

Белорусский национальный технический университет

Факультет энергетического строительства
Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой
«Кораблестроение и гидравлика»

_____ Качанов И.В.

___ _____ 20__ г.

СОГЛАСОВАНО

И.о. декана факультета
энергетического строительства

_____ Кобяк О.Н.

___ _____ 20__ г.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

Теория корабля

Раздел 1, часть 2

для специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая
эксплуатация водного транспорта»

Составитель: д.т.н., проф. Качанов И.В.

Рассмотрено и утверждено

на заседании совета факультета энергетического строительства

___ __ ___ 201 г.

протокол N _

Перечень материалов

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) содержит теоретические сведения в области теории корабля.

Теоретический раздел ЭУМК содержит материалы для теоретического изучения учебной дисциплины в объеме, установленном учебным планом по специальности, и будет представлен конспектом лекций.

В данном разделе приводится краткое изложение содержания учебного материала целого ряда тем раздела «Остойчивость».

Пояснительная записка

Целью ЭУМК по дисциплине «Теория корабля» является подготовка студентов к проектно-конструкторской деятельности путем освоения ими реальных методов проектирования судов и кораблей.

Дисциплина ТК является одной из основных профилирующих учебных дисциплин, обеспечивающих подготовку инженеров для воднотранспортного комплекса Республики Беларусь. Изучение этой дисциплины позволяет сформировать знания, умения, навыки, необходимые для выполнения работ по проектированию, ремонту и модернизации судов, кораблей, функционального оборудования, общесудовых устройств и систем.

В качестве рекомендации по организации работы с ЭУМК следует отметить следующее.

Изучение дисциплины базируется на знаниях, полученных при освоении дисциплин гуманитарного, социально-экономического, математического, естественнонаучного и общетехнического циклов, а также таких специальных дисциплин, как «Проектирование судов», «Конструкция корпуса судна», «Технология судостроения», «Строительная механика и прочность корабля», «Судовые энергоустановки» и др. Поэтому, перед изучением указанных специальных дисциплин следует ещё раз повторить материал, изложенный в ЭУМК.

В части реализации нормативных документов, касающихся создания ЭУМК, в приложениях к данному изданию представлены экзаменационные вопросы по дисциплине «Теория корабля» (Приложение А) и учебная программа дисциплины «Теория корабля» (Приложение Б).

Введение

Теория корабля (судна) – наука о его мореходных качествах (МК) – плавучести, остойчивости, непотопляемости, ходкости, умеренности качки и управляемости.

Изучение ТК производится в зависимости от главных размерений корабля, формы обводов корпуса, распределения грузов и внешних нагрузок.

Корабль в ТК рассматривается как твердое недеформируемое тело, поэтому изучение законов его движения опирается на законы теоретической механики. Но, поскольку, движение корабля происходит в жидкости и воздушной среде, то наряду с законами теоретической механики в ТК широко используются законы движения жидкостей и газов.

Рассмотрим основные определения мореходных качеств.

Плавучесть – способность судна плавать в заданном положении относительно поверхности воды.

Остойчивость – способность судна (корабля), выведенного из равновесия, возвращаться в исходное положение после прекращения действия внешних сил.

Непотопляемость – способность судна оставаться на плаву и в ограниченной степени сохранять МК после затопления одного или группы отсеков. Непотопляемость определяется плавучестью и остойчивостью поврежденного судна.

Ходкость – способность судна двигаться с заданной скоростью при наименьшей возможной мощности главной механической установки.

Качка – это колебательное движение корабля при перемещении его или стоянке на поверхности или над поверхностью воды. Качка исключительно вредное явление. В понятие умеренность качки входят малость и плавность наклонений.

Управляемость – способность корабля удерживать заданное направление движения или изменять его в соответствии действиями судоводителя.

Плавучесть, остойчивость и непотопляемость входят в раздел, называемый статикой корабля; *ходкость, качка и управляемость* – в раздел, именуемый динамикой корабля.

Учение о плавучести, остойчивости и непотопляемости основано на законе Архимеда: «На всякое тело, погруженное в жидкость, действует со стороны этой жидкости выталкивающая (поддерживающая) сила, равная весу (силе тяжести) вытесненной телом жидкости, направленная вверх и проходящая через центр тяжести вытесненного объема». Поддерживающую (выталкивающую)

силу, действующую на погруженную часть корабля называют Архимедовой силой.

Закон Архимеда был открыт в III в. до н.э., но практическое применение его началось с XVII в., когда в 1666 г. английский инженер А. Дин предсказал осадку военного корабля «Рупперт», что дало возможность до его спуска прорезать в бортах отверстия для установки пушек. С тех пор расчеты по статике корабля стали предшествовать его постройке.

В 18 в. относится начало развития ТК, как самостоятельной науки. В 1746 г. французский ученый Бугер издал первые труды по теории корабля. В 1749 г. член РАН Л. Эйлер издал фундаментальный труд «Корабельная наука», основанный на использовании методов математического анализа для решения задач по теории корабля.

В первой половине 19 в. были разработаны методы вычисления элементов плавучести и остойчивости корабля и установлен практический способ определения его ЦТ.

Основоположником современной теории корабля является А.Н. Крылов (1863-1945), который расширил и углубил знания по всем разделам этой науки. Российские ученые А.Н. Крылов и С.О. Макаров являются авторами методов расчета остойчивости и инициаторами её нормирования. Им же принадлежит авторство в разработке теории непотопляемости. Важные работы этой области выполнили И.Г. Бубнов, В.Г. Власов, В.В. Семенов-Тяншанский. Большое значение для развития теории ходкости имели труды Д.И. Менделеева, В.И. Жуковского, В.Л. Поздюнина, Г.Е. Павленко и др.

Перед теорией корабля в н.в. стоят следующие основные проблемы:

- дальнейшее развитие теории остойчивости и непотопляемости и на этой базе разработка практических мероприятий, направленных на увеличение безопасности плавания;
- увеличение скоростей хода судов за счет улучшения их обводов, управления пограничным слоем и создания более современных типов судовых движителей;
- дальнейшее развитие теории качки и создание эффективных способов её успокоения;
- дальнейшее развитие теории поворотливости и устойчивости судна на курсе и разработка мероприятий по улучшению управляемости судов.

Глава 2 Остойчивость

2.1 Общее понятие остойчивости

Остойчивость – способность судна, выведенного из положения равновесия внешним воздействием, воздействием, возвращаться в положение равновесия после прекращения этого воздействия.

Судно, обладающее такой способностью называется **остойчивым**, а не обладающее – **неостойчивым**.

Термин остойчивость следует отличать от понятия устойчивость, применяющегося в теоретической механике. В теоретической механике понятие устойчивость (способность системы, тела возвращаться в исходное равновесное состояние после прекращения силового воздействия) используется только для б.м. перемещений. В тоже время в ТК понятие остойчивость используется и для больших перемещений, т.е. более широко.

Остойчивость имеет меру, т.е. может быть большой и малой, а устойчивость характеризует только качественное состояние.

При изучении остойчивости будем рассматривать равнообъемные наклонения корабля и ограничимся наклонениями около главных центральных осей, понимая под осью наклонения линию пересечения действующих ватерлиний. Малые наклонения около произвольных осей могут рассматриваться как результат наложения наклонений около главных осей.

Плоскость, перпендикулярную к оси наклонения, называют **плоскостью наклонения**. Наклонение корабля в поперечной (МШ) плоскости называют **креном** (характеризуется углом крена θ), а в продольной плоскости – **дифферентом** (характеризуется углом дифферента ψ).

Различают начальную остойчивость, т.е. остойчивость при б.м. наклонениях и остойчивость при больших наклонениях.

Выводы начальной остойчивости можно распространить на случай наклонения кораблей для конечных, но «малых» углов, понимая под этим термином углы, при которых не оголяется днище (скула не выходит, а верхняя кромка палубы не входит в воду). На практике это соответствует угла до 15^0 крена и до 5^0 дифферента; $(\theta \leq 15^0)$ – малые углы крена, $(\psi \leq 5^0)$ – малые углы дифферента. Что касается остойчивости при больших углах наклонения, то здесь в основном рассматриваются только поперечные наклонения, т.е. крен, т.к. изменение дифферента на практике ограничивается лишь малыми углами.

В зависимости от характера действия внешних сил (моментов), вызывающих наклонения корабля, различают статическую и динамическую остойчивость. Если момент, вызывающий наклонение, постоянный или изменяется во времени крайне медленно, то его действие рассматривается как статическое, в случае, когда момент вызывает наклонение корабля с существенной угловой скоростью (рывок буксирного троса, шквал ветра, и т.д.), то его действие рассматривают как динамическое.

Наклонение корабля может происходить вокруг произвольной оси, лежащей в плоскости ватерлинии и проходящей через её ЦТ. Предельными с точки зрения значений кинематических параметров и характеристик остойчивости являются поперечное наклонение вокруг продольной оси OX и продольное – вокруг поперечной оси OY . Остойчивость, характерная для этих двух случаев наклонения, называется поперечной и продольной соответственно. При вращениях относительно осей, параллельных OX (крен) и OY (дифферент) судно может быть остойчивым или неостойчивым, что зависит от формы корпуса, распределение весовой нагрузки, величины отклонения и т.д. Предметом этого раздела ТК является изучение в основном этих двух видов остойчивости. Противодействие судна наклонениям относительно осей, параллельных OX и OY , получается за счет возникновения на корпусе со стороны воды восстанавливающего момента. Для неостойчивого судна восстанавливающий момент может быть равным нулю и даже отрицательным.

При рассмотрении наклонений корабля условились сохранять первоначальный чертеж корабля и на нем наносить дополнительно действующую ватерлинию, так как достаточно рассматривать относительное положение корабля, а не истинное его положение относительно уровня воды. В соответствии с этим на рисунке 2.1, а приведены поперечное сечение, где ватерлиния $ВЛ_1$ соответствует крену корабля на угол θ на правый борт. На продольном разрезе ватерлиния $ВЛ_1$ соответствует дифференту корабля на угол ψ (на нос, рис. 2.1, б). В соответствии с этим вертикальные силы будут изображаться векторами, перпендикулярными к следом действующих ватерлиний.

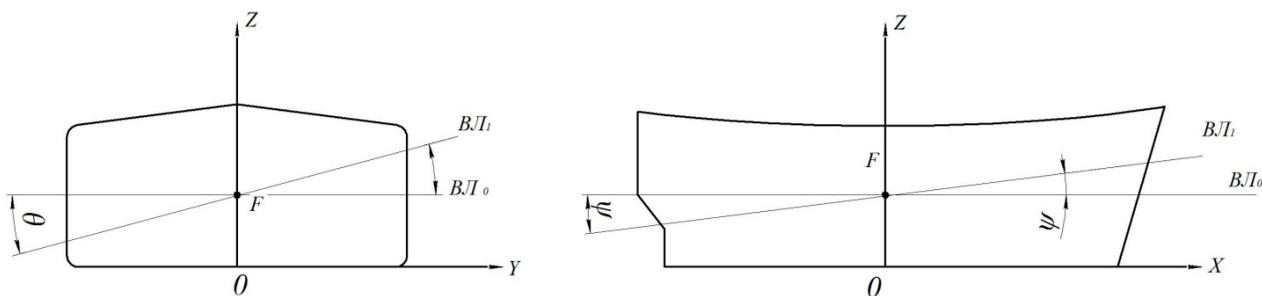


Рис. 2.1. Схемы, поясняющие крен корпуса на правый борт (а) и дифферент на нос (б)

2.2 Теорема Эйлера для равнообъемных ватерлиний

Наклонение корабля называется равнообъемным, если водоизмещение остаётся постоянным по величине и изменяется, лишь по форме. **Ватерлинии**, соответствующие этому наклонению, **называются равнообъемными**. Они характеризуются свойством, которое в ТК называется как «Теорема Эйлера», которую формулируют следующим образом:

«Две равнообъемные ватерлинии при бесконечно малом наклонении пересекаются по прямой, проходящей через центры тяжести их площадей».

Для доказательства этой теоремы предположим, что корабль накренился на бесконечно малый угол $d\theta$ и это наклонение является равнообъемным (рис. 2.2). В этом случае входящий dV_{k1} и выходящий dV_{k2} клиновые объемы будут одинаковыми, т.е.

$$dV_{k1} = dV_{k2}. \quad (2.1)$$

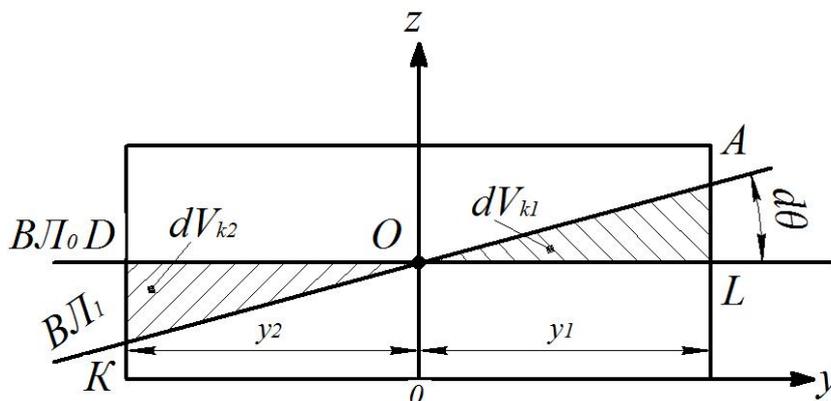


Рис. 2.2. Равнообъемные наклонения корпуса

Для определения объемов клиньев dV_{k1} и dV_{k2} предварительно найдем площади треугольников $S_{\Delta AOL}$ и $S_{\Delta DOK}$, т.е.

$$S_{\Delta AOL} = \frac{1}{2} y_1^2 \operatorname{tg} d\theta.$$

Принимая, что для малых наклонов $\operatorname{tg} d\theta = d\theta \Rightarrow S_{\Delta AOL} = \frac{1}{2} y_1^2 d\theta$.

Аналогично для треугольника ODK $S_{\Delta ODK} = \frac{1}{2} y_2^2 \operatorname{tg} d\theta$, или по аналогии с предыдущим случаем $S_{\Delta ODK} = \frac{1}{2} y_2^2 d\theta$. Умножая площади треугольников AOL и ODK на элемент длины dx найдем элементарные клиновые объемы δdV_{k1} и δdV_{k2} , т.е.

$$\left. \begin{aligned} \delta dV_{k1} &= \frac{1}{2} y_1^2 d\theta dx \\ \delta dV_{k2} &= \frac{1}{2} y_2^2 d\theta dx \end{aligned} \right\}. \quad (2.2)$$

Интегрируя уравнение (2.2) в пределах изменения длины от $-L/2$ до $+L/2$, определим искомые клиновые объемы

$$\left. \begin{aligned} dV_{k1} &= \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{+L/2} y_1^2 d\theta dx \\ dV_{k2} &= \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{+L/2} y_2^2 d\theta dx \end{aligned} \right\}. \quad (2.3)$$

Проводя подстановку (2.3) в (2.1) получим

$$\frac{d\theta}{2} \int_{-y_2}^{+y_2} y_1^2 dx = \frac{d\theta}{2} \int_{-y_2}^{+y_2} y_2^2 dx. \quad (2.4)$$

Уравнение (2.4) после сокращения на угол крена $d\theta$ принимает вид

$$\frac{1}{2} \int_{-L/2}^{+L/2} y_1^2 dx = \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{+L/2} y_2^2 dx. \quad (2.5)$$

Обе части этого уравнения выражают соответствующие статические моменты вошедшей и вышедшей частей площади ватерлинии (ВЛ_о) относительно оси (линии) пересечения равнообъемных ватерлиний ВЛ_о и ВЛ₁. Отсюда можно прийти к выводу, что статические моменты двух частей площади ватерлинии ВЛ_о относительно линии пересечения двух равнообъемных ватерлиний ВЛ_о и ВЛ₁ равны между собой. Отсюда следует, что линия пересечения двух равнообъемных ватерлиний ВЛ_о и ВЛ₁ проходит через центр тяжести ватерлинии ВЛ_о.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{+L/2} y_1^2 d\theta dx = Mx_{\text{п}} = \frac{1}{2} \int_{S_{\text{п}}} y dS \\ \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{+L/2} y_2^2 d\theta dx = Mx_{\text{л}} = \frac{1}{2} \int_{S_{\text{л}}} y dS \end{aligned} \right\}, \quad (2.6)$$

где $Mx_{\text{п}}$ и $Mx_{\text{л}}$ – статические моменты правой и левой частей площади ватерлинии ВЛ_о относительно оси ОХ. Тогда, учитывая (2.5), уравнение (2.6) представим в виде

$$Mx_{\text{п}} = Mx_{\text{л}} = M_S \left(M_S = \frac{1}{2} \int_S y dS \right) = 0,$$

где M_S – статический момент (результатирующий) площади ватерлинии ВЛ_о, относительно линии пересечения равнообъемных ватерлиний ВЛ_о и ВЛ₁.

