P_{cp} + P_6$ . Максимальная величина водоизмещения и дедвейта определяются осадкой по действующую грузовую марку.

В третий столбец таблицы нагрузок в каждую строку вносятся значения аппликаты ЦМ соответствующей статьи. Если в Информации об остойчивости судна отсутствуют данные для расчета аппликаты ЦМ частично заполненных цистерн, то для этих цистерн аппликаты ЦМ берутся, как для полных, а погрешность, вносимая в расчет  $z_g$  судна, идет в запас остойчивости.

В пятый столбец таблицы нагрузок в каждую строку вносятся значения абсциссы ЦМ соответствующей статьи.

В седьмой столбец таблицы нагрузок вносятся поправки на свободную поверхность для жидких грузов и запасов. Сумма поправок на свободную поверхность  $\sum \delta M_z$  (сумма чисел столбца 8) используется для расчета расчетного (исправленного)  $M_z$  и поправки метацентрической высоты  $\delta h$ . Порядок учета поправок приводится в Информации об остойчивости.

В четвертый столбец таблицы нагрузок в каждую строку вносятся значения статического момента статьи относительно основной плоскости – произведение массы соответствующей статьи на ее аппликату (произведение чисел из 2 и 3 столбцов статьи). Сумма статических моментов статей относительно ОП (сумма чисел, вписанных в четвертый столбец) составляет статический момент водоизмещения относительно основной плоскости - M<sub>z</sub>. В шестой столбец таблицы нагрузок в каждую строку вносятся значения статического момента статьи относительно плоскости мидель-шпангоута – произведение массы соответствующей статьи на ее абсциссу (произведение чисел из 2 и 5 столбцов статьи). Сумма статических моментов статей относительно мидель-шпангоута (сумма чисел, вписанных в шестой столбец) составляет статический момент водоизмещения относительно мидель-шпангоута –  $M_x$ .

Координаты ЦМ судна определяются

$$z_g = \frac{M_z}{\Delta}; \ x_g = \frac{M_x}{\Delta}.$$

Значения координат ЦМ судна записываются в 3 и 5 столбцы строки «Водоизмещение».

Поскольку эксплуатация судна со статическим креном не допускается, все запасы и грузы размещаются симметрично относительно ДП, вследствие чего, ЦМ судна располагается в ДП, поэтому в бланке отсутствуют столбцы для расчета ординаты ЦМ судна  $y_g$ . Если невозможно обеспечить симметричное распределение нагрузки, то возникший вследствие этого момент рассчитывается и компенсируется отдельным образом.

Рассчитанные значения координат *ЦМ* судна и водоизмещения используются для проверки остойчивости и расчета посадки судна.

На рис. 2.3 показана таблица нагрузок, соответствующая типовому случаю загрузки транспортного рефрижератора «Олюторский залив».

Приведенная расчетная схема не является универсальной. Есть расчетные схемы, в которых вертикальные моменты рассчитываются не относительно  $O\Pi$ , а относительно другой плоскости, например, относительно плоскости  $z_0 = 5,0 m$ ; в другой расчетной схеме определяются не водоизмещение и статические моменты водоизмещения, а дедвейт и статические моменты дедвейта и т.п.

Выбор расчетной схемы осуществляется по рекомендации классификационного общества, осуществляющего надзор за судном (в России – Регистр морского судоходства РФ). Для конкретного судна приведенная в его Информации об остойчивости расчетная схема является обязательной.

Судно с однородным г	JJ JOM D I	nomax (p	1.407 1	. / 1 )		
Статья нагрузки	<b>Р</b> , т	<b>Z</b> , м от ОЛ	$M_z$ , TM	<b>Х, м</b> от ⊗	<i>М</i> <sub><i>x</i></sub> , тм	Попр. <i>б</i> М <sub>7</sub> . тм
Сулно порожнем	7261	0.0	7330	-13.8	-100383	
Экипаж провизия снабжение	11.5	0.0	20	-15.0	-100505	
Танк 1 20 расу кот топ ПрБ	11.5	11.85	15	-36.5		
Танк 1.20 расх.ког. топ. прв	527	11.05	507	-50.5	1010	
Танк 1.22 расходный ДП	52.7	11.55	597	26 77	-1919	
Танк 2.0 расходный ЛВ	1.1	11.3	87	-30.77	-283	
Танк утечн. масла 5.2 прв	0.3	0.7	0	-35.45	-27	
Танк сепарир.масла 5.5 ЛБ	7.2	0.30	4	-40.00	-331	
Танк сепарир.масла 5.4 Прв	1.2	0.62	4	-40.24	-355	
Танк сточн. масла 5.5 ДП	10.0	0.93	15	-47.65	-763	
Танк утечн. масла 3.7 ЛБ	2.0	1.10	2	-55.45	-107	
Танк отраоот.масла 3.8 ДП	5.9	0.35	2	-57.35	-338	
Танк цилинд.масла 3.9 Прь	3./	10.70	40	-65.30	-242	
Танк запасн.масла 3.10 Прь	10.4	11.13	116	-65.14	-677	
Танк запасн масла 3.11 ПрБ	5.2	10.85	56	-69.10	-359	
Танк охлажд. воды 4.1 ЛБ	17.1	0.98	17	-40.94	-700	
Танк кот. питат. в. 4.2 ПрБ	57.8	7.25	419	-57.96	-3350	77
Танк кот.питат. в. 4.3 ЛБ	57.8	7.25	419	-57.96	-3350	77
Танк питьевой воды 4.6 ДП	24.0	11.74	282	-66.03	-1585	76
Танк охлажд. воды 4.8 ДП	2.4	3.00	7	-62.81	-151	
Фекальный танк 3.12 ЛБ	7.9	11.37	90	-36.14	-286	
Танк гр. в. мед. бл. 3.16 ЛБ	2.1	11.86	25	-24.84	-52	
Трюм 1 низ	492.0	3.78	1860	40.86	20103	
Трюм 1 середина	542.0	7.21	3908	41.73	22618	
Трюм 1 верх	721.0	11.46	8263	41.88	30195	
Трюм 2 низ	755.0	3.73	2816	22.43	16935	
Трюм 2 середина	701.0	7.18	5033	23.03	16144	
Трюм 2 верх	779.0	11.42	8896	22.97	17894	
Трюм 3 низ	909.0	3.69	3354	-4.46	-4054	
Трюм 3 середина	782.0	7.18	5615	-4.81	-3761	
Трюм 3 верх	849.0	11.42	9696	-4.65	-3948	
Трюм 4 низ	845.0	3.72	3143	-24.37	-20593	
Трюм 4 серелина	780.0	7.18	5600	-24.93	-19445	
Трюм 4 верх	861.0	11.42	9833	-24.87	-21413	
Груз на палубе	0.0		0		0	
Всего балласта	0.0		0		0	
Волоизмешение	16578 5	8 67	143747	.3 93	-91296	230
Всего поправка $\delta M_{-}$ тм	1007010	0.07	230	0.70	/12/0	200
Момент М. расчетный тм			143977			
IIM сулна Z <sub>2</sub> расчетный, им			8 68			
IIM судна Z <sub>g</sub> допустимый, м			9.04			
Аппликата метацентра Z <sub>m</sub> м			9.32			
Без попра	авки h <sub>o</sub> = Z	т <b>-</b> Ze. M	0.65		К*=3 15	
Метацентрическая высота Поправка	. <u></u>	,	0.05		5.15	
Исправи	-uuagh = h	- Sh M	0.64			
Средняя	d м	- 011, M	7.96			
Осалка Носом	d <sub>u</sub> M		676			
Кормой	dк. м		9,15			

Случаи нагрузки № 1.Рейс дальностью 5000 миль ( приход) Судно с однородным грузом в трюмах (ц = 1.487 м<sup>3</sup>/т)

Рис. 2.3. Таблица нагрузок и параметров остойчивости и посадки

# 2.3 Расчет объемного водоизмещения и координат центра величины судна

Значение объемного водоизмещения и его распределение по длине и высоте судна характеризуют *строевые по шпангоутам и ватерлиниям*, представленные на рис. 2.4.

Строевая по шпангоутам (рис. 2.4,а) представляет собой огибающую площадей шпангоутов в координатах x - A (абсцисса – погруженная площадь шпангоута), вычисленных для заданной ватерлинии. Площадь, ограниченная строевой, соответствует объемному водоизмещению  $\nabla$ , абсцисса  $\mu T$  этой площади – величине  $x_c$ . Величина объемного водоизмещения и абсцисса  $\mu B$  определяются выражениями

$$\nabla = \int_{-L/2}^{L/2} Adx ; x_c = \frac{1}{V} \int_{-L/2}^{L/2} Axdx .$$
 (2.4)

Приведенные выражения соответствуют использованию 21 теоретического шпангоута и, соответственно, размер теоретической шпации  $\delta L = L/20$ .

Входящие в выражения определенные интегралы вычисляют по правилам приближенного интегрирования. Используя способ трапеций, получаем

$$\nabla = \delta L[A_1 + A_2 + \dots + A_{19} + \frac{1}{2}(A_0 + A_{20})]; \qquad (2.5)$$

$$x_{c} = [(\delta L)^{2} / \nabla] [9, 5(A_{0} - A_{20}) + 9(A_{1} - A_{19}) + \dots + (10 - n) (A_{n} - A_{20 - n})].$$
(2.6)

Строевая по ватерлиниям (рис. 2.3, б) представляет собой огибающую площадей ватерлиний в координатах z - S. Площадь, ограниченная строевой, соответствует объемному водоизмещению V, аппликата  $\mu T$  этой площади – величине  $z_c$ . Величина объемного водоизмещения и абсцисса  $\mu B$  определяются выражениями

$$\nabla = \int_{0}^{d} Sdz \, ; \, z_{c} = (1/\nabla) \int_{0}^{d} Szdz \, .$$
(2.7)

Используя способ трапеций для вычисления определенных интегралов, входящих в приведенные выражения, получаем

 $\nabla = \delta d[S_1 + \dots + S_{m-1} + \frac{1}{2}(S_0 + S_m)];$  $z_c = [(\delta d)^2 / \nabla][S_1 + S_2 + \dots + (m-1)S_{m-1} + (S_0 + (2m-1)S_m)/4].$  (2.8)

В приведенных выражениях m – число ватерлиний;  $\delta d = d/m$  – расстояние между соседними теоретическими ватерлиниями.



Рис. 2.4. Строевые по шпангоутам (а) и ватерлиниям (б)

Для определения объемного водоизмещения  $\nabla$  и абсциссы ЦВ  $x_c$  судна с дифферентом используют различные диаграммы. Наиболее распространенной диаграммой является *масштаб Бонжана* (рис. 2.5), представляющий собой совокупность интегральных кривых площадей шпангоутов A(z), рассчитанных для 21 теоретического шпангоута для значений z *от* 0 *до*  $z_{max}$ , соответствующего палубе переборок.

Для определения  $\nabla$  и  $x_c$  на масштабе Бонжана необходимо на соответствующих шкалах отложить осадки носом и кормой, провести ватерлинию и отметить точки ее пересечения с линиями теоретических шпангоутов. Площади шпангоутов  $A_i$  снимаются по горизонтали и представляют собой расстояние от точки пересечения ватерлинии с линией шпангоута до соответствующей интегральной кривой. Подставляя снимаемые с масштаба Бонжана значения  $A_i$  в выражения (2.5) и (2.6), получают искомые  $\nabla$ и  $x_c$ .



Рис. 2.5. Масштаб Бонжана

# 2.4 Гидростатические кривые

Гидростатические кривые или кривые элементов теоретического чертежа представляют собой совокупность кривых водоизмещения  $\Delta$ , объемного водоизмещения  $\nabla$ , координат ЦВ  $x_c$  и  $z_c$ , площади ватерлинии S, абсциссы ЦТ площади ватерлинии  $x_f$ , моментов инерции площади ватерлинии  $I_x$  и  $I_{yf}$ , метацентрических радиусов г и R, коэффициентов полноты корпуса  $\alpha$ ,  $\beta u C_B$  и других параметров плавучести и остойчивости, выражающих зависимость соответствующих параметров от осадки судна d. Шкала осадки располагается вдоль горизонтальной оси диаграммы.

В некоторых случаях указанные параметры приводятся в виде таблицы, называемой *таблицей гидростатических* элементов. Общий вид гидростатических кривых показан на рис. 2.6. Масштабы кривых выбирают исходя из обеспечения необходимой точности и удобства их использования в практических расчетах.

Совокупность кривых r и  $z_m$  называют метацентрической диаграммой, а зависимость  $\Delta = f(d) - грузовым размером.$ 



Рис. 2.6. Гидростатические кривые

2.5 Изменение осадки при приеме и снятии груза

Методика расчета изменения осадки при приеме или снятии (расходовании) груза определяется соотношением массы груза и водоизмещения.

Рассмотрим прием малого груза.

Малым называется такой груз, при приеме или снятии которого не изменяется форма и площадь ватерлинии. Такое возможно, если борта судна в районе ватерлинии прямостенные. По величине малый груз может достигать 15 % водоизмещения. Определить предельную величину малого груза для конкретной загрузки можно при помощи гидростатических кривых или гидростатических таблиц.

На кривых малому грузу соответствует прямой участок грузового размера (от точки действующего водоизмещения до

соответствующей границы прямого участка), в гидростатических таблицах – участок постоянных значений изменения осадки.

Таким образом, при приеме малого груза массой P приращение погруженного объема  $\delta v$  имеет форму прямой призмы, имеющей в основании ватерлинию судна площадью S и высоту, равную приращению осадки  $\delta d$ . Из сказанного следует

$$\delta v = \frac{P}{\gamma} = S \,\delta d.$$

(2.10)

Подставив в (2.10)  $\delta d = l \ c_M = 0,01 \ M$ , получим выражение числа тонн на сантиметр осадки

$$y = 0,01 \ \gamma S.$$
 (2.11)

В документах *ИМО* число тонн на сантиметр осадки обозначается *ТРС*.

В итоге, при приеме малого груза массой *P* изменение осадки судна определится выражением  $\delta d = \frac{P}{q}$ , см. (2.12)

Если принимаемый груз нельзя считать малым, то изменение осадки можно определить по грузовому размеру или по грузовой шкале – таблице зависимости водоизмещения от осадки для различных значений плотности забортной воды.

2.6 Изменение осадки при перемене плотности забортной воды

Расчет изменения осадки при перемене плотности забортной воды особенно актуально при заходе судна в порт, расположенный в устье реки.

Из основного уравнения плавучести  $g\Delta = g\gamma \nabla$  следует, что при изменении плотности пропорционально изменяется объемное водоизмещение  $\gamma_2 \nabla_2 = \gamma_1 \nabla_1$ , где индексы 1 и 2 соответствуют разным значениям плотности.

Обозначив изменение погруженного объема  $\delta v = \nabla_2 - \nabla_1$ , получим

$$\delta v = \nabla_1 \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_2}.$$

Предполагая, что изменение погруженного объема имеет форму прямой призмы, основанием которой является ватерлиния площадью *S*, а высота равна изменению осадки, получим

$$\delta d = \frac{\overline{\gamma_1}}{s} \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_2}.$$
(2.13)

### 3 Остойчивость

Остойчивостью называется способность судна, наклоненного внешним воздействием, возвращаться в исходное положение после прекращения воздействия, вызвавшего наклонение.

Различают остойчивость поперечную и продольную, статическую и динамическую, начальную и остойчивость при больших наклонениях.

На практике под термином «остойчивость» без определения предполагается начальная статическая поперечную остойчивость и/или ее показатель – начальная поперечная метацентрическая высота.

3.1 Начальная остойчивость

3.1.1 Схема образования восстанавливающего момента

Рассмотрим *малое статическое поперечное равнообъемное наклонение судна* (наклонение, в процессе которого водоизмещение судна не изменяется). Схема образования восстанавливающего момента при наклонении судна показана на рис. 3.1.

Предположим, что в исходном положении крен отсутствует, а для простоты изображения на схеме показываем наклонение ВЛ.

В начальный момент судно находилось в равновесии под действием силы тяжести  $g\Delta$  и равной ей силы плавучести  $g\gamma V$ , находившихся на одной линии. Под воздействием внешнего *кренящего момента*  $M_{\kappa p}$  судно наклонилось на угол крена  $\theta$ , при этом UB сместился в сторону наклонения и сила поддержания совместно с силой тяжести создали восстанавливающий момент  $M_6$ , равный по величине кренящему моменту  $M_6 = M_{\kappa p}$ . Равенство кренящего и восстанавливающего моментов выражает основной закон статических наклонений. Смещение UB в сторону наклонения обусловлено тем, что при наклонении судна один борт (в приведенной схеме – правый) погружается в воду, а другой (левый) выходит из воды, это приводит к перераспределению погруженного объема корпуса судна и как следствие, смещение центра объема.

Согласно *теореме Эйлера*, ось малого равнообъемного наклонения проходит через *ЦТ* площади, действующей *ВЛ*. Поскольку на приведенной схеме в начальный момент крен отсутствовал, то в силу симметрии корпуса *ЦТ* площади действующей *ВЛ* находился в *ДП*, в этой точке пересекаются ватерлинии судна *ВЛ* и *ВЛ*. При малых наклонениях кривую центра величины  $CC_{\theta}$  можно заменить дугой окружности радиуса r, называемого начальным поперечным метацентрическим радиусом,  $r = C_m = C_{\theta m}$ , центр этой окружности находится в точке m, которая называется начальным поперечным метацентром.



Рис. 3.1. Схема образования восстанавливающего момента:

Возвышение метацентра над центром масс судна называется начальной поперечной метацентрической высотой (МЦВ)  $h = z_m - z_g$ . Возникший при наклонении восстанавливающий момент как момент пары сил (тяжести и поддержания) равен произведению одной из сил на плечо, равное кратчайшему расстоянию между линиями действия этих сил. Это плечо обозначается  $l_{cm}$  и называется плечом статической остойчивости или плечом восстанавливающего момента. Восстанавливающий момент  $M_g = l_{cm}g\Delta$  (кНм) или в размерности [mM]  $M_g = l_{cm}\Delta$ . Из прямоугольного треугольника при  $m \ l_{cm} = h \ sin \theta$ . В итоге получаем метацентрическую формулу поперечной остойчивости

$$M_{\theta} = \Delta h \sin \theta, \, m M. \tag{3.1}$$

Поскольку наклонения малы, что соответствует малым значениям угла крена  $\theta$ , можно воспользоваться известными математике соотношениями, справедливыми для малых углов, выраженных в *радианах* (1 радиан равен 57,3°)  $sin\theta \approx \theta = \theta^{\circ}/57,3°; cos\theta \approx 1,0$  и получить *метацентрическую формулу поперечной остойчивости* в окончательном виде

$$M_{\theta\theta} = \frac{\Delta h \theta^{\circ}}{57.3^{\circ}}, m_{\mathcal{M}}.$$
(3.2)

Приведенное выражение показывает линейную зависимость восстанавливающего момента от угла крена. При положительных значениях МЦВ (точка *m* расположена выше точки *G*) восстанавливающий момент положителен; при h = 0 (точки *m* и *G* совпадают) восстанавливающий момент равен нулю и судно остойчивостью не обладает; при отрицательных значениях МЦВ (точка *m* расположена ниже точки *G*) возникающий при наклонении судна момент увеличивает кренящий момент. Таким образом, знак и величина восстанавливающего момента определяется знаком и величиной МЦВ, и поэтому МЦВ используется в качестве показателя начальной остойчивости судна. Произведение  $\Delta h$  называется коэффициентом none-речной остойчивости.

Схема образования восстанавливающего момента при продольном наклонении показана на рис. 3.2. В общем случае, в силу большой величины отношения длины судна к его осадке, любые продольные наклонения можно считать малыми, поэтому все допущения, примененные при рассмотрении поперечных наклонений, применимы для продольных наклонений. Продольный метацентр обозначается M, его координаты —  $x_M$  и  $z_M$ , продольный *метацентрический радиус* – R, продольная  $M \amalg B - H = z_M - z_g$ . Точкой F на схеме обозначен  $\amalg T$  площади, действующей  $B \varPi$ . Выражение 3.1 для продольных наклонений записывается в виде

$$M_{\omega} = \Delta H \sin \psi, m M.$$

Поскольку на практике в качестве параметра продольного наклонения используется величина дифферента, а не его угол, то по рис. 3.2 можно определить, что  $tg \ \psi = D_f/L$ . Поскольку угол  $\psi$  мал, то в силу свойств малых углов  $sin \ \psi \approx tg \ \psi$ , а выражение продольного восстанавливающего момента имеет вид

$$M_{\theta\psi} = \frac{\Delta H D_f}{L}, \ mM. \tag{3.3}$$



Рис. 3.2.Схема продольного наклонения

Если в выражении (3.3) принять дифферент равным одному метру  $D_f = 1,0 \, m$ , то получим выражение момента, дифферентующего на 1 метр

$$M_{IM} = \frac{\Delta H}{L}.$$
 (3.4.)

Если при расчете координат UM судна получено  $x_g \neq x_c$ , то судно будет иметь дифферент, создаваемый продольным моментом сил тяжести и поддержания, равным  $\Delta(x_g - x_c)$ . Величина дифферента определяется выражением

$$D_f = \frac{\Delta(x_g - x_c)}{M_{1M}}.$$

Осадки носом и кормой определяются по формулам

$$d_{\mu}=d+\left(\frac{L}{2}-x_{f}\right)\frac{D_{f}}{L}; d_{\kappa}=d-\left(\frac{L}{2}+x_{f}\right)\frac{D_{f}}{L},$$

где *d* – осадка по грузовому размеру.

# 3.1.2 Расчет метацентрических радиусов

Рассмотрим равнообъемное наклонение плавающего тела произвольной формы (рис. 3.3). Тело имеет погруженный объем V, площадь ватерлинии S,  $\mathcal{U}T$  площади ватерлинии находится в точке F, ось ординат  $\partial Y$  лежит в плоскости  $B \Pi$ . При *бесконечно малом* наклонении тела на угол  $d\varphi$  центр величины тела точка C смещается в сторону наклонения по дуге окружности радиуса  $\rho$ , центр той окружности находится в точке m.



Рис. 3.3. Схема наклонения тела произвольной формы

Пусть  $B\Pi$  – начальная ватерлиния плавающего тела, соответствующая его прямому положению, а  $B_I \Pi_I$  – близкая к ней равнообъемная ватерлиния после наклонения тела на бесконечно малый угол  $d\varphi$ . Согласно теореме Эйлера, ось рассматриваемого равнообъемного наклонения проходит через точку  $F - \mu T$  площади ватерлинии  $B\Pi$  (по нормали к плоскости чертежа). В результате входа в воду клина  $F\Pi_1\Pi$  и выхода из воды равновеликого ему клина  $FB_1B$  центр величины переместится из точки C в точку  $C_1$  с ординатой  $dy_c$ . Статический момент погруженного объема тела изменится на величину  $dM_V = Vdy_c$ . Поскольку угол  $d\varphi$  бесконечно малый,  $dy_c$ можно считать равной дуге  $CC_1$ , тогда  $dy_c = \rho d\varphi$ , а  $dM_V = V\rho d\varphi$ . Изменение статического момента погруженного объема тела равно статическому моменту объема, вызвавшему это изменение – объема тела, заключенного между ватерлиниями  $B\Pi$  и  $B_1\Pi_1$ .

