ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ МИНИСТЕРСТВА СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет

С. В. Самсонов

ОСНОВЫ ТЕОРИИ СУДНА

Плавучесть. Остойчивость. Непотопляемость.

Учебное пособие для курсантов и студентов специальности 180402
«Судовождение»

Владивосток
2017

ДК 629.12.073
ББК 39.42
С 178

Рецензенты:
д-р техн. наук Азовцев А.И.;
капитан дальнего плавания Беличенко К.

ББК 39.42

С 178 Самсонов С.В. Основы теории судна судна: уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2017. 79 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. 44, табл. 9, библиогр. список – 11 назв.

Содержание

	Введение	5
1	Координатные оси и посадка судна	6
1.1	Система координат	6
1.2	Основные размерения судна	7
1.3	Форма корпуса судна	7
1.4	Посадка судна	9
2	Плавучесть	13
2.1	Условия вертикального равновесия судна	14
2.2	Расчет водоизмещения и координат центра масс судна	15
2.3	Расчет объемного водоизмещения и координат центра величины судна	18
2.4	Гидростатические кривые	19
2.5	Изменение осадки при приеме и снятии груза	21
2.6	Изменение осадки при перемене плотности забортной воды	21
3	Остойчивость	22
3.1	Начальная остойчивость	22
3.1.1	Схема образования восстанавливающего момента	22
3.1.2	Расчет метацентрических радиусов	26
3.2	Остойчивость при больших наклонениях	29
3.3	Диаграмма статической остойчивости	30
3.3.1	Параметры диаграммы статической остойчивости	31
3.3.2	Метацентрическая высота на ДСО	32
3.3.3	Построение диаграммы статической остойчивости	33
3.4	Динамическая остойчивость судна	36
3.4.1	Диаграмма динамической остойчивости	38
3.4.2	Опрокидывающий момент судна, испытывающего качку	40
3.5	Нормирование остойчивости	43
3.5.1	Общие требования к остойчивости	43
3.5.2	Учет обледенения	47
3.5.3	Дополнительные требования к остойчивости	48
3.6	Проверка остойчивости	49
3.7	Информация об остойчивости	51
3.8	Применение теории остойчивости для оценки эксплуатационных ситуаций	52
3.8.1	Перемещение груза	52
3.8.2	Прием/снятие малого груза	55
3.8.3	Подвешенный груз	57
3.8.4	Жидки й груз со свободной поверхностью	57
3.8.5	Плавание на попутной волне	59
3.8.6	Посадка судна на мель	61
3.8.7	Крен судна на циркуляции	62
3.8.8	Перевозка сыпучих грузов	62
3.9	Практическое использование ДСО	66
3.9.1	Смещение груза	66
3.9.2	Спрямление судна с несимметричной загрузкой	67

3.9.3	Спрямление судна с отрицательной начальной МЦВ……	68
3.10	Оперативный контроль остойчивости…….	68
4	Непотопляемость……	70
4.1	Нормирование аварийной посадки и остойчивости.....	70
4.2	Расчеты аварийной посадки и остойчивости.....	70
4.2.1	Категории затопленных отсеков.....	70
4.2.2	Коэффициенты проницаемости.....	71
4.2.3	Метод приема груза для расчета затопления малого отсека……...	72
4.2.4	Метод постоянного водоизмещения для расчета затопления малого отсека…….....	73
4.3	Обеспечение непотопляемости судна.....	74
4.4	Спрямление аварийного судна.....	75
4.5	Фактор балластировки цистерны.....	76
4.6	Информация о непотопляемости судна.....	76
	Таблица величин, принятых в части IV «Остойчивость» Правил классификации и постройки морских судов **Российского морского регистра судоходства**……..	77
	Библиографический список.....	79

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 при плавании в штормовых условиях позволяет иметь приемлемые параметры качки.

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

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. Управляемость судна в полном объеме изучается в курсе управления судном.

В данное учебное пособие включены четыре первых раздела теории судна: Основы геометрии корпуса и посадка, Плавучесть, Остойчивость и Непотопляемость. Объем материала соответствует требованиям к компетентности вахтенного помощника капитана по функции Судовождение на уровне эксплуатации по компетентности Наблюдение за погрузкой, размещением, креплением и выгрузкой грузов, а также меры предосторожности по отношению к ним во время плавания и по компетентности Поддержание судна в мореходном состоянии; по функции Обработка и размещение груза на уровне управления по компетенции Планирование и обеспечение безопасной погрузки, размещения, крепления и ухода за грузом в течение рейса и выгрузки, и по компетенции Контроль за посадкой, остойчивостью и напряжениями корпуса Кодекса по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты [5]. 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

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 [1,2,3,4]*.

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 (⊗) – 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 *ОП* и *ДП* образует *ось абсцисс OX* (положительное направление - в нос судна, абсциссы отсчитываются от ⊗); линия пересечения *ОП* и ⊗ - *ось ординат OУ* (положительное направление – в правый борт, ординаты отсчитываются от *ДП*); линия пересечения *ДП* и ⊗ - ось *аппликат OZ* (положительное направление – вверх, аппликаты отсчитываются от *ОП*). В судовых документах часто аппликаты называются возвышением над *ОП* или *ОЛ.*

Уравнения плоскостей, параллельных плоскостям теоретического чертежа имеют вид:

$X = 5$ – плоскость, параллельная плоскости мидель-шпангоута, отстоящая от ⊗ 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.

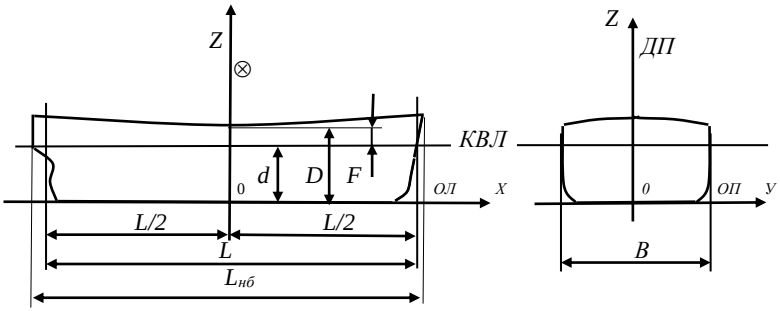


Рис. 1.1. Судовые координаты и основные размерения

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.

$L_{нб}$ (L_{OA}) – длина наибольшая – расстояние между крайними точками корпуса судна;

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

B – 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 – осадка (для теоретического чертежа) – расстояние между основной плоскостью и плоскостью *ВЛ*;

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 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 диа-

метральной, 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.

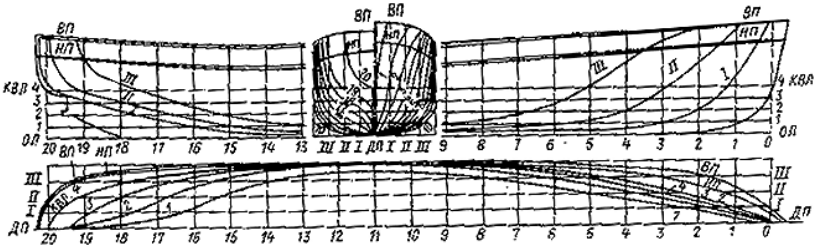


Рис. 1.2. Теоретический чертеж судна

Проекция *Корпус* образована плоскостями, параллельными $\otimes$, на $\otimes$, 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 шпангоут*, 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*.

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

- $C_B = \dfrac{\nabla}{LBd}$ - *коэффициент общей полноты* – отношение *объемного водоизмещения* ∇ (объема погруженной части корпуса) к объему параллелепипеда со сторонами, равными длине *L*, ширине *B* и осадке судна *d*;

- $\alpha = \dfrac{S}{LB}$ - *коэффициент полноты ватерлинии* – отношение *площади ватерлинии S* к площади прямоугольника со сторонами, равными длине *L* и ширине судна *B*;

- $\beta = \dfrac{A_{\otimes}}{Bd}$ - *коэффициент полноты мидель-шпангоута* - отношение *площади мидель-шпангоута* $A_{\otimes}$ к площади прямоугольника со сторонами, равными осадке *d* и ширине судна *B*;

- $\varphi = \dfrac{\nabla}{LA_{\otimes}}$ - *коэффициент продольной полноты* – отношение объемного водоизмещения к объему призмы с основанием, равным площади мидель-шпангоута и высотой, равной длине судна;

- $\chi = \dfrac{\nabla}{Sd}$ - *коэффициент вертикальной полноты* – отношение объемного водоизмещения ∇ 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:

θ - *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.

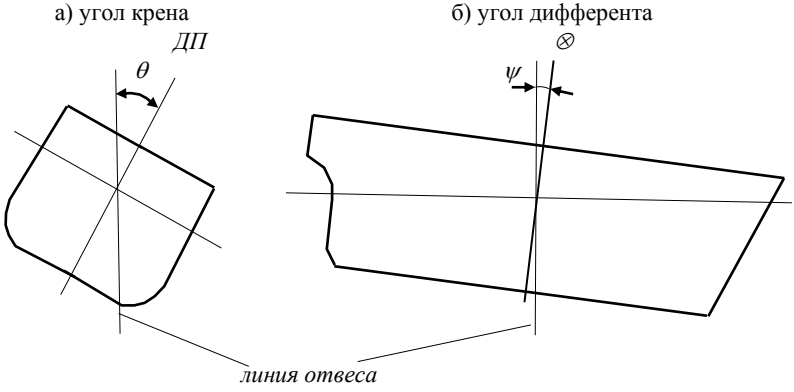


Рис. 1.3. угол крена и угол дифферента

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

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

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

$d_{\otimes} = \frac{d_{нп} + d_{кп}}{2}$ – *осадка 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 *нижней кромки киля (НКК)* в соответствующем месте.

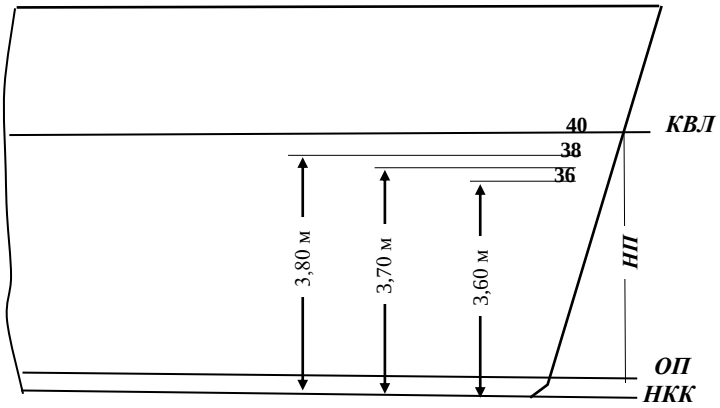


Рис. 1.4. Носовая шкала марок углубления

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.

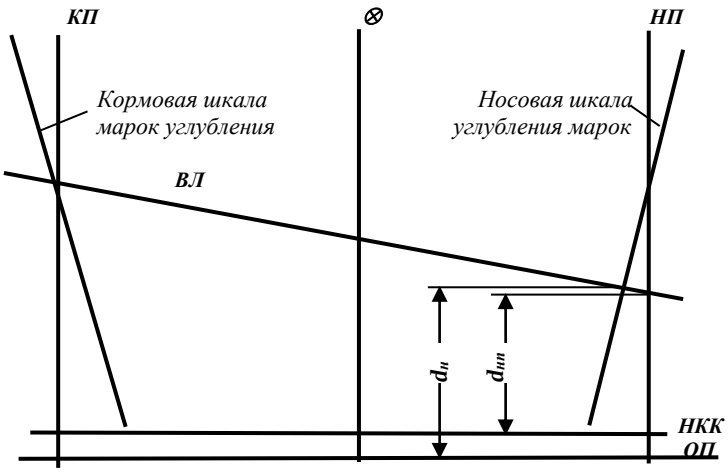


Рис. 1.5. Схема марок углублений

На практике для определения посадки используются следующие параметры:

θ - *угол крена;*

$d_н$ – *осадка носом*;

$d_к$ – *осадка кормой*;

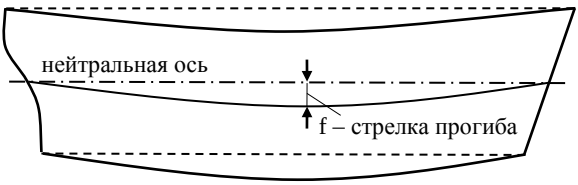
$d_{ср} = \frac{d_н + d_к}{2}$ – *средняя осадка*;

$D_f = d_н - d_к$ – *дифферент*.

Для определения посадки необходимо задать три независимых параметра - $d_н$, $d_к$, θ или $d_{ср}$, D_f, θ.

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

а) прогиб судна



б) перегиб судна

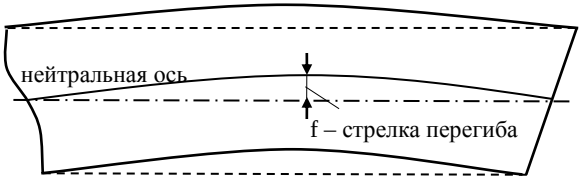


Рис. 1.6. Изгиб корпуса судна: а) прогиб судна; б) перегиб судна

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 погружение 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 мидельшпангоута 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.