Если момент площади ватерлиний ВЛ_о $M_S = 0$, при условии, что площадь $S = S_1 + S_2$, то ось, относительно которой рассчитывается статический момент площади, проходит через центр тяжести площади ватерлинии ВЛ_о.

Воспользовавшись данными рис. 2.2 нетрудно доказать, что линия пересечения ватерлиний ВЛ_о и ВЛ₁ проходит также через центр тяжести площади ватерлинии ВЛ₁.

2.3 Перемещение ЦВ при малых равнообъемных наклонениях

При равнообъемном наклонении изменяется лишь форма погруженного объема, поскольку объемное водоизмещение сохраняется постоянным.

Изменение формы погруженного объема при равнообъемном наклонении судна на бесконечно малый угол крена $d\theta$ можно представить как перемещение клинового объема dV_1 с сечением BOB_1 на место клинового объема dV_2 с сечением LOL_1 .

Будем считать, что центр тяжести объема dV_1 находится в точке « g_1 », а объема dV_2 – в точке « g_2 ».

Расстояние между центрами тяжести указанных объемов g_1g_2 называется плечом перемещения. При малом равнообъемном наклонении объемы dV_1 и dV_2 равны между собой, т.е. $dV_1 = dV_2 = dV$.

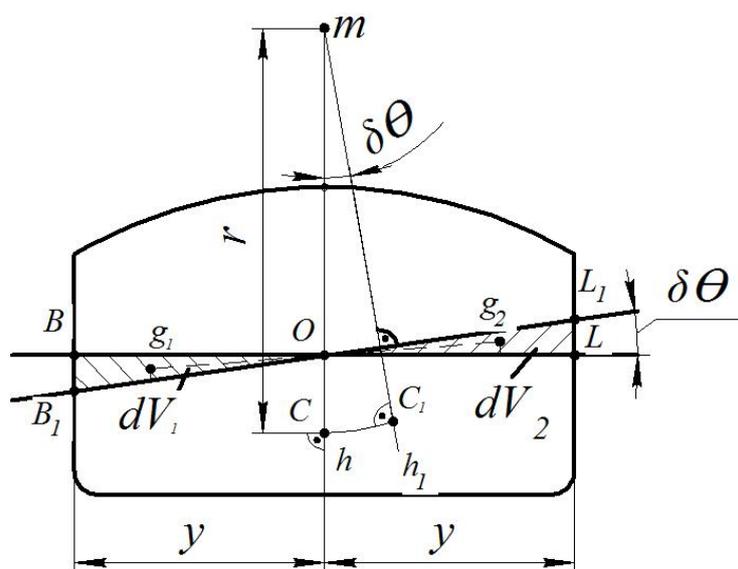


Рис. 2.3. Схема для расчёта перемещения центра величины при равнообъемном наклонении судна на угол $d\theta$

Произведение из плеча перемещения g_1g_2 на объем dV называется моментом перемещения $M_{пер}$ объема dV ($M_{пер} = \overline{g_1g_2} dV$).

В нашем случае объем dV равняется объему клиньев водоизмещения ($dV = DV_1 = DV_2$).

Так как часть объема, создающего силу плавучести F_{AP} перемещается на отрезке $\overline{g_1g_2}$, то параллельно ему и в ту же сторону будет перемещаться ЦВ погруженного объема из точки С в новое положение C_1 .

Этот вывод следует из теоремы механики о том, что «если одно из тел, входящих в систему перемещается в каком либо направлении, то центр тяжести всей системы перемещается в том же направлении, параллельно перемещению тела». При этом указанные перемещения обратно пропорциональны весам (массам) объемам тела и системы, т.е. $\frac{CC_1}{g_1g_2} = \frac{dV}{V}$.

Таким образом, можно утверждать, что плечо перемещения центра величины – участок дуги $\overline{CC_1}$ можно определить из соотношения

$$\overline{g_1g_2}dV = \overline{CC_1} \cdot V, \quad (2.7)$$

где левая часть (2.7) $(\overline{g_1g_2}dV)$ представляет собой момент от перемещения объема dV на расстояние $\overline{g_1g_2}$, а правая – момент объемного водоизмещения корабля $(\overline{CC_1} \cdot V)$.

Следовательно, при наклонении корабля перемещение ЦВ описывается следующей системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \overline{CC_1} \parallel \overline{g_1g_2} \\ \overline{CC_1} = \overline{g_1g_2} \frac{dV}{V} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Из уравнений системы (2.8) следует, что $\overline{CC_1}$ – плечо перемещения ЦВ, при наклонении корабля непосредственно зависит от перемещения клиньев водоизмещения $\overline{g_1g_2}$, параллельно ему и пропорционально отношению объемов $\frac{dV}{V}$.

Рассматривая клиновой элемент объема δdV (рис. 2.4) длиной dx , можно определить, что его объем будет равен произведению площади треугольника $ВОВ_1$ на длину dx , т.е.

$$\delta dV = \frac{1}{2} y^2 \operatorname{tg} \delta \theta dx. \quad (2.9)$$

Принимая во внимание, что при малых углах наклона $\operatorname{tg} \delta \theta = \delta \theta$ (угол $\delta \theta$ измеряется в радианах), тогда уравнение (2.9) можно представить в таком виде

$$\delta dV = \frac{1}{2} y^2 \delta \theta dx. \quad (2.10)$$

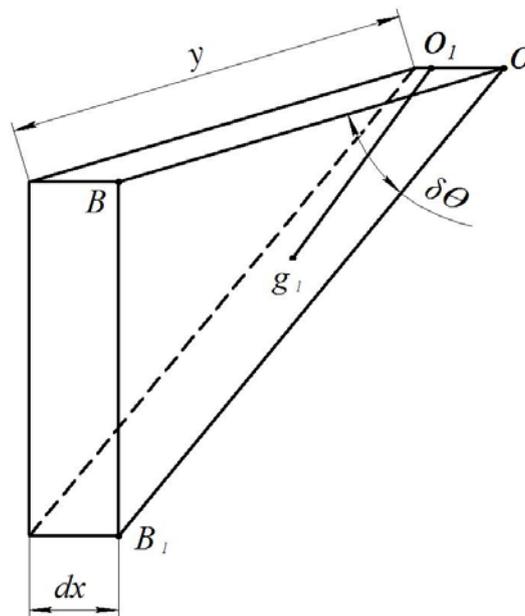


Рис. 2.4. Схема для вычисления перемещения центра величины подводного объема при малых равнообъемных наклонах

Для рассматриваемых треугольников BOB_1 и LOL_1 (см. рис. 2.3) точки g_1 и g_2 , как центры тяжести этих треугольников, расположены на медианах на расстоянии $\frac{2}{3}$ их длины y от соответствующих вершин. Так как угол крена $\delta \theta$ является бесконечно малым, а площади треугольников BOB_1 и LOL_1 равны между собой, то можно принять, что плечо перемещения $\overline{g_1g_2}$ будет определяться уравнением

$$\overline{g_1g_2} = 2 \cdot \frac{2}{3} y = \frac{4}{3} y. \quad (2.11)$$

Перемножая (2.10) и (2.11) и интегрируя полученный результат по длине судна, получим

$$\overline{g_1 g_2} dV = \frac{2}{3} \int_{-L/2}^{+L/2} y^3 dx \delta\theta \quad \text{или}$$

$$\overline{g_1 g_2} dV = \frac{2}{3} \delta\theta \int_{-L/2}^{+L/2} y^3 dx. \quad (2.12)$$

В уравнении (2.12) выражение $\frac{2}{3} \int_{-L/2}^{+L/2} y^3 dx$ представляет собой центральный момент инерции J_x площади ватерлинии относительно центральной продольной оси ОХ, проходящей через центр тяжести площади ватерлинии ВЛ.

В этом случае уравнение (2.12) можно представить таким образом

$$\overline{g_1 g_2} dV = \delta\theta J_x \quad (2.13)$$

или учитывая (2.8)

$$\overline{CC_1} = \frac{J_x}{V} \delta\theta. \quad (2.14)$$

Для бесконечно малого угла крена $\delta\theta$ участок дуги $\overline{CC_1}$ можно заменить отрезком прямой ($CC_1 = \overline{CC_1}$), величину которого определяют из треугольника mCC_1 (см. рис. 2.3).

$$\overline{CC_1} = rtg\delta\theta = r\delta\theta, \quad (2.15)$$

где r – малый метацентрический радиус (поперечный метацентрический радиус).

Точка « m » в ТК называется поперечным метацентром.

Из (2.14) видно, что приращение (перемещение) ЦВ $\overline{CC_1}$ происходит с нарастанием угла наклона в данном случае угла крена θ .

Одновременно с этим приращение ЦВ пропорционально отношению момента инерции площади относительно главных центральных осей к объемному водоизмещению корабля

$$\overline{CC_1} = \frac{\delta\theta J_x}{V}. \quad (2.16)$$

2.4 Метacentры и метacentрические радиусы

Как видно из рассмотренного рисунка 2.5 при крене судна центр величины смещается в сторону наклона, описывая кривую $\cup CC_1$, которая называется кривой центров величины.

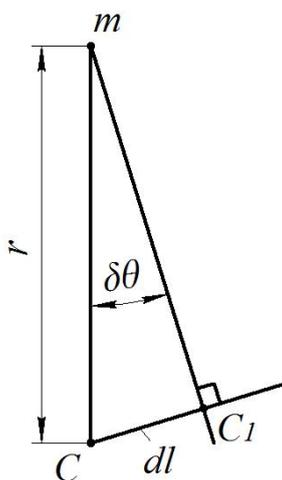


Рис. 2.5. Схема к вычислению перемещения ЦВ при поперечном наклонении судна

Центр кривизны этой кривой называется поперечным метacentром (точка « m »).

Указанная точка получается как точка пересечения двух линий действия сил поддержания при малых углах крена $\delta\theta$.

Различают поперечный метacentр m при крене и продольный метacentр M при дифференте.

Расстояние от центра величины (кривая CC_1) до поперечного или продольного метacentров называется соответственно поперечным r или продольным R метacentрическим радиусами.

Из рисунка 2.5 видно, что поперечный метацентрический радиус r – это радиус кривизны кривой CC_1 . Обозначив длину дуги $\overset{\cup}{CC_1}$ через dl , можно записать $dl = r\delta\theta$.

В виду б.м. размеров dl , можно считать, что

$$dl = \overset{\cup}{CC_1} = \overline{CC_1} = r\delta\theta.$$

Тогда, учитывая, что

$$CC_1 = \delta\theta \frac{J_x}{V},$$

получим

$$r\delta\theta = \delta\theta \frac{J_x}{V}$$

или

$$r = \frac{J_x}{V}, \quad (2.17)$$

где r – малый (поперечный) метацентрический радиус; J_x – момент инерции площади ВЛ относительно продольной главной центральной оси ОХ; V – объемное водоизмещение судна.

Так как J_x и V – сугубо положительные числа, то и r – число всегда положительное.

Рассуждая аналогично, получим радиус R кривизны траектории (кривой CC_1 при продольных наклонениях (рис. 2.6).

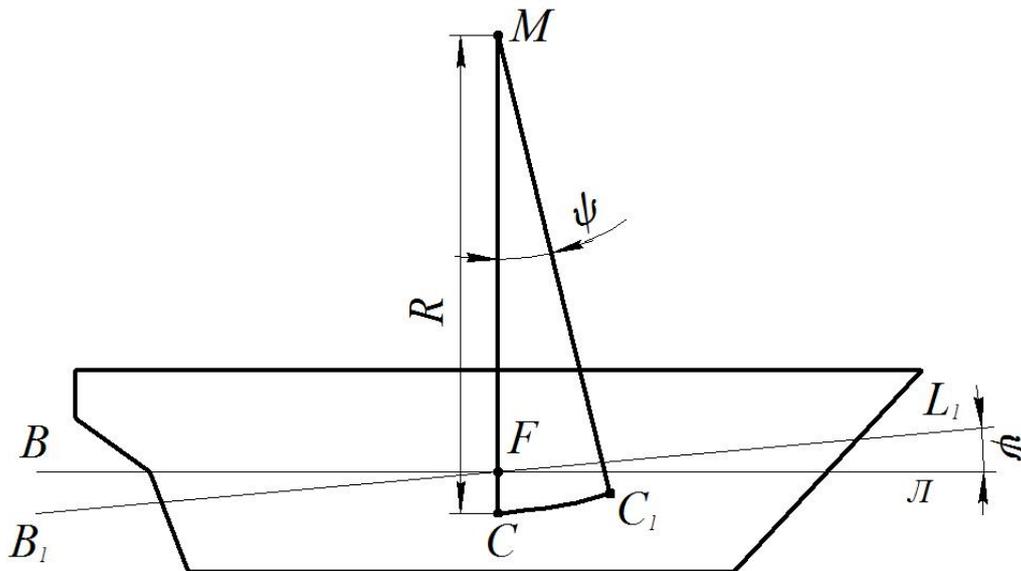


Рис. 2.6. Схема к вычислению продольного метацентрического радиуса R

$$R = \frac{J_{yf}}{V}. \quad (2.18)$$

Здесь R – продольный метацентрический радиус, а соответствующий центр кривизны продольной кривой $CC_1 (\cdot)M$, называется продольным метацентром (см. рис. 2.4); J_{yf} – момент инерции площади ватерлинии относительно главной центральной поперечной оси.

С изменением осадки изменяются значения J_x, J_{yf}, V , следовательно, меняются также r и R . Примерный характер зависимостей $r(z)$ и $R(z)$ представлен на рис. 2.7.

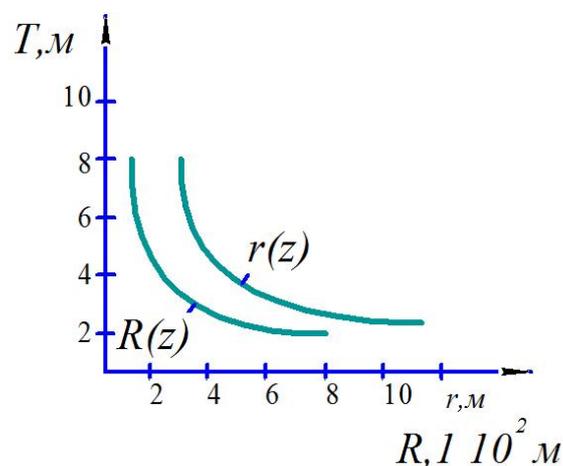


Рис. 2.7. Характер зависимости $r(z)$ и $R(z)$

Эти кривые входят в совокупность кривых элементов теоретического чертежа.

Поскольку длина судна значительно больше ширины, то момент инерции J_{yf} значительно больше момента J_x и, следовательно, радиус R больше r .