Для определения последнего выделим элементарный объем, представляющий собой призму с основанием dS и вертикальными образующими. Объем призмы равен  $dS(y - y_f)d\varphi$ , а статический момент объема -  $dSy(y - y_f)d\varphi$ . Проинтегрировав полученный элементарный статический момент по площади ватерлинии *S*, получим искомое значение  $dM_V$ 

$$V\rho d\varphi = d\varphi \int_{S} y(y - y_f) dS = d\varphi \left[ \int_{S} y^2 dS - y_f \int_{S} y dS \right].$$
(3.5)

В полученном выражении  $\int_{S} y^2 dS = I_x$  – момент инерции пло-

щади ватерлинии относительно ее продольной оси  $\partial x$ ;  $\int_{S} y dS = y_f S$ .

Следовательно, выражение (3.5) принимает вид

$$V\rho = I_x - y_f S = I_F, \qquad (3.6)$$

где  $I_F$  – момент инерции площади ватерлинии относительно оси наклонения.

В итоге получаем выражение для начального метацентрического радиуса  $\rho = \frac{I_F}{V}$  (3.7)

Перейдя от плавающего тела произвольной формы к судну, имеющему строгую ориентацию ватерлинии относительно осей  $\partial x$ и  $\partial y$ , наклонениям судна относительно главных центральных осей ватерлинии будут соответствовать два главных метацентра *m* и *M* и два главных метацентрических радиуса *r* и *R*, один из которых будет наименьшим, а другой – наибольшим. В частном случае, когда судно сидит прямо и на ровный киль, проекция на *ОП* главной продольной оси совпадает с осью  $\partial x$ , а проекция главной поперечной оси  $\partial y_f$  параллельна оси  $\partial y$ . Соответственно этому, выражения для поперечного *r* и продольного *R* метацентрических радиусов имеют вид

$$r = \frac{I_x}{\nabla}; \quad R = \frac{I_{yf}}{\nabla}, \tag{3.8}$$

где  $I_x$  – момент инерции площади ватерлинии относительно главной продольной оси;  $I_{yf}$  – момент инерции площади ватерлинии относительно главной поперечной оси (оси, параллельной  $\partial y$ , проходящей через UT площади ватерлинии точку F).

Моменты инерции площади плоской фигуры, имеющей размеры *l* вдоль оси 0х и *b* вдоль оси 0у, определяются выражением

$$i_x = k_x l b^3; i_y = k_y l^3 b,$$
 (3.9)

где  $k_x$  и  $k_y$  – коэффициенты, зависящие от формы фигуры; для прямоугольника  $k_x = k_y = 1/12$ .

Для судна выражения (3.9) имеют вид

$$I_x = k_x LB^3; I_{yf} = k_y L^3 B.$$
 (3.10)

Выражения (3.10) позволяют оценить соотношение между продольным и поперечным метацентрическим радиусом

$$R/r = (k_y L^3 B / \nabla) / (k_x L B^3 / \nabla) = k_1 (L/B)^2, \qquad (3.11)$$

где  $k_1 = k_y/k_x -$ коэффициент, по величине близкий к 1.

При отношении длины к ширине промыслового судна 5...7 отношение метацентрических радиусов равно 25...50.

Выразим метацентрические высоты через метацентрические радиусы

$$h = r - (z_g - z_c); H = R - (z_g - z_c).$$

Поскольку поперечная *МЦВ* величина малая (обычно 0,2...1,0 м), то возвышение *ЦМ* судна над *ЦВ* близко по величине к поперечному метацентрическому радиусу и, следовательно, продольные метацентрическая высота и радиус близкие величины  $H \approx R$ .

Выражение (3.10) позволяет также оценить влияние главных размерений судна на его начальную остойчивость. Поскольку *МЦВ* отличается от метацентрического радиуса на постоянную для данной загрузки величину, то последний также может быть использован в качестве показателя начальной остойчивости. Если подставить в выражение метацентрических радиусов  $V = C_B LBd$ , то получим

 $r = I_x / \nabla = k_x L B^3 / C_B L B d = k_r B^2 / d; R = I_{yf} / \nabla = k_y L^3 B / C_B L B d = k_R L^2 / d,$ 

где  $k_r = k_x/C_B$ ,  $k_R = k_y/C_B - коэффициенты, зависящие от формы корпуса судна.$ 

Таким образом, поперечный метацентрический радиус прямо пропорционален квадрату ширины судна, а продольный – квадрату длины судна.

Полученные выводы, на пример, позволяют оценить влияние формы корпуса судна на изменение остойчивости при изменении дифферента.

На рис. 3.4. показан корпус судна, на котором изображены шпангоуты в кормовой части, в районе миделя и в носовой части. Подобная форма корпуса характерна для большинства транспортных судов. Ватерлиния BЛ соответствует положению судна на ровный киль,  $B_1 J_1 -$  дифференту на нос и  $B_2 J_2 -$  дифференту на корму. На нижнем рисунке показаны соответствующие формы ватерлинии. Из рисунка следует, что при дифференте на нос ватерлиния становится шире, а при дифференте на корму – уже. Соответственно, дифферент на нос увеличивает остойчивость, а на корму – уменьшает. Для новых судов в судовой документации  $z_m$  дается с учетом дифферента.



Рис. 3.4. Изменение формы ватерлинии

3.2 Остойчивость при больших наклонениях

При больших наклонениях кривую центра величины нельзя заменить дугой окружности, поскольку возникающие от подобной замены погрешности неприемлемы для практических расчетов восстанавливающего момента. Поэтому при больших наклонениях используется другой способ расчета плеча статической остойчивости.

На рис. 3.10 представлена схема поперечного наклонения судна на угол, для которого замена кривой центра величины дугой окружности недопустима. Точка  $m_{\theta}$  является центром кривизны кривой  $CC_{\theta}$  в точке  $C_{\theta}$ .



Рис. 3.5. Схема большого наклонения

Пользуясь обозначениями, приведенными на рис. 3.5, плечо статической остойчивости  $l_{cm}$ , выраженное отрезком GK, определяется выражением

$$GK = CB + BF - CA.$$

Выразив входящие в выражения отрезки через координаты UM и UB в прямом положении и при крене  $\theta$ , получим искомое выражение плеча статической остойчивости

 $l_{cm} = y \cos\theta + (z - z_c) \sin\theta - (z_g - z_c) \sin\theta.$ (3.12)

В выражении (3.12) первые два слагаемые выражают расстояние от ЦВ т. С до линии действия силы поддержания судна с креном и включают в себя координаты ЦВ судна при крене  $\theta$ , зависящие от формы корпуса, поэтому их сумма называется *плечом формы*  $l_{\phi} = y \cos\theta + (z - z_c) \sin\theta$ , последнее слагаемое выражает расстояние от т. С до линии действия силы тяжести судна с креном и зависит от водоизмещения и координат ЦМ судна, поэтому называется *плечом веса*  $l_e = (z_g - z_c) \sin\theta$ .

Выражение (3.12) принимает вид

$$l_{cm} = l_{\phi} - l_{\theta}. \tag{3.13}$$

Если плечо статической остойчивости определять относительно т. 0, то плечо формы выражается отрезком  $\partial M$  и обозначается  $l_{\phi}^*$  - расстояние от т. 0 до линии действия силы поддержания, а плечо веса будет равно  $l_{g}^* = z_g \sin \theta$  - расстояние от т. 0 до линии действия силы тяжести и, таким образом, выражение (3.30) будет иметь вид

$$l_{cm} = l_{\phi}^* - l_{g}^*. \tag{3.14}$$

## 3.3 Диаграмма статической остойчивости

Диаграмма статической остойчивости (ДСО) представляет собой графическую зависимость плеча статической остойчивости или восстанавливающего момента от угла крена.

Поскольку корпус судна симметричен относительно ДП, ДСО имеет две симметричные относительно точки 0 диаграммы ветви, однако изображается только одна – правая ветвь (рис. 3.6).

Поскольку  $\square CO$  является графическим изображением выражения  $l_{cm} = l_{\phi} - l_{e}$ , то для конкретного судна заданным значениям водоизмещения  $\varDelta$  и аппликаты  $\square M z_g$  соответствует единственная кривая  $\square CO$ , для которой восстанавливающий момент  $M_e = l_{cm} \varDelta$ , тм.

3.3.1 Параметры диаграммы статической остойчивости

При симметричной относительно ДП загрузке судна ( $y_g = 0$ ) ДСО проходит через т. 0.
Максимум диаграммы  $l_{max}$  показывает максимальный восстанавливающий момент  $M_6^{max} = l_{max}\Delta$ , соответствующий данной загрузке; этот момент называется статическим опрокидывающим моментом  $M_c^{cm}$  - судно может быть опрокинуто только кренящим моментом, превосходящим по величине  $M_c^{cm}$ .



Рис. 3.6. Диаграмма статической остойчивости

Максимуму диаграммы соответствует угол максимума  $\theta_m$ , делящий  $\mathcal{A}CO$  на восходящую ( $0 < \theta < \theta_m$ ) и нисходящую ветви ( $\theta_m < \theta < \theta_v$ ). Для того, чтобы определить, как ведет себя судно, находясь на той или иной ветви, на  $\mathcal{A}CO$  проведем линию, соответствующую действию постоянного статического кренящего момента. Эта линия имеет две точки пересечения с диаграммой, соответствующие равенству кренящего и восстанавливающего моментов ( $M_{\kappa p} = M_6$ ).

Рассмотрим, как ведет себя судно, находящееся в положении равновесия на восходящей (т. 1) и нисходящей (т. 2) ветвях. Если судно, находящееся в т. 1, дополнительным малым кренящим моментом его можно наклонить вправо (т.1') и отпустить, то в т. 1' момент восстанавливающий будет больше кренящего момента  $M_6 > M_{\kappa p}$  и судно вернется в т. 1; если судно из т. 1 отклонить влево в т. 1", то  $M_{\kappa p} > M_6$  и судно снова вернется в т. 1; таким образом, т. 1 является *точкой устойчивого равновесия*, а участок *ДСО* от 0 до  $\theta_m$  – ветвью устойчивого равновесия. Если судно, находящееся в т. 2

наклонить вправо (т.2') и отпустить, то в т. 2' момент восстанавливающий будет меньше кренящего момента  $M_{\kappa p} > M_6$  и судно опрокинется; если судно из т. 2 отклонить влево в т. 2", то  $M_6 > M_{\kappa p}$  и судно; вернется в т. 1; таким образом, т. 2 является *точкой неустойчивого равновесия*, а участок ДСО от  $\theta_m$  до  $\theta_v$  – ветвью неустойчивого равновесия. Соответственно этому, угол максимума  $\theta_m$  делит диаграмму на зоны устойчивого и неустойчивого равновесия и показывает **максимальное значение безопасного крена**, поскольку для любого значения угла крена  $\theta > \theta_m$  случайное воздействие может привести к опрокидыванию судна.

Угол заката ДСО  $\theta_v$  показывает максимальное значение угла крена, до которого диаграмма соответствует положительным значениям восстанавливающего момента. Если у судна угол заливания (угол крена  $\theta_f$ , при котором опасные отверстия, через которые забортная вода может поступить внутрь непроницаемого корпуса, входят в воду)  $\theta_f < \theta_v$ , то ДСО заканчивается углом заливания.

## 3.3.2 Метацентрическая высота на ДСО

Рассмотрим ДСО в районе точки 0.

При малых наклонениях судна зависимость плеча статической остойчивости от угла крена определяется из выражения (3.1) как  $l_{cm} = h \sin \theta$ . Продифференцируем данное выражение по углу крена

$$\frac{dl_{\rm CT}}{d\theta} = \frac{dh}{d\theta} \sin\theta + h \cos\theta. \tag{3.15}$$

Подставив в выражение (3.15)  $\theta = 0$ , получим

$$\frac{dl_{\rm CT}}{d\theta}_{(\theta=0)} = h, \tag{3.16}$$

## т.е. начальная метацентрическая высота равна производной от диаграммы статической остойчивости в точке 0.

Как известно, производная от кривой в точке равна тангенсу угла наклона касательной к кривой в этой точке (угол  $\alpha$  на рис. 3.6); поскольку тангенс угла равен отношению противолежащего катета к прилежащему, то, если прилежащий к углу  $\alpha$  катет равен единице ( $1 \text{ pad} = 57,3^\circ$ ), то противолежащий катет – тангенсу угла, который, в свою очередь, равен метацентрической высоте. Это свойство метацентрической высоты используется для проверки правильности построения  $\mathcal{ACO}$ , а треугольник с катетами, равными одному радиану и метацентрической высоте, называется *проверочным* – **у правильно** 

# построенной ДСО начальный участок совпадает с гипотенузой проверочного треугольника.

Проверочный треугольник позволяет также выделить на ДСО участок, соответствующий начальной остойчивости.

Участок ДСО, совпадающий с касательной к диаграмме в точке 0 соответствует начальной остойчивости и описывается линейной зависимостью плеча статической остойчивости от угла крена  $l_{cm} = h\theta/57,3^{\circ}$ , а остальная часть диаграммы соответствует остойчивости при больших наклонениях и описывается выражением  $l_{cm} = l_{\phi} - l_{e}$ . Величина  $l_{\phi}$  определяется через координаты ЦВ наклоненного судна, значения которых аналитически не выражаются, поэтому задачи остойчивости при больших наклонениях решаются графически при помощи ДСО.

3.3.3 Построение диаграммы статической остойчивости

Как указывалось выше, перед каждым рейсом на судне производится расчет водоизмещения и координат ЦМ судна *на отход* и *на приход*. Завершается этот расчет построением диаграмм статической остойчивости на отход и приход. В зависимости от материалов, имеющихся в Информации об остойчивости, применяется два метода построения ДСО – графоаналитический и графический.

Графоаналитический метод построения основан на использовании *пантокарен* – интерполяционных кривых плеча формы, показанных на рис. 3.7.

Пантокарены представляют собой кривые зависимости плеча формы  $l_{\phi}$  от водоизмещения судна  $\Delta$  для значений угла крена, кратного 5° или 10°. Шкала  $\Delta$  включает все возможные значения водоизмещения судна. На поле графика обычно указывается формула, по которой рассчитываются плечи ДСО

 $l_{cm} = l_{\phi} - (z_g - z_c) \sin \theta$  или  $l_{cm} = l_{\phi} - z_g \sin \theta$ .

По виду формулы плеча веса определяется, относительно какой точки определено плечо формы:

- если  $(z_g - z_c) \sin \theta$ , то относительно **т. С**,

- если  $z_g \sin \theta$ , то относительно **т. 0**.

Расчет выполняется в табличной форме по образцу таблицы 3.1.

В Информации об остойчивости вместо диаграммы пантокарен может быть приведена таблица зависимости плеч формы от водоизмещения для различных значений угла крена. Графический способ построения ДСО основан на использовании универсальной диаграммы статической остойчивости, показанной на рис. 3.8.

Универсальная диаграмма статической остойчивости имеет две вертикальных оси: левая – ось плеч статической остойчивости и правая – ось аппликат ЦМ судна (направлена верх) или метацентрических высот (направлена вниз).

На поле диаграммы нанесены кривые плеча формы (рассчитываются по формуле 3.12) для различных значений водоизмещения судна. Для нахождения плеч  $\mathcal{ACO}$  на универсальной диаграмме на правой оси откладывают значение аппликаты  $\mathcal{UM}$  судна или  $\mathcal{MUB}$ ; из полученной точки (на рисунке –  $z_{g\,3a0}$ ) проводят прямую до точки 0 оси углов; поскольку значения углов крена на оси абсцисс диаграммы нанесены на расстояниях от т. 0, пропорциональных синусу соответствующих углов (если расстояние от 0 до 90° принять равным  $\lambda$ , то расстояние от 0 до  $\theta$  на оси абсцисс равно  $\lambda \sin\theta$ ), эта прямая будет представлять собой плечо веса ( $z_g \sin\theta$ ); кривая плеча формы для заданного водоизмещения  $\Delta_{3a0}$  проводится методом графического интерполирования между кривыми, соответствующими ближайшим большему и меньшему водоизмещению; искомые плечи  $\mathcal{ACO}$  равны длинам отрезков между построенными кривой и прямой (на рисунке – выделенные отрезки).





- Chi	$\varphi \sim s$							
⊿=		$z_g =$		$Z_c =$	=	<i>h</i> =		
$\theta^{o}$	0	10	20	30	40	50	60	70
$l_{\phi}$								
$z_g \sin \theta$								
$l_{cm}$								

Таблица 3.1 - Расчет плеч диаграммы статической остойчивости  $l_{cm} = l_{\phi} - z_{e} \sin \theta$ 

## 3.4 Динамическая остойчивость судна

*Динамической остойчивостью* называется способность судна выдерживать, не опрокидываясь, динамическое воздействие кренящего момента.

Рассматривая статическую остойчивость, мы предполагали, что кренящий момент, приложенный к судну, возрастает до своей конечной величины постепенно, не вызывая существенной скорости наклонения. Однако на практике часто бывают случаи, когда кренящий момент прикладывается практически мгновенно как, например, при воздействии шквала или обрыве буксирного троса. В этом случае, необходимо учитывать не только величину кренящего момента, но и дополнительное наклонение, возникающее за счет инерции наклонения.

Рассмотрим воздействие на судно динамического кренящего момента  $M_{\partial}$  (рис. 3.9).

Пусть момент  $M_{\partial} = const$  и, соответственно, на диаграмме статической остойчивости плечо момента изобразится прямой, параллельной оси наклонений. Если бы кренящий момент действовал статически, то судно бы наклонялось бы до той поры, пока восстанавливающий и кренящий моменты не сравнялись (точка *B*) и судно имело бы статический крен  $\theta_{cm}$ . Однако за счет динамики наклонения, достигнув точку *B* на диаграмме, судно будет иметь некоторую скорость наклонения и соответствующий запас кинетической энергии; благодаря накопленному запасу этой энергии судно продолжит наклонение, расходуя запас энергии на преодоление сопротивления восстанавливающего момента (сопротивлением среды наклонению пренебрегаем), и достигнет угла крена  $\theta_0$ , когда кинетическая энергия наклонения будет израсходована на преодоление избытка момента восстанавливающего над кренящим и скорость наклонения станет равна нулю.

Для определения величины динамического крена  $\theta_{\partial}$  используется равенство работ кренящего и восстанавливающего момента  $T_{\kappa p}$ =  $T_{e}$ . Поскольку работа момента равна произведению момента на угол наклонения, то работа кренящего момента при  $M_{\kappa p} = const$  будет равна  $T_{\kappa p} = \int_{0}^{\theta} M \kappa p d\theta = M_{\kappa p} \theta_{\partial}$ , а работа восстанавливающего момента -  $T_{e} = \int_{0}^{\theta} M e d\theta$ .



Рис. 3.9. Определение динамического крена на ДСО

Работа кренящего момента  $T_{\kappa p}$  на рис. 3.14 равна площади прямоугольника  $\partial AD \theta_{\partial}$ , а работа восстанавливающего момента  $T_e$  – площади под  $\mathcal{A}CO$  от 0 до  $\theta_{\partial}$  (фигуры  $\partial BCD \theta_{\partial}$ ) и условие (3.34) сводится к равенству площадей фигур

$$S_{0AD\theta\theta} = S_{0BCD\theta\theta}.$$
 (3.17)

Из рис. 3.9 видно, что фигуры  $0AD\theta_0$  и  $0BCD\theta_0$  имеют общий участок  $0BD\theta_0$  и, соответственно, условие (3.17) сводится к равенству площадей

$$S_{0AB} = S_{BCD}. \tag{3.18}$$

Таким образом, для определения величины угла динамического крена от воздействия постоянного динамически приложенного кренящего момента необходимо подобрать такую вертикальную линию  $C\theta_{\partial}$ , которая совместно с кривой  $\mathcal{QCO}$  и прямой кренящего момента образует фигуру, равную по площади фигуре, образованной осью плеч, прямой момента и кривой *ДСО* (на рис. 3.9– заштрихованные фигуры).

Предложенный метод позволяет определить предельную величину динамического крена  $\theta_{\partial. np.}$  (рис. 3.10).



Рис. 3.10. Предельный угол динамического крена

Для определения  $\theta_{0.np}$  необходимо подобрать горизонтальную линию *AD*, отсекающую от *ДCO* фигуру *BCD*, равную по площади фигуре *OAB*, заключенной между этой прямой, осью плеч и кривой *ДCO* (на рис. 3.10 – заштрихованные фигуры). Динамический кренящий момент  $M_{0.onp}$ , определяемый прямой *AD*, имеет название *дина-мический опрокидывающий момент* (максимальный динамически приложенный кренящий момент, не приводящий к опрокидыванию судна); динамическому опрокидывающему моменту соответствует плечо опрокидывающего момента  $l_{0.onp}/\Delta$ .

## 3.4.1 Диаграмма динамической остойчивости

График зависимости плеча динамической остойчивости  $l_{\partial}$  от угла крена называется *диаграммой динамической остойчивости* (ДДО). Плечо динамической остойчивости равна плечу работы восстанавливающего момента, которое определяется площадью под соответствующим участком ДСО, разделенную на водоизмещение судна.

При построении ДДO ее плечи рассчитываются как соответствующие площади под ДСО для тех же значений углов крена, для которых были определены значения плеч статической остойчивости  $l_{cm}$  при построении ДCO. Площадь ДCO рассчитывается способом трапеций. На рис. 3.11 представлена интерпретация расчета плеч ДДО.

в)

б)



Рис. 3.11. Расчет плеч ДДО.

Плечо ДДО, соответствующее  $\theta = 10^{\circ} - l_{\partial 10}$ , равно площади треугольника участка ДСО от 0 до 10 °

 $l_{\partial 10} = 0,5 l_{cm10} * 10/57,3.$ 

a)

Плечо ДДО, соответствующее  $\theta = 20^{\circ} - l_{\partial \theta}$ , равно площади треугольника участка ДСО от  $\theta$  до  $10^{\circ}$  плюс площадь трапеции от  $10^{\circ}$  до  $20^{\circ}$ 

 $l_{\partial 20} = l_{\partial 10} + 0,5(l_{cm10} + l_{cm20}) *10/57,3$  и т.д.

Таким образом, *i*-е плечо ДДО определяется выражением

 $l_{\partial 10i} = l_{\partial 10(i-1)} + 0.5(l_{cm10(i-1)} + l_{cm10i})10/57,3,$  (3.19) где  $i = 1, ..., n; l_{\partial 0} = l_{cm0} = 0; 10/57,3$  – безразмерная высота трапеции при определении плеч ДСО с шагом 10°.