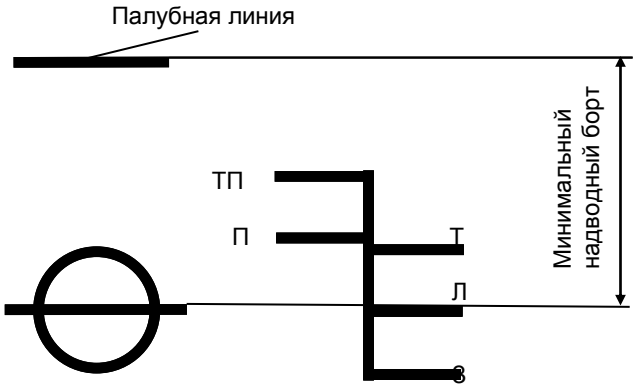


Рис. 2.1. Грузовая марка

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)* $\gamma g \nabla$.

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 погруженного объема (в центре тяжести погруженного объема) корпуса судна. Схема действующих сил представлена на рис. 2.2.

Условие равенства сил имеет вид $g\Delta = \gamma g \nabla$, кН; в масштабе масс

$$\Delta = \gamma \nabla, \text{ т}, \qquad (2.1)$$

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

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

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).

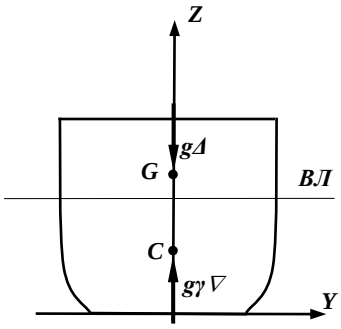


Рис. 2.2. Схема вертикальных сил

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* Δ_0 и координаты *ЦМ* порожнего судна приведены в специальном разделе Информации об остойчивости.

Вторая составляющая - *суммарная масса экипажа, провизии и снабжения* $P_э$. 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 – *жидкие запасы* $P_з$; для каждого вида запасов – тяжелого и дизельного топлива, смазочных масел и пресной воды вносятся цистерны, содержащие соответствующие запасы. Цистерны объединяются в группы по виду запасов.

Четвертая составляющая соответствует *перевозимому грузу* $P_{гр}$; 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* $P_б$ – 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 2) составляет ***водоизмещение судна*** $\boldsymbol{\Delta} = \Delta_0 + P_э + P_з + P_г + P_б$, состоящее из постоянной величины (Δ_0) и суммы масс переменных грузов, называемой *дедвейтом судна* $Dw = P_э + P_з + P_г + P_б$. Максимальная величина водоизмещения и дедвейта определяются действующей грузовой маркой.

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 7) используется для определения расчетного (исправленного) M_z и поправки метацентрической высоты δh. 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 нагрузки относительно основной плоскости*** (сумма чисел, вписанных в четвертый столбец) составляет ***статический момент водоизмещения относительно основной плоскости - M_z.***

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 нагрузки относительно плоскости мидель-шпангоута*** (сумма чисел, вписанных в шестой столбец) составляет ***статический момент водоизмещения относительно мидель-шпангоута – M_x.***

Координаты *ЦМ* судна определяются по формулам

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

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 *ОП*, а относительно другой плоскости, например, относительно плоскости $z_0 = 5{,}0$ *м*; 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.*

Случаи нагрузки № 1.Рейс дальностью 5000 миль (приход)

Судно с однородным грузом в трюмах (μ = 1.487 м^3/т)

Статья нагрузки	***P***, т	***Z***, м от ОЛ	M_z , тм	***X, м*** *от ⊗*	M_x, тм	Попр. δM_z, тм
Судно порожнем	7261.	0.0	7330	-13.8	-100383	
Экипаж, провизия, снабжение	11.5		22		-476	
Танк 1.20 расх.кот. топ. ПрБ	1.5	11.85	18	-36.5	-55	
Танк 1.22 расходный ДП	52.7	11.33	597	-36.4	-1919	
Танк 2.6 расходный ЛБ	7.7	11.3	87	-36.77	-283	
Танк утечн. масла 3.2 ПрБ	0.5	0.7	0	-53.45	-27	
Танк сепарир.масла 3.3 ЛБ	7.2	0.50	4	-46.00	-331	
Танк сепарир.масла 3.4 ПрБ	7.2	0.62	4	-46.24	-333	
Танк сточн. масла 3.5 ДП	16.0	0.95	15	-47.83	-765	
Танк утечн. масла 3.7 ЛБ	2.0	1.16	2	-53.45	-107	
Танк отработ.масла 3.8 ДП	5.9	0.35	2	-57.35	-338	
Танк цилинд.масла 3.9 ПрБ	3.7	10.70	40	-65.30	-242	
Танк запасн.масла 3.10 ПрБ	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 середина	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	
Водоизмещение	**16578.5**	**8.67**	**143747**	**-3.93**	**-91296**	**230**
Всего поправка δM_z, тм			230			
Момент M_z расчетный, тм			143977			
ЦМ судна Z_g расчетный, м			8.68			
ЦМ судна Z_g допустимый, м			**9.04**			
Аппликата метацентра Z_m, м			9.32			
Метацентрическая высота	Без поправки $h_o = Z_m - Z_g$, м		0.65		K*=3.15	
	Поправка δh, м		0.01			
	Исправленная $h = h_o - \delta h$, м		0.64			
Осадка	Средняя $d_{ср}$, м		7.96			
	Носом $d_н$, м		6.76			
	Кормой $d_к$, м		9.15			

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 ∇, абсцисса *ЦТ* этой площади – величине x_c. Величина объемного водоизмещения и абсцисса *ЦВ* определяются выражениями

$$\nabla = \int_{-L/2}^{L/2} A dx \; ; \; x_c = \frac{1}{\nabla} \int_{-L/2}^{L/2} A x dx \cdot \qquad (2.4)$$

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

$$\nabla = \delta L[A_1 + A_2 + ... + A_{19} + ½(A_0 + A_{20})]; \qquad (2.5)$$

$$x_c = [(\delta L)^2/\nabla][9{,}5(A_0 - A_{20}) + 9(A_1 - A_{19}) + ... + (10 - n)(A_n - A_{20-n})]. \qquad (2.6)$$

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

Строевая по ватерлиниям (рис. 2.3, б) представляет собой огибающую площадей ватерлиний в координатах z - S. Площадь, ограниченная строевой, соответствует объемному водоизмещению ∇, аппликата *ЦТ* этой площади – величине z_c. Величина объемного водоизмещения и абсцисса *ЦВ* определяются выражениями

$$\nabla = \int_0^d S dz \; ; \; z_c = (1/\nabla) \int_0^d S z dz \cdot$$

(2.7)

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

$$\nabla = \delta d[S_1 + ... + S_{m-1} + ½(S_0 + S_m)];$$

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

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

Для определения объемного водоизмещения ∇ 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 ∇ и x_c на масштабе Бонжана необходимо 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 ∇ и x_c.

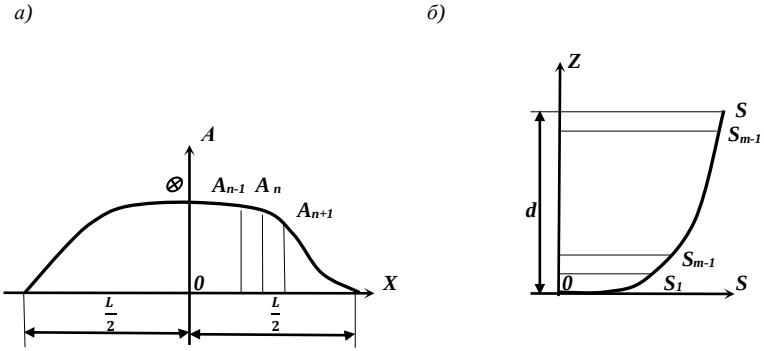


Рис. 2.4. Строевые по шпангоутам (а) и ватерлиниям (б)

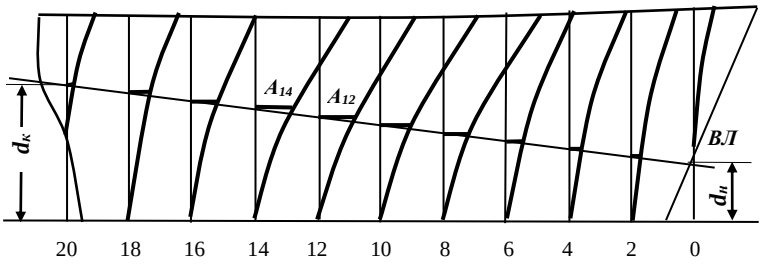


Рис. 2.5. Масштаб Бонжана

2.4 Гидростатические кривые

Гидростатические кривые или *кривые элементов теоретического чертежа* представляют собой совокупность кривых *водоизмещения Δ, объемного водоизмещения* ∇, *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 r и R, коэффициентов полноты корпуса α, β и 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*.

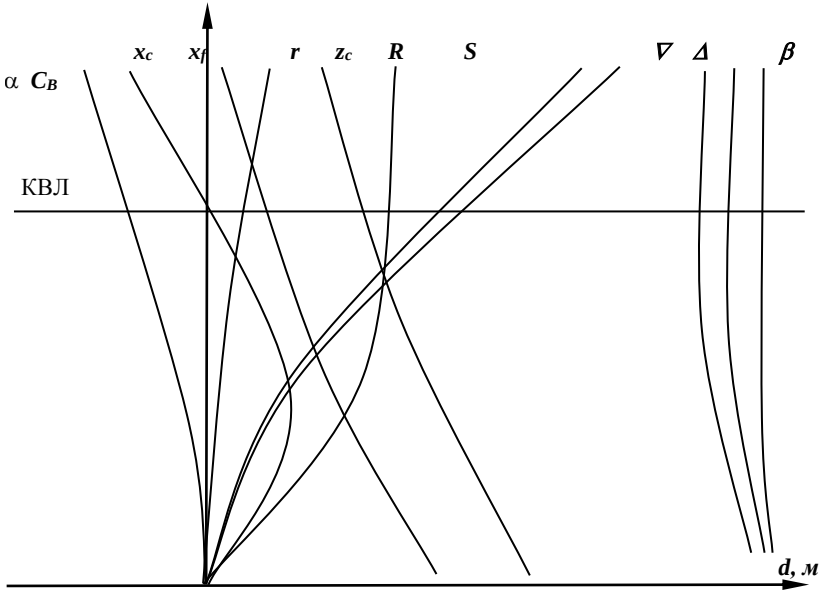


Рис. 2.6. Гидростатические кривые

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 δv имеет форму прямой призмы, имеющей в основании ватерлинию судна площадью *S* и высоту, равную приращению осадки δd. Из сказанного следует

$$\delta v = \frac{P}{\gamma} = S\,\delta d. \qquad (2.10)$$

Подставив в (2.10) $\delta d = 1$ *см* $= 0{,}01$ *м*, получим *выражение числа тонн на сантиметр осадки*

$$q = 0{,}01\,\gamma S. \qquad (2.11)$$

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

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

$$\delta d = \frac{\nabla_1}{S}\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_2}. \qquad (2.13)$$

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 и мера – *начальная поперечная метацентрическая высота*.

3.1 Начальная остойчивость

3.1.1 Схема образования восстанавливающего момента

Рассмотрим *малое 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* $M_{кр}$ судно наклонилось на угол крена θ, при этом *ЦВ* сместился в сторону наклонения и сила поддержания совместно с силой тяжести создали *восстанавливающий момент* $M_в$, равный по величине кренящему моменту $M_в = M_{кр}$. Равенство кренящего и восстанавливающего моментов выражает основной закон статических наклонений. Смещение *ЦВ* 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 в сторону наклонения.

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 $ВЛ_\theta$. При малых наклонениях *кривую центра величины* CC_θ 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*.

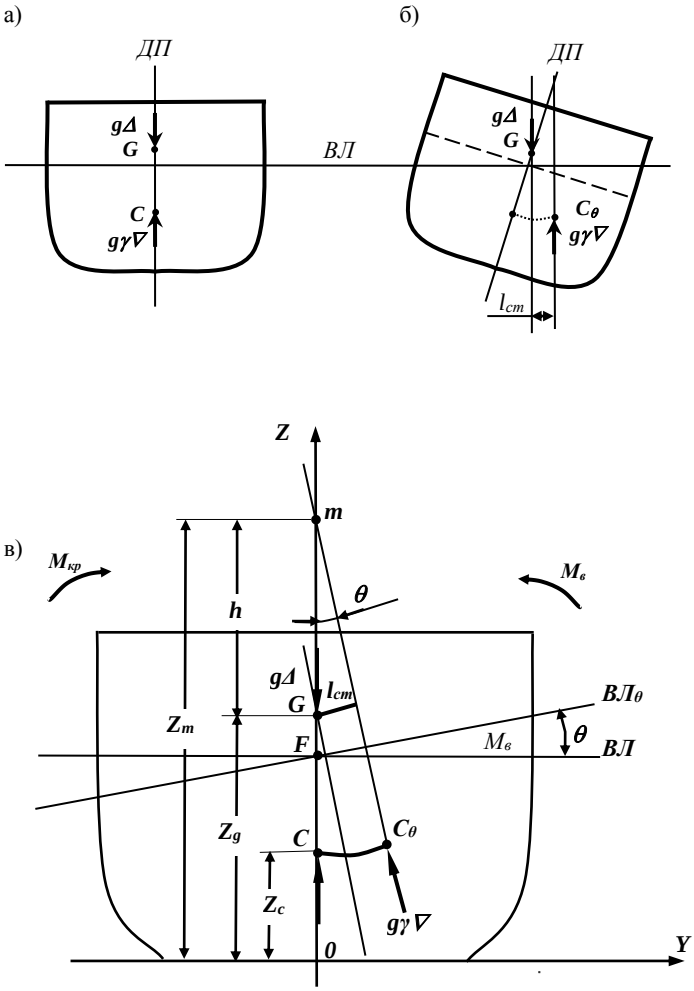


Рис. 3.1. Схема образования восстанавливающего момента:
а) начальное положение; б) судно с креном; в) схема наклонения.