Обычно $R = (1 \div 2)L$, $r = (0,15 \div 0,3)B$.

Например, для прямоугольного понтона длиной L и шириной B можно записать

$$\begin{cases} J_x = \frac{LB^3}{12} \\ J_{yf} = \frac{BL^3}{12} \end{cases} \Rightarrow, \quad (2.19)$$

$$\frac{R}{r} = \frac{J_{yf}}{J_x} = \frac{BL^3 \cdot 12}{12LB^3} = \left(\frac{L}{B}\right)^2. \quad (2.20)$$

Если $\frac{L}{B} = 6$, то $\frac{R}{r} = 36$, $\Rightarrow R = 36r$.

$$J_x = \frac{LB^3}{12}, J_{yf} = \frac{BL^3}{12}.$$

2.5 Восстанавливающий момент. Метациентрические формулы устойчивости. Понятие о метациентрической высоте

При равнообъемном наклонении с углом крена θ ЦТ судна не меняет своего положения по отношению к системе координат XYZ, связанной с судном, а ЦВ перемещается в сторону наклонения. При крене, например, силы веса D и поддержания $F_{AP} = \rho g$ перестают быть расположенными на одной прямой (вертикальной) и образуют пару сил, действующих на плече \overline{GK} (рис. 2.8).

где \overline{GK}_ψ – плечо восстанавливающего момента (рис. 2.9) при продольном наклонении корабля.

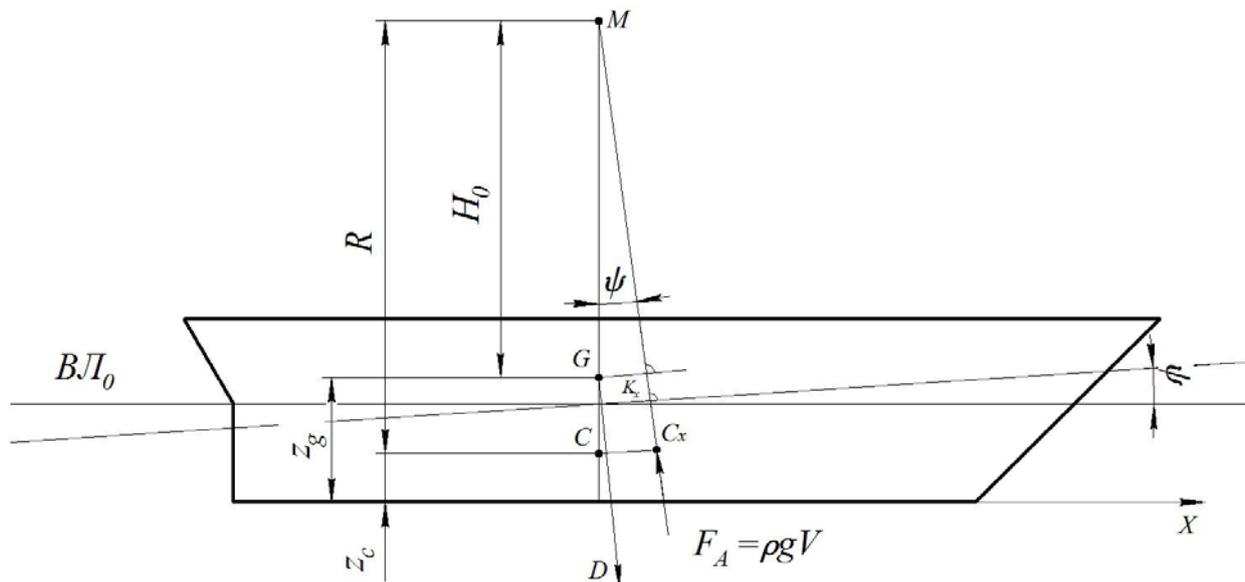


Рис. 2.9. Схема для расчета восстанавливающего момента $M_{B\psi}$ при продольном наклонении корабля

Из треугольника MGK_ψ следует, что $\overline{GK}_\psi = \overline{MG} \sin \psi$. Тогда, учитывая, что $D = \rho g V$, восстанавливающий момент при продольном наклонении корабля $M_{B\psi}$ определится из выражения, которое принимает во внимание, что

$$\overline{GK}_\psi = H_0 \sin \psi = H_0 \psi, \quad (2.24)$$

где H_0 – продольная метацентрическая высота, показывающая превышение продольного метацентра (точка М) над центром тяжести корабля (точка G).

С учетом (2.24) зависимость (2.23) для момента $M_{B\psi}$ запишется в виде

$$M_{B\psi} = DH_0 \psi \quad (2.25)$$

или используя уже известные соотношения

$$M_{B\psi} = DH_0 \frac{x_c - x_g}{R} = D(x_c - x_g), \quad (2.26)$$

где R – продольный метацентрический радиус, величина которого вполне соизмерима с продольной метацентрической высотой ($R \approx H_0$); $x_c - x_g$ – абсциссы центров величины (точка C) и тяжести (точка G) соответственно.

Формулы (2.21) и (2.25) называются метацентрическими формулами устойчивости.

В расчетной практике для определения метацентрических высот h_0 и H_0 используются выражения, составленные на основе рассмотрения рис. 2.10 и 2.11.

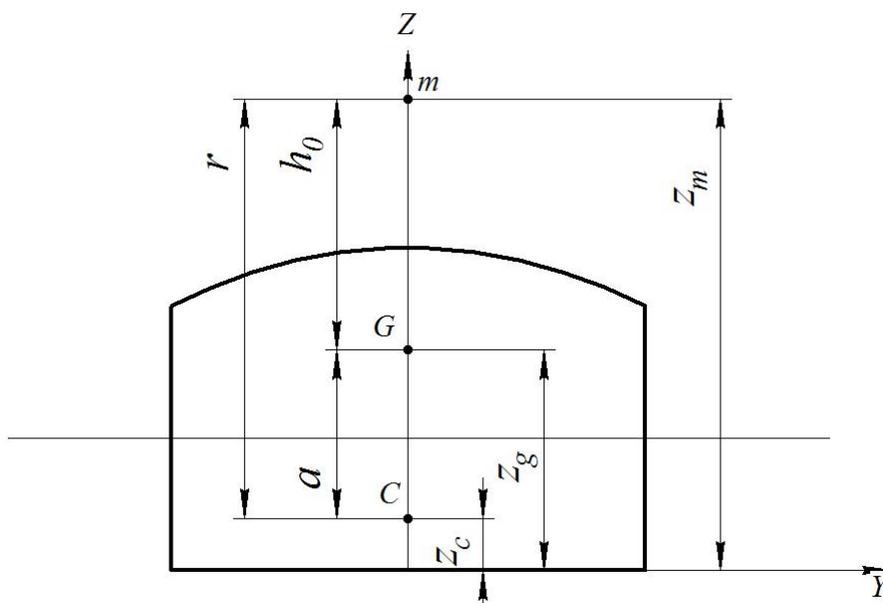


Рис. 2.10. Схема для определения поперечной метацентрической высоты

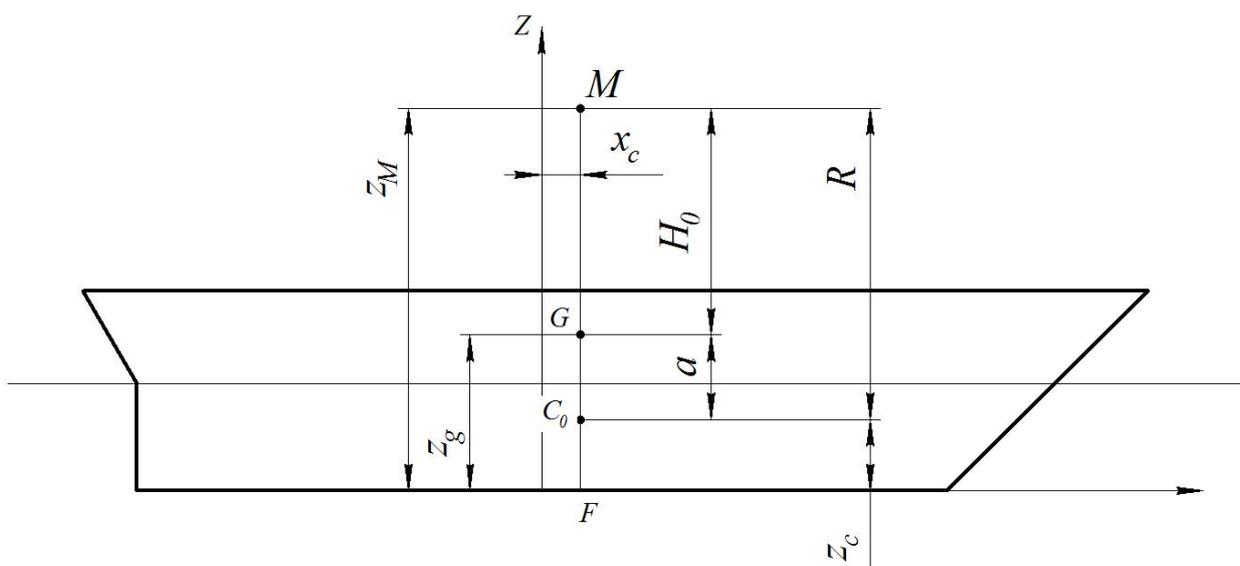


Рис. 2.11. Схема для определения продольной метацентрической высоты

Так, например, для поперечной метацентрической высоты h_0 , исходя из рис. 2.10 можно записать

$$h_0 = r + z_c - z_g, \quad a = z_G - z_C,$$

$$h_0 = z_m - z_g, \quad (2.27)$$

$$h_0 = r - a, \quad (2.28)$$

$$h_0 = z_m - a - z_c. \quad (2.29)$$

Аналогичным образом, по данным рис. 2.9 можно определить продольную метацентрическую высоту по следующим формулам

$$H_0 = R + z_c - z_g, \quad (2.30)$$

$$H_0 = R - a, \quad (2.31)$$

$$H_0 = z_m - z_c - a. \quad (2.32)$$

В (2.25), (2.26), (2.28), (2.29) a – превышение ЦТ над ЦВ.

2.6 Метацентрическая высота как мера начальной остойчивости

Из структуры метацентрических формул остойчивости следует, что чем больше будет метацентрическая высота h_0 или H_0 при данном водоизмещении, тем больше будет величина восстанавливающих моментов M_B и $M_{B\psi}$ и поэтому тем больше будет начальная остойчивость судна.

Таким образом, метацентрические высоты h_0 и H_0 могут служить мерой начальной остойчивости в метацентрических формулах остойчивости

$$M_B = Dh_0\theta \quad \text{и} \quad M_{B\psi} = DH_0\psi.$$

Рассмотрим эти положения для ряда примеров при анализе начальной остойчивости.

2.6.1 Анализ начальной остойчивости судна при $z_m > z_g$ и $z_g > z_c$

Допустим, что в начальном положении ЦТ судна расположен выше ЦВ, а метацентр (точка m) расположен выше ЦТ (точка G). Для этого случая соотношения между ординатами указанных точек будут следующие: $z_g > z_c$, $z_m > z_g$ (рис. 2.12).

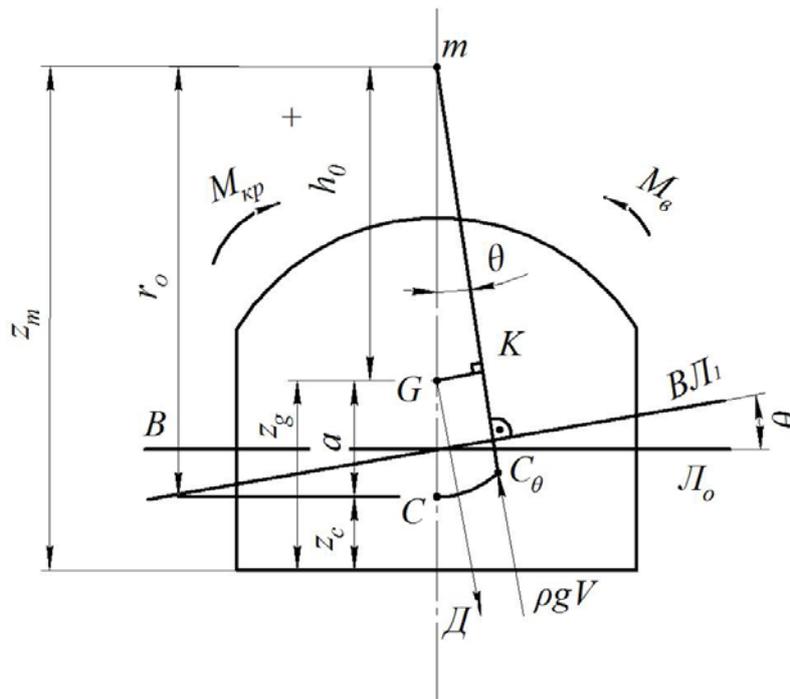


Рис. 2.12. Схема действия кренящего и восстанавливающего моментов $M_{кр}$ и M_B при положительной метацентрической высоте h_0

Учитывая соотношения (2.27) – (2.29), метацентрическая высота h_0 в данном случае будет величиной положительной ($h_0 > 0$). Восстанавливающий момент $M_B = Dh_0\theta$ будет направлен против действия кренящего момента $M_{кр}$.

При этом после окончания действия кренящего момента $M_{кр}$ восстанавливающий момент M_B вернет судно в исходное положение равновесия.

Таким образом, при положительной метацентрической высоте h_0 и при соотношениях ординат $z_g > z_c$, $z_m > z_g$ судно является **остойчивым**.

2.6.2 Анализ начальной остойчивости судна при $z_c > z_g$ и $z_m > z_c$

Допустим, что в начальном положении ЦТ (точка G) судно находится ниже ЦВ (точка G) (рис. 2.13).

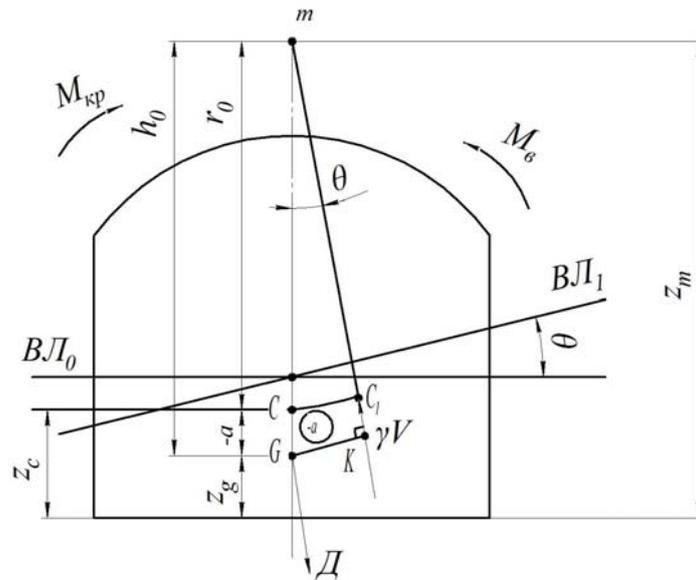


Рис. 2.13. Кренящий $M_{кр}$ и восстанавливающий M_B моменты при расположении центра величины (точка C) выше центра тяжести (точка G) судна

Для этого случая соотношения между ординатами указанных точек будут следующие $z_c > z_g$, $z_m > z_c$.

Как видно из рис. 2.13 для данного случая метацентрический радиус r_0 сугубо положительная величина. Так как поперечный метациентр (точка m) находится выше ЦВ (точка C), то метацентрическая высота h_0 тем более будет положительной величиной ($h_0 > 0$, $h_0 = r_0 - (-a) = r_0 + a$). Восстанавливающий момент M_B , действующий на корпус судна после окончания действия кренящего момента $M_{кр}$, также является положительной величиной ($M_B = Dh_0\theta > 0$).