На рис. 3.12 представлена ДСО и соответствующая ей ДДО.

ДДО является интегральной кривой по отношению к ДСО: ДДО имеет максимум, соответствующий углу заката ДСО, точка перегиба ДДО соответствует максимуму ДСО.

Для определения угла динамического крена от действия постоянного кренящего момента на оси наклонений ДДО откладывается 1  $pad = 57,3^\circ$ ; через эту точку проводится линия, перпендикулярная к оси наклонения и на ней откладывается значение плеча кренящего момента (плечо ДДО равно работе, деленной на водоизмещение, а плечо кренящего момента равно моменту, деленному на водоизмещение; поскольку работа равна произведению момента на угол, **то соответствующие плечи будут равны**, если угол равен единице); полученная точка соединяется с началом диаграммы; эта прямая пересекает кривую ДДО в точке, соответствующей углу динамического крена. Плечо динамического опрокидывающего момента на ДДO равно отрезку перпендикуляра, проходящего через  $\theta = 1$  рад, между осью наклонения и касательной к диаграмме, проведенной из ее начала.



Рис. 3.12. Определение  $\theta_{\delta}$  и  $M_{\delta.onp.}$  на ДСО и ДДО

#### 3.4.2 Опрокидывающий момент судна, испытывающего качку

1) На судно, испытывающее качку с амплитудой  $\theta_r$ , в момент максимального наклонения на правый борт ( $\theta = \theta_r$ ) слева действует порыв ветра. На рис. 3.13 показана схема определения динамического опрокидывающего момента на  $\mathcal{ACO}$  и  $\mathcal{AAO}$ .



Рис. 3.13. Динамический опрокидывающий момент на ДСО и ДДО

2) На судно, испытывающее качку с амплитудой  $\theta_r$ , в момент максимального наклонения на левый борт ( $\theta = -\theta_r$ ) слева действует порыв ветра. На рис. 3.14 показана схема определения динамического опрокидывающего момента на  $\mathcal{ACO}$  и  $\mathcal{AAO}$ .

Рис. 3.18 и 3.19 иллюстрируют, что наиболее опасным является случай, когда порыв ветра действует с той стороны, куда

наклонилось судно. В этом случае на участке наклонения от - $\theta_r$  до  $\theta$  восстанавливающий момент совпадает с кренящим моментом от шквала и, соответственно, работа восстанавливающего момента на этом участке складывается с работой кренящего момента.

Плечо опрокидывающего динамического момента для данного случая в Правилах Регистра используется для определения *критерия погоды*. Похожая схема наклонения используется и для проверки остойчивости по *критерию погоды* в Кодексе остойчивости ИМО.



Рис. 3.14. Динамический опрокидывающий момент на ДСО и ДДО

## 3.5 Нормирование остойчивости

Остойчивость считается достаточной, если выполняются общие и дополнительные требования к остойчивости, приведенные в «Правилах классификации и постройки морских судов» Российского Морского Регистра Судоходства [4] (Том 1, Глава IV).

Для судов, на которые распространяются требования части V Правил Регистра «Деление на отсеки» (в символе класса судна присутствует знак [1] или [2]), остойчивость в неповрежденном состоянии должна быть достаточной для того, чтобы в аварийных условиях она отвечала этим требованиям.

Нормы остойчивости и непотопляемости изменяются в соответствии с изменением Правил Регистра, однако, на каждое судно распространяются требования, действовавшие на момент начала строительства этого судна.

3.5.1 Общие требования к остойчивости

Остойчивость судна считается достаточной, если выполняются требования к *критерию погоды*, параметрам ДСО и метацентрической высоте.

1 Критерий погоды

Остойчивость судна по *критерию погоды* считается достаточной, если судно способно противостоять одновременному воздействию шквала и качки в соответствие с указанным ниже:

1) Судно находится под воздействием постоянного ветра, направленного перпендикулярно ДП судна, которому соответствует плечо ветрового кренящего момента  $l_{wI}$  (рис. 3.15).

2) От статического угла крена  $\theta_{wl}$ , вызванного постоянным ветром, судно под воздействием волн кренится на наветренный борт на угол, равный амплитуде качки  $\theta_{lr}$ .

3) На накрененное судно динамически действует порыв ветра, которому соответствует плечо  $l_{w2}$ .

4)Вычисляются и сравниваются площади a и b, заштрихованные на рис. 3.5. Площадь b ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой, соответствующей плечу  $l_{w2}$ , и углом крена  $\theta_{w2}=50^\circ$ ,

либо углом крена  $\theta_c$ , соответствующим точке второго пересечения прямой  $l_{w2}$  с кривой восстанавливающих плеч, либо углом заливания  $\theta_f$ , в зависимости от того, какой из них меньше. Площадь *a* ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой  $l_{w2}$  и углом крена, соответствующим амплитуде качки  $\theta_{lr}$ .

Остойчивость судна считается достаточной по критерию погоды K = b/a, если площадь b равна или больше площади a, т.е.  $K \ge 1$ .



Рис. 3.15. Определение критерия погоды

Статический угол крена от действия постоянного ветра  $\theta_{w1}$  не должен превышать 16°, либо 0,8 угла входа в воду кромки открытой палубы, в зависимости от того, какой из них меньше.

*Кренящее плечо l*<sub>w1</sub>, м, принимается постоянным для всех углов крена и рассчитывается по формуле

$$l_{wl} = p_v Az/(1000 g \Delta),$$
 (3.20)  
где  $p_v -$  давление ветра,  $\Pi a$ , определяется по табл. 3.2 в зави-  
симости от района плавания судна;

*z* – плечо парусности, *м*, принимается равным измеренному по вертикали расстоянию от центра парусности до центра площади проекции подводной части корпуса на диаметральную плоскость, или, приближенно, до середины осадки судна; *А* – площадь парусности, м<sup>2</sup> – проекция надводной части судна на плоскость, параллельную ДП;

⊿ - водоизмещение судна, т;

g = 9,81 м/с<sup>2</sup>- ускорение свободного падения.

Кренящее плечо  $l_{w2}$  определяется по формуле  $l_{w2}=1,5l_{w1}$ 

Для рыболовных судов длиной от 24 до 45 м давление ветра в формуле (3.20) может приниматься по табл. 3.3 в зависимости от расстояния от ватерлинии до центра парусности *Z*.

Табл. 3.2

Зависимость давления ветра от раи	она плавания
Район плавания судна	Давление
	ветра $p_v$ , $\Pi a$
Неограниченный	504
Ограниченный <i>R1</i>	353
Ограниченный <b>R1, R2-RSN, R2-RSN(4,5), R3-RSN</b>	252

Табл. 3.3

Зависимость давления ветра от возвышения центра парусности над ватерлинией

<i>Z</i> , м	1	2	3	4	5	≥6
р <sub>v</sub> , Па	316	386	429	460	485	504

Амплитуда качки судна с круглой скулой, градусов, вычисляется по формуле

$$\theta_{lr} = 109kX_lX_2\sqrt{rS} , \qquad (3.21)$$

где k – коэффициент, учитывающий влияние скуловых и/или брусковых килей, и определяется по табл. 3.4 от отношения  $\frac{A\kappa}{LB}$ , в котором  $A_{\kappa}$  – суммарная габаритная площадь скуловых килей, либо площадь боковой проекции брускового киля, либо сумма этих площадей,  $m^2$ ;

 $X_1$  – безразмерный множитель, определяемый по табл. 3.5 в зависимости от отношения B/d;

 $X_2$  – безразмерный множитель, определяемый по табл. 3.6 в зависимости от значения коэффициента общей полноты С<sub>В</sub>;

r – параметр, определяемый по формуле  $r = 0,73 + 0,6 \frac{z_g - d}{d}$ . Значение r не должно приниматься больше 1; *S* – безразмерный множитель, град., определяемый по табл. 3.7 в зависимости от района плавания и периода качки *T*, который рассчитывается по формуле  $T = \frac{2cB}{\sqrt{h}}$ , здесь  $c = 0,373 + 0,023 \frac{B}{d} - 0,043 \frac{L}{100}$ ;

*h* – метацентрическая высота, исправленная поправкой на свободные поверхности жидких грузов.

Таблица 3.4

Коэффициент к										
<i>А</i> к/( <i>LB</i> )%	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	≥4,0		
K	1,00	0,98	0,95	0,88	0,79	0,74	0,72	0,70		

Vaahhuuuaumk

#### Таблица 3.5

	Множитель $X_1$													
B/d	≤2,4	2.6	2,8	3,0	3,2	3,4	3.5	3.6	4,0	4,5	5,0	5.5	6,0	≥6,5
$X_{l}$	1,00	0,96	0,93	0,90	0,86	0,82	0,80	0,79	0,78	0,76	0,72	0,68	0,64	0,62

### Таблица 3.6

	Множитель Х2												
$C_B$	≤0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	≥0,70							
$X_2$	0,75	0,82	0,89	0,95	0,97	1,00							

#### Таблица 3.7

	Множитель 5											
Район пла-		Т, с										
вания судна	≤5	6	7	8	10	12	14	16	18	≥20		
Неогранич.	0,100	0,100	0,098	0,093	0,079	0,065	0,53	0,044	0,038	0,035		
Огранич.	0,100	0,093	0,083	0,073	0,53	0,040	0,035	0,035	0,035	0,035		

При расчете амплитуды качки по формуле (3,21) для судна с острой скулой коэффициент *k* следует принимать равным 0,7.

2 Диаграмма статической остойчивости

Площадь под положительной частью диаграммы статической остойчивости должна быть не менее 0,055 м\*рад до угла крена 30° и не менее 0,090 м\*рад до угла крена 40° либо до угла заливания  $\theta_f$ , в зависимости от того, какой из них меньше. Дополнительно, площадь между углами 30° и 40°, или, если  $\theta_f < 40^\circ$ , между углами 30° и  $\theta_f$  должна быть не менее 0,030 м\*рад.

Максимальное плечо диаграммы статической остойчивости (максимум диаграммы)  $l_{max}$  должно быть не менее 0,25 м для судов

длиной 80 м и менее и не менее 0,20 м для судов длиной 105 м и более. Для промежуточных значений длины судна величина *l<sub>max</sub>* определяется линейной интерполяцией.

Угол крена  $\theta_{m}$ , которому соответствует максимальное плечо диаграммы статической остойчивости (угол максимума), должен быть не менее 30°. При наличии у ДСО двух максимумов вследствие влияния надстроек или рубок требуется, чтобы первый от прямого положения максимум наступил при крене не менее 25°.

Предел положительной статической остойчивости (угол заката диаграммы  $\theta_v$  или угол заливания  $\theta_f$ , в зависимости от того, что меньше) должен быть не менее 50°.

3 Метацентрическая высота

Исправленная начальная метацентрическая высота *h* всех судов при всех вариантах нагрузки, за исключением «судна порожнем», должна иметь значение *не менее 0,15 м*.

Минимальная исправленная метацентрическая высота может иметь другую величину в случаях, особо оговоренных в разделе 3.6.3.

Для всех судов, за исключением рыболовных судов, китобаз и прочих судов, используемых для переработки живых ресурсов моря и не занятых их ловом, случаи отрицательной начальной *МЦВ* для варианта нагрузки «судно порожнем» являются в каждом случае предметом специального рассмотрения Регистром.

3.5.2 Учет обледенения

Для судов, плавающих в зимнее время в зимних сезонных зонах, установленных Правилами о грузовой марке морских судов, помимо основных вариантов нагрузки, должна быть проверена остойчивость с учетом обледенения.

При расчете обледенения следует учитывать изменения водоизмещения, возвышения центра тяжести и площади парусности от обледенения.

При определении кренящего и опрокидывающего моментов для судов, плавающих в зимних сезонных зонах севернее параллели 66°00'N и южнее параллели 60°00'S, а также в зимнее время в Беринговом море, Охотском море и в Татарском проливе, условные нормы обледенения должны приниматься следующим образом:

- массу льда на квадратный метр площади общей горизонтальной

проекции открытых палуб следует принимать равной 30 кг. В общую горизонтальную проекцию палуб должна входить сумма горизонтальных проекций всех открытых палуб и переходов независимо от наличия навесов. Момент по высоте от этой нагрузки определяется по возвышениям центра тяжести соответствующих участков палубы и переходов независимо от наличия навесов. Момент по высоте от этой нагрузки определяется по возвышениям центра тяжести соответствующих участков палубы и переходов;

- массу льда на квадратный метр площади парусности следует принимать равной 15 кг. Площадь и возвышение центра парусности должны определяться при этом, как при определении кренящего момента от шквала, но без учета обледенения.

Для диаграмм статической остойчивости, построенных с учетом обледенения, угол заката диаграммы должен быть не менее 55°, а максимальное плечо статической остойчивости для судов неограниченного района плавания - не менее 0,2 м при крене не менее 25°.

3.5.3 Дополнительные требования к остойчивости

В этом разделе Правил Регистра приводятся дополнительные требования к остойчивости некоторых специализированных судов, а также приводятся указания по распределению составляющих нагрузки на судне при расчетах остойчивости и минимальные значения параметров остойчивости и посадки.

Для пассажирских судов дополнительно нормируется угол крена от скопления пассажиров у борта (угол паники) и угол крена на циркуляции.

При реально возможном скоплении пассажиров на верхней доступной пассажирам палубе у одного борта, возможно ближе к фальшборту, угол крена не должен превышать 10°.

Угол крена на циркуляции не должен превышать 10.

*Кренящий момент на циркуляции М<sub>R</sub>, кН*\*м, определяется по формуле

$$M_R = 0.20 V_0^2 \Delta \frac{z_g - \frac{d}{2}}{L},$$
(3.22)

где  $V_0$  – эксплуатационная скорость судна, *м/с*.

Для сухогрузных судов указывается, что накатные суда (суда с горизонтальным способом погрузки) должны иметь исправленную МЦВ без учета обледенения не менее 0,2 м.

## Критерий ускорения

Избыточная остойчивость ограничивается у судов, имеющих отношение  $\sqrt{h}/D > 0.08$  или B/d > 2.5, а также для судов, перевозящих груз с малым удельным погрузочным объемом. У таких судов необходимо осуществлять проверку остойчивости по критерию ускорения  $K^*$ .

Остойчивость по критерию ускорения  $K^*$  считается приемлемой, если в рассматриваемом состоянии нагрузки расчетное ускорение (в долях g) не превышает допустимого значения, т.е. выполняется условие

$$K^* = \frac{0.3}{a_{\text{pacy}}} \ge 1, \tag{3.23}$$

где  $a_{pacy}$  – расчетное ускорение (в долях g), определяемое по формуле

$$a_{pacy} = 1.1 * 10^{-3} Bm^2 \theta_r$$

здесь  $m = \frac{m_0}{\sqrt{h_0}}$  – нормируемая частота собственных колебаний

судна;

 $m_0$  - коэффициент, определяемый по табл. 3.8 в зависимости от  $\frac{Bh_0}{3}$ ;

 $z_{g\sqrt[3]{\nabla}}$ 

 $\theta_r$  – расчетная амплитуда качки, определяемая как при расчете опрокидывающего момента, град.

Таблица 3.8

Bh <sub>0</sub>	0,10	0,15	0,25	0,50	1,0	2,0	3,0
$Z_{g\sqrt[3]{\nabla}}$	и менее						и более
$m_0$	0,34	0,42	0,64	1,13	1,96	2,69	2,94

#### Коэффициент то

При перевозке навалочных грузов с углом естественного откоса менее или равным 30°, как определено в Международном кодексе безопасной практики перевозки навалочных грузов, остойчивость должна удовлетворять положениям этого кодекса и требованиям Морской администрации.

Исправленная начальная МЦВ лесовоза:

- с лесным грузом в трюмах и на палубе должна быть *не менее 0,1 м*;

- судно без груза – *не менее 0,15 м*.

Площадь под положительной частью диаграммы статической остойчивости должна быть не менее 0,08 м-рад до угла крена 40° либо до угла заливания 0/, в зависимости от того, какой из них меньше; максимальное плечо диаграммы должно быть не менее 0,25 м. Угол статического крена от действия постоянного ветра не должен превышать 16°; норматив по углу входа кромки палубы в воду для лесовозов не применяется.

Исправленная начальная *МЦВ рыболовного судна* для варианта нагрузки «судно порожнем», должна быть не менее 0,05 м или 0,003 ширины судна, смотря по тому, что больше.

Для однопалубных судов исправленная начальная метацентрическая высота должна быть *не менее 0,35 м*. Однако, для судов со сплошной настройкой и для судов длиной более 70 м исправленная начальная метацентрическая высота может быть уменьшена до 0,15 м.

У контейнеровоза определенный по ДСО угол крена на циркуляции или под действием постоянного бокового ветра должен быть не более половины угла, при котором верхняя палуба входит в воду, в любом случае угол крена не должен превышать 16°.

3.5.4 Предыдущая версия нормирования остойчивости

В настоящее время под российским флагом по морям ходит достаточное количество морских судов, спроектированных и построенных по предыдущей версии нормирования остойчивости.

Нормирование остойчивости морского судна, киль которого заложен до первого июля 2002 г. имеет некоторое отличие от современного.

Основное отличие состоит в расчетной схеме критерия погоды.

Остойчивость судов считается по критерию погоды K достаточной, если при наихудшем, в отношении остойчивости, варианте нагрузки динамически приложенный кренящий момент от давления ветра ( от шквала)  $M_v$  равен или меньше опрокидывающего момента  $M_c$ , т.е. если соблюдены условия  $M_v \leq M_c$  или

$$K = \frac{M_c}{M_v} \ge 1, 0. \tag{3.24}$$

Кренящий момент  $M_v$ ,  $\kappa H_M$ , определяется выражением  $M_v = 0,001 p_v A_v z,$  (3.25) где  $A_v, M^2$  – площадь парусности (проекция надводной части корпуса судна и судовых конструкций на плоскость, параллельную  $\mathcal{Д}\Pi$ );

*z*, *м* – возвышение центра парусности (*ЦТ* площади парусности) над плоскостью действующей ватерлинии;

*p<sub>v</sub>*, *Па* – давление ветра, принимается по табл. 3.9 в зависимости от района плавания и величины *z*.

Таблица 3.9

Augure 20	-p~ <i>p</i> , -	100							
Район пла-				Ζ, Μ					
вания судна	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	≥7,0		
Неогранич.	706	863	971	1049	1108	1167	1216		
Огранич. І		0,567 давления для неограниченного района							
Огранич. II		0,2	75 давле	ния для н	еограниче	енного рай	і́она		

Кренящий момент от шквала является постоянным за весь период накренения судна.

Динамический опрокидывающий момент  $M_c = g \Delta l_c$ . Плечо опрокидывающего момента  $l_c$  определяется по  $\square CO$  или  $\square \square O$  с учетом амплитуды качки  $\theta_r = \theta_{lr}$  или  $\theta_r = \theta_{2r}$  (рис. 3.14).

Амплитуда качки судна с круглой скулой  $\theta_r$ , градусов, не снабженного скуловыми килями и брусковым килем, вычисляется по формуле 3.21 для значения k = 1, 0.

3.6 Проверка остойчивости

Парпецие ретра  $n = \Pi a$ 

Проверка остойчивости осуществляется по завершению расчета координат *ЦМ* судна. Проверяется остойчивость по диаграмме контроля остойчивости, представляющей собой график зависимости допустимой метацентрической высоты (или аппликаты *ЦМ* судна *z<sub>g</sub>*, или момента водоизмещения относительно *ОП M<sub>z</sub>*, или момента дедвейта относительно *ОП M<sub>zDW</sub>*) от водоизмещения судна.

Рассмотрим диаграмму контроля остойчивости транспортного рефрижератора «Олюторский залив» (рис. 3.16).

Для всего диапазона водоизмещения рассчитываются кривые зависимости возвышения UM над  $O\Pi$  ( $Z_g$ ) от водоизмещения для предельных значений критериев остойчивости (K = 1,0;  $l_{max} = 0,20$ M;  $\theta_m = 30°$ ;  $\theta_v = 60°$ ; h = 0,15 и  $K^* = 1,0$ ). Рассчитанные кривые наносятся на график. Кривая зависимости  $Z_g$  от  $\Delta$  при значениях  $K^* = 1,0$  располагается в части диаграммы и отделяет зону допустимой остойчивости от зоны чрезмерной остойчивости; если расчетное значение аппликаты ЦМ попадает на эту кривую, то остойчивость будет считаться предельной по критерию ускорения, если ниже – чрезмерной. Остальные 5 кривых располагаются в верхней части диаграммы. Нижняя огибающая этих кривых (на рис. 3.16 – выделенная линия) разделяет зоны допустимой и недостаточной остойчивости: если расчетное значение аппликаты ЦМ попадает на эту кривую, то остойчивость будет считаться предельной по одному из критериев (в зависимости от того, с участком какой кривой в данном месте совпадает огибающая).



Рис. 3.16. Диаграмма контроля остойчивости

Для судов, плавающих в районах, в которых необходимо учитывать обледенение, на диаграммах контроля остойчивости наносятся линии допустимых значений аппликаты ЦМ с учетом обледенения.

В некоторых случаях в Информации об остойчивости приводится таблица допустимых аппликат ЦМ (или допустимых

метацентрических высот, или допустимых моментов). В этом случае допустимые значения снимаются с соответствующих кривых диаграммы контроля остойчивости, а проверка остойчивости сводится к сравнению расчетного значения параметра с допустимым значением.

Если согласно требованиям Регистра у судна должна быть обеспечена непотопляемость при затоплении отсеков, то описанная выше диаграмм используется для проверки «основной остойчивости», т.е. без учета возможного затопления отсеков. Для проверки «аварийной остойчивости», т.е. аварийной остойчивости и аварийной плавучести, используется диаграмма, построенная для предельных значений параметров аварийной остойчивости и аварийной плавучести.

## 3.7 Информация об остойчивости

На каждом судне имеется согласованная с Регистром Информация об остойчивости. Она представляет собой документ, в котором в систематизированной форме приведены сведения об остойчивости судна и рекомендации по ее поддержанию в процессе эксплуатации судна. Объем Информации может меняться в зависимости от типа судна, его назначения, запаса остойчивости и района плавания.

В Правилах Регистра указывается перечень материалов, которые должны содержаться в Информации об остойчивости.

Информация должна содержать основные данные по судну:

- название судна и верфи, где оно построено, год постройки;

- порт приписки и регистровый номер;

- тип судна и его назначение;

- класс судна;

- район плавания и установленные судну ограничения;

- размерения судна, осадки по грузовым маркам и соответствующий дедвейт;

- скорость хода;

- данные опыта кренования судна, положенные в основу Информации (водоизмещение и координаты *ЦМ* судна порожнем, название и серийный номер судна, данные кренования, использованные для данной Информации);

- другие данные по усмотрению разработчика Информации.