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 под-

держания) равен произведению одной из сил на плечо, равное кратчайшему расстоянию между линиями действия этих сил. Это плечо обозначается $l_{ст}$ и называется *плечом статической остойчивости* или *плечом восстанавливающего момента*. Восстанавливающий момент $M_в = l_{ст} g\Delta$ *(кНм)* или в размерности [*тм*] $M_в = l_{ст}\Delta$. Из прямоугольного треугольника при m $l_{ст} = h \sin\theta$. В итоге получаем метацентрическую формулу поперечной остойчивости

$$M_в = \Delta h \sin\theta, \text{ тм}. \qquad (3.1)$$

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

$$M_{в\theta} = \frac{\Delta h \theta°}{57{,}3°}, \text{ тм}. \qquad (3.2)$$

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 Δh называется *коэффициентом поперечной 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 МЦВ* – $H = z_M - z_g$. Точкой F на схеме обозначен *ЦТ площади действующей ВЛ*. Выражение 3.1 для продольных наклонений записывается в виде

$$M_{в\psi} = \Delta H \sin\psi, \text{ тм}.$$

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 ψ мал, то в силу свойств малых углов $\sin\ \psi \approx tg\ \psi$, а выражение продольного восстанавливающего момента имеет вид

$$M_{в\psi} = \frac{\Delta H D_f}{L}, \text{ тм}. \qquad (3.3)$$

Основной закон статических наклонений для продольных наклонений выражается равенством *продольного момента* $M_{пр}$ и *продольного восстанавливающего момента* $M_{в\psi}$.

Выражение (3.3) называется *метацентрической формулой продольной остойчивости*, а произведение ΔH - *коэффициентом продольной остойчивости.*

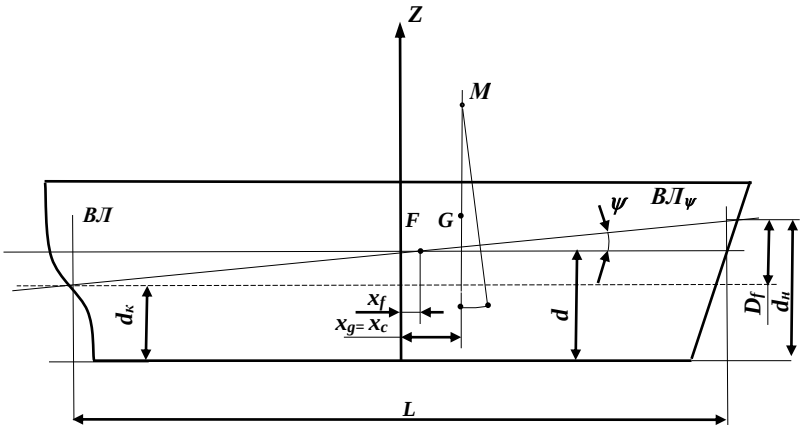


Рис. 3.2.Схема продольного наклонения

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

$$M_{1M} = \frac{\Delta H}{L}. \qquad (3.4.)$$

Если при расчете координат *ЦМ* 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

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

Осадки носом и кормой определяются по формулам

$$d_н = d + (\frac{L}{2} - x_f)\ \frac{D_f}{L};\ d_к = d - (\frac{L}{2} + x_f)\ \frac{D_f}{L},$$

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*, *ЦТ* площади ватерлинии находится в точке *F*, ось ординат *0Y* лежит в плоскости *ВЛ*. При *бесконечно малом* наклонении тела на угол $d\varphi$ центр величины тела точка *C* смещается в сторону наклонения по дуге окружности радиуса ρ, центр той окружности находится в точке *m*.

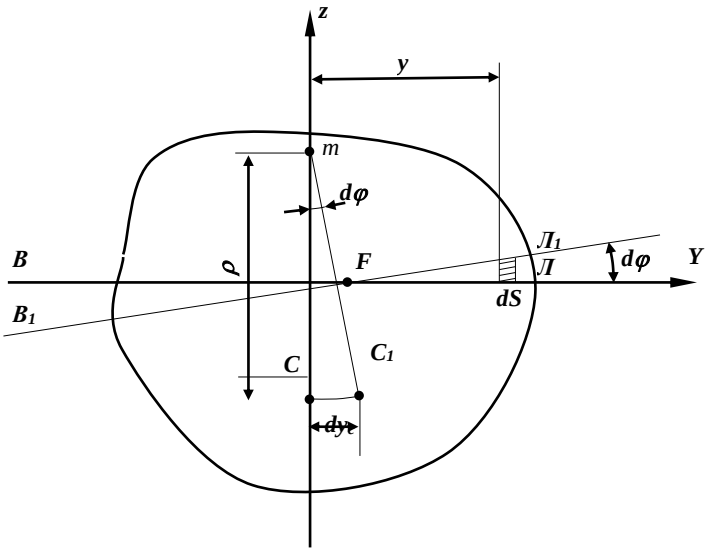


Рис. 3.3. Схема наклонения тела произвольной формы

Пусть *ВЛ* – начальная ватерлиния плавающего тела, соответствующая его прямому положению, а $B_1Л_1$ – 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* – *ЦТ* площади ватерлинии *ВЛ* (по нормали к плоскости чертежа). В результате входа в воду клина $FЛ_1Л$ 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 *ВЛ* и $B_1Л_1$.

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

$$V\rho\, d\varphi = d\varphi \int_S y(y - y_f)dS = d\varphi \left[\int_S y^2 dS - y_f \int_S y dS\right]. \quad (3.5)$$

В полученном выражении $\int_S y^2 dS = I_x$ – момент инерции площади ватерлинии относительно ее продольной оси $0x$; $\int_S y dS = y_f S$. Следовательно, выражение (3.5) принимает вид

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

где I_F – момент инерции площади ватерлинии относительно оси наклонения, проходящей через центр ее площади.

В итоге получаем выражение для начального метацентрического радиуса

$$\rho = \frac{I_F}{V} \quad (3.7)$$

Перейдя от плавающего тела произвольной формы к судну, имеющему строгую ориентацию ватерлинии относительно осей $0x$ и $0y$, 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 $0x$, а проекция главной поперечной оси $0y_f$ параллельна оси $0y$. Соответственно этому, выражения для поперечного r и продольного R метацентрических радиусов имеют вид

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

где I_x – момент инерции площади ватерлинии относительно главной продольной оси; I_{yf} – момент инерции площади ватерлинии относительно главной поперечной оси (оси, параллельной $0y$, проходящей через *ЦТ* площади ватерлинии точку F).

Моменты инерции площади плоской фигуры, имеющей размеры l вдоль оси 0x и b вдоль оси 0y, определяются выражением

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

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

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

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 $\nabla = C_B LBd$, то получим

$$r = I_x/\nabla = k_x LB^3/C_B LBd = k_r B^2/d; \; R = I_{yf}/\nabla = k_y L^3 B/C_B LBd = k_R L^2/d,$$ 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 *ВЛ* соответствует положению судна на ровный киль, $B_1 Л_1$ – дифференту на нос и $B_2 Л_2$ – 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.

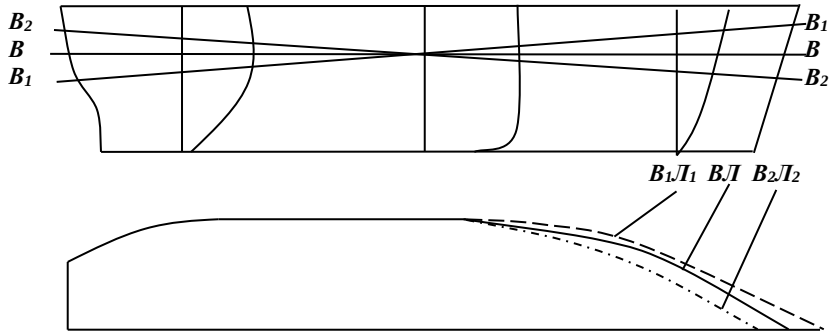


Рис. 3.4. Изменение формы ватерлинии

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. 3.5 представлена схема поперечного наклонения судна на угол, для которого замена кривой центра величины дугой окружности недопустима. Точка m_θ является центром кривизны кривой CC_θ в точке C_θ.

Пользуясь обозначениями, приведенными на рис. 3.10, плечо статической остойчивости l_{cm}, выраженное отрезком GK, определяется выражением

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

Выразив входящие в выражения отрезки через координаты *ЦМ* и *ЦВ* в прямом положении и при крене θ, получим искомое выражение плеча статической остойчивости

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

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 θ, 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* $l_в = (z_g - z_c)\sin\theta$.

Выражение (3.12) принимает вид

$$l_{cm} = l_\phi - l_в. \qquad (3.13)$$

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

$$l_{cm} = l_\phi^* - l_в^*. \qquad (3.14)$$

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 *ДСО* является графическим изображением выражения $l_{cm} = l_\phi - l_в$, то для конкретного судна заданным значениям водоизмещения Δ и ап-

пликаты *ЦМ* z_g соответствует единственная кривая *ДСО*, для которой восстанавливающий момент $M_в = l_{cm}\Delta$, тм.

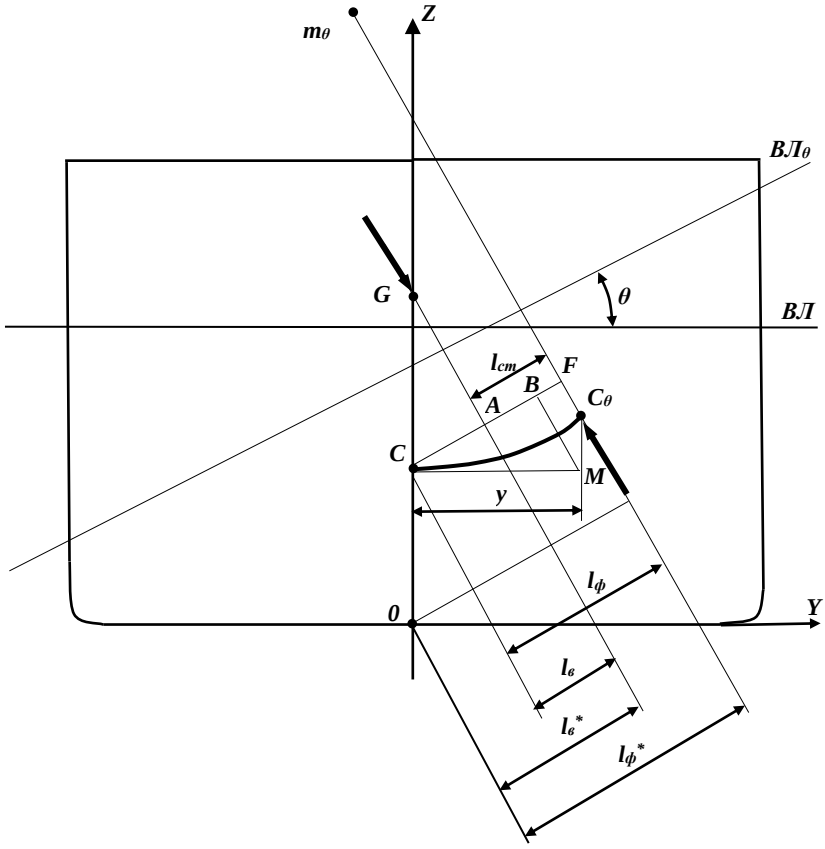


Рис. 3.5. Схема большого наклонения

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 $M_в^{max} = l_{max}\Delta$, 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}.

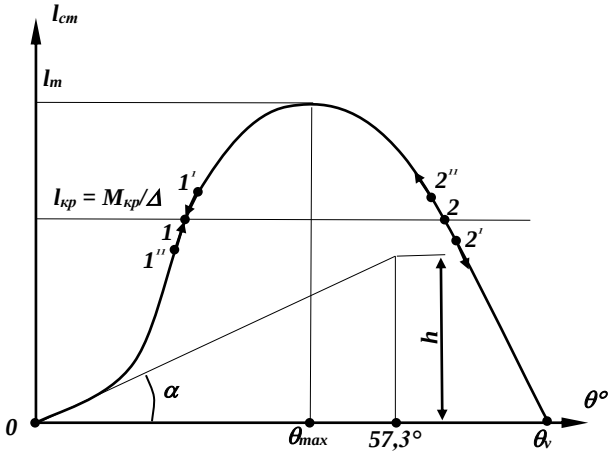


Рис. 3.6. Диаграмма статической остойчивости

Максимуму диаграммы соответствует угол максимума θ_m, делящий *ДСО* 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 *ДСО* проведем линию, соответствующую действию постоянного статического кренящего момента. Эта линия имеет две точки пересечения с диаграммой, соответствующие равенству кренящего и восстанавливающего моментов ($M_{кр} = M_в$).