Поэтому судно с указанным соотношением между ординатами z_c , z_g , z_m ($z_c > z_g$ и $z_m > z_c$) будет обладать безусловной остойчивостью. У надводных судов такое положение трудно достичь, но оно встречается в некоторых гоночных парусных судах, яхтах, где применяют специальные меры повышения остойчивости (металлический киль, балласт в килевой плоскости и т.д.), а также в подводных лодках.

2.6.3 Анализ начальной остойчивости судна при соотношении ординат $z_g > z_m$

Допустим, что в начальном положении ЦТ (точка G) (рис. 2.14) лежит выше метациентра (точка m).

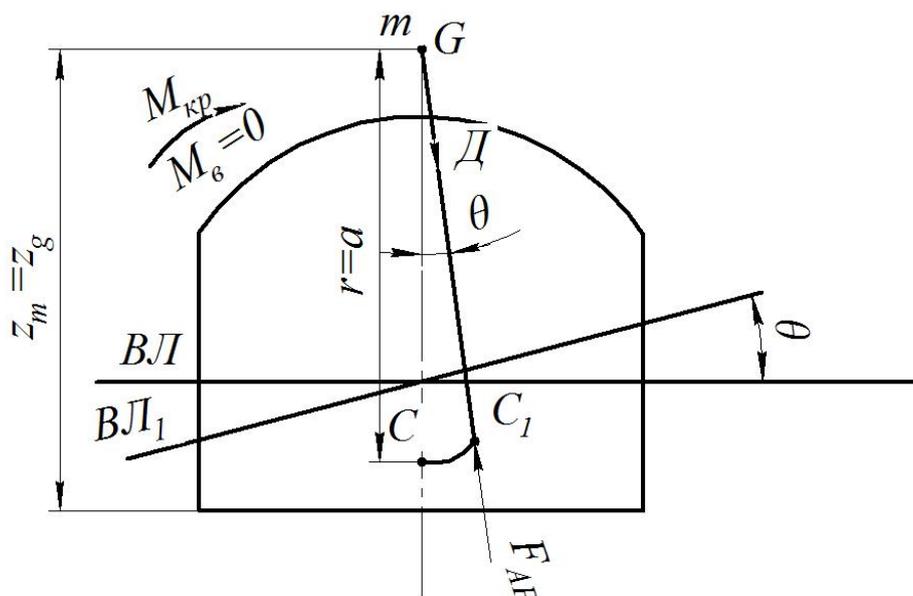


Рис. 2.15. Схема для оценки поперечной остойчивости при поперечной метацентрической высоте $h_0 = 0$

Из схемы видно, что при $r = a \Rightarrow h_0 = r - a = 0$.

В случае, когда $h_0 = 0$ и восстанавливающий момент M_B также будет равен нулю ($M_B = 0$) и поэтому никакого противодействия кренящему моменту $M_{кр}$ со стороны корпуса судна оказано не будет.

Учитывая это обстоятельство, после прекращения действия момента $M_{кр}$ судно не вернется в исходное положение и поэтому оно будет нестойчивым.

Мерой поперечной остойчивости может также служить произведение Dh_0 , которое характеризуется коэффициентом μ_θ поперечной остойчивости

$$\mu_\theta = Dh_0, \quad (2.33)$$

где μ_θ – коэффициент поперечной остойчивости.

Для оценки продольной остойчивости используют коэффициент μ_ψ продольной остойчивости, определяемый по уравнению

$$\mu_\psi = DH_0. \quad (2.34)$$

2.7 Составляющая восстанавливающего момента. Остойчивость формы и остойчивость веса

Учитывая по уравнению (2.22), что восстанавливающий момент $M_B = Dh\theta$ и принимая во внимание, что метацентрическая высота $h_0 = r - a$, можно выражение для момента M_B представить в таком виде

$$\left. \begin{aligned} M_B &= D(r - a)\theta \quad \text{или} \\ M_B &= Dr\theta - Da\theta \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Первое выражение $Dr\theta$ называется моментом остойчивости формы M_ϕ , т.е.

$$M_\phi = Dr\theta = \gamma V \frac{J_x}{V} \theta = \gamma J_x \theta. \quad (2.36)$$

Такое название этот момент получил потому, что входящий в выражение (2.36) поперечный метацентрический радиус r определяется по выражению $r = \frac{J_x}{V}$, зависящему только от размеров и формы корпуса.

Вторая составляющая в выражении (2.35) называется моментом остойчивости веса M_g

$$M_g = Da\theta. \quad (2.37)$$

Такое название момента M_g обусловлено тем, что величина a ($a = z_g - z_c$) зависит от положения ЦТ судна (точка G), а точнее от его возвышения над центром величины (точка C).

Окончательно выражение для восстанавливающего момента с учетом вышеизложенного примет вид

$$M_B = M_\phi - M_g. \quad (2.38)$$

Из (2.38) следует вывод, что восстанавливающий момент M_B тем больше, чем больше момент остойчивости формы M_ϕ и меньше момент остойчивости веса M_g .

Изложенное можно проиллюстрировать соответствующим графическим примером (рис. 2.16), предварительно установив по уравнению (2.21), что момент M_B можно представить и таким образом

$$M_B = Dl = Dr\theta - Da\theta,$$

или, восстанавливая исходные тригонометрические функции, выражение для M_B примет вид

$$Dl = Dr \sin \theta - Da \sin \theta. \quad (2.39)$$

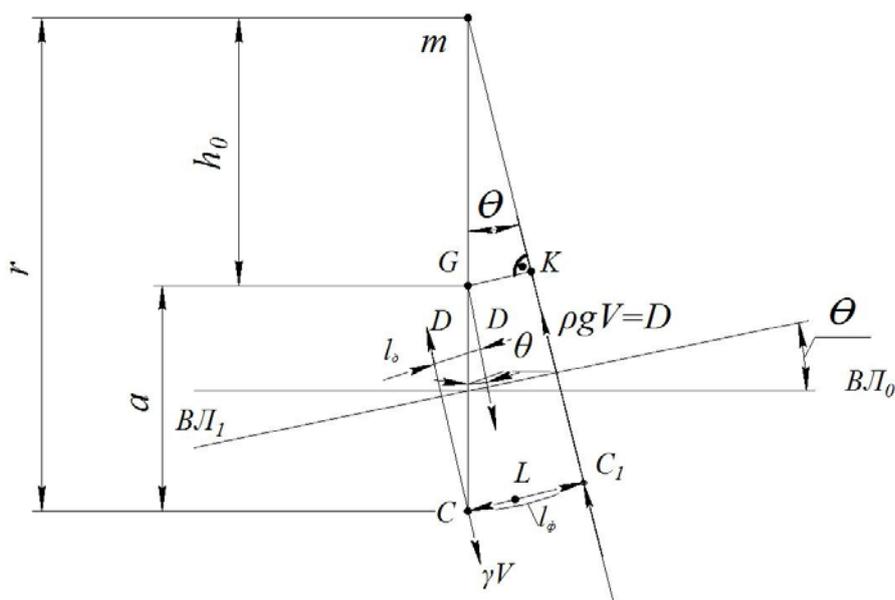


Рис. 2.16. Схема для расчета составляющих плеча статической устойчивости l_ϕ и l_g

Разделив выражение (2.39) на вес судна D , получим (рис. 2.16)

$$l = r \sin \theta - a \sin \theta. \quad (2.40)$$

Из (2.40) видно, что по аналогии с моментами плечо статической устойчивости l состоит из двух составляющих l_ϕ и l_g .

Составляющая $l_\phi = r \sin \theta$ называется плечом устойчивости формы, а составляющая $l_g = a \sin \theta$ – плечом устойчивости веса.

Таким образом, плечо статической устойчивости

$$l = l_{\phi} - l_g. \quad (2.41)$$

Геометрический смысл составляющих l_{ϕ} и l_g плеча статической остойчивости l виден из рис. 2.16. Из рассмотрения данных этого рисунка видно, что результирующее плечо статической остойчивости $l = \overline{GK}$ будет тем больше, чем больше будет плечо остойчивости формы l_{ϕ} ($l_{\phi} = \overline{CC_1}$) и чем меньше будет плечо остойчивости веса l_g ($l_g = \overline{CL}$).

2.8 Остойчивость на больших углах крена. Определение координат центра величины и метацентра при больших наклонениях

Полученные ранее зависимости и выводы справедливы для малых углов наклона. Однако, при больших углах крена, достигающих в условиях не очень суровой бортовой качки значений 20° и выше эти зависимости применять нельзя. Это объясняется заметным изменением площади соответствующей ВЛ, её моментов инерции, величины метацентрического радиуса. Метацентр плаванья также изменяет свое положение в процессе наклона на большой угол.

При больших углах крена, характеризующихся минимальной остойчивостью судна, восстанавливающий момент M_B определяется как произведение весового водоизмещения D на плечо статической остойчивости, а именно

$$M_B = Dl, \quad (2.42)$$

где D – весовое водоизмещение судна, н; l – плечо статической остойчивости, при больших углах крена, м.

Плечо статической остойчивости l при больших углах крена, также как и при малых определяется длиной перпендикуляра \overline{GK} , опущенного из центра тяжести корабля (точка G) на линию действия силы поддержания $F_{AP} = \rho g V$ (см. рис. 2.16).

Однако особенностью больших углов наклона является переменное положение метацентра (точка m), в связи, с чем будет изменяться и искомая длина плеча l .

Чтобы точно определить значение плеча статической остойчивости $l = \overline{GK}$ необходимо точно знать координаты центра величины C_0 и координаты

метацентра m_θ , т.к. линия поддержания проходит через обе эти точки перпендикулярно плоскости равнообъемной ВЛ.

Для решения этой задачи рассмотрим, как показано на рис. 2.17, положение линии поддержания $m_\theta C_\theta$, заданное в системе координат YOZ при произвольном значении угла крена θ .

Расстояние между метацентром $m_\theta(y_m, z_m)$ и центром $C_\theta(y_\theta, z_\theta)$ равно метацентрическому радиусу $r_\theta = r(\theta)$, при этом угол крена θ будем считать независимой переменной.

От заданного наклонного положения корабля сообщим ему дополнительное наклонение на бесконечно малый угол $d\theta$, в результате чего ЦВ переместится из точки C_θ в бесконечно близкую по расположению точки $C_{\theta1}$ и его координаты получат бесконечно малые приращения dy и dz (рис. 2.17).

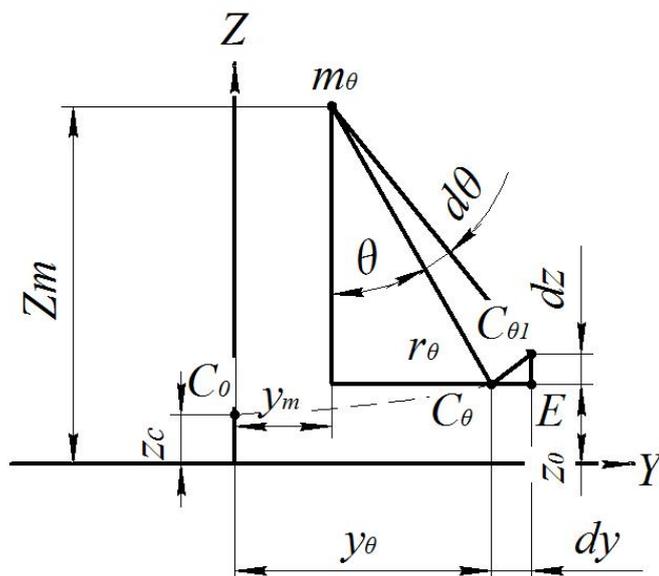


Рис. 2.17. Определение координат ЦТ во время наклонения на большой угол крена

Принимая, что для бесконечно малого наклонения $d\theta$ положение метацентра m_θ и метацентрического радиуса r_θ не изменяются, в связи, с чем бесконечно малое перемещение $C_\theta C_{\theta1}$ будет равно

$$\check{C}_\theta C_{\theta1} = \overline{C_\theta C_{\theta1}} = r_\theta d\theta. \quad (2.43)$$

Тогда составляющие перемещения ЦВ по осям Y и Z определим из треугольника C_0EC_{01} с помощью следующих выражений

$$\left. \begin{aligned} dy &= \overline{C_0C_{01}} \cos \theta = r_\theta d\theta \cos \theta \\ dz &= \overline{C_0C_{01}} \sin \theta = r_\theta d\theta \sin \theta \end{aligned} \right\}, \quad (2.44)$$

Если проинтегрировать (2.44) с учетом (2.43), то получим следующие соотношения для координат ЦВ при больших углах наклона.

При интегрировании по ординате Z следует иметь в виду, что при $\theta = 0$ $z = z_{c\theta}$, тогда окончательно будем иметь

$$\left. \begin{aligned} y_\theta &= \int_0^\theta r_\theta \cos \theta d\theta \\ z_\theta &= \int_0^\theta r_\theta \sin \theta d\theta + z_{c\theta} \end{aligned} \right\}. \quad (2.45)$$

С помощью системы (2.45) для координат ЦВ легко можно получить формулы для координат метacentра m_θ в следующем виде

$$\left. \begin{aligned} y_m &= y_\theta - r_\theta \sin \theta \\ z_m &= z_\theta + r_\theta \cos \theta \end{aligned} \right\}. \quad (2.46)$$

С учетом (2.45) выражение (2.46) запишем таким образом

$$\left. \begin{aligned} y_m &= \int_0^\theta r_\theta \cos \theta d\theta - r_\theta \sin \theta \\ z_m &= \int_0^\theta r_\theta \sin \theta d\theta + r_\theta \cos \theta + z_{c\theta} \end{aligned} \right\}. \quad (2.47)$$

Таким образом, для построения кривых ЦВ и метacentра m_θ необходимо знать метacentрический радиус r_θ при произвольных углах крена θ .

2.9 Способ расчёта плеч статической устойчивости при равнообъемных наклонениях (Способ Крылова-Дарньи)

Для того, чтобы вычислить плечи статической устойчивости, координаты центра величины и поперечного метacentра, необходимо иметь данные по изменению зависимости $r_\theta = f(\theta)$ для равнообъемных наклонений. Для этого используется формула

$$r_\theta = \frac{J_{x\theta}}{V}, \quad (2.48)$$

где $J_{x\theta}$ – момент инерции площади равнообъемной ватерлинии относительно центральной (продольной) оси; V – объемное водоизмещение судна – величина постоянная для выбранного диапазона углов наклонения.

Для решения задачи по определению поперечного метacentрического радиуса r_θ используем широко известный в практике проектирования судов метод А.Н. Крылова-Дарньи.

По этому методу положение равнообъемной ватерлинии $ВЛ_1$ определяется с помощью вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$, которые не совпадают между собой и проходят друг относительно друга под одним и тем же углом $\Delta\theta$, но на каком-то расстоянии ε (рис. 2.18).