Информация включает в себя характеристику остойчивости судна и четко сформулированные ограничения, вытекающие из требований Правил с учетом особенностей данного судна, а именно:

- перечень критериев остойчивости, которые требуется выполнить для данного судна;

- указания на критерии, лимитирующие остойчивость судна;

- указания на то, что критерии остойчивости не учитывают возможного смещения груза, поэтому для предотвращения смещения груза следует руководствоваться соответствующими документами;

- конкретные ограничения по загрузке судна;

- конкретные указания по порядку расходования жидких грузов и балластировке судна;

 ограничения и указания, которые необходимо соблюдать, чтобы удовлетворялись требования к аварийной посадке и остойчивости;

- указания по ограничению осадок носом и кормой с пояснением, чем вызвано ограничение;

- другие необходимые указания.

В Информации приводятся рекомендации капитану по поддержанию достаточной остойчивости в процессе эксплуатации судна, включающие полезные, по мнению проектанта, сведения (например, выбор курса и скорости судна при плавании на попутном волнении, указания по маневрированию и т.п.).

Информация должна содержать типовые случаи загрузки, охватывающие все указанные в спецификации грузы, требуемые Правилами варианты нагрузки, а также другие случаи, показывающие практические границы эксплуатации судна. Типовые случаи используются также для приближенной оценки приемлемости грузового плана сравнением его с наиболее близким типовым.

Представленные в Информации материалы для самостоятельной оценки капитаном остойчивости судна должны обеспечить возможность достаточно точно с минимальной затратой времени определить, удовлетворяет ли остойчивость требованиям Правил Регистра.

В материалы этого раздела должны входить:

- диаграмма контроля остойчивости в виде графика или таблицы;

- данные, необходимые для определения массы и положения ЦТ для жидких грузов;

- таблицы поправок на влияние свободных поверхностей жид-ких грузов;

- данные, необходимые для подсчета массы и положения ЦТ перевозимых грузов;

- диаграмма осадок носом и кормой или другие материалы, позволяющие быстро вычислить осадки судна носом и кормой;

- грузовой размер судна;

- пояснения капитану по определению посадки и остойчивости судна для случая загрузки, отличающегося от типового;

- бланки для проведения самостоятельных расчетов.

В Информации должна быть ссылка на документацию, на основании которой она составлена.

Формальное соблюдение указаний Информации не освобождает капитана от ответственности за остойчивость судна.

3.8 Применение теории остойчивости для оценки эксплуатационных ситуаций

Изложенная выше теория остойчивости позволяет решать большой объем практических задач, возникающих в процессе эксплуатации судна.

3.8.1 Перемещение груза

Определим изменение посадки и остойчивости судна вследствие произвольного перемещения груза.

Пусть на судне водоизмещением  $\Delta$  тонн с координатами  $\mathcal{U}T x_g$ и  $y_g$  сидящем прямо и на ровный киль со средней осадкой  $d_{cp}$  груз массой P перемещается из точки  $A(x_1; y_1; z_1)$  в точку  $B(x_2; y_2; z_2)$ . Изменение посадки оценим величинами возникших крена  $\theta$  и дифферента  $D_f$  (средняя осадка судна не изменяется, поскольку водоизмещение не изменяется), изменение остойчивости оценим величинами изменения метацентрических высот  $\delta h$  и  $\delta H$ .

Для оценки изменения посадки и остойчивости судна от произвольного перемещения груза, рассмотрим раздельно вертикальное, горизонтальное поперечное и горизонтальное продольное перемещения.

Вертикальное перемещение из точки  $A(x_1; y_1; z_1)$  в точку  $A_1(x_1; y_1; z_2)$  не создает кренящий или дифферентующий момент, а приводит только к изменению аппликаты UM судна, поэтому посадка

судна не изменится, а изменится только остойчивость, выражаемая метацентрическими высотами  $h = z_m - z_g$  и  $H = z_M - z_g$ . Поскольку аппликаты метацентров зависят только от величины водоизмещения, изменения метацентрических высот будет равно изменению аппликаты UM судна  $\delta h = \delta H = -\delta z_g$ .

Для определения  $\delta z_g$  составим уравнение статических моментов - изменение статического момента водоизмещения равно статическому моменту, вызвавшего это изменение  $\Delta \delta z_g = P(z_2 - z_1)$ , откуда получаем  $\delta z_g = \frac{P}{A}(z_2 - z_1).$ 

В итоге получим

$$\delta h = \delta H = -\frac{P}{A}(z_2 - z_1). \tag{3.26}$$

Из полученного выражения следует, что перемещение груза  $(z_2 > z_1)$  уменьшает остойчивость, а вниз  $(z_2 < z_1)$  – увеличивверх вает

Горизонтальное поперечное перемещение из точки  $A_1(x_1; y_1; z_2)$ в точку A<sub>2</sub>(x<sub>1</sub>; y<sub>2</sub>; z<sub>2</sub>). При поперечном перемещении груза возникает кренящий момент  $M_{\kappa p}$ , вызывающий наклонение судна на угол  $\theta$ , уравновешиваемый восстанавливающим моментом  $M_{\theta\theta} = M_{\kappa\rho}$ . Из схемы наклонения (рис. 3.17) следует, что  $M_{\kappa p} = P(y_2 - y_1) \cos \theta$ . Используя для определения восстанавливающего момента выражение 3.1, получим

$$\Delta h \sin\theta = P(y_2 - y_1) \cos\theta.$$
  
В итоге, угол крена определяется выражением  
$$\theta^{\circ} = \operatorname{arctg} \frac{P(y_2 - y_1)}{\Delta h}.$$
 (3.27)  
С учетом (3.1.1) это выражение имеет вид  
$$\theta^{\circ} = 57.3 \frac{M_{\text{кр}}}{2}.$$
 (3.28)

$$P^{o} = 57,3 \ \frac{M_{\rm kp}}{\Delta h}.$$
 (3.28)

Горизонтальное продольное перемещение из точки  $A_2(x_1; y_2; z_2)$ в точку *B*(*x*<sub>2</sub>; *y*<sub>2</sub>; *z*<sub>2</sub>) показано на рис. 3.18.

При продольном перемещении груза возникает дифферентующий момент  $M_{\partial u\phi} = P(x_2 - x_1)$ . Используя (3.4), получим

$$D_f = \frac{P(x_2 - x_1)}{M_{1M}}.$$
(3.29)

Осадки носом и кормой находятся по формулам

$$d_{\mu} = d_{cp} + \left(\frac{L}{2} - x_f\right) \frac{Df}{L};$$
(3.30)

$$d_{\kappa} = d_{cp} - \left(\frac{L}{2} + x_{f}\right) \frac{Df}{L}, \qquad (3.31)$$

где  $x_f$  – абсцисса UT площади ватерлинии – определяется по гидростатическим кривым.



Рис. 3.17. Поперечное перемещение груза



Рис. 3.18. Продольное перемещение груза

## 3.8.2 Прием/снятие малого груза

Определим, как изменяется посадка и остойчивость судна при приеме или снятии малого груза.

*Малым* называется груз, прием или снятие которого существенно не изменяет площадь и форму действующей ватерлинии. В практических расчетах для судна обычных обводов масса малого груза не превышает 5...10 % от водоизмещения судна.

Предполагаем, что в начальный момент судно имеет посадку прямо и на ровный киль.

Поставленную задачу будем решать в два приема: вначале примем груз в такую точку, чтобы крен и дифферент судна не изменились, и определим, как изменится средняя осадка и остойчивость, а затем известными методами рассчитаем изменение посадки при перемещении груза в заданную точку.

Крен и дифферент судна не изменятся, если UM принятого груза будет находиться на одной вертикали с UT объема, добавленного к погруженному объему судна за счет приема груза P. Если крен и дифферент судна при приеме груза не изменяются, то новая ватерлиния судна будет параллельна исходной ватерлинии, а UT добавленного объема будет находиться в  $Д\Pi$  на одной вертикали с UT площади ватерлинии.

Таким образом, считаем, что вначале груз принимается в точку с координатами ( $x_f$ , 0, z).

Изменение средней осадки определяется выражением (2.12)

$$\delta d = \frac{P}{\gamma S} (\mathbf{M}) = \frac{P}{100q}, \tag{3.32}$$

а новая средняя осадка  $d_{cpl} = d_{cp} + \delta d$ .

Для определения изменения остойчивости запишем выражение метацентрической высоты судна, принявшего груз, через метацентрический радиус

$$h_{I} = r_{I} - z_{gI} + z_{cI},$$
  
где  $h_{I} = h + \delta h, r_{I} = r + \delta r, z_{gI} = z_{g} + \delta z_{g}, z_{cI} = z_{c} + \delta z_{c};$   
 $\delta h = \delta r - \delta z_{g} + \delta z_{c}.$  (3.33)

Таким образом, используя выражение 3.33, найдем изменение *МЦВ бh* через приращения соответствующих параметров.

Используя выражение 3.8, запишем  $\delta r = r_l - r = \frac{I_{x1}}{V_1} - \frac{I_x}{V}$ . Поскольку при приеме малого груза площадь и форма ватерлинии не изменяется  $I_{xl} = I_x$ , а  $\nabla_l = \nabla + v$ . Тогда  $\delta r = -\frac{I_x}{\nabla + v} - \frac{I_x}{\nabla} = -v \frac{I_x}{\nabla(\nabla + v)} = -r \frac{v}{\nabla + v}$ . Умножив числитель и знаменатель полученного выражения на плотность забортной воды  $\gamma$ , получим

$$\delta r = -r \frac{P}{\Delta + P}.$$
(3.34)

Приращение аппликаты  $\mu T$  судна  $\delta z_g$  найдем из уравнения статических моментов (относительно нового  $\mu T$  судна  $G_1$ )  $\delta z_g(\Delta + P) = (z - z_g)P$ , откуда

$$\delta z_g = (z - z_g) \frac{P}{\Delta + P}.$$
(3.35)

Приращение аппликаты UB судна  $\delta_{zc}$  найдем из уравнения статических моментов объема (относительно нового UB судна  $C_1$ )

$$\delta z_c(\nabla + v) = v l_v,$$

где  $l_v$  - плечо объема v.

Из рис. 3.19 следует, что

$$\delta z_c(\nabla + v) = v \left( d + \frac{\delta d}{2} - z_c \right); \ \delta z_c = \left( d + \frac{\delta d}{2} - z_c \right) \frac{v}{(\nabla + v)}$$

Умножив числитель и знаменатель полученного выражения на плотность забортной воды *у*, получим

$$\delta z_{c} = \left(d + \frac{\delta d}{2} - z_{c}\right) \frac{P}{(\Delta + P)}.$$
(3.36)

Рис. 3.19. Прием малого груза груза

Подставив в (3.33) выражения (3.34 – 3.36), получим

$$\delta h = (-r + z_g - z + d + \frac{\delta d}{2} - z_c).$$
Поскольку - r + z\_g - z\_c = -h, получим  

$$\delta h = (d + \frac{\delta d}{2} - h - z) \frac{P}{\Delta + P},$$
(3.37)

или с учетом (3.48)

$$\delta h = \left(d + \frac{P}{200q} - z_c\right) \tag{3.38}$$

Из выражения (3.37) следует, что при приеме малого груза *P* остойчивость не изменится ( $\delta h = 0$ ), если  $(d + \frac{\delta d}{2} - h - z) = 0$  или

$$z=d+\frac{\delta d}{2}-h.$$

Последнее выражение является уравнением горизонтальной плоскости, называемой *нейтральной плоскостью*. Если аппликата *ЦМ* принимаемого груза оказывается в нейтральной плоскости, то остойчивость судна не изменяется; если груз принимается выше нейтральной плоскости, то остойчивость ухудшается, если ниже – улучшается. Для судна с небольшой *МЦВ* нейтральная плоскость находится в районе ватерлинии.

При снятии груза *P* и *δ d* меняют знак и выражение (3.37) для приема/снятия груза будет иметь вид

$$\delta h = \frac{\pm P}{(\Delta \pm P)} \left( d \pm \frac{\delta d}{2} - h - z_c \right),$$

(3.39) где верхние знаки соответствуют приему груза, а нижние – снятию.

## 3.8.3 Подвешенный груз

Рассмотрим, как изменяется остойчивость при подъеме груза *Р* из трюма судовым грузовым устройством.

При подрыве груза натяжение шкентеля становится равным весу *P* груза. Рис. 3.20 показывает, что при подъеме груза при любом его положении по высоте и любом наклонении судна линия действия силы тяжести, приложенной к грузу, проходит через точку подвеса, что соответствует нахождению *ЦМ* груза в этой точке.

Таким образом, подвешенный груз влияет на остойчивость так же, как при его перемещении в точку подвеса. Если  $l_n$  - расстояние между UM груза до подъема и точкой подвеса, то влияние на остойчивость подвешенного груза определится выражением

$$\delta h = -l_n \frac{P}{\Delta}.$$
(3.40)



Рис. 3.20. Подвешенный груз

3.8.4 Жидкий груз со свободной поверхностью

Рассмотрим, как изменяется остойчивость при перевозке жид-кого груза со свободной поверхностью.

В качестве жидкого груза рассматривается жидкость в судовом помещении (цистерне, трюме), имеющая свободную поверхность. Если свободная поверхность отсутствует, как, например, в запрессованном танке, то жидкость рассматривается как твердый груз.

Если на судне имеется жидкий груз, то при наклонениях судна жидкость за счет свободной поверхности перетекает в сторону наклонения и создает дополнительный кренящий момент, уменьшающий восстанавливающий момент. Поскольку восстанавливающий момент пропорционален метацентрической высоте, свободная поверхность ухудшает остойчивость.

На рис. 3.21 показан отсек с жидкостью со свободной поверхностью. Цифрами 0 - 0 обозначена поверхность и буквой f - UM жидкости в отсеке в прямом положении судна, цифрами 1 - 1 и буквой  $f_1$  – то же при крене судна  $\theta$ . Если обозначить буквой a точку пересечения линий действия силы жести, приложенной к жидкости, то

по аналогии с подвешенным грузом остойчивость судна изменится на величину

$$\delta h = -\frac{afP}{\Delta} = \frac{af\gamma_{\rm sc}v}{\Delta}, \qquad (3.41)$$

где *P*, *v* и  $\gamma_{\rm *}$  – масса, объем и плотность жидкости в отсеке.



Рис. 3.21. Жидкий груз со свободной поверхностью

Смещение ЦМ жидкости в отсеке аналогично перемещению ЦВ судна при малых наклонениях. По формуле для метацентрического радиуса судна (3.8)  $af = \frac{ix}{v}$ , где  $i_x$  – момент инерции площади свободной поверхности жидкости в отсеке относительно продольной оси. Подставив *af* в выражение (3.57), получим *формулу поправки на свободную поверхность* 

$$\delta h = -\frac{i_{\chi}\gamma_{\pi}}{4}.\tag{3.42}$$

Из приведенного выражения следует, что поправка на свободную поверхность зависит от момента инерции площади поверхности, плотности жидкости в отсеке, водоизмещения судна и не зависит от количества жидкости в отсеке.

В Информации об остойчивости судна для судовых цистерн приводятся значения поправки на свободную поверхность в виде поправки к моменту водоизмещения относительно *ОП*, рассчитанные с учетом плотности жидкости, для перевозки которой предназначена цистерна,

$$\delta m_z = i_x \gamma_{\mathcal{H}}. \tag{3.43}$$

Поскольку при больших наклонениях площадь свободной поверхности изменяется существенно, то в Информации об остойчивости могут быть приведены значения поправок на свободные поверхности для значений угла крена 0°, 30° и 60°, обозначаемые, соответственно,  $\delta m_{z0}$ ,  $\delta m_{z30}$  и  $\delta m_{z60}$ .

Если цистерна заполнена жидкостью почти полностью или жидкости очень мало, то при наклонениях площадь свободной поверхности существенно уменьшается и поправка на свободную поверхность не существенна. Эти случаи называются *недейственной потерей остойчивости*. По Правилам Регистра цистерна, заполненная менее, чем на 2%, считается пустой, а более чем на 98% - запрессованной, и в этих случаях поправки на свободную поверхность не учитываются.

3.8.5 Плавание на попутной волне

При плавании на попутной волне наибольшую опасность представляет случай, когда направление движения волны совпадает с направлением движения судна ( курсовой угол волны  $KVB = 180^{\circ}$ ), скорость волны *с* равна скорости судна  $V_s$ , а длина волны  $\lambda = L$ . При совпадении указанных параметров скорость перемещения профиля волны относительно корпуса судна невелика, поэтому можно считать, что корпус судна «фиксируется» относительно профиля волны.

Рассмотрим два взаимных положения корпуса судна и профиля волны, предельных с точки зрения остойчивости.

1) Вершина волны находится в районе миделя судна (рис. 3.22).

Оценку изменения остойчивости судна, находящегося на вершине волны, проведем по изменению формы его ватерлинии. При отсутствии волны ватерлиния судна изображается прямой линией  $B_0/I_0$ , а на волне ватерлиния  $B_w/I_w$  соответствует профилю волны. Рассмотрим изменения формы ватерлинии в носовой части (сечение 1 – 1), средней части (сечение 2 – 2) и корме (сечение 3 – 3) судна.

Из рисунка видно, что благодаря развалу бортов в носовой и кормовой части ватерлиния судна, мидель которого находится на вершине волны, становится более узкой, момент инерции ватерлинии уменьшается и, соответственно, остойчивость падает.

При нахождении миделя судна на подошве волны (рис. 3.23) ватерлиния становится шире и остойчивость увеличивается.

Потеря остойчивости при плавании на попутном волнении послужила причиной многих аварий. Помимо потери остойчивости судно, особенно малое, при плавании на попутной волне может быть захвачено волной, потерять

управляемость и совершить неуправляемый разворот лагом к волне - попасть в *брочинг*.

Признаками потери остойчивости на попутной волне являются:

- неожиданное самопроизвольное увеличение крена, существенно превышающее значение предшествующих углов статического крена или амплитуд качки;

- длительное по сравнению с четвертью периода собственных колебаний наклонение судна на борт, задержка (зависание) в положении максимального крена и медленное возвращение в исходное положение.



Рис. 3.22. Вершина волны в районе миделя



Рис. 3.23. Вершина волны в районе миделя

3.8.6 Посадка судна на мель

Рассмотрим посадку судна на мель (камни) в предположении, что контакт судна с мелью точечный, при этом водонепроницаемость корпуса не нарушена.

До посадки на мель судно имело водоизмещение  $\Delta$ , параметры посадки  $d_n$ ,  $d_k$ ,  $\theta = 0$  и метацентрические высоты h и H.

При точечном контакте корпуса судна с мелью реакция мели *R* принимается в виде сосредоточенной силы, приложенной в точке контакта и действующей вертикально вверх.

На рис. 3.24 ватерлиния судна до посадки на мель обозначена *ВЛ*, ватерлиния судна на мели –  $BЛ_{M}$ ;  $\delta d_{\mu}$ ,  $\delta d_{\kappa}$  – изменения осадок носом и кормой судна на мели.

Реакция мели определяется выражением

 $R = \gamma S \delta d, \tag{3.44}$ 

где  $\gamma$  – плотность забортной воды; *S* – площадь ватерлинии

 $\delta d = \frac{\delta d \mathbf{h} - \delta d \mathbf{k}}{2} - \delta \psi x_f$  – изменение осадки в районе ЦТ площади ватерлинии;

 $\delta d_{\mu}$ ,  $\delta d_{\kappa}$  - изменения осадок носом и кормой, вызванные посадкой на мель;

 $\delta \psi = - \frac{\delta d\mathbf{h} - \delta d\mathbf{\kappa}}{L}$  – изменение угла дифферента.

Изменение начальной поперечной МЦВ определяется выражением

$$\delta h = -\frac{R}{\Delta - R} \left( d + \frac{\delta d}{2} - h \right), \tag{3.45}$$

где h - M UB судна до посадки на мель,  $h_{M} = h + \delta h - M UB$  на мели.

Предполагая, что величины изменения крена и дифферента  $\delta\theta$  и  $\delta\psi$  от посадки на мель малые, и пренебрегая изменением продольной *МЦВ*, найдем координаты точки касания грунта

$$x_{R} = x_{f} + \delta \psi \left( \frac{LM_{1M}}{R} + d_{cp M} \right) ; \quad y_{R} = \frac{\delta \theta}{57.3} \left( \frac{\Delta h_{M}}{R} + d_{cp M} \right),$$

(3.46)

где  $M_{l_M}$  – момент, дифферентующий на 1м;  $d_{cp_M} = \frac{d_{\text{HM}} - d_{\text{KM}}}{2}$ .



Рис. 3.24. Судно на мели

Самостоятельное снятие судна с мели можно обеспечить за счет перемещения грузов или разгрузки судна, или комбинацией этих способов. В любом случае, задача самостоятельного всплытия судна с мели сводится к обеспечению условия R = 0, что достигается обеспечением равенства осадки в районе шпангоута с абсциссой  $x_R$  свободно плавающего судна осадке  $d_R$  в районе касания грунта судна на мели. Искомая осадка определяется выражением

$$d_{R} = \frac{d_{\rm HM} + d_{\rm KM}}{2} + (d_{\rm HM} - d_{\rm KM}) \frac{x_{R-} x_{f}}{L}.$$
 (3.47)
### 3.8.7 Крен судна на циркуляции

При циркуляции судна возникает кренящий момент, вызывающий крен в сторону, обратную направлению поворота. Кренящий момент образован центробежной силой  $F_{LLE}$ , приложенной к LM судна, и силой гидродинамического сопротивления дрейфу  $F_{\Gamma,Z}$ , приложенной к точке корпуса, отстоящей от ОП на расстояние, примерно равное d/2.

Схема наклонения судна на циркуляции показана на рис. 3.25.

Кренящий момент и статический угол крена на установившейся циркуляции могут быть вычислены по формулам Г.А. Фирсова, используемым в практике Регистра:

$$M_{\kappa p} = 0.233 \Delta V_0^2 \quad \frac{z_{g-\frac{d}{2}}}{L}; \quad \theta^{\circ} = 1.4 V_0^2 \frac{z_{g-\frac{d}{2}}}{hL},$$

(3.48) где  $V_0$  - скорость судна на прямом курсе при выходе его на циркуляцию.



Рис. 3.25. Крен на циркуляции

## 3.8.8 Перевозка сыпучих грузов

У судов, перевозящих зерно или другие навалочные грузы, при сильной бортовой качке может произойти смещение груза на борт. Возникающий при этом кренящий момент может создать опасный для судна крен.

В отличие от жидкого груза смещение навалочного груза начинается при наклонении судна на угол, превышающий по величине

угол естественного откоса  $\alpha_{\rm n}$  этого груза (углом естественного откоса навалочного груза называется угол между поверхностью сыпучего груза и горизонталью при его свободном пересыпании). Навалочные грузы со значением угла естественного откоса  $30^{\circ} u$  менее считаются навалочными грузами, склонными к сухому смещению, соответственно, относятся к опасным грузам. Подобные грузы называются сыпучими.