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 влево (т.1′) и отпустить, то в т. 1′ момент восстанавливающий будет больше кренящего момента $M_в > M_{кр}$ и судно вернется в т. 1; если судно из т. 1 отклонить вправо в т. 1″, то $M_{кр} > M_в$ и судно снова вернется в т. 1; таким образом, т. 1 является *точкой устойчивого равновесия*, а участок *ДСО* от *0* до θ_m *– ветвью устойчивого равновесия*. Если судно, находящееся в т. 2 наклонить вправо (т.2′) и отпустить, то в т. 2′ момент восстанавливающий будет больше кренящего момента $M_в > M_{кр}$ и судно вернется в т. 1; если судно из т. 2 отклонить влево в т. 2″, то $M_{кр} > M_в$ и судно опрокинется; таким образом, т. 2 является *точкой неустойчивого равновесия*, а участок *ДСО* от θ_m до θ_v *– ветвью неустойчивого равновесия*. Соответственно этому, *угол максимума* θ_m делит диаграмму на зоны устойчивого и неустойчивого равновесия и показывает ***мак-***

симальное значение безопасного крена, поскольку для любого значения угла крена $\theta > \theta_m$ случайное воздействие может привести к опрокидыванию судна.

Угол заката ДСО θ_v показывает максимальное значение угла крена, до которого диаграмма соответствует положительным значениям восстанавливающего момента. Если у судна угол заливания (угол крена θ_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

$$\frac{dl_{cm}}{d\theta} = \frac{dh}{d\theta} \sin\theta + h\cos\theta. \qquad (3.15)$$

Подставив в выражение (3.32) $\theta = 0$, получим

$$\frac{dl_{cm}}{d\theta}\Big|_{\theta=0} = h, \qquad (3.16)$$

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 α на рис. 3.6); поскольку тангенс угла равен отношению противолежащего катета к прилежащему, то, если прилежащий к углу α катет равен единице (*1 рад = 57,3°*), то противолежащий катет – тангенсу угла, который, в свою очередь, равен метацентрической высоте. Это свойство метацентрической высоты используется для проверки правильности построения *ДСО*, 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 $l_{cm} = h\theta/57{,}3°$, а остальная часть диаграммы соответствует остойчивости при больших наклонениях и описывается выражением $l_{cm} = l_\phi - l_в$. Величина l_ϕ 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 $l_ф$ от водоизмещения судна Δ для значений угла крена, кратного 5° или 10°. Шкала Δ включает все возможные значения водоизмещения судна. На поле графика обычно указывается формула, по которой рассчитываются плечи ДСО

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

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

- если $(z_g - z_c)\sin\theta$, *то относительно* ***m. C***,
- если $z_g \sin\theta$, *то относительно* ***m.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 (из формулы 3.12) для различных значений водоизмещения судна. Для нахождения плеч *ДСО* на универсальной диаграмме на правой оси откладывают значение аппликаты *ЦМ* судна или *МЦВ*; из полученной точки (на рисунке – $z_{g\ зад}$) 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 λ, то расстояние от 0 до θ на оси абсцисс равно $\lambda \sin\theta$), эта прямая будет представлять собой плечо веса ($z_g \sin\theta$); кривая плеча формы для заданного водоизмещения $\Delta_{зад}$ проводится методом графического интерполирования между кривыми, соответствующими ближайшим большему и меньшему водоизмещению; искомые плечи *ДСО* равны длинам отрезков между построенными кривой и прямой (на рисунке – выделенные отрезки).

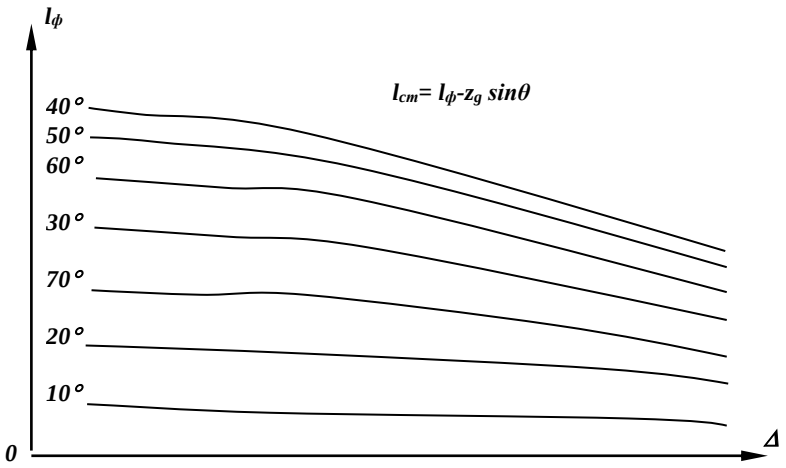
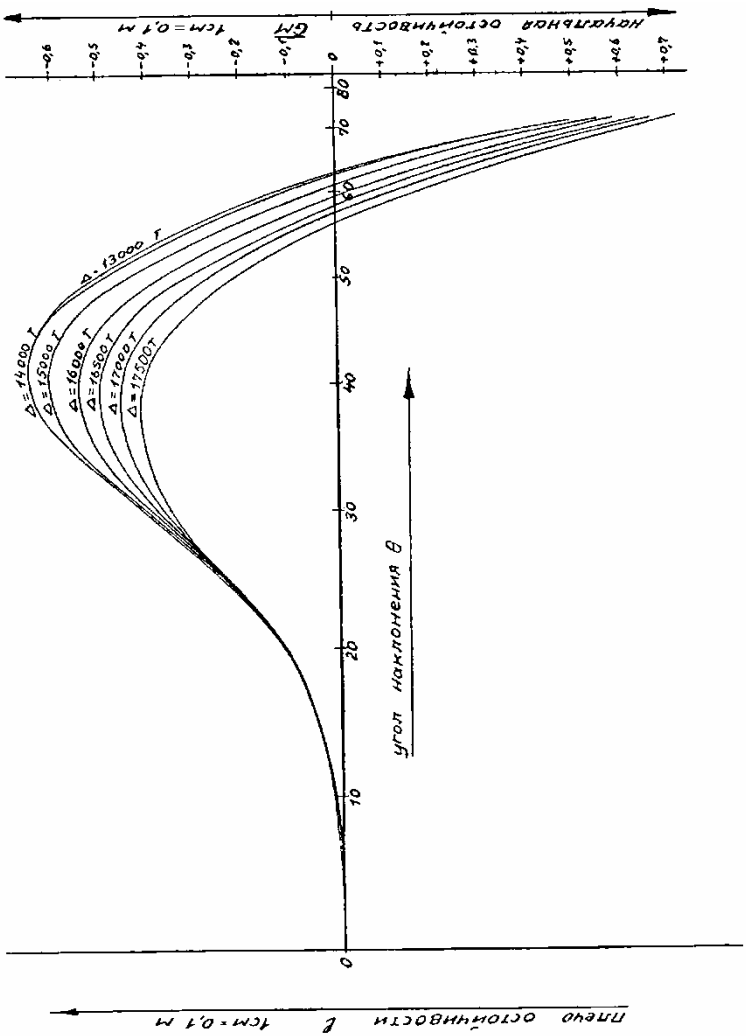


Рис. 3.7. Кривые плеча формы

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

Δ=	z_g =		z_c=	h =				
θ, град	0	10	20	30	40	50	60	70
$\sin\theta$	0,000	0,174	0,342	0,500	0,643	0,766	0,866	0,940
l_ϕ								
$z_g \sin\theta$								
l_{cm}								


Начальная остойчивость GM 1см = 0,1 м
-0,6
-0,5
-0,4
-0,3
-0,2
-0,1
0
+0,1
+0,2
+0,3
+0,4
+0,5
+0,6
+0,7
Δ = 13000 т
Δ = 14000 т
Δ = 15000 т
Δ = 16000 т
Δ = 16500 т
Δ = 17000 т
Δ = 17500 т
угол наклонения θ
0
10
20
30
40
50
60
70
80
Плечо остойчивости l 1см = 0,1 м

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 $M_д$ (рис. 3.9).

Пусть момент $M_д = const$ 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 $\theta_{ст}$. 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 $\theta_д$, когда кинетическая энергия наклонения будет израсходована на преодоление избытка момента восстанавливающего над кренящим и скорость наклонения станет равна нулю.

Для определения величины динамического крена $\theta_д$ используется равенство работ кренящего и восстанавливающего момента $T_{кр} = T_в$. Поскольку работа момента равна произведению момента на угол наклонения, то работа кренящего момента при $M_{кр} = const$ будет равна $T_{кр} = M_{кр}\theta_д$, а работа восстанавливающего момента - $T_в = \int_0^{\theta} M_в d\theta$ и условие равенство работ будет иметь вид

$$M_{кр}\theta_д = \int_0^{\theta} M_в d\theta \,. \qquad (3.17)$$

Правая часть выражения (3.17) на рис. 3.9 равна площади прямоугольника $0AD\theta_д$, а левая часть – площади под *ДСО* от *0* до $\theta_д$ (фигуры $0BCD\theta_д$) и условие (3.17) сводится к равенству площадей фигур

$$S_{0AD\theta д} = S_{0BCD\theta д}. \qquad (3.18)$$

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

$$S_{0AB} = S_{BCD}. \qquad (3.19)$$

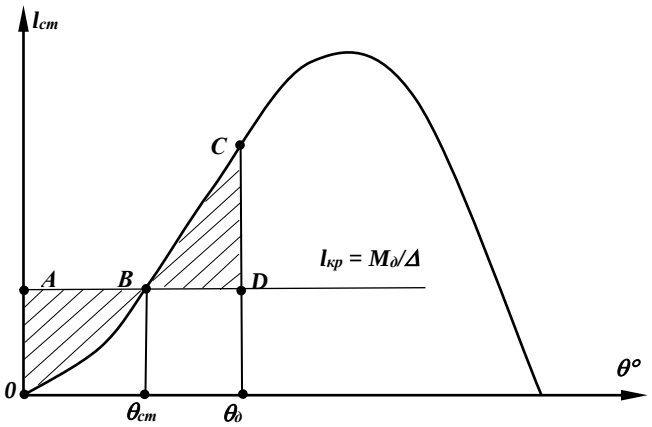


Рис. 3.9. Определение динамического крена на *ДСО*

Таким образом, для определения величины угла динамического крена от воздействия постоянного динамически приложенного кренящего момента необходимо подобрать такую вертикальную линию $C\theta_д$, которая совместно с кривой *ДСО* 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 $\theta_{д.\,пр.}$ (рис. 3.10).

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

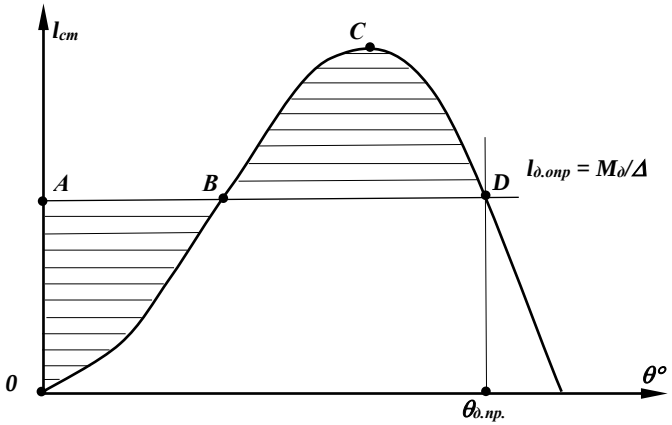


Рис. 3.10. Предельный угол динамического крена

3.4.1 Диаграмма динамической остойчивости

График зависимости плеча динамической остойчивости $l_д$ от угла крена называется *диаграммой динамической остойчивости (ДДО)*. Плечо динамической остойчивости выражает собой работу восстанавливающего момента, которая, как было определено выше, определяется площадью под *ДСО*, разделенную на водоизмещение судна. При построении *ДДО* ее плечи рассчитываются как соответствующие площади под ДСО для тех же значений углов крена, для которых были определены значения плеч статической остойчивости $l_{ст}$ при построении *ДСО*. Площадь *ДСО* рассчитывается способом трапеций. На рис. 3.11 представлена интерпретация расчета плеч ДДО.

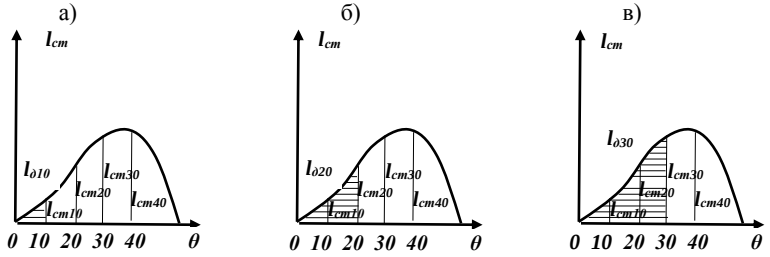


Рис. 3.11. Расчет плеч ДДО.

Плечо *ДДО*, соответствующее $\theta = 10° - l_{д10}$, равно площади треугольника участка ДСО от *0* до *10°*

$$l_{д10} = 0{,}5 l_{ст10} * 10/57{,}3.$$

Плечо *ДДО*, соответствующее $\theta = 20° - l_{д0}$, равно площади треугольника участка ДСО от *0* до *10°* плюс площадь трапеции от *10°* до *20°*

$$l_{д20} = l_{д10} + 0{,}5(l_{ст10} + l_{ст20}) * 10/57{,}3$$

и т.д.