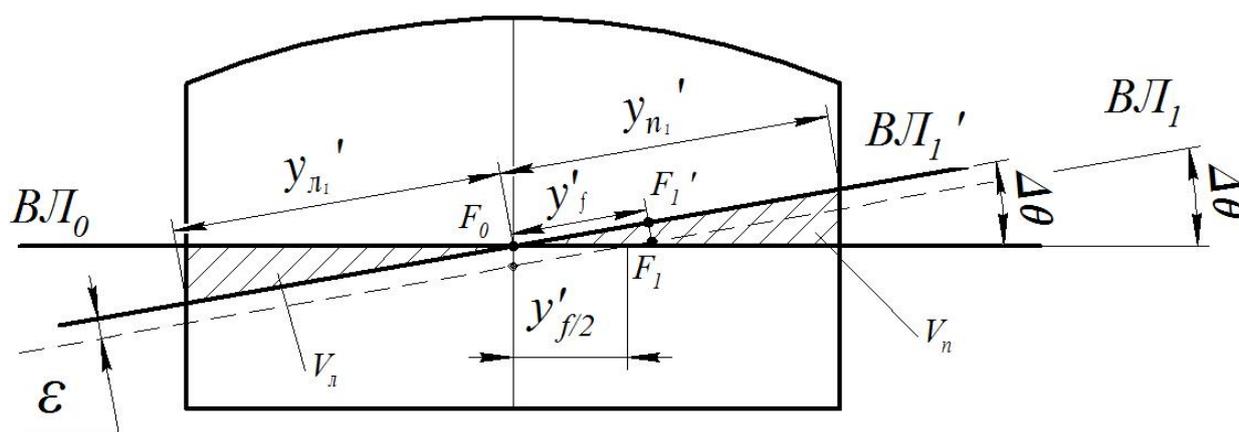


Рис. 2.18. Схема для определения плеч статической устойчивости способом Дарньи-Крылова

Считается, что разность между объемами V_n и V_l будет приближённо равна объему промежуточного слоя с площадью основания S'_1 и высотой ε (та-

кое допущение корректно, если полагать величину ε достаточно малой). Тогда, учитывая данные рис. 2.18 можно записать, что

$$V_{\text{п}} - V_{\text{л}} = \varepsilon S'_1 \Rightarrow \varepsilon = \frac{V_{\text{п}} - V_{\text{л}}}{S'_1}, \quad (2.48)$$

где S'_1 – площадь вспомогательной ватерлинии ВЛ'₁, определяемая по известной формуле

$$S'_1 = \int_{-L/2}^{+L/2} (y'_{\text{пл}} - y'_{\text{пл}}) dx, \quad (2.49)$$

где $y'_{\text{пл}}$ и $y'_{\text{пл}}$ – ординаты соответственно входящей и выходящей частей площади вспомогательной ватерлинии ВЛ'₁, измеряемые от точек $F_{0,i}$, на всех шпангоутах, пересекающихся с ватерлинией ВЛ'₁. При этом вспомогательная ватерлиния проводится через центр тяжести предыдущей действующей ватерлинии.

След первой вспомогательной ватерлинии ВЛ'₁, таким образом, проходит под углом $\Delta\theta$ через точку F_0 пересечения начальной ватерлинии ВЛ₀ и ДП.

Ватерлиния равнообъемная ВЛ₁ будет расположена от вспомогательной ВЛ'₁ на расстоянии ε , которое называется толщиной поправочного слоя. Для определения толщины ε предположим, что объем клина, вошедшего в воду, $V_{\text{п}}$ и отсекаемого вспомогательной ватерлинией ВЛ'₁ не равен объему $V_{\text{л}}$ клина, вышедшего из воды (см. рис. 2.18). Чаще всего эти объемы не равны между собой, поэтому положение вспомогательной и равнообъемной ватерлиний будет отличаться на величину ε .

Замеряя ординаты носовых и кормовых шпангоутов $y'_{\text{пл}}$ и $y'_{\text{пл}}$ по вспомогательной ватерлинии ВЛ'₁ от точки F_0 можно определить объемы клиньев водоизмещения $V_{\text{п}}$ и $V_{\text{л}}$ (рис. 2.19),

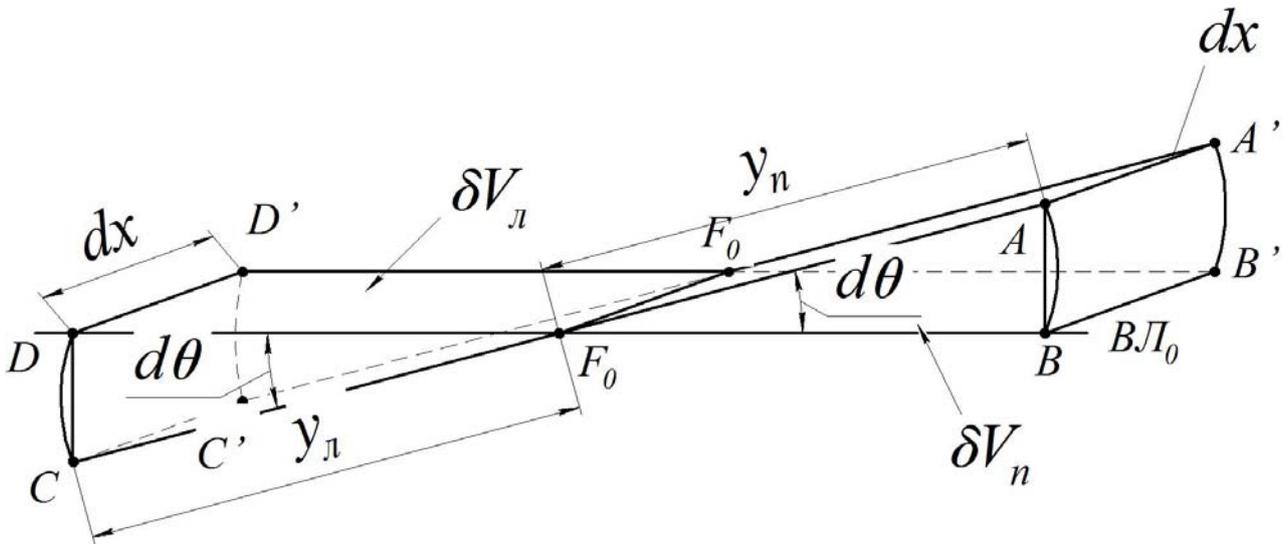


Рис. 2.19. Схема для расчёта объемов клиньев водоизмещения V_n и V_l

если предположить относительно малым значение угла наклона $d\theta$, по следующим выражениям

$$\left. \begin{aligned} V_n &= \frac{1}{2} \int_0^{\theta+L/2} \int_{-L/2}^{\theta} y_{n1}'^2 d\theta dx \\ V_l &= \frac{1}{2} \int_0^{\theta+L/2} \int_{-L/2}^{\theta} y_{l1}'^2 d\theta dx \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

Учитывая выражения (2.49), (2.50) формула для расчёта высоты слоя ε и, следовательно, расстояния между $ВЛ'_1$ и $ВЛ_1$ примет вид

$$\varepsilon = \frac{1}{2S'_1} \int_0^{\theta+L/2} \int_{-L/2}^{\theta} \left[(y_{n1}')^2 - (y_{l1}')^2 \right] d\theta dx = \frac{1}{S'_1} \int_0^{\theta} Mx'_1 d\theta. \quad (2.51)$$

где $\frac{1}{2} \int_{-L/2}^{\theta+L/2} \left[(y_{n1}')^2 - (y_{l1}')^2 \right] dx = Mx'_1$ (2.51 а) – статический момент площади

S'_1 вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$, относительно продольной оси наклона OX , проходящей через точку F_0 .

Учитывая (2.50) и (2.51), (2.51 а), можно записать для любых углов наклона θ_i и θ_{i+1} , что

$$\delta V = V_{\Pi} - V_{\Pi} = \varepsilon S'_i = \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} M x'_1 d\theta, \quad (2.52)$$

где S'_1 – площадь любой вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$; θ_i и θ_{i+1} – предыдущий и последующий углы наклона вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$.

Выражение (2.52) по правилу трапеции приводится к виду, который показывает, что величина δV рассчитывается по уравнению

$$\delta V = \varepsilon S'_i = \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} M_{x'} d\theta = \frac{\Delta\theta}{2} (M_{x_i} + M_{x_{i+1}}) = M_{x_{i+1}} \frac{\Delta\theta}{2} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\delta V}{S'_i}. \quad (2.53)$$

В (2.53) M_{x_i} – статический момент площади предыдущей действующей ватерлинии $ВЛ_0$. Обычно $M_{x_i} = 0$, т.к. вспомогательная ватерлиния $ВЛ'_1$ проходит через тяжести (точка F_0) действующей ватерлинии $ВЛ_0$, которая является равнообъемной $M_{x_{i+1}}$ – статический момент площади вспомогательной ватерлинии относительно той же продольной оси $ОХ$.

Учитывая (2.53), выражение (2.48) приводится к виду

$$\varepsilon = \frac{\Delta\theta}{2} \frac{M_{x_{i+1}}}{S'_i}. \quad (2.53')$$

Так как момент площади $M_{x_{i+1}} = y_{f,i+1} S'_i$ (2.53''), то выражение (2.53') примет вид

$$\varepsilon = \frac{y_{f,i+1}}{2} \Delta\theta, \quad (2.54)$$

где $y_{f,i+1}$ – ордината центра тяжести (точка F'_1) площади вспомогательной ватерлинии, отсчитываемая от ЦТ (точка F_0) площади начальной ватерлинии $ВЛ_0$; $\Delta\theta$ – угол в радианах между ватерлиниями $ВЛ_0$ и $ВЛ'_1$.

Как следует из (2.54) ордината $y_{f,i+1} = \frac{M_{x_{i+1}}}{S'_i}$ или

$$y_{f,i+1} = \frac{1}{2} \frac{\sum (y_{\pi^2} - y_{\pi^2})}{\sum y_i}, \quad (2.55)$$

где $M_{x,i+1}$ – статический момент площади вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$ относительно продольной оси, проходящей через точку F_0 .

Из (2.54) следует, что при изменении знака у одной из величин ε или $y_{f,i+1}$, должен изменяться знак и у другой величины. Геометрически это означает, что при откладывании $+y_f$ вправо, величина $+\varepsilon$ откладывается вниз и наоборот.

В соответствии со сказанным на рисунке 2.18 на расстоянии $+\varepsilon$, отложенном вниз от вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$, проводится первая равнообъемная ватерлиния $ВЛ_1$.

Ввиду того, что равнообъемная ватерлиния $ВЛ_1$ расположена достаточно близко к вспомогательной $ВЛ'_1$, то это позволяет перенести по нормали к $ВЛ_1$ точку F'_1 в новое положение F_1 . Положение точки F_1 будет характеризовать положение ЦТ площади равнообъемной ватерлинии $ВЛ_1$. Далее процесс повторяется.

Величина ε при рассмотренных построениях незначительна, поэтому считается, что площади, моменты инерции, статические моменты площади и другие элементы вспомогательной и действительной равнообъемной ватерлинии одинаковы. Поэтому, как правило, вычисления производят для вспомогательной ватерлинии, но полученные результаты используются для расчета некоторых элементов, например, метацентрических радиусов (большого и малого) равнообъемной ватерлинии $ВЛ_1$.

2.10 Расчёт поперечного метацентрического радиуса r_0 по методу Крылова-Дарньи

Для расчёта поперечного метацентрического радиуса r_0 равнообъемной ватерлинии $ВЛ_1$ полностью используются данные вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$.

Так, например, после определения координаты $y_{f,i+1}$ ЦТ площади вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$ (точка F'_1 на рис. 2.18), осуществляют расчет момента инерции этой площади $ВЛ'_1$ относительно продольной центральной оси OX , проходящей через указанную точку F'_1 по формуле

$$Jx_0 = Jx'_0 - \Delta Jx'_0 \quad (2.56)$$

или

$$Jx_0 = Jx'_0 - S'_1 y_{f,i+1}^2, \quad (2.56, а)$$

где Jx_0 – момент инерции площади вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$ относительно центральной продольной оси, проходящей через точку F'_1 ; Jx'_0 – момент инерции площади вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$ относительно продольной главной оси, проходящей через точку F_0 , где расположен ЦТ (точка F_0) предыдущей действующей равнообъемной ватерлинии $ВЛ_0$. Момент Jx'_0 определяется по формуле

$$Jx'_0 = \frac{1}{3} \int_{-L/2}^{+L/2} (y_{п'_1}^3 - y_{л'_1}^3) dx, \quad (2.56, б)$$

где $\Delta Jx'_0 = S'_1 y_{f,i+1}^2$ – переносный момент инерции площади вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$. По правилу трапеции величину момента инерции Jx'_0 можно рассчитать по формуле

$$Jx'_0 = \frac{\Delta L}{3} \sum (y_{п'_1}^3 - y_{л'_1}^3). \quad (2.56, в)$$

Как видно из формул (2.56, б) и (2.56, в) для расчёта момента инерции Jx'_0 необходимо с теоретического чертежа снять входящие $y_{п'_1}$ и выходящие $y_{л'_1}$ ординаты со вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_1$ и затем для этой же ватерлинии, вычисляется момент инерции Jx'_0 площади S'_1 относительно продольной оси (главной), проходящей через точку F_0 .

При использовании метода Крылова-Дарньи отстояние ε между вспомогательной $ВЛ'_1$ и равнообъемной $ВЛ_1$ ватерлиниями настолько незначительно, что моменты инерции Jx_0 и Jx'_0 можно считать примерно равными.

При этом точку отсчета ординат $y'_{п}$ и $y'_{л}$ можно назначать где угодно, т.к. в дальнейшем при вычислении момента инерции Jx_0 производится его уточнение с помощью переносного момента инерции $\Delta Jx_0 = y_f^2 S$.

Если момент инерции площади равнообъемной ватерлинии принять равным моменту инерции площади вспомогательной ватерлиний, то величина метацентрического радиуса для равнообъемной ватерлинии ВЛ₁ при угле крена θ с учетом (2.41) будет равна

$$r_{\theta} = \frac{Jx'_{\theta} - \Delta Jx_{\theta}}{V} = \frac{Jx_{\theta}}{V}. \quad (2.57)$$

Таким образом, после определения МЦР r_{θ} по (2.57) для всех равнообъемных ватерлиний при больших углах крена вопрос об установлении устойчивости судна можно считать решенным полностью, т.к. используя формулы (2.44) и (2.46) определяются координаты ЦВ и метацентра наклонной ватерлинии. Это в свою очередь позволяет определить направление действия силы поддержания и плечо статической устойчивости.

2.11 Графический метод определения толщины поправочного слоя ε и центра тяжести равнообъемной ватерлинии ВЛ₁

Как было получено выше, величину толщины ε поправочного слоя водоизмещения можно рассчитать по уравнению 2.54 ($\varepsilon = \frac{y_{f,i+1}}{2} \Delta\theta$).

Это уравнение по предложению Дарньи можно использовать для определения величины ε графическим путем. Для этого ε не вычисляют, а ограничиваются графическими построениями, с использованием значений $y_{f,i+1}$.

Для этого необходимо после проведения вспомогательной ватерлинии и вычисления ординаты $y_{f,i+1}$ отложить от ЦТ предыдущей действующей ВЛ₀ (от точки F_0) отрезок $\overline{F_0K} = \frac{y_{f,i+1}}{2}$ по направлению ВЛ₀ и через полученную точку K провести линию, параллельную вспомогательной ватерлинии ВЛ'₁.

Указанная линия и по построению и по (2.54) будет находиться на расстоянии ε от вспомогательной, т.е. будет действующей и равнообъемной.

Затем на вспомогательной ВЛ'₁ необходимо отложить от ЦТ предыдущей линии (точка F_0) отрезок $y_{f,i+1}$ и перенести его конечную точку F'_1 по вертикали на действующую ватерлинию ВЛ₁. Полученная таким образом точка F_1 на действующей ВЛ₁ будет характеризовать положение её ЦТ, через которую должна проводиться последующая вспомогательная ВЛ'₂.