Рассмотрим, как изменяется *ДСО* судна, если груз, который оно перевозит, является сыпучим (рис. 3.26).

Предположим, что угол естественного откоса при наклонении судна на левый борт равен углу при наклонении на правый борт.

Если бы перевозимый груз не был сыпучим, то *ДСО* судна на рис. 3.26 соответствовала бы пунктирная линия.

Пусть судно, перевозящее сыпучий груз, испытывает качку с амплитудой  $\theta_r$ . Если в начальный момент груз не был смещен, то при увеличении крена от 0 до  $\theta_I = \alpha_n$  (т. *А* диаграммы) груз не будет пересыпаться, и участок диаграммы совпадает с исходной диаграммой. При дальнейшем увеличении крена груз будет пересыпаться в сторону наклонения, и плечи диаграммы будут меньше, чем у исходной диаграммы. После достижения угла крена, равного амплитуде качки  $\theta_r$  (т. *В* диаграммы), судно начнет наклонение на другой борт, при этом на правом борту будет максимальное количество сместившегося груза. Пересыпание груза с правого борта на левый начнется после достижения угла крена  $\theta = \theta_r - 2\alpha_n$ . В т. *D* угол крена будет равен нулю, однако часть груза еще находится на правом борту. Точка *E* соответствует точке *A* диаграммы при наклонении на левый борт. Участок *BE* диаграммы зависит от амплитуды качки и при увеличении амплитуды т. *B* стремится к т.  $\theta_{rn}$  на оси наклонений.

Перевозка сыпучих грузов регламентируется международными и национальными нормативными документами.

Перевозятся сыпучие грузы как на специализированных судах (балкерах), так и на универсальных сухогрузных судах. Для разравнивания поверхности груза производится *штивка*.

Если сыпучий груз имеет большой удельный погрузочный объем (УПО) – объем помещения, необходимый для размещения одной тонны груза (зерновые грузы, щепа и т.п.), позволяющий полностью заполнить грузовые помещения, то благодаря конструкции в трюмах балкера не останется пустот, а в трюмах универсального сухогрузного судна пустоты в забоях трюмов останутся, и груз будет иметь

возможность сместиться на качке. Сечения трюмов балкера и универсального сухогрузного судна показаны на рис. 3.34, пустоты в забоях загруженного трюма заштрихованы.



Рис. 3.26. ДСО судна с сыпучим грузом на качке

Если груз тяжелый, то возможно его смещение на обоих типах судов.

В зависимости от величины удельного погрузочного объема навалочный груз, склонный к сухому смещению подразделяется на зерновой ( $Y\Pi O \ge 1,0 \ m^3/m$ ) и не зерновой ( $Y\Pi O < 1,0 \ m^3/m$ ).

Если трюм судна, перевозящего сыпучий груз, заполнен не полностью или в полном трюме в забоях имеются пустоты, то имеется возможность смещения груза. В этом случае, к остойчивости судна, перевозящего подобный груз, предъявляются дополнительные требования, зависящие от вида груза -

а) зерновой груз (УПО  $\geq 1,0 \ \text{м}^3/m$ ):

- исправленная начальная метацентрическая высота  $h \ge 0.30 \ M$ ;
- угол статического крена от условного смещения груза  $\theta_a \leq 12^{\circ}$ ;
- остаточная площадь  $\square CO S_{ocm} \ge 0,075 \text{ } M*pad;$

б) не зерновой груз (УПО <  $1,0 \text{ } \text{м}^3/\text{m}$ ):

- исправленная начальная метацентрическая высота *h* ≥ 0,70 *м*;
- угол статического крена от условного смещения груза  $\theta_a \leq 12^\circ$ ;
- остаточная площадь  $\square CO S_{ocm} \ge 0,12 \text{ } M*pad;$

Угол статического крена от условного смещения груза  $\theta_a$  и остаточная площадь *ДСО S*<sub>ocm</sub> демонстрируются на диаграмме статической остойчивости, представленной на рис. 3.27.

Для определения угла крена  $\theta_a$  и остаточной площади ДСО  $S_{ocm}$  рассчитывается плечо кренящего момента от возможного смещения груза l по формуле

$$l = \frac{M_{o6}*\mu}{\Delta}$$

где  $M_{o\delta}$  – объемный кренящий момент, равный сумме произведений объемов пустот в трюмах на расстояния смещения центра тяжести этих объемов при смещении груза;  $\mu$  - удельный погрузочный объем груза.



Рис. 3.27. Сечение трюма: а) балкер; б) универсальное сухогрузное судно (заштрихованы пустоты)

Кренящий момент, возникающий при поперечном перемещении груза, пропорционален косинусу угла крена (см. 3.8.1 Перенос груза), следовательно, кривая плеча момента имеет вид косинусоиды, аппроксимируемой наклонной прямой. Для ее проведения на оси  $0 - l_{cm}$  ДСО судна откладывается плечо *l* кренящего момента от условного смещения груза, на вертикали, проходящей через  $\theta = 40^{\circ}$  вверх откладывается 0,8*l*. Через полученные точки проводится прямая кренящего момента от условного смещения груза. Точка пересечения линии кренящего момента с ДСО определяет величину угла статического крена  $\theta_a$  от условного смещения сыпучего груза. Площадь участка под ДСО, ограниченного линией кренящего момента и вертикалью, проходящей через  $\theta = 40^{\circ}$  (на рис. 3.28 – заштрихованный участок), называется остаточной площадью ДСО. После завершения погрузки поверхность навалочного груза в трюмах для уменьшения возможности смещения подлежит разравниванию (штивке).



Рис. 3.28. Дополнительные нормируемые параметры ДСО

3.9 Практическое использование ДСО

## 3.9.1 Смещение груза

Кренящий момент, возникающий от смещения груза, пропорционален косинусу угла крена (см. «Перенос малого груза»)  $M_{\kappa p} = P l_y$  $cos \theta$ , где P – масса сместившегося груза,  $l_y$  - поперечное смещение UT груза. Подставляя в выражение кренящего момента значения угла крена, получаем точки кривой, которые наносим на  $\mathcal{ACO}$  (рис. 3.29). Точка пересечения построенной кривой кренящего момента с кривой восстанавливающего момента на диаграмме определяет величину угла крена  $\theta_{cm}$  от смещения груза.

Используя указанный метод, можно определить максимальная масса сместившегося груза  $P_{np}$ , не приводящее к опрокидыванию судна и предельный угол крена  $\theta_{np}$  от смещения груза. Для этого необходимо подобрать косинусоиду, касательную к ДСО. Точка

касания кривых определяет угол  $\theta_{np}$ , а коэффициент косинусоиды -  $P_{np}l_y$ .



Рис. 3.29. Определение углов крена от смещения груза

3.9.2 Спрямление судна с несимметричной загрузкой

При несимметричной загрузке UM судна не будет находиться в  $D\Pi$  и, соответственно, судно будет иметь статический крен  $\theta_{cm}$ . Диаграмма, соответствующая такому случаю загрузки, представлена на рис. 3.15.

Для спрямления судна необходимо создать кренящий момент  $M_{\kappa p}$ , в представленном случае — на левый борт, равный

$$M_{\kappa p} = \Delta y_g,$$

где  $\Delta$  - водоизмещение судна;  $y_g$  - ордината  $\mu T$  судна с несимметричной загрузкой.

На диаграмме спрямление судна выражается переносом оси  $\theta\theta$  в положение  $y_g\theta_l$ .

Аналогичный подход используется при расчете кренгования судна – наклонения для производства работ на обшивке погруженного участка корпуса судна. Кренящий момент создается перемещением жидких запасов в бортовые цистерны или приемом жидкого балласта.



Рис. 3.30. Спрямление судна с несимметричной загрузкой

3.9.3 Спрямление судна с отрицательной начальной МЦВ

Если у судна начальная МЦВ отрицательна, то его ДCO будет иметь вид, показанный на рис. 3.31, и судно будет имеет крен на правый  $\theta_{cm\Pi p E}$  или левый борт  $\theta_{cm\Pi p E}$ .



Рис. 3.31. ДСО судна с отрицательной остойчивостью

Предположим, что судно с отрицательной *МЦВ* имеет крен на правый борт. Если этот крен попытаться спрямить, создав кренящий момент на левый борт, то при достижении создаваемого момента величины  $\Delta l_{\kappa p}$ , судна перевалится на левый борт и будет иметь крен  $|\theta_{cm , JEI}| > |\theta_{cm , JE}|$ , то есть от подобного спрямления крен только увеличится, поэтому спрямлению крена должно предшествовать восстановление остойчивости.

# 3.10 Оперативный контроль остойчивости

В практике часто случается так, что произвести расчет остойчивости невозможно из-за отсутствия времени (например, при маневрировании) или из – за недостатка информации (например, при перевозке контейнеров). В этом случае широко используются опытные методы расчета остойчивости.

1) Расчет МЦВ по периоду бортовой качки.

Этот метод наиболее распространен в судоводительской практике. Основывается метод на известной зависимости

$$h = C/\tau_c^2, \tag{3.49}$$

где *С* – эмпирический коэффициент,  $\tau_c$  – период собственных бортовых колебаний судна.

Зависимость *МЦВ* от периода качки в табличной форме приводится в Информации об остойчивости судна. Эта же таблица обычно вывешивается на видном месте на мостике судна.

По рекомендации ИМО выражение (3.52) может быть представлено в виде

$$h = (aB/\tau_c)^2,$$
 (3.66)  
где  $a = 0.373 + 0.023B/d - 0.00043L, B$  – ширина судна.

При определении *МЦВ* по периоду колебаний судна следует помнить, что при отсутствии волнения достаточно измерить период одного колебания, тогда как на волнении – не менее 9...11 колебаний, поскольку на спокойной воде период качки соответствует периоду собственных колебаний, а на нерегулярном волнении – в среднем стремится к периоду собственных колебаний (на регулярном волнении период качки равен периоду встречи судна с волной).

# 2) Кренование судна.

 $M \amalg B$  определяется по метацентрической формуле остойчивости по величине угла крена от известного кренящего момента. Если определено, что при перемещении груза P на расстояние l поперек судна возникает крен  $\theta^{\circ}$ , то  $M \amalg B$  определится из выражения

 $h = 57,3 \ Pl/(\Delta \theta^{\circ}).$  (3.67) Этот метод широко используется на судах, на которых невозможно точно определить аппликату *ЦТ* груза в трюмах, на пример, на лесовозах или контейнеровозах. Такие суда обычно оснащаются специальной системой кренования, состоящей из пары бортовых цистерн для определения *МЦВ* по углу крена.

Метод кренования также используется для проверки положения *ЦТ* порожнего судна после его постройки или модернизации. В этом случае кренование проводится инспектором Регистра по указанной в Правилах Регистра методике.

4 Непотопляемость

Непотопляемостью называется способность судна в достаточной мере сохранять свои мореходные качества при аварийном затоплении одного или нескольких отсеков.

Вопросы, связанные с конструктивным обеспечением и нормированием непотопляемости судна, регламентируются Правилами Регистра (ч. V «Деление на отсеки»).

4.1 Нормирование аварийной посадки и остойчивости

При аварийном затоплении непотопляемость судна считается обеспеченной, если в конечной стадии затопления выполняются требования Регистра к аварийной плавучести и аварийной остойчивости.

Аварийная плавучесть и аварийная остойчивость судна считаются обеспеченными, если при затоплении отсеков выполняются следующие условия:

1) начальная метацентрическая высота, рассчитанная по методу постоянного водоизмещения, в конечной стадии затопления для ненакрененного судна до принятия мер по ее увеличению должна быть не менее 0,05 м.

Для непассажирского судна по согласованию с Регистром допускается положительная *МЦВ* меньше 0,05 м;

2) угол крена при несимметричном затоплении должен быть не более  $20^{\circ}$  до спрямления и не более  $12^{\circ}$  после;

3) протяженность части  $\square CO$  с положительными плечами без учета срабатывания перетоков, а также после спрямления (с учетом угла заливания) должна быть не менее 20°;

4) максимальное плечо *ДСО* в пределах указанного участка должно быть не менее 0,1 м;

5) площадь части ДСО с положительными плечами должна быть не менее 0,0175 м∗рад;

6) аварийная ватерлиния должна проходить по крайней мере на 0,3 м ниже опасных отверстий (отверстий, через которые вода может распространиться по судну).

Для грузовых судов допускается вход в воду палубы переборок и даже открытой палубы.

4.2 Расчеты аварийной посадки и аварийной остойчивости

4.2.1 Категории затопленных отсеков

Рассматривают три категории затопленных отсеков.

К *первой категории* (рис. 4.1, а) принадлежат отсеки, закрытые сверху, полностью заполненные (не имеющие свободной поверхности).



Рис. 4.1. Категории затопленных отсеков

Во *вторую категорию* (рис. 4.1, б) входят отсеки, заполненные частично (имеющие свободную поверхность) и не сообщающиеся с забортной водой.

*Третью категорию* (рис. 4.1, в) составляют отсеки, открытые сверху и сообщающиеся с забортной водой.

Перечисленные категории отсеков являются основными. Однако наряду с ними на практике встречаются затопленные отсеки, отличающиеся по характеру затопления от перечисленных. Так, при отсутствии вентиляции подпалубного пространства в отсеке третьей категории, образуется воздушная подушка (рис. 4.1, г), и уровень воды в отсеке не совпадает с действующей ватерлинией. Встречаются также отсеки второй категории, у которых при наклонении судна часть воды может выливаться за борт (рис. 4.1, д).

# 4.2.2 Коэффициенты проницаемости

Поскольку в затопленном отсеке всегда имеются водоизмещающие предметы (грузы, механизмы, элементы набора и т. п.), то количество воды, находящееся в отсеке, определяется при помощи коэффициента проницаемости  $\chi$ , равного отношению объема фактически влившейся в отсек воды v к теоретическому объему  $v_{\rm T}$  затопленной части отсека  $\chi = v/v_{\rm T}$ .

Правилами Регистра регламентируются следующие значения коэффициентов проницаемости:

- для помещений, занятых оборудованием (МКО, технологическое оборудование на промысловых судах и т.п.) - 0,85;

- для помещений, занятых запасами или генеральным грузом - 0,60;

- для помещений, загруженных колесной техникой или другими грузами с высокой проницаемостью - 0,95;

- для пустых сухогрузных трюмов и для цистерн под жидкие запасы - 0,98;

- для пустых рефрижераторных трюмов - 0,93.

Коэффициент проницаемости частично заполненного грузом помещения  $\chi_{mp}$  определяется выражением

$$\chi_{mp} = \chi_0 - p\mu(\chi_0 - \chi_{rp})/V, \qquad (4.1)$$

где  $\chi_0$  – коэффициент проницаемости пустого помещения (0,98 для сухогрузного трюма или 0,93 – для рефрижераторного);

р,  $\mu$  - масса и удельный погрузочный объем груза в помещении;

*χ*<sub>гр</sub> – коэффициент проницаемости груза;

*V* – объем помещения.

Если отсек состоит из нескольких помещений с разными значениями коэффициента проницаемости, то коэффициент проницаемости такого отсека  $\chi_{omc}$  определяется выражением

$$\chi_{omc} = \Sigma(\chi_i V_i) / \Sigma(V_i), \qquad (4.2)$$

где  $\chi_i$ ,  $V_i$  - коэффициент проницаемости и объем i – го помещения, составляющего отсек.

## 4.2.3 Метод приема груза для расчета затопления малого отсека

Малым называется отсек, затопление которого не приводит к существенному изменению площади и формы действующей ватерлинии.

Метод приема груза используется при расчетах затопления отсеков первой и второй категории, т.е. отсеков, количество забортной воды в которых известно и это количество от посадки судна не зависит. Параметры аварийной посадки и аварийной остойчивости определяются из выражений, приведенных в разделе «Прием малого груза».

Если в отсеке затопленный объем обозначить V, координаты затопленного объема -  $x_v$ ,  $y_v$ , и  $z_v$ , коэффициент проницаемости отсека -  $\chi$ , а метацентрические высоты до затопления -  $h_0$ ,  $H_0$ , то в отсеке первой и второй категории объем влившейся в отсек забортной воды v, угол крена  $\theta$  и изменение дифферента  $\delta D_f$  определяются выражениями

$$v = \chi V; \ \theta = \operatorname{arctg}\left[\frac{v y_{v}}{h(\nabla + v)}\right]; \ \delta D_{f} = \frac{\nabla L(x_{v} - x_{f})}{H(\nabla + v)},$$
(4.3)

где  $h = h_0 + \delta h$ ,  $H = H_0 + \delta H$ .

Изменение метацентрических высот

$$\delta h = \frac{v}{\nabla + v} \left( d + \frac{\gamma v}{200q} - h_0 - z_v - \frac{i_x}{v} \right); \tag{4.4}$$

$$\delta H = \frac{v}{\nabla + v} \left( d + \frac{\gamma v}{200q} - H_0 - z_v - \frac{i_y}{v} \right); \approx - \frac{v}{\nabla + v} \left( H_0 + \frac{i_y}{v} \right), \qquad (4.5)$$

где q – число тонн на 1 см осадки;  $i_x = k_x \chi l b^3$ ,  $i_y = k_y \chi l^3 b$  – моменты инерции поверхности воды в отсеке;  $k_x$ ,  $k_y$  – коэффициенты моментов инерции; l, b – длина и ширина отсека.

При определении изменения метацентрической высоты для отсека первой категории в выражении (4.5) принимается  $i_x = i_y = 0$ .

# 4.2.4 Метод постоянного водоизмещения для расчета затопления малого отсека

Метод постоянного водоизмещения используется для расчета затопления отсеков третьей категории, т.е. тех отсеков, уровень воды в которых совпадает с ватерлинией судна. Суть метода состоит в том, что весовое водоизмещение судна при затоплении отсека не изменяется, а из водоизмещающего объема корпуса исключается затопленный объем отсека, и соответственно, уменьшается площадь действующей ватерлинии, поэтому данный метод также называется методом исключения.

Хотя из водоизмещающего объема корпуса исключается весь отсек, однако ввиду неизменности водоизмещения, на оставшуюся часть водоизмещающего объема перераспределяется затопленный по исходную (до затопления) ватерлинию объем, равный объему *v* влившейся в отсек воды

$$v = \chi V, \tag{4.5}$$

где V - затопленный по исходную ватерлинию объем отсека;  $\chi$  - коэффициент проницаемости отсека.

Обозначим  $S_0$ ,  $x_{f0}$  - площадь исходной ватерлинии и абсцисса ее UT;  $s = \chi l b$  – потерянная площадь ватерлинии; l, b - длина и ширина затопленного отсека на уровне исходной ватерлинии;  $x_s$ ,  $y_s$  - координаты UT потерянной площади ватерлинии;  $\delta I_x$ ,  $\delta I_{yf}$  – потерянные моменты инерции.

Средняя осадка судна при затоплении отсека увеличится на величину

$$\delta d = \frac{v}{S_0 - s}.\tag{4.6}$$

Координаты ЦТ поврежденной ватерлинии

$$x = x_{f0} - (x_s - x_{f0}) \frac{s}{s_0 - s}; \quad y_f = y_s \frac{s}{s_0 - s}.$$
 (4.7)

Потерянные моменты инерции

$$\delta I_x = i_x + sy_s^2 + (S_0 - s)y_f^2;$$

$$\delta I_{x\xi} = i_x + s(x_{\xi} - x_{\xi})^2 + (S_0 - s)(x_{\xi} - x_{\xi})^2$$
(4.8)

 $\delta I_{yf} = i_y + s(x_s - x_{f0})^2 + (S_0 - s)(x_f - x_{f0})^2$ , где  $i_x = k_x \chi \ l \ b^3$ ;  $i_y = k_y \chi \ l^3 \ b$ ; l, b - длина и ширина затопленного отсека.

Изменение метацентрических высот

$$\delta h = \frac{v}{\nabla} \left( d + \frac{\delta d}{2} - h_0 - z_v - \frac{\delta I_x}{v} \right); \tag{4.9}$$
$$\delta H = \frac{v}{\nabla} \left( d + \frac{\delta d}{2} - H_0 - z_v - \frac{\delta I_{yf}}{v} \right) \approx \frac{\delta I_{yf}}{\nabla}.$$

Метацентрические высоты  $h = h_0 + \delta h$ ,  $H = H_0 + \delta H$ . Угол крена и изменение дифферента

$$\theta = \frac{v(y_v - y_f)}{\nabla h}; \quad \delta D_f = \frac{vL(x_v - x_f)}{\nabla H}.$$
(4.10)

## 4.3 Обеспечение непотопляемости судна

Непотопляемость судна обеспечивается конструктивно, при помощи организационно-технических мероприятий и непосредственной борьбой за живучесть аварийного судна.

Конструктивное обеспечение непотопляемости в первую очередь сводится к разбиению судна поперечными переборками на водонепроницаемые отсеки.

При проектировании поперечных переборок *определяется предельная длина отсека* – условная длина отсека, при затоплении которого при заданном значении коэффициента проницаемости аварийная ватерлиния будет касаться *предельной линии погружения*. Предельная линия погружения на судах, имеющих обычное угловое соединение палубного стрингера с ширстреком – линия пересечения наружной поверхности настила *палубы переборок* с наружной поверхностью бортовой обшивки у борта. Палуба переборок – самая верхняя непрерывная палуба, до которой доводятся поперечные водонепроницаемые переборки по всей ширине судна.

Количество отсеков, при затоплении которых непотопляемость судна конструктивно обеспечена, в символе класса судна обозначается цифрой в прямоугольнике (например, [1] или [2]).

Согласно требованиям Регистра у рыболовных судов непотопляемость должна быть обеспечена для судов длиной более 100 м при затоплении одного отсека и для судов длиной более 160 м – двух отсеков.

У некоторых судов, например, с горизонтальным способом погрузки, непотопляемость обеспечивается водонепроницаемыми платформами.

Большое значение в конструктивном обеспечении непотопляемости имеет двойное дно.

*Организационно техническое обеспечение непотопляемости* предполагает, во-первых, наличие на судне аварийного имущества (брусья, струбцины, пластырь и т.п.) и осушительных систем, а вовторых, – подготовку экипажа к борьбе с водой.

*Борьба за живучесть судна* при аварийном затоплении судовых помещений должна вестись надлежащим образом, поскольку неправильные действия экипажа могут привести к гибели любого судна.

### 4.4 Спрямление аварийного судна

Спрямление аварийного судна зависит от характера затопления поврежденных отсеков. Рассматривают пять типов затопления.

Первый тип. Затопление симметричное относительно ДП, при котором начальная МЦВ существенно положительна и крен отсутствует. В этом случае ограничиваются поддержанием или, если это необходимо, увеличением запаса остойчивости и плавучести путем откачки воды из высокорасположенных отсеков. Уменьшение дифферента достигается за счет перекачки жидких грузов и осушения отсеков в затопленной оконечности.