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

$$l_{д10i} = l_{д10(i-1)} + 0{,}5(l_{ст10(i-1)} + l_{ст10i}) 10/57{,}3 , \qquad (3.20)$$

где $i = 1, ..., n$; $l_{д0} = l_{ст0} = 0$; $10/57{,}3$ – 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 *рад* = 57,3°; 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 *ДДО* равно отрезку перпендикуляра, проходящего через $\theta = 1$ *рад*, между осью наклонения и касательной к диаграмме, проведенной из ее начала.

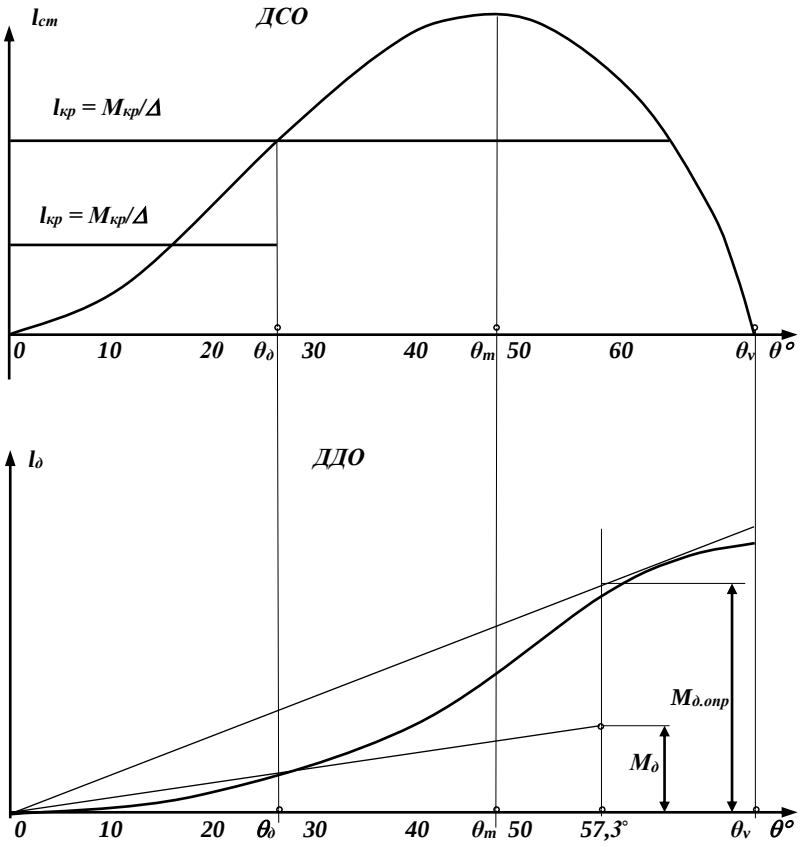


Рис. 3.12. Определение динамического крена и опрокидывающего момента на *ДСО и ДДО*

3.4.2 Опрокидывающий момент судна, испытывающего качку

1) На судно, испытывающее качку с амплитудой θ_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 *ДСО* и *ДДО*.

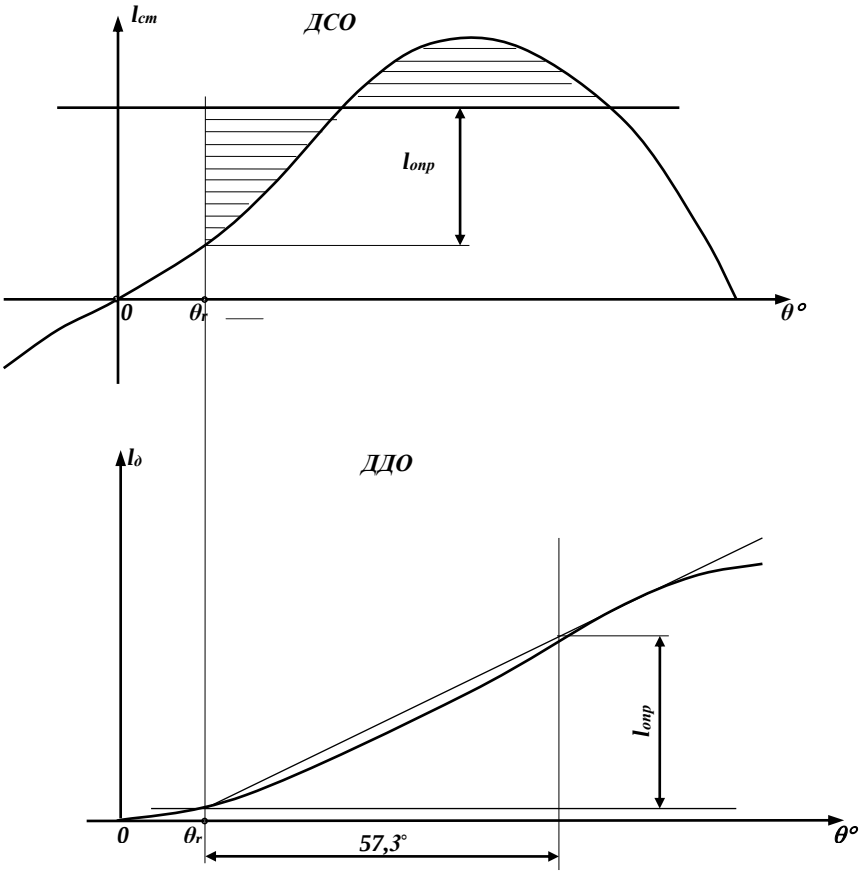


Рис. 3.13. Динамический опрокидывающий момент на ДСО и ДДО

2) На судно, испытывающее качку с амплитудой θ_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 *ДСО* и *ДДО*.

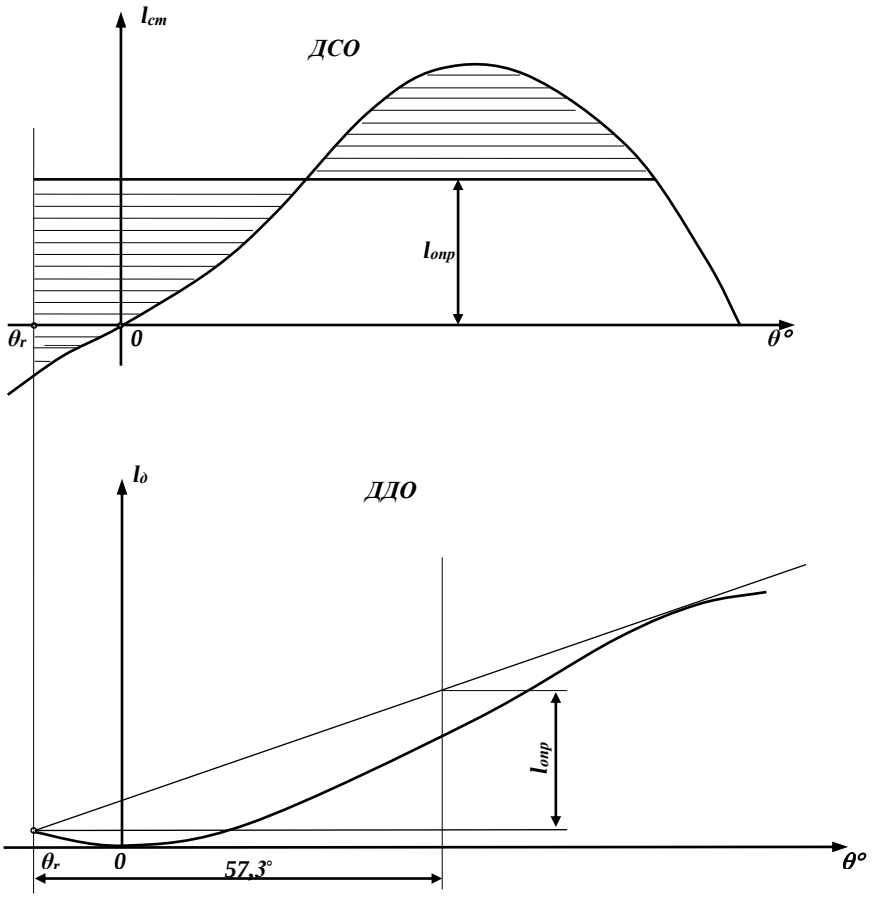


Рис. 3.14. Динамический опрокидывающий момент на ДСО и ДДО

Рис. 3.13 и 3.14 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 *0* 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.

3.5 Нормирование остойчивости

Остойчивость судна считается достаточной, если выполняются требования к *критерию погоды*, параметрам ДСО и метацентрической высоте. Указанные требования приведены в «Правилах классификации и постройки морских судов» Российского Морского Регистра Судоходства [5].

Для судов, у которых согласно V главе Правил Регистра должна быть конструктивно обеспечена непотопляемость при затоплении одного или двух отсеков (в символе класса присутствует знак [1] или [2]), остойчивость в неповрежденном состоянии должна быть такой, чтобы обеспечить требования к непотопляемости судна (аварийной плавучести и аварийной остойчивости судна в аварийном состоянии).

Нормы остойчивости и непотопляемости изменяются в соответствии с изменением Правил Регистра, поэтому на каждое судно распространяются требования, действовавшие на момент закладки киля этого судна.

3.5.1 Общие требования к остойчивости

1 Критерий погоды

Остойчивость *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_{w1} (рис. 3.15).

2) От статического угла крена θ_{w1}, вызванного постоянным ветром, судно под воздействием волн кренится на наветренный борт на угол, равный амплитуде θ_r.

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

4) Вычисляются и сравниваются площади a и b, заштрихованные на рис. 3.20. Площадь b ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой, соответствующей плечу l_{w2}, и углом крена θ_{w2}=50°, либо углом крена θ_c, соответствующим точке второго пересечения прямой l_{w2} с кривой восстанавливающих плеч, либо углом заливания θ_f, в зависимости от того, какой из них меньше. Площадь a ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой l_{w2} и углом крена, соответствующим амплитуде качки θ_r.

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

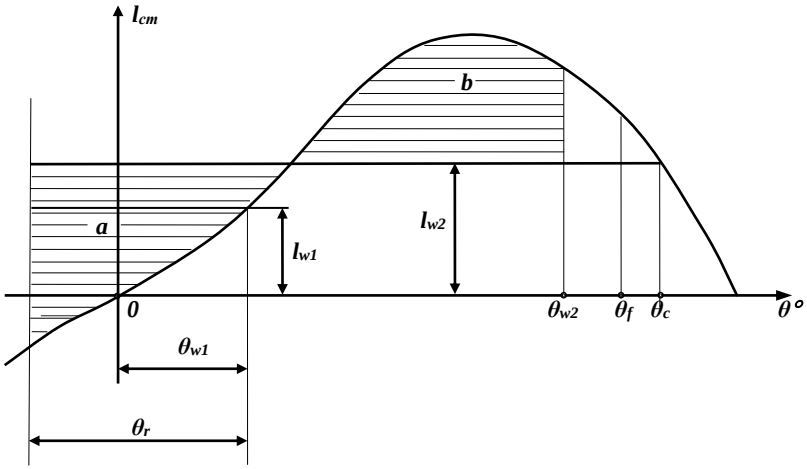


Рис. 3.15. Определение критерия погоды

Статический угол крена от действия постоянного ветра θ_{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_{w1}, м, принимается постоянным для всех углов крена и рассчитывается по формуле

$$l_{w1} = p_v A Z_v / (1000 g \Delta), \qquad (3.21)$$

где p_v – давление ветра, *Па*, определяется по табл. 3.2 в зависимости от района плавания судна;

Z_v – 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;

A – площадь парусности, м^2 – проекция надводной части судна на плоскость, параллельную ДП;

Δ - водоизмещение судна, т;

g = 9,81 м/с^2- ускорение свободного падения.

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

Для рыболовных судов длиной от 24 до 45 м давление ветра в формуле (3.21) может приниматься по табл. 3.3 в зависимости от расстояния от ватерлинии до центра парусности *Z*.

Табл. 3.2

Зависимость давления ветра от района плавания

Район плавания судна	Давление ветра p_v, *Па*
Неограниченный	504
Ограниченный ***R1***	353
Ограниченный ***R1, R2-RSN, R2-RSN(4,5), R3-RSN***	252

Табл. 3.3

Зависимость давления ветра от возвышения центра парусности над ватерлинией

Z, м	1	2	3	4	5	≥6
p_v, *Па*	316	386	429	460	485	504

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

$$\theta_r = 109kX_1X_2\sqrt{rS}\,, \qquad (3.22)$$

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

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 k

$A_к/(LB)\%$	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

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_1	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 X_2

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 S

Район плавания судна	T, с									
	≤5	6	7	8	10	12	14	16	18	≥20
Неограниченный	0,100	0,100	0,098	0,093	0,079	0,065	0,53	0,044	0,038	0,035
Ограниченный	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 (3.22) 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 θ_f, в зависимости от того, какой из них меньше. Дополнительно, площадь между углами 30° и 40°, или, если θ_f < 40°, между углами 30° и θ_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_{max} определяется линейной интерполяцией.