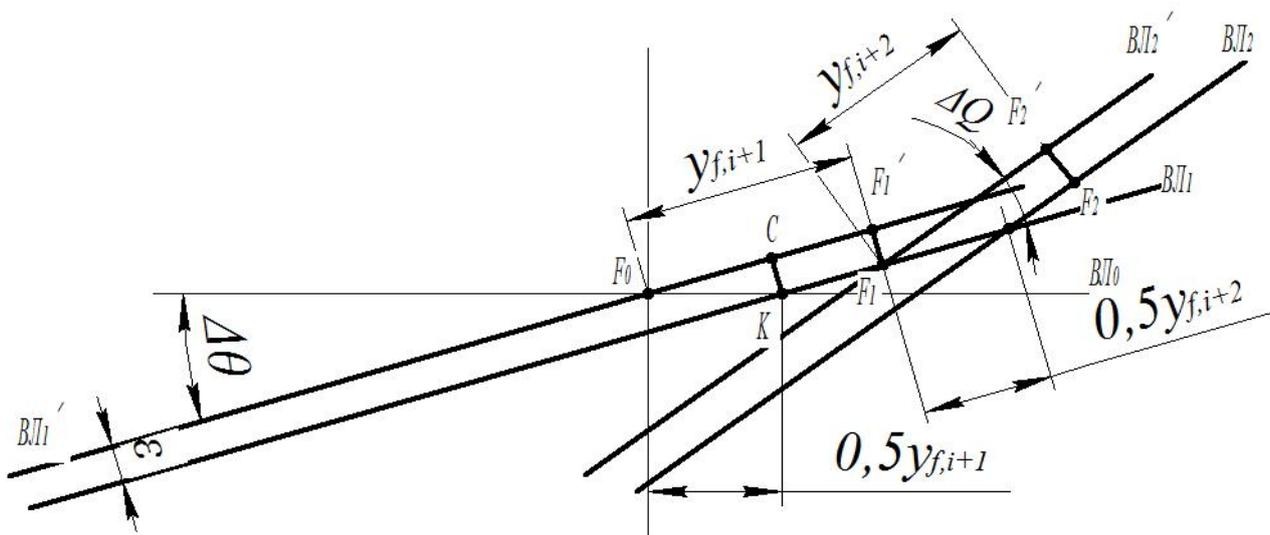


Рис. 2.20. Схема для графического определения толщины поправочного слоя ε и центра тяжести равнообъемной ватерлинии ВЛ₁

Из построений на рис. 2.20 отрезок $\overline{CK} = \sin \Delta\theta \frac{1}{2} y_{f,i+1} = \frac{y_{f,i+1}}{2} \sin \Delta\theta$ или учитывая (2.54) и принимая, что $\sin \Delta\theta = \Delta\theta$, получим

$$\overline{CK} = \varepsilon = \frac{y_{f,i+1}}{2} \Delta\theta, \quad (2.58)$$

где $y_{f,i+1}$ – ордината ЦТ площади вспомогательной ВЛ'₁, $y_{f,i+1} = \frac{M_{x,i+1}}{S'}$.

2.12 Порядок расчета J_{x_0} и r_0 на больших углах крена

Расчет момента инерции площади J_{x_0} наклоненной ватерлинии относительно её центральной продольной оси ОХ и метацентрического радиуса судна r_0 в нашем случае будет проводиться по второму способу А.Н. Крылова-Дарньи, который является графоаналитическим и требует чередования вычислений с графическими построениями на корпусе.

В ТК допускается производить расчет в диапазоне углов крена 0-60 °С с интервалом $\Delta\theta = 15^0$.

Порядок расчета величин J_{x_0} и r_0 следующий.

1. Для начальной ватерлинии ($\theta = 0^0$) $ВЛ_0$ вычисляются момент инерции площади относительно её центральной продольной оси Jx_0 и метацентрический радиус r_0 по формулам

$$Jx_0 = \frac{2}{3} \int_{-L/2}^{+L/2} y^3 dx, \quad r_0 = \frac{Jx_0}{V}. \quad (2.59, a)$$

2. Через центр тяжести площади начальной ВЛ (точка F_0 – пересечения-леда $ВЛ_0$ при $\theta = 0^0$ и ДП) проводится сплошная линия – вспомогательная $ВЛ'_{15}$ ($ВЛ'_{15}$) под заданным углом θ наклонения (в нашем случае $\theta = 15^0$). С указанной $ВЛ'_{15}$ снимаются значения входящих $y_{п,15}$ и выходящих $y_{л,15}$ ординат с учетом правила знаков («+» – для входящих ординат и «-» – для выходящих) (рис. 2.21).

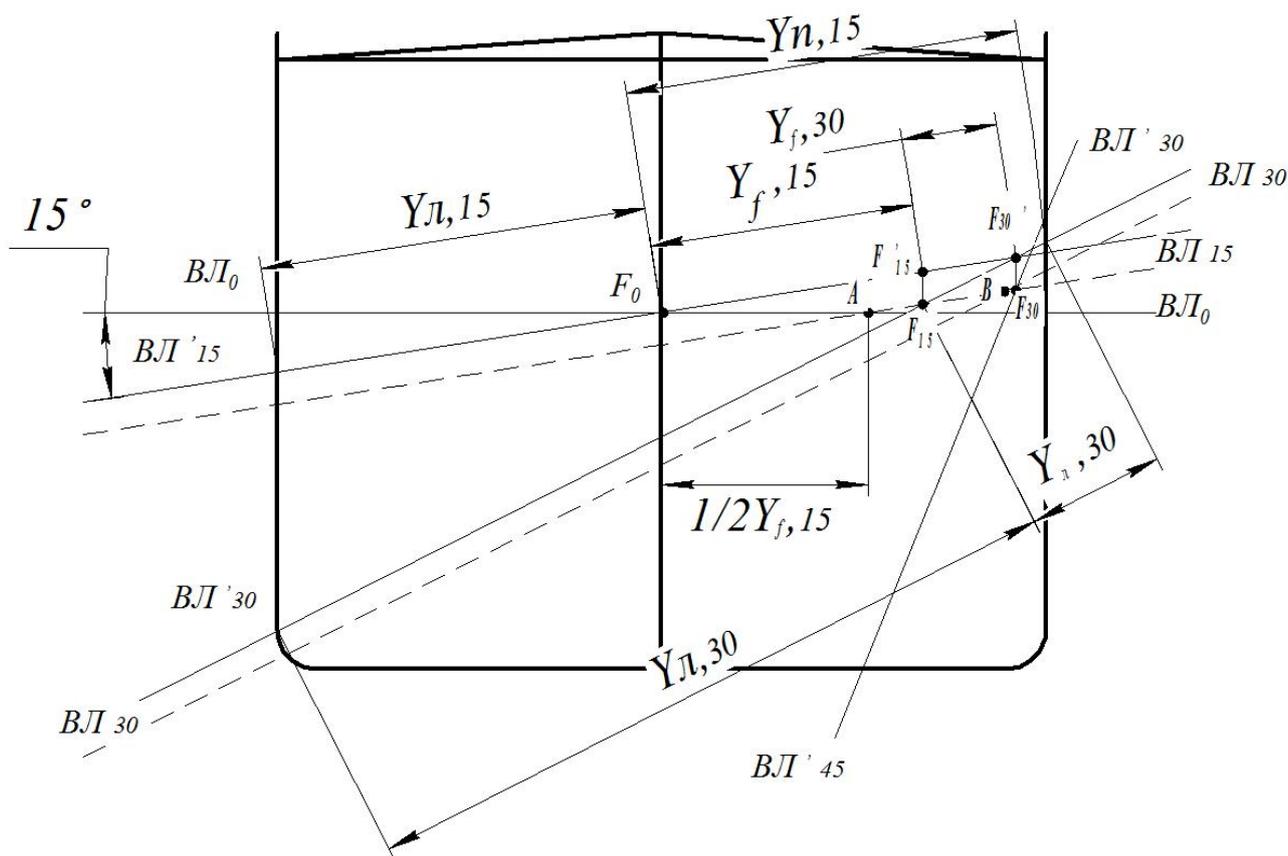


Рис. 2.21. Определение координат y_n и y_l при больших наклонениях судна

Для определения ординат $y_{п,15}$ и $y_{л,15}$ вспомогательной ватерлинии $ВЛ'_{15}$ необходимо от точки F_0 по этой ватерлинии на всех шпангоутах измерить вхо-

дящие $y_{п}$ и выходящие $y_{л}$ ординаты и их натуральные значения занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Пример расчёта равнообъемных наклонов по правилу трапеции

θ_k	$\theta_0 = 0^0$						$\theta_1 = 15^0$					
№ шаггоуга	$y_{п, м}$	$y_{л, м}$	$y_{п, м}^2$	$y_{л, м}^2$	$y_{п, м}^3$	$y_{л, м}^3$	$y_{п, м}$	$y_{л, м}$	$y_{п, м}^2$	$y_{л, м}^2$	$y_{п, м}^3$	$y_{л, м}^3$
1												
2												
...												
10												
Σ	$\Sigma y_{п}$	$-\Sigma y_{л}$	$\Sigma y_{п}^2$	$\Sigma y_{л}^2$	$\Sigma y_{п}^3$	$-\Sigma y_{л}^3$	$\Sigma y_{п}$	$-\Sigma y_{л}$	$\Sigma y_{п}^2$	$\Sigma y_{л}^2$	$\Sigma y_{п}^3$	$-\Sigma y_{л}^3$
1	$\Sigma_1 = \Sigma y_{п} - (-\Sigma y_{л})$						$\Sigma_1 = \Sigma y_{п} - (-\Sigma y_{л})$					
2	$\Sigma_2 = \Sigma y_{п}^2 - \Sigma y_{л}^2 = 0$ только для ВЛ ₀						$\Sigma_2 = \Sigma y_{п}^2 - \Sigma y_{л}^2 \neq 0$					
3	$\Sigma_3 = \Sigma y_{п}^3 - (-\Sigma y_{л}^3)$						$\Sigma_3 = \Sigma y_{п}^3 - (-\Sigma y_{л}^3)$					
4	$S_0 = \Sigma_1 \Delta L$						$S_{15} = \Sigma_1 \Delta L$					
5	$M_0 = \Delta L/2 \cdot \Sigma_2 = 0$						$M_{15} = \Delta L/2 \cdot \Sigma_2 \neq 0$					
6	$y_{f0} = \frac{M_0}{S_0} = \frac{1}{2} \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1} = \frac{1}{2} \frac{(5)}{(4)} = 0$						$y_{f15} = \frac{M_{15}}{S_{15}} = 0,5 \frac{\Sigma_2}{\Sigma_1}$					
7	$J'_{x0} = 2 \Delta L/3 \Sigma_3$						$J'_{x15} = \Delta L/3 \Sigma_3$					
8	$\Delta J_{x0} = S_0 y_{f0}^2 = 0$						$\Delta J_{x15} = S_{15} y_{f15}^2$					
9	$J_{x0} = J'_{x0} - \Delta J_{x0}$						$J_{x15} = J'_{x15} - \Delta J_{x15}$					
10	$r_0 = J_{x0}/V$						$r_{15} = J_{x15}/V$					

Затем в табличной форме вычисляются: y_{f15} – отстояние центра тяжести площади вспомогательной ватерлинии ВЛ₁₅ от точки F_0 ; J_{x15} – центральный момент инерции площади ватерлинии; r_{15} – метацентрический радиус (см. табл. 2.1) по следующим формулам

$$\left. \begin{aligned}
y_{f,15} &= \frac{M_{x,15}}{S_{15}} \\
M_{x,15} &= \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{+L/2} (y_{п,15}^2 - y_{л,15}^2) dx = \frac{\Delta L}{2} \sum (y_{п,15}^2 - y_{л,15}^2) \\
S'_{15} &= \int_{-L/2}^{+L/2} (y_{п,15} - y_{л,15}) dx = \Delta L \sum (y_{п,15} - y_{л,15}) \\
J_{x,15} &= J'_{x,15} - y_{f,15}^2 S_{15} \\
J'_{x,15} &= \frac{1}{3} \int_{-L/2}^{+L/2} (y_{п,15}^3 - y_{л,15}^3) dx = \frac{\Delta L}{3} \sum (y_{п,15}^3 - y_{л,15}^3) \\
r_{15} &= \frac{J_{x,15}}{V}
\end{aligned} \right\} (2.59, б)$$

3. Для нахождения положения равнообъемной ватерлинии ВЛ₁₅ производятся следующие графические построения (см. рис. 2.21):

от точки F_0 по направлению ватерлинии ВЛ₀ ($\theta = 0^0$) откладывается отрезок $\overline{F_0A}$, равный $\frac{1}{2} y_{f,15}$. Через полученную точку А под углом $\theta = 15^0$ проводится ватерлиния ВЛ₁₅, которая и будет являться равнообъемной. Её изображают пунктирной линией. Для определения центра тяжести площади ватерлинии ВЛ₁₅ необходимо от точки F_0 по направлению вспомогательной ватерлинии ВЛ₁₅ отложить величину ординаты $y_{f,15}$ и из полученной точки F_{15} опустить перпендикуляр, точка пересечения которого с ватерлинией ВЛ₁₅ даст положение её центра тяжести – точку F_{15} (см. рис. 2.21). При этом построении используется допущение о прямобортности обводов судна.

Откладывая отрезки ординат $y_{f,15}$ и $\frac{1}{2} y_{f,15}$ необходимо учитывать правило знаков: при положительном значении отрезка $y_{f,15}$ он откладывается вправо от точки F_0 (в сторону входящих ординат), при отрицательном значении – в сторону выходящих ординат (т.е. налево от точки F_0).

4. Для нахождения положения равнообъемной ватерлинии ВЛ₃₀ при следующем угле крена $\theta = 30^0$ необходимо через точку F_{15} провести вспомогательную ватерлинию ВЛ₃₀ под углом $\theta = 15^0$ относительно ватерлинии ВЛ₁₅. Затем для ватерлинии ВЛ₃₀ снимают значения входящих $y_{п,30}$ и выходящих $y_{л,30}$ ординат. Далее, используя полученные значения ординат, производят для ватер-

линии ВЛ₃₀ расчёт, аналогичный тому, который выполнялся для ВЛ₁₅ по формулам

$$\left. \begin{aligned}
 y_{f,30} &= \frac{M_{x,30}}{S'_{30}} \\
 M_{x,30} &= \frac{1}{2} \int_{-L/2}^{+L/2} (y_{п,30}^2 - y_{л,30}^2) dx = \frac{\Delta L}{2} \sum (y_{п,30}^2 - y_{л,30}^2) \\
 S'_{30} &= \int_{-L/2}^{+L/2} (y_{п,30} - y_{л,30}) dx = \Delta L \sum (y_{п,30} - y_{л,30}) \\
 J_{x,30} &= J'_{x,30} - y_{f,30}^2 S'_{30} \\
 J'_{x,30} &= \frac{1}{3} \int_{-L/2}^{+L/2} (y_{п,30}^3 - y_{л,30}^3) dx = \frac{\Delta L}{3} \sum (y_{п,30}^3 - y_{л,30}^3) \\
 r_{30} &= \frac{J_{x,30}}{V}
 \end{aligned} \right\} (2.60)$$

Выполнив кренование для ряда ВЛ (водоизмещений V) получают данные для построения графика зависимости $r = f(\theta)$.

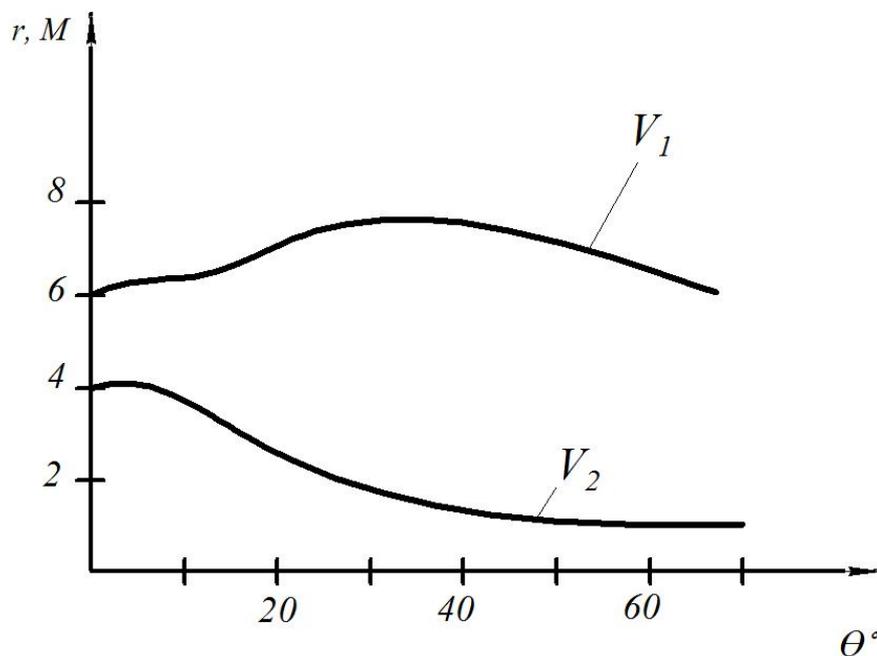


Рис. 2.22. Зависимости $r = f(\theta)$ для водоизмещений V_1 и V_2 ; ($V_1 < V_2$)

2.13 Плечо статической устойчивости и восстанавливающий момент при больших наклонениях. Диаграмма статической устойчивости (ДСО). Диаграмма Руда

2.13.1 Плечо статической устойчивости и восстанавливающий момент при больших наклонениях

Плечо статической устойчивости – это отрезок \overline{GK} (рис. 2.23) пары сил веса D и плавучести $\rho g V$. Определить его можно, проведя перпендикуляр из точки G на направление действия силы $\rho g V$. Обозначается отрезок \overline{GK} через l , т.е. $\overline{GK} = l$ (рис. 2.23).