Второй тип. Затопление асимметричное относительно ДП, при котором начальная MUB сохраняется положительной и судно плавает с креном  $\theta_{cm}$ . Для спрямления судна создают момент, близкий к кренящему, за счет приема балласта в цистерны противоположного погруженному борта и откачкой воды из затопленных отсеков. Допускается также перекачка жидких грузов с борта на борт.

*Третий тип.* Затопление симметричное относительно ДП, при котором начальная МЦВ отрицательна и судно плавает с креном  $\theta_{cm/lp}$  на правый борт или  $\theta_{cm/l}$  на левый борт. В этом случае недопустимо спрямление судна за счет создания спрямляющего момента, поскольку такой момент может привести к переваливанию судна на противоположный борт и, как следствие, к возникновению динамического момента, и при малом запасе динамической остойчивости судно может опрокинуться. Спрямление судна осуществляется за счет восстановления остойчивости при обязательном сохранении симметрии затопления за счет: откачки за борт фильтрационной воды (воды, поступающей в смежные с затопленными помещения, с поступлением которой справляется осушительная система) из крупных помещений и помещений расположенных выше ватерлинии; удаления за борт высокорасположенных грузов; спуска воды в нижележащие помещения и устранения больших многоярусных свободных поверхностей; балластировки судна и др.

Четвертый тип. Затопление асимметричное относительно ДП, при котором начальная *МЦВ* отрицательна и судно имеет крен на борт, совпадающий с затопленным. Восстановление остойчивости обеспечивается теми же мероприятиями, что и в третьем случае, после проведения которых остаточный крен ликвидируют созданием спрямляющего момента. Пятый тип. Затопление асимметричное относительно ДП, при котором начальная МЦВ отрицательна и судно имеет крен на борт, противоположный затопленному и, по этой причине, величина крена не большая. В этом случае наибольшую опасность представляет переваливание судна на другой борт с возможным возникновением существенного динамического момента, способного привести к опрокидыванию судна. Для предотвращения переваливания судна на противоположный борт в первую очередь принимается балласт в танки двойного дна погруженного борта, после этого действуют, как в четвертом случае.

# 4.5 Фактор балластировки цистерны

Для расчета изменения метацентрической высоты судна от приема балласта в цистерну используют величину, называемую *фактор балластировки цистерны*.

Фактор балластировки записывается в виде дроби  $\Phi E_{100}/\Phi E_{50}$ , в которой в числителе указывается значение фактора балластировки при полном заполнении цистерны, а в знаменателе – при пятидесятипроцентном заполнении, т.е. при таком заполнении, когда считается, что поправка на свободную поверхность жидкости в цистерне максимальна.

Для расчета фактора балластировки используются выражения

$$\Phi \mathcal{F}_{100} = (z_{gcp} - z)w;$$
(4.11)
$$\Phi \mathcal{F}_{50} = (z_{gcp} - z)w/2 - i_{r}.$$

где  $z_{gcp}$  – средне значение аппликаты UM судна, определяемое по типовым случаям нагрузки; z – аппликата объема цистерны; w – емкость цистерны;  $i_x$  – момент инерции площади свободной поверхности цистерны при ее половинном заполнении.

Величина изменения *МЦВ* судна при заполнении цистерны определяется выражением

$$\delta h = \Phi \mathcal{B}_{\gamma_{\mathcal{H}}} \Delta, \tag{4.12}$$

где  $\gamma_{\mathcal{H}}$  – плотность жидкости, используемый для балластировки цистерны.

Цистерны с отрицательным значением  $\Phi E_{50}$  необходимо использовать для улучшения остойчивости осторожно, поскольку в процессе заполнения такой цистерны остойчивость судна будет уменьшаться.

### 4.6 Информация о непотопляемости судна

Информацией о непотопляемости называется Информация об аварийной посадке и аварийной остойчивости судна. Информацией о непотопляемости снабжаются суда, у которых согласно требованиям Регистра непотопляемость должна быть обеспечена.

Информацию о непотопляемости составляют по данным расчетов непотопляемости для учета при эксплуатации требований, связанных с делением на отсеки, и оценки состояния аварийного судна для типовых случаев загрузки при получении типовых пробоин.

Информация содержит необходимые сведения о судне, продольный разрез, планы палуб и двойного дна, характерные поперечные сечения с указанием всех водонепроницаемых переборок и выгородок, об отверстиях в них и характере их закрытия, а также о судовых системах, используемых в борьбе за живучесть судна.

В число обязательных материалов включают результаты расчетов аварийной посадки и аварийной плавучести судна для типовых случаев загрузки при затоплении отсеков и групп отсеков.

Прочие сведения, приводимые в Информации, включают указания по использованию устройств для перетока воды и аварийных средств, а также вытекающие из особенностей данного судна возможные последствия затопления, рекомендуемые и запрещенные действия экипажа при эксплуатации и авариях судна, связанных с затоплением.

# Таблица величин, принятых в части IV «Остойчивость» Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства

Регистр	ИМО	Величина
1	2	3
Δ	Δ	Водоизмещение
$\Delta_0$	-	Водоизмещение судна порожнем
γ	γ	Плотность
Av	Av	Площадь парусности
$A_{\kappa}$	-	Площадь килей
арасч	-	Расчетное ускорение (в долях g)
В	В	Ширина судна
$C_B$	$C_B$	Коэффициент общей полноты
D	D	Высота борта
d	d	Осадка по грузовому размеру
$d \otimes$	$d_M$	Осадка на миделе
g	g	Ускорение свободного падения
h	GM	Исправленная начальная метацентрическая вы-
		сота (с поправкой на свободную поверхность)
ho	$GM_0$	Начальная метацентрическая высота без по-
		правки на свободную поверхность
Н	-	Продольная метацентрическая высота
K	-	Критерий погоды
$K^*$	-	Критерий ускорения
k	-	Коэффициент, учитывающий влияние скуловых
		килей
L	L	Длина судна
l	GZ	Исправленное плечо статической остойчивости
l <sub>max</sub>	$GZ_m$	Максимальное плечо диаграммы статической
		остойчивости с поправкой на свободные поверх-
		ности
ld	l	Плечо динамической остойчивости с поправкой
		на свободные поверхности
$l_F$	-	Плечо формы относительно центра величины
lĸ	-	Плечо формы относительно основной плоскости
$l_c$	-	Плечо опрокидывающего момента, вычисленное
		с учетом поправки на свободную поверхность
$l_{v}$	-	Плечо кренящего момента
θ	θ	Угол крена
$\theta_{\rm f}$	$\theta_{\rm f}$	Угол заливания
$\theta_{\rm v}$	$\theta_{\rm v}$	Угол заката диаграммы статической остойчиво-
		сти

$\theta_{\rm m}$	$\theta_{m}$	Угол, соответствующий максимуму диаграммы
		статической остойчивости
$\theta_{1r}$	$\theta_r$	Амплитуда качки судна с круглой скулой
$\theta_{2r}$	$\theta_{\rm r}$	Амплитуда качки судна с килями
$M_c$	$M_c$	Опрокидывающий момент
$M_{v}$	$M_{\nu}$	Кренящий момент от шквала
$M_{hl}$	$M_h$	Кренящий момент от скопления пассажиров
$M_{h2}$	$M_h$	Кренящий момент от циркуляции
$\delta m_h$	-	Поправка на свободную поверхность
т	-	Нормируемая частота собственных колебаний
		судна
$p_{v}$	$p_v$	Расчетное давление ветра
$v_s$	-	Скорость прямолинейного движения судна
$X_1, X_2$	-	Множители для определения амплитуды качки
У	-	Ордината центра тяжести груза от ДП
Уg	-	Бортовое смещение центра тяжести судна от ДП
Y	-	Множитель (функция) для определения ампли-
		туды качки
z	-	Плечо парусности
Zg	KG	Возвышение центра тяжести над основной плос-
		костью
$X_c$	$X_B$	Абсцисса центра величины
$X_{g}$	$X_G$	Абсцисса центра тяжести

### 5 Качка судна

#### 5.1 Характеристики качки судна

Качкой называются колебательные движения, совершаемые судном на поверхности воды. Основной причиной качки является морское волнение.

Судно как свободно плавающее тело имеет 6 степеней свободы, однако только три вида колебательных движений из шести рассматриваются как качка судна: вращение вокруг продольной оси – *бортовая качка (rolling)*; вращение вокруг поперечной оси – *килевая качка (pitching)*; поступательные движения вдоль вертикальной оси – *вертикальная качка (heaving)*.

Горизонтально-продольные колебания (*surging*) рассматриваются в ходкости судна как фактор неравномерности хода судна; горизонтально-поперечные колебания (*swaying*) являются составляющей дрейфа судна и вращение вокруг вертикальной оси (*yawing*) – как рыскание судна.

Характеристиками качки являются: *амплитуда* – наибольшее отклонение судна от положения равновесия; *частота* – количество колебаний за  $2\pi$  секунд; *период* – время, затрачиваемое судном за одно полное колебание; *разность фаз* – разность аргументов функций, описывающих колебательный процесс судна и волнения.

Судно обладает хорошей мореходностью тогда, когда его качка имеет малые амплитуды и большие периоды, а также благоприятную разность фаз (например, при килевой качке максимальное опускание носовой оконечности совпадает с нахождением у форштевня подошвы волны).

Понимание физических процессов, определяющих качку судна, позволяет судоводителю за счет оптимального распределения запасов и груза, а также выбора оптимальных курса и скорости относительно волны добиться оптимальных с позиции качки условий плавания.

На тихой воде качка рассматривается как свободные колебания судна, на волнении - как вынужденные колебания.

5.2 Качка судна на тихой воде

При изучении качки судна на тихой воде используются следующие допущения:

- отклонения судна от положения равновесия малы;

- силы сопротивления воды колебаниям судна пропорциональны первой степени скорости;

 поверхность воды при колебаниях судна остается спокойной;

- восстанавливающие моменты (поперечный и продольный) пропорциональны углам наклонения.

Если судно отклонить от положения равновесия, а затем устранить причину отклонения, то судно будет совершать свободные колебания.

Для составления уравнений качки используют три системы координат:

1) Подвижная *Gxyz* с началом в *ЦТ* судна; ось *Gz* направлена вниз, направление остальных осей совпадают с соответствующими судовыми координатами; служит для описания геометрии корпуса судна.

2) Подвижная  $\partial \xi \eta \zeta$ , лежит в плоскости поверхности невзволнованной воды; в исходном состоянии судна направление осей  $\partial \xi$ ,  $\partial \eta$ , и  $\partial \zeta$  совпадают с направлением Gx, Gy и Gz, соответственно; служит для отклонений судна от положения равновесия.

3) Неподвижная  $0\xi_1\eta_1\zeta_1$ ; лежит в плоскости поверхности невзволнованной воды; служит для описания направления движения судна и распространения волн.

На основании уравнений движения Эйлера уравнения, описывающие вертикальную, бортовую и килевую качку соответственно, будут иметь вид:

$$\Delta(d^2 \varphi/dt^2) = Z; \tag{5.1}$$

$$J_x(d^2\theta/dt^2) = M_x; (5.2)$$

$$J_{y}(d^{2}\psi/dt^{2}) = M_{y}.$$
 (5.3)

В приведенных уравнениях  $J_x$  и  $J_y$  – главные центральные моменты инерции массы судна  $\Delta$  относительно осей Gx и Gy; Z – проекция главного вектора всех сил на ось Gz;  $M_x$  и  $M_y$  – проекции главного момента всех сил на оси Gx и Gy;  $\zeta$  – перемещение  $\mbox{${\it U}$} T$  судна вдоль оси  $G_{\zeta}$ ,  $\theta$  и  $\psi$  –углы крена и дифферента. При вертикальной качке (рис. 5.1) на судно действует сила тяжести, равная весовому водоизмещению судна  $g\Delta = \gamma g \nabla_0$ , сила плавучести  $\gamma g \nabla(\varsigma) = \gamma g \nabla_0 + \gamma g S \varsigma$ , инерционная гидродинамическая сила  $P(\varsigma) = -\delta M(d^2 \varsigma dt^2)$ , обусловленная тем, что судно сообщает окружающей жидкости ускорения, и сила сопротивления воды  $R(\varsigma) = -2N_{\varsigma}(d\varsigma dt)$ . Здесь  $\nabla_0$  – объем погруженной части корпуса судна в равновесном положении; S – площадь ватерлинии;  $\delta M$  – присоединенная масса воды (окружающая погруженную часть корпуса судна масса воды, вовлеченная в движение при вертикальных колебаниях судна);  $2N_{\varsigma}$ - коэффициент сопротивления, зависящий от формы корпуса.

При бортовой и килевой качке (рис. 5.2 и 5.3) на судно действуют восстанавливающие моменты  $M_e(\theta) = g\Delta h\theta$  и  $M_e(\psi) = g\Delta H\psi$ , моменты инерционных гидродинамических сил  $M_p(\theta) = \delta J_x d^2 \theta/dt^2$  и  $M_p(\psi) = \delta J_y d^2 \psi/dt^2$ , а также моменты сопротивления среды  $M_R(\theta) = 2N_{\theta} d\theta/dt$  и  $M_R(\psi) = 2N_{\psi} d\psi/dt$ . В приведенных выражениях  $\delta J_x$  и  $\delta J_y$ моменты инерции присоединенных масс относительно осей *Gx* и *Gy* соответственно;  $2N_{\theta}$  и  $2N_{\psi}$  коэффициенты сопротивления.

Таким образом,  $Z = g\Delta - \gamma g \nabla_0 - \gamma g S \zeta - 2N_{\zeta} (d\zeta/dt) - \delta M (d^2 \zeta/dt^2);$  $M_x = -g\Delta h\theta - 2N_{\theta} d\theta/dt - \delta J_x d^2 \theta/dt^2; M_y = -g\Delta H\psi - 2N_{\psi} d\psi/dt - \delta J_y d^2 \psi/dt^2.$ 

Подставив приведенные выражения в уравнения 5.1 – 5.3, получим:

$$(\Delta + \delta M)d^2 \varsigma/dt^2 + 2N_{\varsigma}(d\varsigma/dt) + \rho gS\varsigma = 0;$$
(5.4)

$$(J_x + \delta J_x)d^2\theta/dt^2 + 2N_\theta d\theta/dt + g\Delta h\theta = 0;$$
(5.5)

$$(J_y + \delta J_y)d2\psi/dt^2 + 2N_{\psi}d\psi/dt + g\Delta H\psi = 0.$$
(5.6)



Рис. 5.1.



Рис. 5.2.



Рис. 5.3.

Все полученные уравнения относятся к одному типу, выражаемому уравнением

$$d^{2}/dt^{2} + 2\nu d\varphi/dt + n^{2}\varphi = 0, \qquad (5.7)$$

где *v* - коэффициент затухания; *n* – частота свободных колебаний. Для вертикальной качки

$$v_{\varsigma} = N_{\varsigma} / (\Delta + \delta M), \ n_{\varsigma} = \sqrt{\frac{\gamma g S}{\Delta + \delta M}};$$
(5.8)

для бортовой качки

$$v_{\theta} = N_{\theta} / (J_x + \delta J_x), \ n_{\theta} = \sqrt{\frac{\Delta g h}{Jx + \delta Jx}};$$
 (5.9)

для килевой качки

$$v_{\psi} = N_{\psi} / (J_y + \delta J_y), \ n_{\psi} = \sqrt{\frac{\Delta g H}{J y + \delta J y}}.$$
 (5.10)

Уравнение (5.10) имеет решение в виде

$$\varphi = \varphi_{\rm m} e^{-\nu t} \cos(\omega t - \varepsilon_{\rm T}), \qquad (5.11)$$

где  $\phi_m$  - амплитуда колебаний;  $\varepsilon_r$  - фазовый угол,  $\omega = \sqrt{n^2 - \nu^2}$  - частота качки с учетом сопротивления среды.

Из уравнения (5.11) следует, что качка судна на тихой воде представляет собой затухающие колебания с периодом  $\tau = 2\pi/\omega$  и уменьшающейся амплитудой  $\varphi_m e^{-\nu}$ . Зависимость  $\varphi$  от *t* показана на рис. 5.4.



Рис. 5.4.

Период свободных колебаний судна  $\tau = 2\pi / \omega = 2\pi / \sqrt{n^2 - v^2}$  зависит от сопротивления воды, однако влияние сопротивления воды на период качки является незначительным, поэтому в практических расчетах полагают  $v \approx 0$ , а  $\tau = 2\pi / n$ .

Учитывая вышеизложенное и используя параметры судна среднего размера, получим выражения для расчета периодов вертикальной, бортовой и килевой качки будут:

$$au_{\varsigma} \approx 2, 7\sqrt{d}; au_{ heta} = cB/\sqrt{h}; au_{\psi} \approx 2, 6\sqrt{d}.$$

(5.12)

## 5.3 Качка судна на волнении

#### 5.3.1 Бортовая качка судна на волнении

Рассмотрим бортовую качку судна на регулярном волнении, профиль которого можно описать уравнением

$$\zeta_6 = r_6 \cos \sigma t. \tag{5.13}$$

В приведенном уравнении  $\zeta_{e}$  - возвышение профиля волны над линией невзволнованной поверхности,  $r_{B}$  - амплитуда волнения,  $\sigma$  - частота волны, связанная с периодом волны  $\tau_{e}$  выражением  $\sigma = 2\pi/\tau_{e}$ .

На рис. 5.5 показано судно, отклоненное от положения равновесия на угол  $\theta$ , находящееся на волне, имеющей угол волнового склона  $\alpha$ .



Рис. 5.5.

Максимальное значение угла волнового склона  $\alpha_0$  соответствует положению профиля на плоскости невзволнованной поверхности. Наклонение судна к поверхности профиля обозначается u, амплитуда волны –  $u_0$ . На рис. 5.6 показан амплитудно-частотный график – зависимость  $u_m/\alpha_0$  от  $\sigma/n_\theta$  ( $n_\theta = 2\pi/\tau_\theta$  – частота бортовой качки) для разных значений отношения коэффициента затухания к частоте бортовой качки v/n<sub> $\theta$ </sub>, на рис. 5.7 показано положение судна волне для разных значений  $\sigma/n_\theta$ 



Рис.5.6

Амплитудно-частотный график демонстрирует, что при  $\sigma/n_{\theta} \rightarrow 0$  отношение  $u_{n\prime}/\alpha_0 \rightarrow 0$ . В этом случае при бортовой качке ДП судна совпадает с нормалью к поверхности воды, и наклонения судна повторяют изменения угла бортового склона. Это возможно, когда  $\sigma \rightarrow 0$ , что возможно при  $\lambda \rightarrow \infty$ , т.е. на очень длинных волнах, либо при  $n_{\theta} \rightarrow \infty$ , что в соответствие с (5.12) возможно при  $h \rightarrow \infty$ , т.е. при очень большой остойчивости, как, на пример, у плота.

При  $\sigma/n_{\theta} \rightarrow 1$  имеет место резонанс – резкое увеличение амплитуды колебаний при совпадении частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний. Амплитуда качки при резонансе уменьшается с ростом коэффициента сопротивления и момента инерции присоединенной массы воды и возрастает при увеличении остойчивости судна. Если сопротивление воды колебаниям судна отсутствует ( $v_{\theta} = 0$ ), то амплитуда качки становится бесконечно большой. Вдали от резонансной зоны сопротивление воды колебаниям практически не влияет на амплитуду качки.

Резонанс качки, наблюдаемый при совпадении частот называется основным резонансом. Если частоты будут кратными ( $\sigma/n_{\theta} = 2$  или 3 и т.д.) также будет наблюдаться резонанс, называемый параметрическим резонансом, однако амплитуда будет увеличиваться меньше, чем при основном резонансе.

Фазовый угол  $\varepsilon_{\theta}$  изменяется от 0 до  $\pi/2$ , при резонансе  $\varepsilon_{\theta} = \pi/2$ .



Рис. 5.7.

#### 5.3.2 Нелинейный резонанс бортовой качки

Допущение о линейной зависимости восстанавливающего момента от угла крена является допустимым для решения большинства практических задач, однако, в некоторых случаях, когда амплитуда качки значительна, для оценки безопасности мореплавания необходимо учитывать нелинейный характер зависимости восстанавливающего момента от угла крена. Амплитудно-частотный график при нелинейном резонансе представлен на рис. 5.8.



Рис. 5.8.

Кривая частот I (пунктирная линия на рис. 5.8) состоит из двух участков – участок *lm*, на котором частота свободных колебаний n<sub> $\theta$ </sub> остается постоянной, соответствует линейной зависимости восстанавливающего момента от угла крена, а участок *lk* - нелинейной зависимости. Частота колебаний на участке, соответствующем нелинейной части ДСО, уменьшается до нуля, когда судно достигает угла заката  $\theta_v$ . Объясняется это тем, что при крене, равном углу заката, судно не может выпрямиться и период качки становится равным бесконечности.

Амплитудно-частотная кривая II показывает, как изменяется амплитуда качки  $\theta_m$  при изменении частоты  $\sigma$ . При нарастании частоты  $\sigma$  до величины  $\sigma_b$  амплитуда качки судна резко увеличивается от величины, соответствующей точке b, до амплитуды, соответствующей точке d амплитудно-частотной кривой. При дальнейшем возрастании частоты амплитуда качки будет плавно уменьшаться по кривой de. При уменьшении частоты, соответствующей участку de, амплитуда качки будет плавно увеличиваться до значения, соответствующего точке с. При дальнейшем уменьшении частоты амплитуда будет уменьшаться по кривой  $a\theta$ .

Таким образом, при некоторых частотах возможно существование различных режимов качки, чередование которых зависит от того, нарастает или падает частота возмущения.

5.3.3 Вертикальная и килевая качка

Вертикальная и килевая качка во многом связаны между собой, поэтому на практике эти два вида колебаний судна принято рассматривать совместно как продольную качку. Изучение продольной качки имеет большое практическое значение, так как с ней связаны вопросы прочности корпуса, ходкости, заливаемости палубы и др.

Расчет продольной качки на регулярном волнении сводится к решению системы двух неоднородных дифференциальных уравнений. Несмотря на целый ряд применяемых допущений, решение этих уравнений имеет громоздкий вид, поэтому ограничимся выводами, которые следуют из их решения.

Вертикальная и килевая качка на регулярном волнении представляет собой гармонические колебания с частотой, равной частоте волн, и сдвигом по фазе относительно возмущающих сил. Их амплитуды достигают наибольшей величины при резонансе. Существенное влияние на амплитуды вертикальной и килевой качки оказывает отношение длины волны  $\lambda$  к длине судна L. Так, для крупнотоннажных судов на встречном волнении амплитуды будут иметь наименьшие значения при  $\lambda/L = 0,65...0,85$ ; при  $\lambda/L > 0,9$  амплитуды начинают резко возрастать.