Угол крена θ_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 θ_v или *угол заливания* θ_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 M_R, кН*м,* определяется по формуле

$$M_R = 0{,}20V_0^2\Delta\frac{Z_g - \frac{d}{2}}{L}, \qquad (3.23)$$

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

$$K^* = \frac{0{,}3}{a_{расч}} \geq 1, \qquad (3.24)$$

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

$$a_{расч} = 1{,}1 * 10^{-3} B m^2 \theta_r,$$

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

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

θ_r – расчетная амплитуда качки, определяемая как при расчете опрокидывающего момента, град.

Таблица 3.8

Коэффициент m_0

$\frac{h_0 B}{z_g\sqrt[3]{\nabla}}$	0,10 и менее	0,15	0,25	0,50	1,0	2,0	3,0 и более
m_0	0,34	0,42	0,64	1,13	1,96	2,69	2,94

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***.

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°.***

3.6 Проверка остойчивости

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_g, или момента водоизмещения относительно *ОП* M_z, или момента дедвейта относительно *ОП* M_{zDW}) от водоизмещения судна.

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

Для всего диапазона водоизмещения рассчитываются кривые зависимости метацентрической высоты от водоизмещения для предельных значений критериев остойчивости ($K = 1,0$; $l_{max} = 0,20$ *м*; $\theta_m = 30°$; $\theta_v = 60°$; $h = 0,15$ (или минимальное значение по дополнительным требованиям); $K^* = 1,0$). Рассчитанные кривые наносятся на график. Кривая зависимости h от Δ при значениях $K^* = 1,0$ располагается в верхней части диаграммы и отделяет зону достаточной остойчивости от зоны чрезмерной остойчивости; если расчетное значение *МЦВ* попадает на эту кривую, то остойчивость будет считаться предельной по критерию ускорения, если выше, то – чрезмерной. Остальные 5 кривых располагаются в нижней части диаграммы. Верхняя огибающая этих кривых (на рис. 3.16 – выделенная линия) разделяет зоны достаточной и недостаточной остойчивости: если расчетное значение МЦВ 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), а по остальным – достаточной, если ниже, то – недостаточной. Диаграмма контроля остойчивости может быть построена в других координатах; иногда шкала МЦВ направлена сверху вниз.

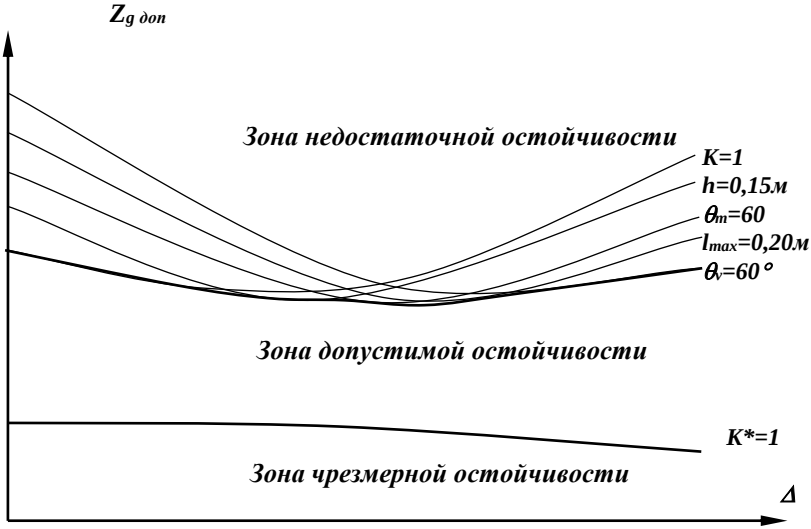


Рис. 3.16. Диаграмма контроля остойчивости

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 которого использованы 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 жидких 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

Пусть на судне водоизмещением Δ тонн с координатами *ЦТ* 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 $B(x_2; y_2; z_2)$. Определим изменение посадки и остойчивости судна.

Чтобы найти изменение 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 измене-

нию координат *ЦМ* 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 *ЦМ* судна $\delta h = \delta H = - \delta z_g$.

Для определения δz_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 $\delta z_g = \frac{P}{\Delta}(z_2 - z_1)$.

В итоге получим

$$\delta h = \delta H = - \frac{P}{\Delta}(z_2 - z_1). \qquad (3.25)$$

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

Горизонтальное поперечное перемещение из точки $A_1(x_1; y_1; z_2)$ в точку $A_2(x_1; y_2; z_2)$. При поперечном перемещении груза возникает кренящий момент $M_{кр}$, вызывающий наклонение судна на угол θ, уравновешиваемый восстанавливающим моментом $M_{в\theta} = M_{кр}$. Из схемы наклонения (рис. 3.17) следует, что $M_{кр} = P(y_2 - y_1)\cos\theta$. 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

$$\theta^\circ = arctg \frac{P(y_2 - y_1)}{\Delta h}. \qquad (3.26)$$

С учетом (3.1.1) это выражение имеет вид

$$\theta^\circ = 57{,}3 \frac{M_{кр}}{\Delta h}. \qquad (3.27)$$

Горизонтальное продольное перемещение из точки $A_2(x_1; y_2; z_2)$ в точку $B(x_2; y_2; z_2)$ показано на рис. 3.18.

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

$$D_f = \frac{P(x_2 - x_1)}{M_{1M}}. \qquad (3.28)$$

Осадки носом и кормой находятся по формулам

$$d_н = d_{ср} + \left(\frac{L}{2} - x_f\right)\frac{Df}{L}; \qquad (3.29)$$

$$d_к = d_{ср} - \left(\frac{L}{2} + x_f\right)\frac{Df}{L}, \qquad (3.30)$$

где x_f – абсцисса *ЦТ* площади ватерлинии – определяется по гидростатическим кривым.

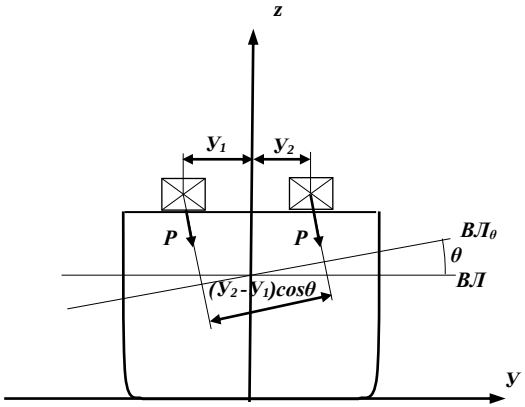


Рис. 3.17. Поперечное перемещение груза

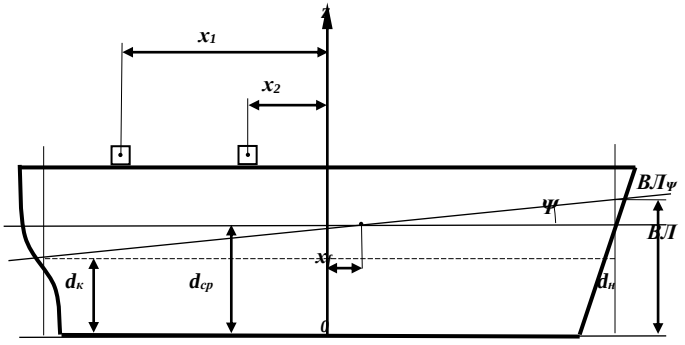


Рис. 3.18. Продольное перемещение груза

3.8.2 Прием/снятие малого груза

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.

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 *ЦМ* принятого груза будет находиться на одной вертикали с *ЦМ* судна. Если крен и дифферент судна при приеме груза не изменяются, то новая ватерлиния судна будет параллельна исходной ватерлинии, а *ЦТ* добавленного объема будет находиться в *ДП* на одной вертикали с *ЦТ* площади ватерлинии.

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

Изменение средней осадки определяется выражением (2.12)

$$\delta d = \frac{P}{\gamma S}\,(\text{м}) = \frac{P}{100q}, \qquad (3.31)$$

а новая средняя осадка $d_{cp1} = d_{cp} + \delta d$.

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

$$h_1 = r_1 - z_{g1} + z_{c1},$$

где $h_1 = h + \delta h$, $r_1 = r + \delta r$, $z_{g1} = z_g + \delta z_g$, $z_{c1} = z_c + \delta z_c$;

$$\delta h = \delta r - \delta z_g + \delta z_c. \qquad (3.32)$$

Таким образом, используя выражение 3.32, найдем изменение *МЦВ* δh через приращения соответствующих параметров.

Используя выражение 3.8, запишем $\delta r = r_1 - r = \frac{I_{x1}}{V_1} - \frac{I_x}{V}$. Поскольку при приеме малого груза площадь и форма ватерлинии не изменяется $I_{x1} = I_x$, а $\nabla_1 = \nabla + v$. 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 γ, получим

$$\delta r = -r\frac{P}{\Delta+P}. \qquad (3.33)$$

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

$$\delta z_g = (z - z_g)\frac{P}{\Delta+P}. \qquad (3.34)$$

Приращение аппликаты *ЦВ* судна δz_c найдем из уравнения статических моментов объема (относительно нового *ЦВ* 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 γ, получим

$$\delta z_c = \left(d + \frac{\delta d}{2} - z_c\right)\frac{P}{(\Delta + P)}. \qquad (3.35)$$

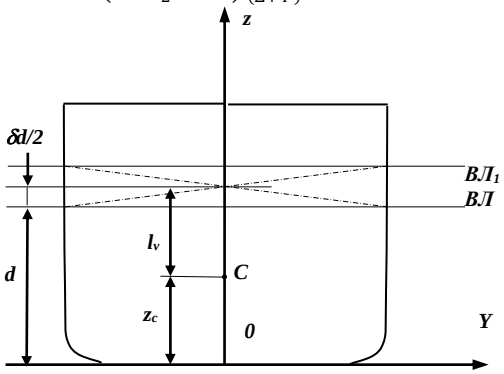


Рис. 3.19. Прием малого груза груза

Подставив в (3.49) выражения (3.33 – 3.35), получим

$$\delta h = (-r + z_g - z + d + \frac{\delta d}{2} - z_c).$$

Поскольку $-r + z_g - z_c = -h$, получим

$$\delta h = (d + \frac{\delta d}{2} - h - z)\frac{P}{\Delta + P}, \qquad (3.36)$$

или с учетом (3.31)

$$\delta h = (d + \frac{P}{200q} - z_c) \qquad (3.37)$$

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 δd меняют знак и выражение (3.36) для приема/снятия груза будет иметь вид

$$\delta h = \frac{\pm P}{(\Delta \pm P)}\left(d \pm \frac{\delta d}{2} - h - z_c\right), \qquad (3.38)$$

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

После определения осадки и остойчивости судна с принятым грузом рассчитываем крен и дифферент по методике, приведенной выше.

3.8.3 Подвешенный груз

Рассмотрим подъем груза *P* из трюма судовым грузовым устройством.

При подрыве груза натяжение шкентеля становится равным весу *P* груза. При подъеме груза при любом его положении по высоте и любом наклонении судна линия действия силы тяжести, приложенной к грузу, проходит через точку подвеса (рис. 3.20), 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 *ЦМ* груза до подъема и точкой подвеса, то влияние на остойчивость подвешенного груза определится выражением

$$\delta h = - l_n \frac{P}{\Delta}. \qquad (3.39)$$

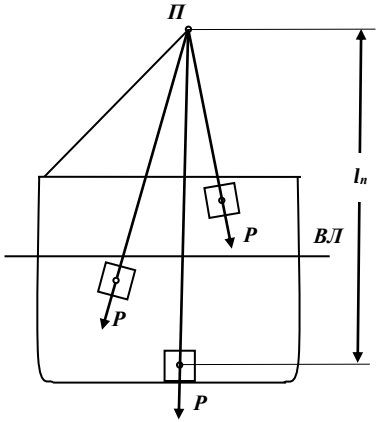


Рис. 3.20. Подвешенный груз

3.8.4 Жидкий груз со свободной поверхностью

В качестве жидкого груза рассматривается только 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 со-

здает дополнительный кренящий момент. Таким образом, жидкость в судовых помещениях, имеющая свободную поверхность, ухудшает остойчивость.

На рис. 3.21 показан отсек с жидкостью со свободной поверхностью. Цифрами *0 – 0* обозначена поверхность и буквой *f - ЦМ* жидкости в отсеке в прямом положении судна, цифрами *1 – 1* и буквой f_1 – то же при крене судна θ. Если обозначить буквой ***a*** точку пересечения линий действия силы тяжести, приложенной к жидкости, то по аналогии с подвешенным грузом остойчивость судна изменится на величину

$$\delta h = -\frac{af\mathrm{P}}{\Delta} = \frac{af\gamma_ж v}{\Delta}, \qquad (3.40)$$

где *P, v* и $\gamma_ж$ – масса, объем и плотность жидкости в отсеке.