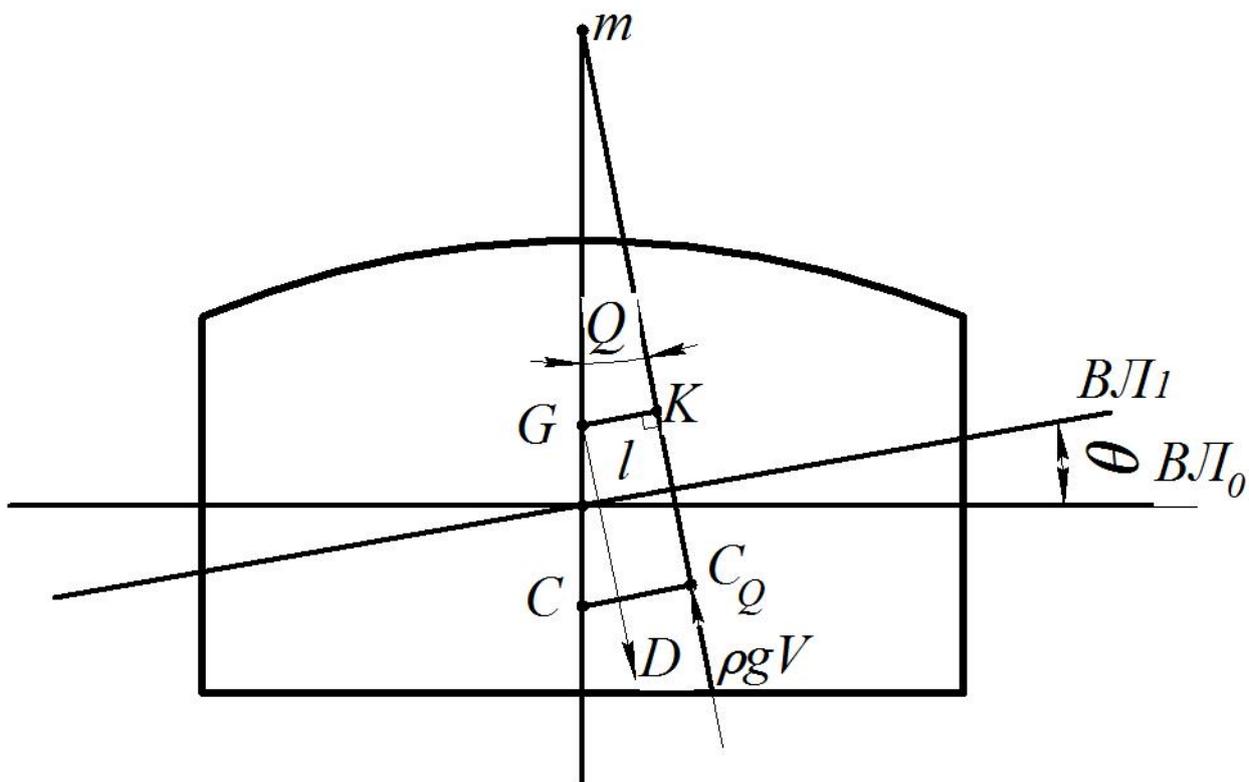


Рис. 2.23 Формирование плеча статической устойчивости при больших наклонениях

Определим величину GK из построений, приведенных на рис. 2.24.

$$M_B = Dl = D[y_\theta \cos \theta + (z_\theta - z_c) \sin \theta - a \sin \theta]. \quad (2.62)$$

2.13.2 Диаграмма статической остойчивости (ДСО). Диаграмма Рида

Графическое изображение зависимостей $l = f(\theta)$ и $M_B = f(\theta)$ (рис. 2.25) называют диаграммой статической остойчивости, при этом углы крена на правый борт откладываются по положительной оси координат, а углу крена на левый борт – по отрицательной оси координат.

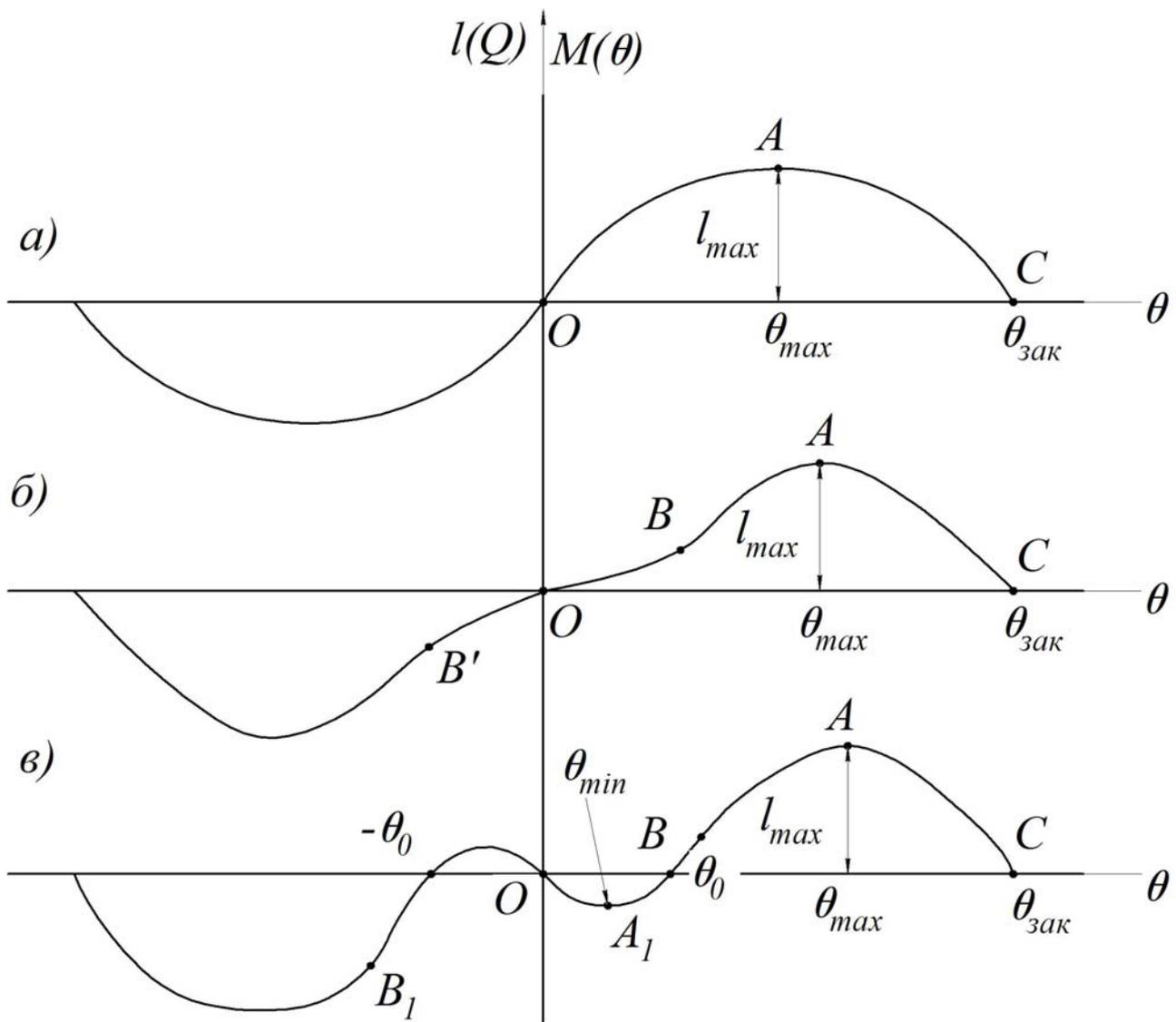


Рис. 2.25. Диаграммы статической остойчивости:
 а) – при большом значении h_0 ; б) – S – образная; в) – с отрицательной метацентрической высотой

Зависимости $l = f(\theta)$ и $M_B = f(\theta)$ нечетные, поэтому при отрицательных углах они изображаются в 3-м квадранте. Обычно $l(\theta)$ и $M_B(\theta)$ изображаются в 1-ом квадранте при $\theta > 0$.

Формы ДСО могут быть различными в зависимости от формы обводов и положения ЦТ судна. На рис. 2.25, а показана наиболее распространенная ДСО, имеющая форму синусоиды с точкой перегиба в начале координат. Такая ДСО характерна для судов сравнительно широких (ледоколы, танкеры), имеющих отношение $L/B = 5 \div 6$. На рис. 2.25, б изображена ДСО, имеющая дополнительные перегибы в точках В и В'. Такая диаграмма называется S-образной. Такая ДСО характерна для высокобортных в т.ч. и пассажирских судов. Обеспечивая достаточную остойчивость, она способствует умерению-повышению периода бортовой качки.

На рис. 2.25, в изображена ДСО с отрицательным начальным участком для правого борта и положительным начальным участком левого борта. При $\theta = 0$ судно неустойчиво (такие ДСО называются с отрицательной метацентрической высотой). При $\theta \geq \theta_0$ и $\theta \leq -\theta_0$ плечо $l(\theta)$ становится положительным. Поэтому такие суда плавают с начальными углами крена $\theta = \theta_0$ или $\theta = -\theta_0$. Такие диаграммы ДСО бывают у аварийных судов при затоплении ряда отсеков, у судов с лесом при неправильной его загрузке. Способствует появлению начального крена обледенение верхней палубы и надстроек. Чтобы спрямить корабль при ДСО на рис. 2.25, в нельзя применять поперечное перемещение груза, т.к. это приведет к увеличению крена на противоположный борт, а надо восстановить начальную остойчивость. Для этого осуществляют мероприятия по снижению ЦТ корабля. Это осуществляют либо переносом груза по вертикали вниз, либо приемом груза, ниже предельной плоскости. Первый вариант обычно трудно осуществим, т.к. разово трудно переместить в уже загруженные трюмы дополнительный груз. Поэтому на практике широко используют второй вариант путем приема забортной воды в балластные цистерны, расположенные в междудонном пространстве.

На всех диаграммах точка А характеризует максимум плеча статической остойчивости l_{\max} , а соответствующий угол обозначается Q_{\max} . Точка С характеризует угол, при котором плечо статической остойчивости становится нулевым и судно теряет статическую остойчивость. Эта точка на ДСО называется закатом диаграммы, а соответствующий угол обозначается $\theta_{\text{зак}}$. Для ДСО на рис. 2.25, в угол Q_{\min} соответствует точке А₁.

Свойства ДСО.

1. Плечи статической остойчивости и восстанавливающие моменты, имеющие знак плюс, расположены над осью абсцисс, а имеющие знак минус – под осью абсцисс.

2. Близкая к началу координат часть ДСО представляет собой прямую линию. При малых углах крена θ изменение диаграммы подчиняется метацентрической формуле остойчивости

$$M_B = Dh\theta,$$

где θ – угол крена в радианах.

Но $M_B = Dl$, а $l = h\theta$, поэтому зависимость между l и θ является линейной и изображается прямой линией.

3. Касательная к ДСО в начале координат отсекает на перпендикуляре к оси абсцисс, восстановленном в точке $\theta = 57,3^0$, отрезок АВ, который в масштабе плеч статической остойчивости равен начальной метацентрической высоте (h).

$$tg\alpha = \frac{l}{\theta}, \text{ но } l = h\theta \Rightarrow tg\alpha = h.$$

$$\text{Но } tg\alpha = \frac{AB}{OB}, \text{ при } OB = 1 \text{ рад, } tg\alpha = AB = h.$$

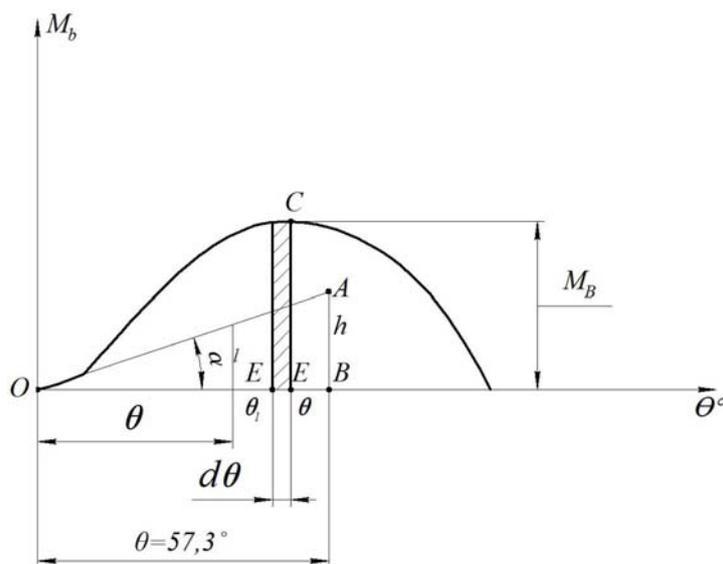


Рис. 2.25. Схема для анализа свойств ДСО

4. Часть площади ДСО в масштабе моментов, расположенная слева от данной ординаты, представляет собой работу восстанавливающего момента при выпрямлении судна от угла крена θ_1 , при котором проведена эта ордината, до прямого положения ($\theta = 0$), или работу наклонения судна из прямого положения до угла крена θ_1 (рис. 2.26).