## 5.3.4 Качка судна на нерегулярном волнении

На нерегулярном волнении судно рассматривается в качестве динамической системы, преобразующей случайный процесс волнения с известными характеристиками в случайный процесс качки, характеристики которой являются неизвестными и подлежат определению.

Нерегулярное волнение представляют как результат наложения друг на друга большого количества регулярных гармонических волн, каждая из которых имеет свою длину, скорость и, следовательно, частоту. Высоты последовательных волн нерегулярного волнения неодинаковы, их чередование носит случайный характер. Математически нерегулярное волнение может быть представлено спектром волнения, под которым понимают функцию, описывающую распределение амплитуд регулярных гармонических волн по их частотам.

Собственные колебания судна на нерегулярном волнении не затухают, как это было в условиях регулярного волнения. Поэтому качка на нерегулярном волнении представляет собой сочетание свободных и вынужденных колебаний судна различной частоты. Резонансные амплитуды качки будут меньше, чем на регулярном волнении, так как резонанс не успевает развиться. Нерезонансные амплитуды, наоборот, возрастают, что вызвано влиянием собственных колебаний судна. Нерегулярность волнения сказывается тем сильнее, чем меньше сопротивление воды колебаниям судна. Отсюда следует, что наибольшие изменения претерпевает бортовая качка судна, которая носит явно выраженный неправильный характер с преобладанием свободных колебаний судна. Стремление периода бортовой качки судна на нерегулярном волнении к периоду собственных колебаний используется при определении МЦВ по периоду бортовой качки.

### 5.3.5 Влияние на качку курса и скорости судна

Рассмотрим движение судна со скоростью V под курсовым углом к направлению бега волн  $\phi$  (рис. 5.9). Скорость перемещения волны относительно судна определиться выражением

$$c_0 = c + V \cos\varphi. \tag{5.14}$$

Время прохождения двух последовательных гребней волн через фиксированную точку на корпусе судна, называемое кажущимся периодом волны, определяется по формуле

$$\tau = \lambda/c_0. \tag{5.15}$$

Подставив (5.14) в (5.15), получим  $\tau = \frac{\lambda}{c + V \cos \phi} - \frac{\tau_{e}}{1 + \frac{V}{c} \cos \phi}$ (5.16)

Как следует из выражения (5.16), меняя скорость судна и курс, можно изменить кажущийся период волнения (период возмущающей силы) и тем самым влиять на качку.



Рис. 5.9.

При расчетах бортовой качки судна рассматривают проекция волнового профиля на плоскость мидель-шпангоута и соответствующая длина волны будет  $\lambda_{\theta} = \lambda / sin \varphi$ , а при расчетах вертикальной качки -  $\lambda_{\psi} = \lambda / cos \varphi$ .

Условия качки судна зависят от соотношения между периодом свободных колебаний судна (бортовых -  $\tau_{\theta}$  или килевых -  $\tau_{\psi}$ ) и кажущимся периодом волны  $\tau$ . При  $\tau_{\theta}/1,3 \le \tau \le \tau_{\theta}/0,7$  судно испытывает усиленную бортовую качку, при  $\tau_{\psi}/1,3 \le \tau \le \tau_{\psi}/0,7$  – усиленную килевую качку. Качка судна зависит также от курсового угла волны

 $\varphi$ . Если курсовой угол волны близок к  $0^{\circ}$  или  $180^{\circ}$ , то судно даже в условиях резонанса почти не испытывает бортовой качки; при курсовых углах, близких к  $90^{\circ}$ , всегда незначительной будет килевая качка. Резонансная качка сопровождается сильными ударами носовой оконечности о воду – слеммингом, заливаемостью палубы, падением скорости и т.п. Меняя курс и/или скорость судна можно избежать резонансной качки. Особенно опасный характер приобретает резонансная качка в условиях шторма.

Неблагоприятные сочетания курса и скорости при штормовом плавании судна позволяет установить Штормовая диаграмма Ю. В. Ремеза. Эта же диаграмма позволяет рассчитать курс и скорость судна, позволяющие уклониться от резонанса.

Современные компьютерные расчетно-информационные комплексы, как правило, содержат модули расчета курса и скорости судна, свободные от резонанса.

5.3.6 Успокоители качки

Для уменьшения амплитуды качки используются успокоители качки. Успокоители качки бывают пассивными и активными.

Наиболее распространенными пассивными успокоителями качки являются скуловые кили. Суммарная площадь скуловых килей составляет 3...6 % площади грузовой ватерлинии. Скуловые кили обеспечивают увеличение момента сопротивления бортовым колебаниям и увеличение момента инерции присоединенных масс воды, что способствует уменьшению амплитуды бортовой качки. При движении судна на скуловых килях возникают гидродинамические подъемные силы, уменьшающие амплитуду продольной качки. Скуловые кили позволяют уменьшить амплитуду бортовой качки на 20...25 %.

Другим распространенным видом пассивных успокоителей качки являются бортовые антироллинговые цистерны. Сечение канала, соединяющего эти цистерны, и количество воды в них подбирается таким образом, чтобы перетекание воды из цистерны в цистерну происходило в противофазе с качкой судна. В некоторых случаях подобные цистерны делаются сообщающимися с забортной водой. Масса воды в цистернах составляет 2,0...2,5 % водоизмещения судна.

В качестве примера активного успокоителя качки можно привести бортовые управляемые рули. Автоматическое управление рулями обеспечивает создание на них гидродинамических моментов, препятствующих наклонениям судна.

Другим примером активного успокоителя качки являются бортовые цистерны, соединительный канал которых оснащен насосом большой производительности, обеспечивающим переток жидкости из цистерны в цистерну, осуществляемый в противофазе с колебаниями судна.

### 6 Управляемость судна

Управляемостью называется способность судна сохранять или менять направление движения судна по желанию судоводителя. Управляемость обеспечивается рулевым устройством. Влияние на управляемость оказывают внешние условия (ветер, волнение, течения) и условия работы судна (свободный ход, ведение промысла, буксировка).

Управляемость определяется *поворотливостью* и *устойчивостью на курсе*. Оптимальное соотношение этих противоречивых способностей обеспечивают хорошую управляемость.

### 6.1 Поворотливость судна

Поворотливость судна обеспечивается рулевым устройством, состоящим из пульта управления (на мостике), рулевого привода (в румпельном отделении), поворачивающего баллер, соединенный с пером руля.

На рис. 6.1 показана траектория движения UM судна, идущего со скоростью V при перекладке руля направо. При перекладке перо руля поворачивается относительно  $Д\Pi$ , создавая угол атаки к набегающему патоку. Возникающая на пере гидродинамическая сила F может быть представлена в виде двух составляющих: силы лобового сопротивления  $F_x$  и подъемной силы  $F_y$  (рис. 6.1). Теория крыла приведена в разделе Ходкость).

Лобовое сопротивление, направленное вдоль ДП, притормаживает судно, подъемная сила, направленная перпендикулярно ДП, вызывает дрейф судна влево, при этом возникает гидродинамическая сила сопротивления дрейфу, направленная вправо. Подъемная сила совместно с силой сопротивления создают момент, поворачивающий судно в сторону перекладки руля. При продолжении движения (*циркуляции*) ЦМ судна перемещается по траектории, близкой к круговой. Судно на циркуляции движется с углом дрейфа  $\beta$ .

Различают три периода циркуляции: *маневренный*, *эволюционный* и *период установившегося движения*. Маневренный период по времени совпадает с продолжительностью перекладки руля. Эволюционный период начинается после перекладки руля и заканчивается в момент, когда движение судна становится установившимся. Период установившегося движение заканчивается, когда перо руля отводится в ДП.



Рис. 6.1.

При циркуляции центробежная сила, приложенная к ЦМ судна создает кренящий момент, вызывающий крен судна в обратную от циркуляции сторону. Угол крена на циркуляции можно определить по выражению, приведенному в разделе «Остойчивость».

В качестве характеристик циркуляции используются следующие величины:

- диаметр установившейся циркуляции *D*<sub>*u*</sub> – диаметр окружности, которую описывает *ЦМ* судна при установившемся движении;

- тактический диаметр циркуляции  $D_m$  – расстояние между ДП судна на прямом и обратном курсе;

- выдвиг *l*<sub>1</sub> – расстояние продольного перемещения *ЦМ* судна при повороте на 90° от прямого курса;

 прямое смещение l<sub>2</sub> – расстояние поперечного перемещения ЦМ судна при повороте на 90° от прямого курса;

- обратное смещение *l*<sub>3</sub> – смещение *ЦМ* судна в сторону, обратную повороту.

Характеристики циркуляции судна для различных режимов его движения приводятся в «Таблице маневренных элементов».

6.2 Устойчивость судна на курсе

Устойчивость судна на курсе определяется способом управления курсом и внешними условиями.

Управление курсом судна может осуществляется в ручном либо в автоматическом режиме.

Ручной режим используется при маневрировании судна во время швартовых, буксировочных, спасательных операций, использовании промыслового устройства, прохождении узкостей, движение в условиях ограниченной видимости и т.п. Автоматический режим управления курсом используется при движении в нормальных навигационных условиях.

Ухудшение погодных условий приводит к увеличению рыскания судна (отклонения от курса) независимо от способов управления.

6.3 Влияние основных элементов судна на управляемость

На управляемость судна существенное влияние оказывают форма корпуса, посадка, скорость хода и движитель.

Узкие суда, имеющие сравнительно большую осадку, обладают хорошей устойчивостью на курсе и затрудненной поворотливостью. Широкие суда с малой осадкой лучше реагируют на перекладку руля, но их труднее удерживать на курсе. Следовательно, с увеличением *L/B* и уменьшением *B/d* устойчивость на курсе улучшается, а поворотливость ухудшается.

Суда с полными обводами (коэффициент общей полноты близок к единице) имеют хорошую поворотливость.

Большое влияние на управляемость судна оказывает дифферент. При дифференте на корму, центр бокового гидродинамического сопротивления смещен в корму, что уменьшает поворачивающий момент от гидродинамических сил, и это улучшает устойчивость на курсе. При дифференте на нос улучшается поворотливость.

Наличие крена приводит к несимметричному обтеканию корпуса, что снижает устойчивость на курсе. При крене нос судна стремится уйти в сторону, противоположную крену, поэтому для удержания судна на курсе необходимо перекладывать руль в сторону
крена. По этой причине поворот в сторону крена осуществляется дольше, чем в противоположную.

При относительной скорости, выраженной числом Фруда  $Fr = V/\sqrt{(gL)} < 0.3$  элементы циркуляции практически не зависят от скорости судна. У быстроходных судов увеличение скорости свыше указанной увеличивает диаметр циркуляции и уменьшает угол дрейфа.

У судна с одним гребным винтом в момент начала вращения винта при прямом положении руля корма смещается в сторону вращения, потому что боковая сила, создаваемая лопастями, из-за разности гидростатического давления в нижней части винта больше, чем в верхней. Таким образом, у судна с правым вращением винта при даче хода вперед движется вправо, а с левым вращением влево. По мере увеличения хода судна боковая сила винта будет компенсироваться противоположной ей силой, возникающей на пере руля, и корма перестанет отклоняться в сторону вращения. Дальнейшее увеличение скорости хода приводит к тому, что корма одновинтового судна с винтом правого вращения начинает отклоняться влево, а само судно уходит с курса вправо. У такого судна поворотливость вправо будет лучше, чем влево.

При движении одновинтового судна струя, отбрасываемая винтом, увеличивает подъемную силу на пере руля при его перекладке, что увеличивает поворотливость. У двухвинтового судна эффект от такого потока меньше, однако такое судна можно легко развернуть, вращая винты один на передний ход, а другой на задний. На двух винтовых судах обычно устанавливают винты внешнего вращения: справа правого вращения, слева – левого.

6.4 Влияние условий плавания на управляемость

На управляемость судна влияют ветер, волнение, глубина моря.

На судно действует кажущийся (вымпельный) ветер, который определяется векторной суммой истинного ветра и набегающего потока воздуха. Надводная часть корпуса по форме соответствует крылу. Результирующая сила от воздействия ветра может быть представлена в виде продольной и поперечной составляющих: продольная составляющая при ветре с носовых курсовых углов тормозит судно, а с кормовых – «подгоняет» судно, поперечная составляющая - вызывает ветровой дрейф. Воздействие ветра на судно,

соответственно, определяется скоростями судна и ветра и курсовым углом вымпельного ветра.

Если центр боковой парусности располагается в нос от *ЦМ* судна, то судно будет стремиться повернуть по ветру (увалиться), если в корму, то повернуться носом к ветру (привестись).

Воздействие волнения на судно определяется курсовым углом волнения и соотношением длин и скоростей судна и волны.

Наиболее устойчивым движением судно обладает при волнении с острых курсовых углов. При косых курсовых угла волнения судно подвержено рысканью с достаточно большой амплитудой и частотой, равной кажущей частоте волнения.

Особенно опасным является плавание на попутном волнении при равенстве скоростей судна и волны. В этом случае при нахождении кормы на переднем склоне волны, орбитальная скорость частиц воды совпадает с направлением движения судна и подъемная сила на пере руля резко снижается. Углы рысканья средне размерного судна может достигнуть 40°, а малое судно может потерять управляемость. Это явление называется *брочинг*.

Заметное влияние на управляемость судна в условиях интенсивного волнения оказывает продольная качка судна, приводящая к оголению винта-рулевого комплекса.

Глубина акватории на управляемость судна выражается следующим образом.

На мелководье при малых скоростях движения глубина на управляемость не влияет. На средних скоростях ухудшается устойчивость на курсе и улучшается поворотливость, на больших скоростях устойчивость на курсе улучшается, а поворотливость ухудшается.

При плавании в районах с большим перепадом глубин нос судна пытается уйти в сторону большой глубины.

При движении судна задним ходом его управляемость существенно ухудшается. Как правило, суда не обладают устойчивостью прямолинейного движения на заднем ходу, а уже при слабом ветре управляемость теряется.

### 7 Ходкость

*Ходкостью* называется способность судна двигаться с заданной скоростью за счет упора собственного движителя или внешней тяги.

Учение о ходкости состоит из двух самостоятельных разделов: сопротивления среды движению судна, определяющего величину необходимого упора, и движителей, определяющего мощность, потребляемую движителем для создания необходимого упора.

Кроме того, необходимо рассмотреть основы гидромеханики как науки о движении жидкости и ее взаимодействии с твердыми телами, поскольку и судно, и движитель движутся в жидкости, а также необходимы знания теории подобия, поскольку основными методами исследования ходкости являются испытания моделей, и следовательно, необходимо иметь представление о принципах пересчета результатов с модели на натуру.

7.1 Основы гидромеханики

В гидромеханике рассматриваются следующие свойства жидкости: весомость, сплошность, сжимаемость, вязкость.

Весомость жидкости выражается ее плотностью – массой жидкости в единице занимаемого этой жидкостью объема  $\gamma[\kappa z/m3]$ . В некоторых случаях используется понятие удельного веса  $\rho = g\gamma$  [*H*/*m*3], равного силе тяжести, приложенной к единице занимаемого этой жидкостью объема

Значение плотности воды в различных районах Мирового океана колеблется от 995 до 1033 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от температуры и солености (Рис. 7.1). Для практических расчетов используются стандартные значения плотности: для пресной воды  $\gamma = 1000 \ \kappa e^2/m^3$ , для соленой -  $\gamma = 1025 \ \kappa e^2/m^3$ .

Плотность воздуха зависит от температуры и высоты над уровнем моря; на уровне моря при  $t = 15 \, \mathcal{C} \, \gamma = 1,226 \, \kappa z/m^3$ , т.е. в 800 раз меньше плотности пресной воды.

Сплошность жидкости выражается тем, что значение ее плотности одинаково в любой точке объема, занятого жидкостью.

Сжимаемость жидкости (увеличение плотности при увеличении давления) определяется ее типом. Капельные жидкости (вода) в практических расчетах считаются несжимаемыми, а газообразные (воздух) – сжимаемыми. Сжимаемость газообразной жидкости проявляется при скорости ее течения, близкой к скорости звука. При скорости существенно ниже скорости звука течения газообразных и капельных жидкостей различий не имеют.

Вязкостью жидкости называют свойство, в силу которого в ней проявляются силы внутреннего трения, препятствующие сдвигающим усилиям.

Вязкостью жидкости называют свойство, в силу которого в ней проявляются силы внутреннего трения, препятствующие сдвигающим усилиям.

При движении слоев жидкости с различными скоростями между ними возникают напряжения внутреннего трения  $\tau$ , значения которых согласно закону Ньютона пропорциональны градиенту скорости  $\partial V/\partial n$  по нормали *n* к направлению движения

$$\tau = \mu \, \partial V / \partial n, \tag{7.1}$$

где *µ*[*Па.с*] - коэффициент динамической вязкости.

Чаще используется коэффициент кинематической вязкости  $v = \tau / \gamma [m^2/c].$ 

Зависимости коэффициента кинематической вязкости воздуха и воды от температуры показаны на рис. 7.2.





Рис. 7.2.

При решении ряда теоретических вопросов используется понятие идеальной жидкости. Идеальной называется абсолютно несжимаемая невязкая жидкость (коэффициенты  $\mu$  и  $\nu$  равны нулю).

Равновесие жидкости рассматривается гидростатикой. Основное уравнение гидростатики устанавливает связь давления в произвольной точке р, называемое гидростатическим давлением, с атмосферным давлением  $p_a$ , глубиной H и плотностью жидкости  $\gamma$ 

 $p = p_a + \gamma g H.$  (7.2) Величина  $\gamma g H$  в выражении (7.2) называется избыточным давлением, т. е.  $p_u = p - p_a$ .

Давление в системе СИ измеряется в Паскалях Па (1 Па = 1  $H/M^2$ ), в технике используются несистемные единицы: атмосфера (1  $am = 9,81 \times 104 \ \Pi a$ ), мм ртутного столба и т. п.; в США давление измеряют также в фунтах на квадратный дюйм (1 ppsi = 6894,76  $\Pi a$ ).

При движении жидкости различают два режима – ламинарный и турбулентный. Ламинарному режиму соответствует преимущественно параллельное движение частиц, образующих слои вдоль направления движения. При турбулентном движении частицы жидкости внутри потока движутся хаотично.

Движение жидкости бывает *установившееся*, когда в каждой точке потока его характеристики (скорость, давление) не изменяются, и *неустановившееся*, когда характеристики постоянно изменяются.

При установившемся движении можно провести линию, касательную к векторам скорости в различных точках потока. Эта кривая называется *линией тока* (Рис. 7.3).



Рис. 7.3.

Поверхность, образуемую линиями тока, проходящими через замкнутый контур, перпендикулярный направлению движения, называют *трубкой тока*, а жидкость внутри трубки тока – элементарной струйкой.

Для установившегося движения справедливым является принцип обращенного движения, согласно которому движение тела в неподвижной жидкости можно рассматривать как набегание движущейся жидкости (потока) на неподвижное тело.

Закон сохранения массы потока выражается уравнением неразрывности, согласно которому через любое поперечное сечение трубки тока в единицу времени протекает одинаковое количество жидкости. Уравнение неразрывности для трубки тока, показанной на рис. 7.4 имеет вид

 $V_1 d\omega_1 V_2 d\omega_2 = \dots = V_n d\omega_n = dQ = const, \tag{7.3}$ 

где V и  $d\omega$  - скорость потока и площадь соответствующего сечения элементарной струйки; dQ – расход жидкости в элементарной струйке.



Рис. 7.4.

Расход жидкости всего потока *Q* определяется как сумма расходов во всех элементарных струйках.

Закон сохранения энергии потока выражается уравнением Бернулли

$$Z_{I} + \frac{p_{1}}{\gamma g} + \frac{V_{1}^{2}}{2g} = Z_{2} + \frac{p_{2}}{\gamma g} + \frac{V_{2}^{2}}{2g}$$
(7.4)

или

$$Z + \frac{p}{\gamma g} + \frac{V^2}{2g} = H = const.$$
(7.5)

Это уравнение показывает, что сумма высоты положения сечения Z, пьезометрического напора p/g и скоростного напора  $V^2/2g$ , равная гидродинамическому напору H, является постоянной величиной для всех сечений элементарной струйки.

Уравнение Бернулли показывает, что при увеличении скорости потока давление в нем падает и наоборот.

Для решения многих задач в гидромеханике используется моделирование, например, буксировочное сопротивление проектируемого судна определяется по результатам буксировки в опытовом бассейне модели корпуса этого судна. Определение размеров модели и пересчет модельных испытаний на натурное судно производится при помощи *meopuu nodoбия*.

В механике различают три вида подобия: геометрическое, кинематическое и динамическое.

При *геометрическом подобии* отношение сходственных линейных размеров натуры и модели равно постоянной величине, называемой масштабом

$$\frac{L_H}{L_M} = \frac{\sqrt{S_H}}{\sqrt{S_M}} = \frac{\sqrt[3]{W_H}}{\sqrt[3]{W_M}} = C_l,$$
(7.6)

где  $L_H$ ,  $S_H$ ,  $W_H$  – сходственные линейные размеры, площади и объемы натуры;  $L_M$ ,  $S_M$ ,  $W_M$  – сходственные линейные размеры, площади и объемы модели;  $C_l$  – постоянная геометрического подобия.

При кинематическом подобии отношение промежутков времени, в течение которых сходственные точки описывают геометрически подобные отрезки траекторий, равно постоянной величине. Кинематическое подобие характеризуется двумя постоянными

$$\frac{L_H}{L_M} = C_l \; ; \; \frac{t_H}{t_M} = C_l \; . \tag{7.7}$$

Используя масштаб  $C_l$  и постоянную времени  $C_t$ , можно получить постоянную скорости  $C_V$  и постоянную ускорения  $C_a$ 

$$\frac{V_H}{V_M} = C_V = \frac{C_l}{C_t}; \ \frac{a_H}{a_M} = C_a = \frac{C_l}{C_t^2} = \frac{C_v^2}{C_l}.$$
 (7.8)

При динамическом подобии отношение сходственных сил равно постоянной величине. Это условие выполняется, если при соблюдении условия кинематического подобия, отношение сходственных масс натуры и модели равно постоянной величине

$$\frac{m_H}{m_M} = C_m \text{ или } \frac{m_H}{m_M} = \frac{\gamma_H W_H}{\gamma_M W_M} = C_\gamma C_l^3, \tag{7.9}$$

где  $\gamma_H$ ,  $\gamma_M$  - плотности сходственных объемов натуры  $W_H$  и модели  $W_M$ ;  $C_\gamma$ ,  $C_l$  - постоянные подобия.

Отношение сходственных сил можно записать в виде

$$\frac{F_H}{F_M} = \frac{m_H a_H}{m_M a_M} = C_{\gamma} C_l \frac{{}^3C_V^2}{C_l} = C_{\gamma} C_V {}^2 C_l,$$

откуда следует общий закон динамического подобия

$$\frac{F_H}{\gamma_H V^2 H S_H} = \frac{F_M}{\gamma_M V^2 M S_M}.$$
(7.10)

Согласно выражению (7.10), любую гидродинамическую силу можно выразить в виде

$$F = \frac{1}{2} \, \mathcal{G} V^2 S, \tag{7.11}$$

где *с* - безразмерный коэффициент силы.