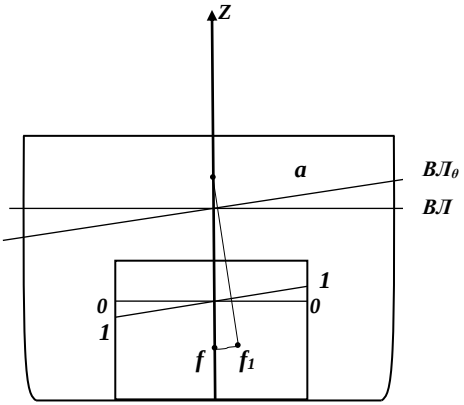


Рис. 3.21. Жидкий груз со свободной поверхностью

Смещение *ЦМ* жидкости в отсеке аналогично перемещению *ЦВ* судна при малых наклонениях. По формуле (3.8) для метацентрического радиуса судна $af = \frac{ix}{v}$, где i_x – момент инерции площади свободной поверхности жидкости в отсеке относительно продольной оси. Подставив *af* в выражение (3.40), получим *формулу поправки на свободную поверхность*

$$\delta h = -\frac{i_x\gamma_ж}{\Delta}. \qquad (3.41)$$

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 [11] 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,

$$\delta m_z = i_x \gamma_ж. \quad (3.42)$$

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, δm_{z0}, δm_{z30} *и* δm_{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 *недействительной 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 *КУВ = 180°*), скорость волны *c* равна скорости судна V_s, а длина волны $\lambda = L$. При указанных значениях этих 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 $B_0Л_0$, а на волне ватерлиния $B_wЛ_w$ 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 уже, 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.

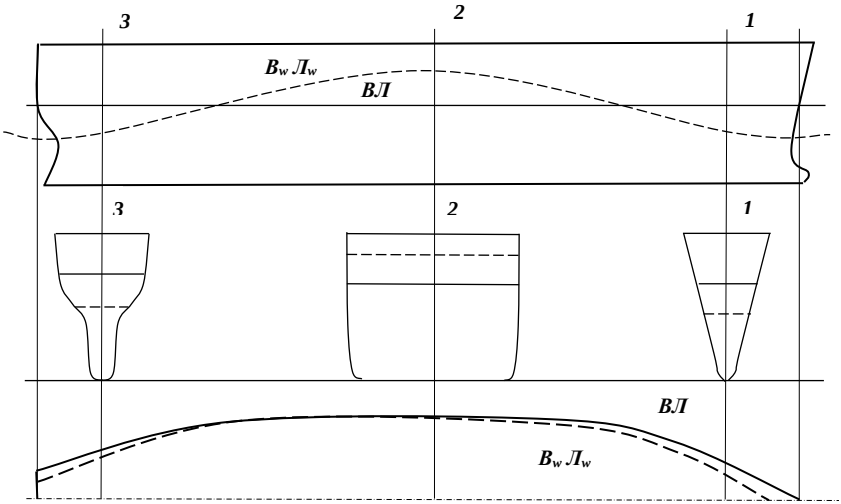


Рис. 3.22. Вершина волны в районе миделя

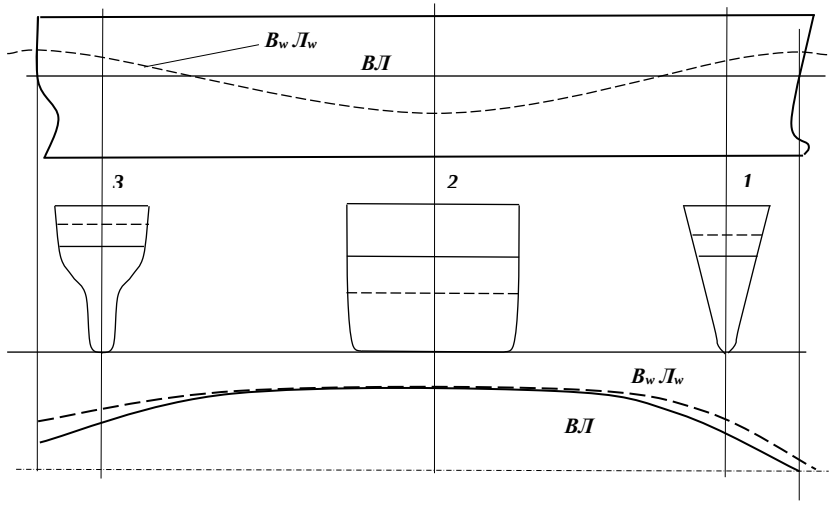


Рис. 3.23. Вершина волны в районе миделя

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 Δ, параметры посадки $d_н$, $d_к$, $\theta = 0$ 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 – $ВЛ_м$; $\delta d_н$, $\delta d_к$ – изменения осадок носом и кормой судна на мели.

Реакция мели определяется выражением

$$R = \gamma S \delta d, \tag{3.43}$$

где γ – плотность забортной воды; S – площадь ватерлинии

$\delta d = \frac{\delta d_н - \delta d_к}{2} - \delta\psi x_f$ – изменение осадки в районе *ЦТ* площади ватерлинии;

$\delta d_н$, $\delta d_к$ - изменения осадок носом и кормой, вызванные посадкой на мель;

$\delta\psi = -\frac{\delta d_н - \delta d_к}{L}$ – изменение угла дифферента.

Изменение начальной поперечной *МЦВ* определяется выражением

$$\delta h = -\frac{R}{\Delta - R}\left(d + \frac{\delta d}{2} - h\right), \tag{3.44}$$

где h – *МЦВ* судна до посадки на мель, $h_м = h + \delta h$ – *МЦВ* 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

$$x_R = x_f + \delta\psi\left(\frac{LM_{1м}}{R} + d_{ср.м}\right); \; y_R = \frac{\delta\theta}{57{,}3^\circ}\left(\frac{\Delta h_м}{R} + d_{ср.м}\right), \tag{3.45}$$

где $M_{1м}$ – момент, дифферентующий на 1м; $d_{ср.м} = \frac{d_{нм} - d_{км}}{2}$.

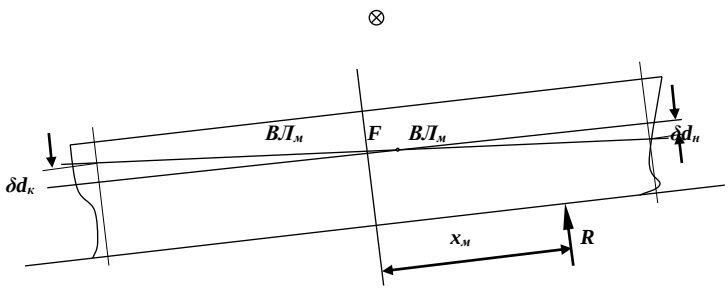


Рис. 3.24. Судно на мели

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

$$d_R = \frac{d_{нм}+d_{км}}{2} + (d_{нм} - d_{км})\frac{x_R - x_f}{L}. \quad (3.46)$$

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 $F_{ЦБ}$, приложенной к *ЦМ* судна, и силой гидродинамического сопротивления дрейфу $F_{ГД}$, приложенной к точке корпуса, отстоящей от ОП на расстояние, примерно равное $d/2$.

Схема наклонения судна на циркуляции показана на рис. 3.25.

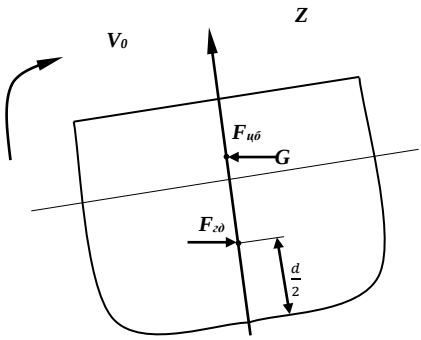


Рис. 3.25. Крен на циркуляции

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

$$M_{кр} = 0{,}233\Delta V_0^2 \frac{z_{g-\frac{d}{2}}}{L}; \quad \theta^\circ = 1{,}4V_0^2 \frac{z_{g-\frac{d}{2}}}{hL}, \quad (3.47)$$

где V_0 - скорость судна на прямом курсе при выходе его на циркуляцию.

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 $\alpha_п$ 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° и менее относятся к сыпучим грузам.*

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

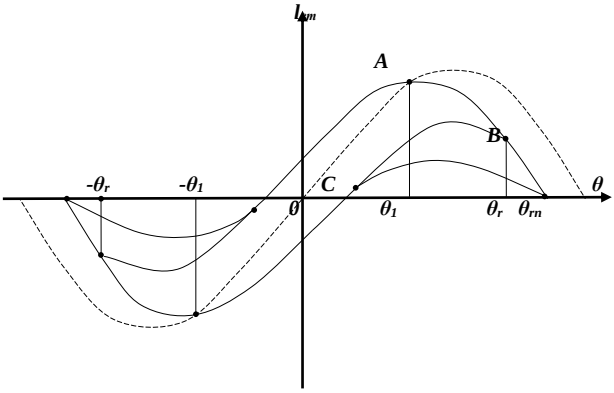


Рис. 3.26. ДСО судна с сыпучим грузом на качке

В качестве показателя сыпучести груза используется *угол естественного откоса* α_n – угол наклона горизонтальной поверхности груза, при котором начинается его пересыпание. 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 θ_r. Если в начальный момент груз не был смещен, то при увеличении крена от 0 до $\theta_1 = \alpha_n$ (т. *A* 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 θ_r (т. *B* 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 ампли-

туды качки и при увеличении амплитуды т. *B* стремится к т. θ_m на оси наклонений.

Перевозка сыпучих грузов регламентируется международными [10] 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 грузового 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. 3.27, пустоты в забоях загруженного трюма заштрихованы.

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

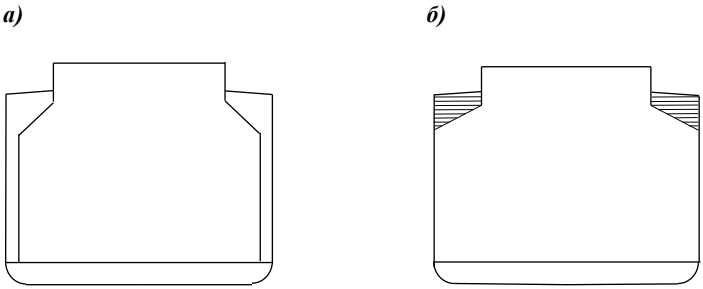


Рис. 3.27. Сечение трюма: а) балкер; б) универсальное сухогрузное судно (заштрихованы пустоты)

Навалочный груз, имеющий угол естественного откоса менее *30°*, считается склонным к сухому смещению и относится к опасным грузам.

В зависимости от величины удельного погрузочного объема навалочный груз, склонный к сухому смещению подразделяется на зерновой *(УПО ≥ 1,0 м³/т)* и не зерновой *(УПО < 1,0 м³/т)*.

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 ≥ 1,0 м³/т):*

- исправленная начальная метацентрическая высота $h \geq 0{,}30$ *м*;

- угол статического крена от условного смещения груза $\theta_a \leq 12°$;
- остаточная площадь *ДСО* $S_{ост} \geq 0{,}075$ *м*рад*;

б) не зерновой груз *(УПО < 1,0 м³/т):*

- исправленная начальная метацентрическая высота $h \geq 0{,}70$ *м*;
- угол статического крена от условного смещения груза $\theta_a \leq 12°$;
- остаточная площадь *ДСО* $S_{ост} \geq 0{,}12$ *м*рад*;

Угол статического крена от условного смещения груза θ_a и остаточная площадь *ДСО* $S_{ост}$ демонстрируются на диаграмме статической остойчивости, представленной на рис. 3.28.

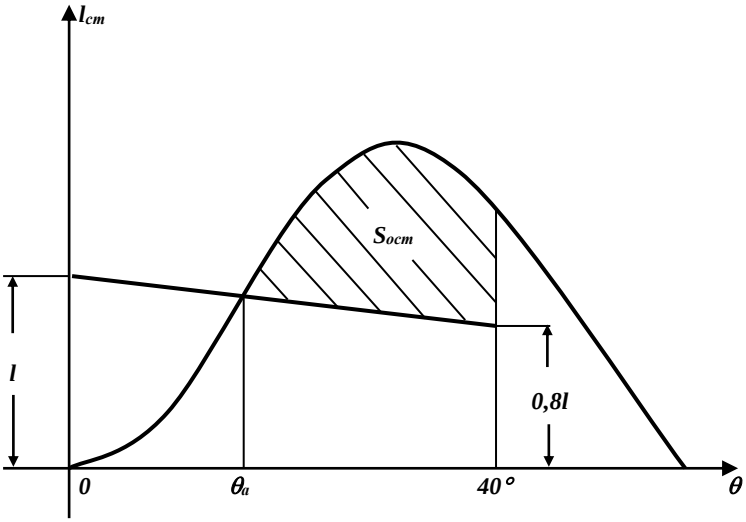


Рис. 3.28. Дополнительные нормируемые параметры *ДСО*

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

$$l = \frac{M_{об} * \mu}{\Delta},$$

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

Кренящий момент, возникающий при поперечном перемещении груза, пропорционален косинусу угла крена (см. 3.8.1 Перемещение груза), следовательно, кривая плеча момента имеет вид косинусоиды, аппроксимируемой наклонной прямой. Для ее проведения на оси $0 - l_{ст}$ *ДСО* судна откладывается

плечо l кренящего момента от условного смещения груза, на вертикали, проходящей через $\theta = 40°$ вверх откладывается $0{,}8l$. Через полученные точки проводится прямая кренящего момента от условного смещения груза. Точка пересечения линии кренящего момента с *ДСО* определяет величину угла статического крена θ_a от условного смещения сыпучего груза. Площадь участка под *ДСО*, ограниченного линией кренящего момента и вертикалью, проходящей через $\theta = 40°$ (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).

3.9 Практическое использование *ДСО*

3.9.1 Смещение груза

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

Используя указанный метод, можно определить максимальная масса сместившегося груза $P_{пр}$, не приводящее к опрокидыванию судна и предельный угол крена $\theta_{пр}$ от смещения груза. Для этого необходимо подобрать косинусоиду, касательную к *ДСО*. Точка касания кривых определяет угол $\theta_{пр}$, а коэффициент косинусоиды - $P_{пр}l_y$.

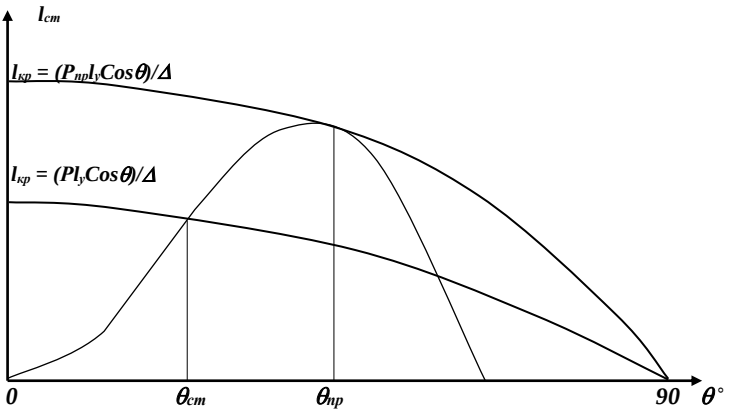


Рис. 3.29. Определение углов крена от смещения груза

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.

3.9.2 Спрямление судна с несимметричной загрузкой

При несимметричной загрузке *ЦМ* судна не будет находиться в *ДП* и, соответственно, судно будет иметь статический крен θ_{cm}. Диаграмма, соответствующая такому случаю загрузки, представлена на рис. 3.30.

Для спрямления судна необходимо создать кренящий момент $M_{кр}$, в представленном случае – на левый борт, равный

$$M_{кр} = \Delta y_g,$$

где Δ - водоизмещение судна; y_g - ордината *ЦТ* судна с несимметричной загрузкой.

На диаграмме спрямление судна выражается переносом оси 0θ в положение $y_g\theta_1$.

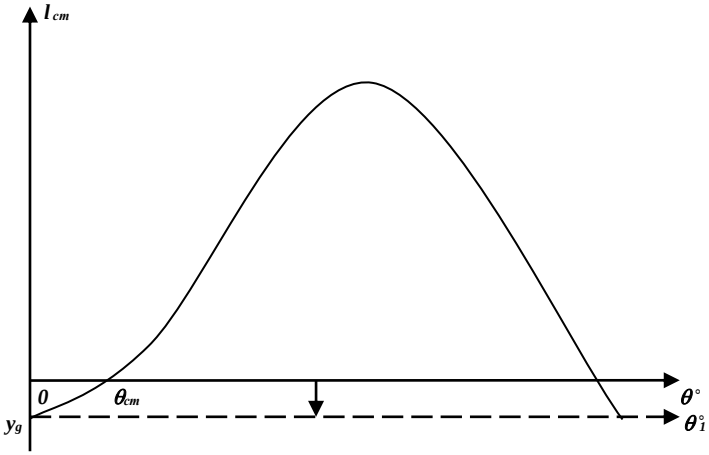


Рис. 3.30. Спрямление судна с несимметричной загрузкой

3.9.3 Спрямление судна с отрицательной начальной *МЦВ*

Если у судна начальная МЦВ отрицательна, то его *ДСО* будет иметь вид, показанный на рис. 3.31, и судно будет имеет крен на правый $\theta_{стПрБ}$ или левый борт $\theta_{стЛБ}$.

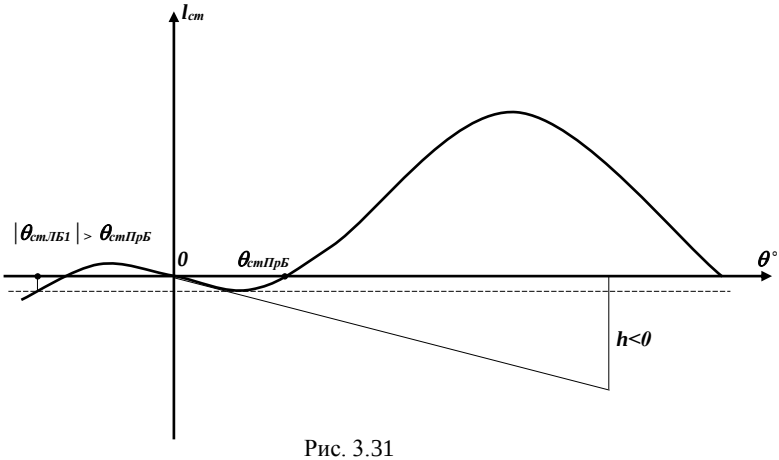


Рис. 3.31

Пусть 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 $\Delta\, l_{кр}$, судна перевалится на левый борт и будет иметь крен $|\theta_{ст\ ЛБ1}| > |\theta_{ст\ ЛБ}|$, 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

$$h = C/\tau_c^2, \qquad (3.48)$$

где C – эмпирический коэффициент, τ_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 (3.48) может быть представлено в виде

$$h = (aB/\tau_c)^2, \qquad (3.49)$$

где $a = 0{,}373 + 0{,}023B/d - 0{,}00043L$.

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 (например, на зыби) этот метод неприменим, поскольку период качки равен периоду встречи судна с волной.

2) Кренование судна.

МЦВ 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 θ°, то *МЦВ* определится из выражения

$$h = 57{,}3^\circ Pl/(\Delta\theta^\circ). \qquad (3.50)$$

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 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») [6].

4.1 Нормирование аварийной посадки и 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° до спрямления и не более 12° после;

3) протяженность части *ДСО* 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

Методика расчета непотопляемости определяется категорией затопленного отсека.

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).

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).

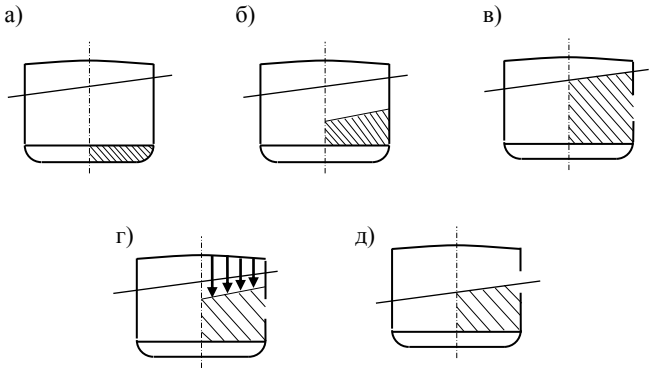


Рис. 4.1. Категории затопленных отсеков

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 отсек определяется при помощи коэффициента проницаемости χ, равного отношению объема фактически влившейся в отсек воды v к теоретическому объему $v_т$ затопленной части отсека $\chi = v/v_т$.

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 χ_{mp} определяется выражением

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

где χ_0 – коэффициент проницаемости пустого помещения (0,98 для сухогрузного трюма или 0,93 – для рефрижераторного);

p, μ - масса и удельный погрузочный объем груза в помещении;

χ_{cp} – коэффициент проницаемости груза;

V – объем помещения.

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

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

где χ_i, V_i - коэффициент проницаемости и объем i – го помещения, составляющего отсек, i – число помещений в отсеке.

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 - χ, 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 θ и изменение дифферента δD_f определяются выражениями

$$v = \chi V;\ \theta = arctg\left[\frac{vy_v}{h(\nabla + v)}\right];\ \delta D_f = \frac{\nabla L(x_v - x_f)}{H(\nabla + v)}, \quad (4.3)$$

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

Изменение метацентрических высот

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

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

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 водоизмещение судна при затопления отсека не изменяется, а из водоизмещающего объема корпуса исключается затопленный отсек, 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

$$v = \chi V, \qquad (4.5)$$

где V - затопленный по исходную ватерлинию объем отсека; χ - коэффициент проницаемости отсека.

Обозначим S_0, x_{f0} - площадь исходной ватерлинии и абсциссу ее *ЦТ*; $s = \chi\, l\, b$ – потерянная площадь ватерлинии; l, b - длина и ширина затопленного отсека на уровне исходной ватерлинии; x_s, y_s - координаты *ЦТ* потерянной площади ватерлинии; δI_x, δI_{yf} – потерянные моменты инерции.

Средняя осадка судна при затоплении отсека увеличится на величину

$$\delta d = \frac{v}{S_0 - s}. \qquad (4.6)$$

Координаты *ЦТ* поврежденной ватерлинии

$$x_f = x_{f0} - (x_s - x_{f0}) \frac{s}{S_0 - s};\ y_f = y_s \frac{s}{S_0 - s}. \qquad (4.7)$$

Потерянные моменты инерции

$$\delta I_x = i_x + s y_s^2 + (S_0 - s) y_f^2; \qquad (4.8)$$

$$\delta I_{yf} = i_y + s(x_s - x_{f0})^2 + (S_0 - s)(x_f - x_{f0})^2,$$

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

$$\delta h = \frac{v}{\nabla}\left(d + \frac{\delta d}{2} - h_0 - z_v - \frac{\delta I_x}{v}\right); \qquad (4.9)$$

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

Метацентрические высоты $h = h_0 + \delta h$, $H = H_0 + \delta H$.

Угол крена и изменение дифферента

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

Приведенные методы позволяют получить достоверные значения параметров аварийной посадки и остойчивости, однако значения рассчитанной метацентрической высоты будут отличаться.

Соотношения метацентрических высот, рассчитанных разными методами можно определить, сравнив значения коэффициентов остойчивости

$$\Delta_\Delta h_\Delta = \Delta_p h_p,$$

где методу приема груза соответствует индекс p, методу постоянного водоизмещения – индекс Δ.

Поскольку $\Delta_p > \Delta_\Delta$, то $h_\Delta > h_p$, следовательно ***методу постоянного водоизмещения соответствует большее значение метацентрической высоты***.

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 во-вторых, – подготовку экипажа к борьбе с водой.

Борьба за живучесть судна при аварийном затоплении судовых помещений должна вестись надлежайшим 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 *МЦВ* сохраняется положительной и судно плавает с креном $\theta_{ст}$. 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 $\theta_{стПр}$ на правый борт или $\theta_{стЛ}$ 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 меро-

приятиями, 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 $ФБ_{100}/ФБ_{50}$, в которой в числителе указывается значение фактора балластировки при полном заполнении цистерны, а в знаменателе – при пятидесяти процентном заполнении, т.е. при таком заполнении, когда считается, что поправка на свободную поверхность жидкости в цистерне максимальна.

Для расчета фактора балластировки используются выражения

$$ФБ_{100} = (z_{gcp} - z)w; \qquad (4.11)$$
$$ФБ_{50} = (z_{gcp} - z)w/2 - i_x,$$

где z_{gcp} – средне значение аппликаты *ЦМ* 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

$$\delta h = ФБ\gamma_ж/\Delta, \qquad (4.12)$$

где $\gamma_ж$ – плотность жидкости, используемый для балластировки цистерны.

Цистерны с отрицательным значением $ФБ_{50}$ 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 деле-

нием 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
Δ_0	-	Водоизмещение судна порожнем
γ	γ	Плотность
A_v	A_v	Площадь парусности
$A_к$	-	Площадь килей
$a_{расч}$	-	Расчетное ускорение (в долях g)
B	B	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 высота (с поправкой на свободную поверхность)
h_0	GM_0	Начальная метацентрическая высота без поправки на свободную поверхность
H	-	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_{max}	GZ_m	Максимальное плечо диаграммы статической остойчивости с поправкой на свободные поверхности
l_d	l	Плечо динамической остойчивости с поправкой на свободные поверхности
l_F	-	Плечо формы относительно центра величины
l_K	-	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
θ_f	θ_f	Угол заливания
θ_v	θ_v	Угол заката диаграммы статической остойчивости

1	*2*	*3*
θ_m	θ_m	Угол, соответствующий максимуму диаграммы статической остойчивости
θ_{1r}	θ_r	Амплитуда качки судна с круглой скулой
θ_{2r}	θ_r	Амплитуда качки судна с килями
M_c	M_c	Опрокидывающий момент
M_v	M_v	Кренящий момент от шквала
M_{h1}	M_h	Кренящий момент от скопления пассажиров
M_{h2}	M_h	Кренящий момент от циркуляции
δm_h	-	Поправка на свободную поверхность
m	-	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
y	-	Ордината центра тяжести груза от ДП
y_g	-	Бортовое смещение центра тяжести судна от ДП
Y	-	Множитель (функция) для определения амплитуды качки
z	-	Плечо парусности
z_g	KG	Возвышение центра тяжести над основной плоскостью
X_c	X_B	Абсцисса центра величины
X_g	X_G	Абсцисса центра тяжести

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. Правила классификации и постройки морских судов. Российский Морской Регистр Судоходства.- С.Пб., 2016.- 493 с.

7. Самсонов С.В. Основы теории судна: Уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2002.- 98 с.

8. Самсонов С.В. Основы теории и судовые расчеты элементов остойчивости, плавучести и непотопляемости: Уч. Пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2001.- 67 с.

9. Самсонов С.В. Остойчивость судна: Уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2008.- 79 с.

10. 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.

11. Т/х «Олюторский залив». Информация об остойчивости судна. - Владивосток.: ПКБ АО «ДВМП», 1997. – 98с.