При моделировании сил, обусловленных вязкостью жидкости, помимо соблюдения общих условий динамического подобия должно соблюдаться равенство чисел Рейнольдса  $Re = \frac{VL}{R}$ 

$$Re_M = Re_H, \tag{7.12}$$

где *V, L, v*-характерные скорость, линейный размер и коэффициент кинематической вязкости для модели и натуры.

При моделировании сил, обусловленных весомостью жидкости, помимо соблюдения общих условий динамического подобия должно соблюдаться равенство чисел Фруда  $Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$ 

$$Fr_M = Fr_H, (7.13)$$

где g – ускорение свободного падения.

Важным для ходкости разделом гидромеханики является теория крыла. Особенностью крыла является то, что при его обтекании возникает подъемная сила, во много раз превосходящая силу лобового (профильного) сопротивления. Форму крыла имеют лопасти гребного винта, перо руля, корпус судна, паруса и другие судовые конструкции. Схема обтекания крыла потоком показана на рис. 7.5.



Рис. 7.5.

На рисунке показаны: V – скорость обтекания; t - толщина профиля; b – длина хорды профиля;  $\alpha$  - угол атаки; F - сила, возникающая на крыле при его косом обтекании; Fy - подъемная сила; Fx сила лобового сопротивления. Силы лобового сопротивления и подъемная выражаются через соответствующие коэффициенты

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \, \gamma V^2 S; \, F_y = \frac{1}{2} C_y \, \gamma V^2 S, \tag{7.14}$$

где  $C_x$  - коэффициент лобового сопротивления;  $C_y$  - коэффициент подъемной силы; S - площадь крала в плане, для прямоугольного крыла  $S = b \times l$ ; l - размах крыла.

Отношение  $C_y/C_x = K$  называется качеством крыла.

На рис. 7.6 показаны зависимости коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления от угла атаки.

Из рисунка следует, что у подъемной силы имеется критический угол атаки, при достижении которого подъемная сила резко уменьшается. Этот угол находится в диапазоне 30 -35 градусов. Лобовое сопротивление монотонно увеличивается.



Рис. 7.6.

#### 7.2 Сопротивление среды движению судна

## 7.2.1 Буксировочное сопротивление и буксировочная мощность

При движении судно преодолевает сопротивление среды R, называемое буксировочным сопротивлением. На преодоление этого сопротивления расходуется буксировочная мощность  $N_{\delta}$ , определяемая выражением

$$N_{\delta} = RV, \tag{7.15}$$

где  $N_{\delta}$  – буксировочная мощность, кВт; R - буксировочное сопротивление, кН; V - скорость судна, м/с.

Мощность, подводимая к ступице гребного винта  $N_p = \frac{N_{\delta}}{\eta_{\delta}}$ .

Эффективная мощность (мощность на выходном фланце главного двигателя)

$$N_e = -\frac{N_p}{\eta_e \eta_n} = \frac{N_{\delta}}{\eta_o \eta_e \eta_n} = \frac{N_{\delta}}{\eta}, \qquad (7.16)$$

где  $\eta_{\partial}$ ,  $\eta_{s}$ ,  $\eta_{n} - K\Pi \square$  гребного винта, валопровода и передачи, соответственно;  $\eta$  – пропульсивный коэффициент судна.

*КПД* гребного винта обусловлен расходом мощности на ускорение отбрасываемые винтом частиц воды;  $\eta_o = 0,45...0,75$ . *КПД* валопровода обусловлен расходом мощности на преодоление сил трения в подшипниках гребного вала; при кормовом расположении МКО -  $\eta_e = 0,96...0,99$ . *КПД* передачи обусловлен потерей мощности частоты вращения гребного вала; для зубчатого редуктора  $\eta_n = 0,97...0,98$ ; для гидромуфты  $\eta_n = 0,95...0,97$ .

Буксировочное сопротивление выражается суммой составляющих: аэродинамической  $R_a$  (сопротивление воздуха), гидродинамической  $R_b$  (сопротивление воды) и гидрометеорологической  $R_{IM}$  (сопротивление, обусловленное ветром и волнением моря)

$$R = R_a + R_{\theta} + R_{\Gamma M}. \tag{7.17}$$

Поскольку плотность морской воды на три порядка выше плотности воздуха, а согласно (7.11) сопротивление пропорционально плотности среды, то, в общем случае, Re >> Ra. Гидрометеорологическая составляющая зависит от погодных условий и при отсутствии ветра и волнения  $R_{IM} = 0$ . На основании вышеизложенного, в качестве буксировочного сопротивления будем принимать

$$R = R_6$$

# 7.2.2 Составляющие гидродинамического сопротивления

Сопротивление воды движению судна представляется суммой сопротивления трения  $R_{mp}$ , сопротивления формы  $R_{\phi}$  и волнового сопротивления  $R_w$ 

$$R = R_{mp} + R_{\phi} + R_{w} . \qquad (7.18)$$

Сопротивление трения обусловлено вязкостью жидкости – частицы жидкости, покрывающие смоченную поверхность корпуса судна, вовлекаются судном в движение, эти частицы передают движение соседним частицам и т.д. Сопротивление трения равно суммарному усилию, затрачиваемому судном на движение жидкости.

Прилегающие к корпусу частицы воды, вовлеченные в движение, образуют *пограничный слой*, утолщающийся от носа к корме судна. Пограничный слой сходит с корпуса в корме, образуя *попутный поток*, называемый также *спутной струей* – движущиеся частицы воды отстают от судна, но продолжают двигаться в направлении движения судна.

Увеличение скорости частиц жидкости от носа к корме судна приводит к падению давления на корпусе. В образовавшуюся зону разряжения устремляется жидкость извне пограничного слоя, пограничный слой отрывается с образованием вихрей. Усилие, затрачиваемое на образования вихрей, называется *сопротивлением формы* или *вихревым сопротивлением*. У плохообтекаемых корпусов сопротивление формы больше.

При движении судно выводит прилегающие к корпусу частицы из положения вертикального равновесия. Колебания частиц складываясь, образуют корабельные волны, состоящие из двух групп – носовой и кормовой. Каждая из этих групп разделяется на две системы волн – расходящихся и поперечных. Определяющей в волнообразовании является сила тяжести, а затрачиваемое на него усилие составляет волновое сопротивление.

Таким образом, сопротивление трения и сопротивление формы вызваны вязкостью воды и, следовательно, зависят от числа Рейнольдса, а волновое сопротивление вызвано весомостью и зависит от числа Фруда.

Соотношение между составляющими сопротивления показано на рис. 7.7.



Рис.7.7

Как следует из рис. 7.7, при малых скоростях движения определяющим является сопротивление трения, а при больших – волновое.

Величина сопротивления трения для конкретного судна определяется состоянием поверхности подводной части корпуса. Обрастание корпуса в междоковый период существенно увеличивает сопротивление трения.

Для уменьшения волнового сопротивления у некоторых судов имеется *носовой бульб*, который уменьшает носовую подпорную волну.

Почти полностью избавиться от гидродинамического сопротивления удается только для *судов с динамическими принципами поддержания – СВП, СПК, глиссеров*, движущихся в режиме глиссирования, однако выход на режим глиссирования требует существенного увеличения энерговооруженности, поэтому такой принцип поддержания возможен только для малых судов.

# 7.2.3 Практический расчет сопротивления воды движению судна

Практический расчет сопротивления воды движению судна основывается на *гипотезе*  $\Phi pyda$ , согласно которой сопротивление находится как сумма сопротивления трения  $R_{mp}$ , рассчитываемого теоретически в виде функции от числа Рейнольдса, и остаточного сопротивления Rr, рассчитываемого по данным испытания модели в виде функции от числа  $\Phi$ руда

$$R = R_{mp}(Re) + R_r(Fr). \tag{7.19}$$

Как следует из (7.18), остаточное сопротивление равно сумме волнового сопротивления и сопротивления формы. Сопротивление формы вызвано вязкостью воды, однако при турбулентном обтекании оно не зависит от числа Рейнольдса.

Выражение (7.19) с учетом (7.11) представляется в виде

$$R = \frac{1}{2} \, \varsigma \gamma V^2 \Omega, \tag{7.20}$$

где  $\zeta = \zeta_{mp} + \zeta_r - \kappa оэффициент гидродинамического сопротивления;$  $<math>\zeta_{mp} - \kappa оэффициент сопротивления трения; \zeta_r - коэффициент оста$  $точного сопротивления; <math>\Omega$  - площадь смоченной поверхности корпуса судна.

Для расчета площади смоченной поверхности используются эмпирические зависимости, например, формула *Мумфорда – Мурагина* 

$$\Omega = Ld(1,36+1,13C_B\frac{B}{d}).$$

Коэффициент сопротивления трения определяется выражением

 $\zeta_{mp} = \zeta_f + \zeta_n + \zeta_{G^{q}},$ 

где  $\zeta_f$  - сопротивление трения эквивалентной технически гладкой пластины, определяемой по так называемым экстраполяторам трения, например по «формуле опытовых бассейнов»

$$\varsigma_f = \frac{0,075}{(lgRe-2)^2};$$

*ς*<sub>n</sub> - надбавка на шероховатость;

*с* <sub>вч</sub> - надбавка на выступающие части.

Коэффициент остаточного сопротивления  $\varsigma_r$  определяется по кривым, полученным в результате систематических испытаний моделей.

7.3 Движители

В качестве судового движителя на большинстве морских судов используется гребной винт (ГВ), состоящий из ступицы и лопастей (рис. 7.8).



Рис. 7.8

Различают винты фиксированного шага (ВФШ) и регулируемого шага (ВРШ). Винты бывают правого и левого вращения (на рисунке – винт правого вращения). Передняя по ходу вращения кромка лопасти называется входящей, задняя – выходящей. Поверхность лопасти, обращенная в нос судна называется засасывающей, противоположная ей поверхность – нагнетающей. Диаметр винта D равен диаметру окружности, описываемой крайней точкой лопасти. Нагнетательная поверхность лопасти выполняется в виде винтовой поверхности, получаемой при одновременном вращении отрезка BB1 (образующей винтовой поверхности) вокруг оси 00 и перемещении его вдоль оси (рис. 7.9). Расстояние, проходимое любой точкой образующей в аксиальном направлении за один оборот, называется геометрическим шагом винтовой линии Н. Если скорость вращения и поступательного перемещения образующей постоянны, то развертка винтовой линии, образованной концом образующей точкой В1 будет являться гипотенузой шагового треугольника. Угол при основании шагового треугольника называется шаговым углом, определяемым выражением

$$tg \ \varphi = H/2\pi r. \tag{7.21}$$



Рис. 7.9

# Основными *геометрическими* характеристиками гребного винта являются:

- диаметр D, м;

- *шаг винта Н, м* – средний шаг винтовой поверхности, положенный в основу образования нагнетающей поверхности лопасти;

- *шаговое отношение H/D*;
- площадь спрямленной поверхности лопастей А, м<sup>2</sup>;
- дисковое отношение  $\theta = 4A/\pi D^2$ ;
- диаметр ступицы dст, м;
- число лопастей z.

Кинематические характеристики гребного винта:

- поступь  $h = V_p / n_c (V_p, M/c)$  – осевая скорость набегающего на винт потока воды,  $n_c, c^{-1}$  – частота вращения винта);

- относительная поступь  $\lambda_p = V_p / n_c D = h/D$ .

Гидродинамические характеристики гребного винта в свободной воде:

- упор винта  $P = K_1 \gamma n_c^2 D^4$ , к $H(K_1 - коэффициент упора);$ 

- момент сопротивления вращению  $M = 2\pi K_2 \gamma n_c^2 D^5$ , к $H(K_2 - коэффициент момента);$ 

- КПД винта =  $\eta_{\rm p} = \frac{PV_P}{2\pi n_c} = \frac{K_1}{K_2} \frac{\lambda_p}{2\pi}$ .

Для расчета гребного винта используются специальные диаграммы, построенные по результатам систематических испытаний моделей винтов. В России используются диаграммы Э.Э. Пампеля, состоящие из двух графиков: один – кривые зависимостей коэффициента упора  $K_1$  от относительной поступи  $\lambda_p$  для различных значений шагового отношения H/D и  $K\Pi \square$  винта  $\eta_p$ , другой – коэффициента момента  $K_2$  от  $\lambda_p$  для различных H/D и  $\eta_p$ .

Взаимодействие между гребным винтом и корпусом судна учитывается при помощи коэффициентов *попутного потока*  $\omega$  (попутный поток уменьшает скорость набегающего на винт потока воды) и *засасывания t* (винт, засасывая воду, увеличивает скорость обтекания корпуса судна). *КПД винта* за корпусом судна  $\eta_{\partial}$  выражается как

$$\eta_{\partial} = \eta_p \frac{1-t}{1-\omega}.$$

В определенных случаях возможна кавитация гребного винта – образование пузырьков газа (пара) на засасывающих поверхностях лопастей, вызванная разряжением. Кавитация приводит как к ухудшению гидродинамических характеристик винта, так и к эрозии поверхности лопастей. Проверка на кавитацию производится посредством сравнения *дискового отношения винта*  $\theta$  с минимально допустимым по условиям кавитации значением

$$\theta_{min} = 1,27\gamma f \frac{\mathrm{K_c}}{\mathrm{P}} (n_c D)^2,$$

где f = 1, 3... 1, 6 - коэффициент запаса на кавитацию;

 $K_c$  – кавитационная характеристика, определяемая по специальным графикам;  $p = 101300 + \gamma g(H_0 - D/2)^2 - абсолютное гидро$ статическое давление у концов лопастей, Па;

Н<sub>0</sub>- погружение оси винта.

Расчет гребного винта производится как при проектировании судна, так и для проверки соответствия винта корпусу и главному двигателю. В последнем случае, определяют, что винт является оптимальным (при номинальных оборотах двигателя момент сопротивления вращению M равен моменту на гребном валу  $M_{\Gamma B}$  и мощность двигателя используется полностью), либо винт – гидродинамически тяжелый ( $M > M_{\Gamma B}$  и двигатель работает с перегрузом, не развивая номинальных оборотов), либо винт – гидродинамически легкий ( $M < M_{\Gamma B}$  и при номинальных оборотах двигатель не развивает расчетной мощности).

### 8 Прочность

Прочностью называется способность конструкции противостоять внешним нагрузкам, не разрушаясь.

Приложенные к корпусу судна нагрузки создают в нем *напря*жения, приводящие к деформациям. Способность противостоять деформациям называется жесткостью, способность восстанавливать форму после прекращения действия нагрузки – упругостью, а сохранять деформации – пластичностью. Устойчивостью называется способность противостоять потере формы.

Прочность корпуса судна в целом называется *общей прочно*стью, а прочность отдельных конструкций – местной прочностью.

### 8.1 Общая продольная прочность судна

В процессе эксплуатации корпус судна подвержен деформациям *изгиба, сдвига и кручения*. Наиболее опасными являются деформации, вызванные общим продольным изгибом.

При расчете нагрузки, действующей на корпус судна, рассматривают два состояния: судно на тихой воде и судно на волнении.

На *тихой воде* на судно действуют сила тяжести и сила поддержания. Нагрузки от этих сил рассчитываются для каждой теоретической шпации. Нагрузка от силы тяжести p(x) определяется как масса корпусных конструкций, оборудования и переменных грузов, находящихся в пределах шпации, умноженная на ускорение свободного падения g. Нагрузка от силы поддержания r(x) – как произведение погруженного объема шпации на g и плотность забортной воды  $\gamma$ . Для простоты расчетов предполагается, что в каждой теоретической шпации масса и погруженный объем распределены равномерно, следовательно, графики этих сил будут иметь вид ступенчатых кривых (рис. 8.1).

Результирующая нагрузка q(x) находится как сумма этих нагрузок. По значениям q(x) находятся кривые перерезывающих сил на тихой воде  $Q(x)_{\text{т.в.}}$  и изгибающих моментов  $M(x)_{\text{т.в.}}$  (рис. 8.2).

$$Q(x)_{\text{T.B.}} = \int_{L/2}^{x} q(x) dx; \ M(x)_{\text{T.B.}} = \int_{L/2}^{x} Q(x) dx$$
(8.1)

Входящие в (8.1) интегралы вычисляются численным методом.

Для определения дополнительной нагрузки, вызванной волнением, используется метод *статической постановки судна на волну* – берется волна длиной, равной длине судна, движущаяся курсом и скоростью, равным курсу и скорости судна. Рассматривается два случая: вершина волны располагается в районе миделя судна, и подошва волны располагается в районе миделя судна (рис. 8.3). Для этих случаев рассчитывается изменение силы поддержания на волне  $q(x)_{6}$ , соответствующее профилю волны  $q(x)_{6} = \gamma g \delta w(x)$ , здесь  $\delta w(x)$  - изменение погруженного объема шпации, вызванное волновым профилем. По величине  $q(x)_{6}$  рассчитывается дополнительная перерезывающая сила  $Q(x)_{6}$  и дополнительный изгибающий момент  $M(x)_{6}$ . Таким образом, при плавании на волнении перерезывающая сила и изгибающий момент равны, соответственно

$$= Q(x)_{m.6} + Q(x)_{6}; \quad M = M(x)_{m.6} + M(x)_{6}.$$
(8.2)



Рис. 8,1



Рис. 8.2



Рис. 8.3.

Для расчета напряжений, возникающих при общем продольном изгибе, корпус судна заменяется эквивалентным брусом - тонкостенной пустотелой составной балкой. При расчете изгиба такой балки применяется теория плоских сечений, согласно которой нормальные напряжения в поперечных сечениях по высоте изменяются по линейному закону, а по ширине балки остаются неизменными. Величина нормального напряжения определяется выражением

$$\sigma = \frac{M_u}{I} z_i , \qquad (8.3)$$

где  $M_u$  - изгибающий момент в рассматриваемом сечении корпуса; *I* - главный центральный момент инерции сечения;  $z_i$  - отстояние центра тяжести *i*-той связи от нейтральной оси сечения. Принято, что момент положителен при растянутой палубе и сжатом днище, т.е. при перегибе судна; *z<sub>i</sub>* положительно от нейтральной оси вверх.

Максимальных значений напряжение достигает в палубе судна ( $\sigma_n$ ) и днище ( $\sigma_o$ ) судна.

Поперечное сечение эквивалентного бруса формируется продольными балками набора, настилами палуб, платформ и двойного дна, бортовой и днищевой обшивкой.

На рис. 8.4 показано сечение эквивалентного бруса и эпюра нормальных напряжений.



Рис. 8.4.

7.2 Контроль прочности в судовых условиях

В процессе эксплуатации судна контроль общей прочности осуществляется следующим образом.

Согласно требованиям Регистра все суда длиной 60 м и более снабжаются одобренной Регистром Инструкцией по загрузке, в которой приведены варианты загрузки, принятые в качестве расчетных при определении размеров элементов набора корпуса судна; допускаемые значения изгибающих моментов и перерезывающих сил и, если требуется, ограничения, связанные со скручивающими и поперечными нагрузками; результаты расчетов изгибающих моментов и перерезывающих сил для типовых вариантов загрузки; допускаемые местные нагрузки на отдельные конструкции (люковые крышки, палубы, двойное дно и т. п.). В дополнение к Инструкции суда с широким раскрытием палубы, независимо от их длины, и суда длиной 120 м и более при проектировании которых учитывается любая возможная неравномерность загрузки или балластировки, например чередование пустых и заполненных трюмов, снабжаются одобренным Регистром прибором контроля загрузки, например, при наличие на судне персонального компьютера – одобренной Регистром программой расчета предельных напряжений.

Проверка общей прочности сводится к расчету моментов дедвейта относительно поперечных сечений, указанных в Инструкции, и сравнении их с допустимыми значениями.

На рис. 8.5 приведена диаграмма контроля общей продольной прочности транспортного рефрижератора «Олюторский залив». На вертикальной оси диаграммы откладывается момент дедвейта относительно мидель-шпангоута  $M_{DWx} = \frac{1}{2} \Sigma (P_i / x_i /)$ . В приведенной формуле  $P_i$  – массы статей нагрузки судна за исключением водоизмещения порожнем;  $/x_i /$  - абсолютное значение абсциссы соответствующей статьи нагрузки.

На горизонтальной оси диаграммы откладывается водоизмещение судна.

На диаграмме нанесены линии, соответствующие предельным значениям изгибающего момента при перегибе (вверху диаграммы) и при прогибе (внизу диаграммы) для судна в порту, на рейде и в море. Допустимые значения изгибающего момента находятся на участке диаграммы между соответствующими линиями перегиба и прогиба.

Для проверки местной прочности по допустимой нагрузке на палубу или крышку твиндека определяется значение удельной нагрузки

$$q = h_{zp} / Y \Pi O, \tag{8.4}$$

где *q* - удельная нагрузка на соответствующую палубу; *h*<sub>г</sub> - высота штабеля груза; *УПО* - удельный погрузочный объем груза.

Если в штабели разные грузы, то удельная нагрузка определяется в виде суммы нагрузок от каждого груза.

Рассчитанное значение нагрузки не должно превышать допустимого значения.

Формулу (8.4) можно использовать для определения максимальной высоты груза в соответствующем помещении

$$h_{zp.max} = q_{\partial on} \ V\Pi O, \tag{8.5}$$

где *q<sub>don</sub>* – допустимая нагрузка на соответствующую палубу.



Рис. 8.5.

### Библиографический список

1. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. Том 2. Статика судов - Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.

2. Кацман Ф.М. и др. Теория и устройство судна. - Л.: Судостроение, 1991. – 416 с.

3. Кулагин В.Д. Теория и устройство морских промысловых судов. - Л.: Судостроение, 1986. – 392 с.

4. Задачник по теории, устройству судов и движителям/ Б.И. Друзь и др.– Л.: Судостроение, 1986. – 240 с.

5. Международная конвенция о подготовке и дипломированию моряков и несении вахты 1978 года с поправками: Лондон: ИМО, 2011.- 413 с.

6. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии.-СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2009. – 103 с.

7. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства.- С.Пб., 2019.- 493 с.

8. Самсонов С.В. Основы теории судна: Уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2002.- 98 с.

9. Самсонов С.В. Основы теории и судовые расчеты элементов остойчивости, плавучести и непотопляемости: Уч. Пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2001.- 67 с.

10. Самсонов С.В. Остойчивость судна: Уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2008.- 79 с.

11. Сборник кодексов ИМО по безопасной перевозке морем (по перевозке зерна насыпью; леса на палубе; размещению и креплению грузов)- 4-е издание - СПб.: ЗАО ЦНИИ МФ, 2001 г., - 330 с.

12. Т/х «Олюторский залив». Информация об остойчивости судна. - Владивосток.: ПКБ АО «ДВМП», 1997. – 98с.