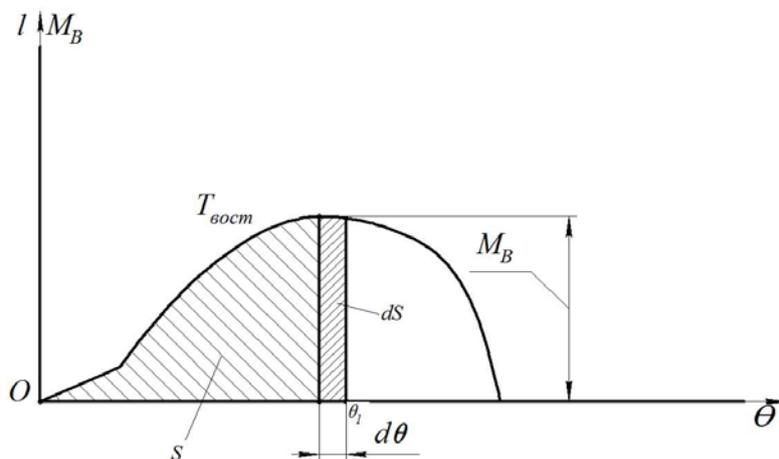


Рис. 2.26. Схема для расчета работы восстанавливающего момента $T_{\text{восст}}$ с помощью ДСО

Выделим элемент площади ДСО

$$dS = -M_B d\theta.$$

Знак «-» в уравнении показывает, что угол крена θ при выпрямлении корабля уменьшается. Уравнение показывает, что элементарная площадка dS равна элементарной работе $dT_{\text{восст}}$ восстанавливающего момента M_B . После интегрирования получим

$$S = -\int_{\theta}^0 M_B d\theta = \int_0^{\theta} M_B d\theta = T_{\text{восст}} \quad \text{или} \quad S = T_{\text{восст}}.$$

5. При крене, соответствующем восходящей ветви ДСО, положение судна является устойчивым, а при крене, соответствующем нисходящей ветви ДСО, положение судна является неустойчивым.

$$M_B = Dl = D[y_{\theta} \cos \theta + (z_{\theta} - z_c) \sin \theta - a \sin \theta].$$

2.14 Составляющие восстанавливающего момента и плеча статической устойчивости при больших углах крена

Подобно тому, как при малых углах крена восстанавливающий момент M_B состоял из момента устойчивости формы M_Φ и момента устойчивости веса M_g , при больших углах крена также можно записать

$$M_B = Dl = M_\Phi - M_g, \quad (2.63)$$

где в соответствии с формулой (2.62)

$$M_\Phi = D[y_\theta \cos \theta + (z_\theta - z_c) \sin \theta], \quad (2.64)$$

$$M_g = Da \sin \theta = D(z_\theta - z_c) \sin \theta. \quad (2.65)$$

Из (2.64) следует, что M_Φ зависит только от формы корпуса и положения ЦВ. Чем больше величина M_Φ , тем больше будет значение восстанавливающего момента M_B , действующего на судно при крене.

Величина M_g в основном зависит от положения ЦТ судна и действует в противоположном направлении по отношению к моменту M_B снижая таким образом величину последнего и, следовательно, устойчивость судна.

Представляя составляющие момента M_B через произведения

$$\left. \begin{aligned} M_\Phi &= Dl_\Phi \\ M_g &= Dl_g \end{aligned} \right\} \quad (2.66)$$

и принимая во внимание (2.64), (2.65), можно записать

$$l_\Phi = y_\theta \cos \theta + (z_\theta - z_c) \sin \theta, \quad (2.67)$$

$$l_g = a \cos \theta = (z_g - z_c) \sin \theta, \quad (2.68)$$

где l_Φ – плечо устойчивости формы; l_g – плечо устойчивости веса.

Таким образом, учитывая (2.67), (2.68) и (2.50) для плеча l устойчивости статической можно записать

$$l = l_{\phi} - l_g. \quad (2.69)$$

Геометрически плечо остойчивости формы l_{ϕ} равно длине перпендикуляра (отрезок $\overline{G_0R}$ на рис. 2.24), опущенного из ЦВ (точка C_0) на линию подержания C_0RK (рис. 2.24).

Геометрически плечо остойчивости веса l_g характеризуется отрезком C_0E (рис. 2.24), величина которого при данном угле крена θ зависит от возвышения ЦТ над ЦВ (отрезок $\overline{GC_0} = z_g - z_c$).

Приведенные выражения (2.63), (2.64), (2.66-2.69) являются основными при расчете остойчивости на больших углах крена.

2.15 Производная от плеча статической остойчивости по углу крена. Обобщенная метацентрическая высота

Продифференцируем (2.61) по углу крена θ и получим

$$\frac{dl}{d\theta} = \frac{dy_{\theta}}{d\theta} \cos \theta - y_{\theta} \sin \theta + \frac{d(z_{\theta} - z_c)}{d\theta} \sin \theta + (z_{\theta} - z_c) \cos \theta - a \cos \theta. \quad (2.70)$$

В соответствии с (2.44)

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_{\theta}}{d\theta} &= r_{\theta} \cos \theta \\ \frac{d(z_{\theta} - z_c)}{d\theta} &= r_{\theta} \sin \theta \end{aligned} \right\}. \quad (2.71)$$

Подставляя (2.71) в (2.70) получим

$$\frac{dl}{d\theta} = r_{\theta} \cos^2 \theta - y_{\theta} \sin \theta + r_{\theta} \sin^2 \theta - a \cos \theta + (z_{\theta} - z_c) \cos \theta \quad (2.72)$$

или

$$\frac{dl}{d\theta} = r_{\theta} - y_{\theta} \sin \theta + (z_{\theta} - z_c) \cos \theta - a \cos \theta. \quad (2.73)$$

При $\theta = 0$; $\sin\theta = 0$; $\cos\theta = 1$;

$$z_\theta = z_c \Rightarrow \left. \frac{dl}{d\theta} \right|_{\theta=0} = r - a = h_0 \quad (2.74),$$

т.е. производная от уравнения (2.70) при $\theta = 0$ равна начальной метацентрической высоте h_0 .

По аналогии с (2.74) обозначают

$$\frac{dl}{d\theta} = h_\theta, \quad (2.75, \text{а})$$

где h_θ – обобщенная метацентрическая высота. Для обобщенной метацентрической высоты справедливо равенство

$$h_\theta(\theta = 0) = h_0. \quad (2.75, \text{б})$$

Таким образом, при $\theta = 0^\circ$, h_θ обращается в начальную метацентрическую высоту. При малых углах крена начальная метацентрическая высота характеризует превышение метацентра m над ЦТ G , т.е. расстояние \overline{mG} . При больших углах крена обобщенная метацентрическая высота также характеризует превышение метацентра m_θ над ЦТ, но это будет расстояние $m_\theta K$ (рис. 2.26').

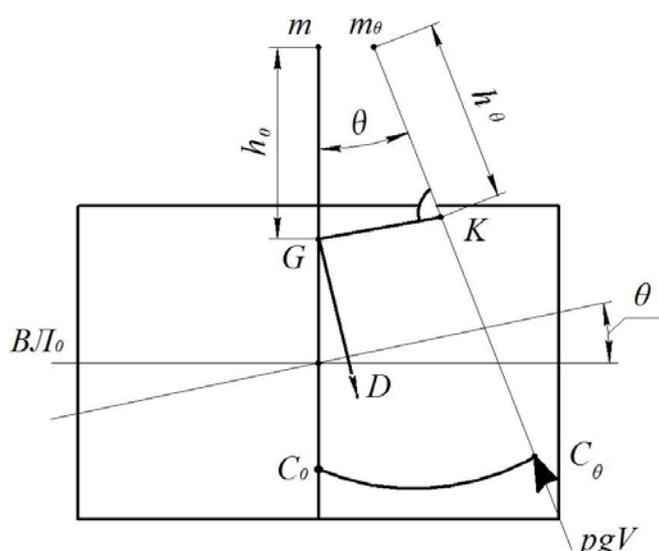


Рис. 2.26'. Схема для анализа геометрического смысла обобщенной метацентрической высоты

На диаграмме статической остойчивости величину h_θ можно получить, проведя касательную в любой точке и отложив по горизонтальному направлению угол крена $\theta = 1$ рад (рис. 2.27, а).

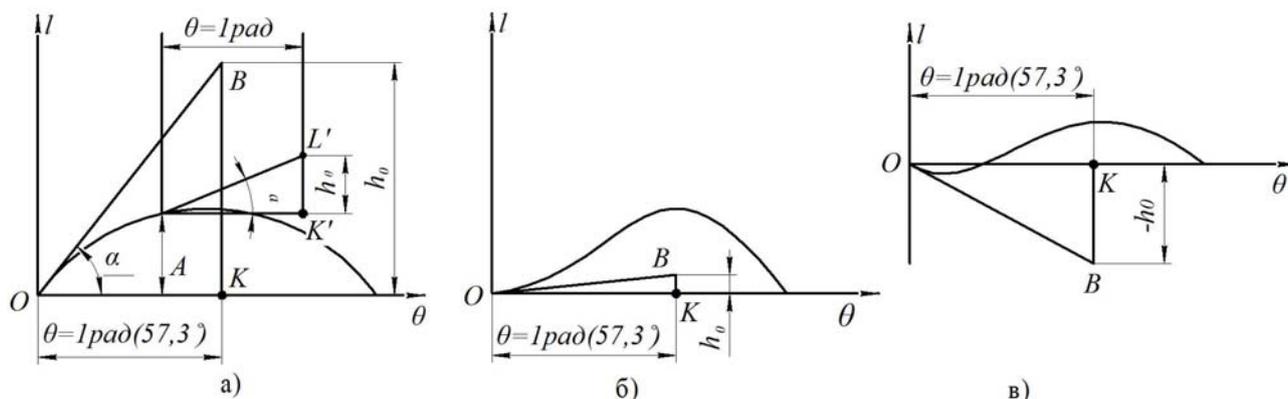


Рис. 2.27. Типовые диаграммы статической остойчивости

Тогда $\frac{dl}{d\theta} = \operatorname{tg}\alpha = \frac{h_\theta}{1 \text{ рад}} = h_\theta$. Таким образом вертикальный отрезок KL' ,

восстановленный от горизонтальной линии из точки K' , где $\theta = 1$ рад, и доведенный до касательной к диаграмме статической остойчивости (касательная проводится к ДСО в любой точке) будет характеризовать искомую обобщенную метацентрическую высоту h_θ . С другой стороны ордината касательной к ДСО в точке K , где угол крена $\theta = 1$ рад будет равна начальной метацентрической высоте h_0 (см. рис. 2.27 а, б, в). Из приведенных данных видно, что величина h_0 будет близка к нулю (S -образная ДСО на рис. 2.27, б) или бывает отрицательной (см. рис. 2.27, в).

Из рис. 2.27 видно, что для нахождения начальной поперечной метацентрической высоты h_0 необходимо провести касательную в точке $\theta = 0^\circ$ к кривой $l(\theta)$ и по оси абсцисс отложить отрезок, равный одному радиану ($\theta = 1$ рад). Метацентрическая высота h_0 определится отрезком KB , выполненном в масштабе плеч. Указанное свойство позволяет проверить правильность построения начального участка ДСО и значение начальной поперечной метацентрической высоты, вычисленной по формулам.

2.16 Динамическая остойчивость. Плечо динамической остойчивости

На судно могут действовать не только статические кренящие моменты, но и динамические, приложенные резко (качка, шквал ветра, рывок буксирного

троса). В этом случае судно получает не только запас потенциальной энергии, но и кинетической. При этом вся приложенная к судну энергия должна компенсироваться работой восстанавливающего момента, которая характеризует динамическую остойчивость судна.

Работу, которую совершает корабль при наклонении, можно оценить двояко.

Из теоретической механики известно, что работа силы на линейном перемещении, совпадающем с её перемещением, равна произведению силы на это перемещение. Применительно к наклонению судна работа T будет производиться при подъёме силы веса D на расстояние d (рис. 2.28)

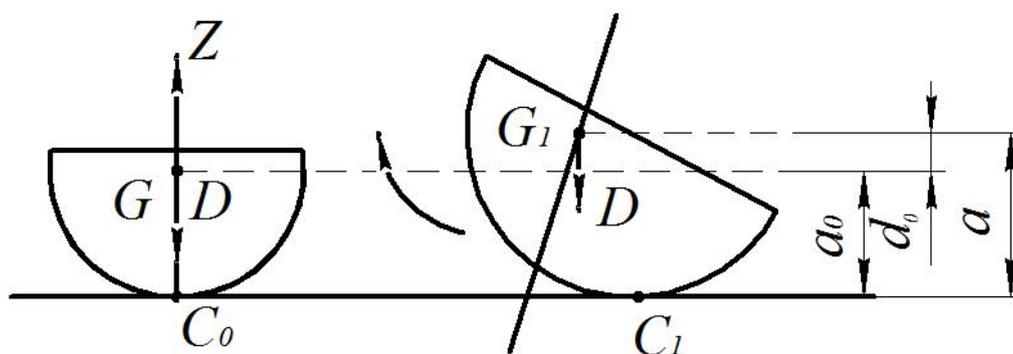


Рис. 2.28. Подъем ЦТ при качении твердого полуцилиндра по плоскости

При этом работа T будет равна

$$T = D \cdot d, \quad (2.76)$$

где D – сила веса, н; d – изменение расстояния по высоте между центрами тяжести и величины (точки G и C_0 , G'_1 и C_1) или иначе плечо динамической остойчивости. Начальное расстояние между точками G и C_0 при этом равняется a_0 .

Определённая аналогия с наклонением корпуса судна имеет место при качении полуцилиндра по плоскости. При этом (рис. 2.28) ЦТ полуцилиндра G поднимается над точкой опоры C , на что тратится энергия. Величина подъема точки G над точкой опоры C будет равна d .

С другой стороны при резком наклонении корабля на угол крена $d\theta$ будет совершаться работа T , направленная на преодоление сопротивления от действия восстанавливающего момента M_B . Величину этой работы можно определить из выражения

$$T = \int_0^{\theta} M_B d\theta = D \int_0^{\theta} l d\theta. \quad (2.77)$$

Но $T = Dd \Rightarrow$ приравняв (2.76) и (2.77), получим, что плечо d

$$d = \frac{T}{D} = \int_0^{\theta} l d\theta. \quad (2.78)$$

Таким образом, плечо динамической остойчивости d будет равно работе восстанавливающего момента, приходящейся на единицу веса водоизмещения при крене судна на угол $d\theta$.

Из формул (2.78) и (2.74) следует, что

$$\frac{dl}{d\theta} = l; \quad d' = l \quad (2.79)$$

и

$$d'' = h_{\theta}. \quad (2.80)$$

Для графического определения величины d проанализируем выражение (2.76), которое в соответствии с рис. 2.28 представим в таком виде

$$T = D(a - a_0). \quad (2.81)$$

Т.е. работа при подъеме веса D определяется произведением этого веса на изменение расстояние между ЦВ и ЦТ. Это изменение в начальном и конечном положениях судна геометрически и будет являться плечом динамической остойчивости d

$$d = a - a_0. \quad (2.82)$$

Учитывая сказанное, величину d определим графически. Для этого необходимо от точки К (рис. 2.29) отложить по линии $C_{\theta}M_{\theta}$ величину a_0 .

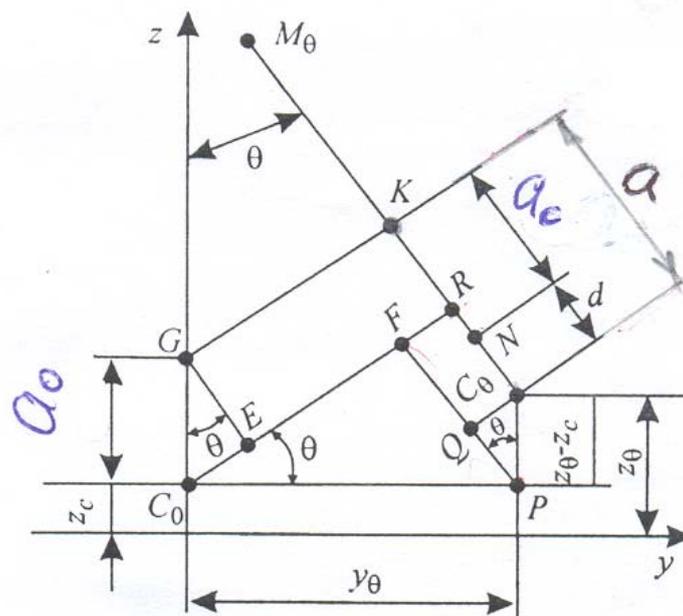


Рис. 2.29. Схема для определения плеча динамической устойчивости

$$\overline{KC}_\theta = a; \overline{KN} = a_0$$

Тогда отрезок \overline{NC}_θ будет характеризовать d , т.е. изменение расстояния по высоте между ЦТ и ЦВ

$$\overline{NC}_\theta = d.$$

По построению на рис. 2.29 плечо $d = \overline{NC}_\theta = \overline{KC}_\theta - a_0 = a - a_0$, где a – расстояние между ЦТ и ЦВ в конечном положении судна, равняется отрезку длиной \overline{KC}_θ . В свою очередь $\overline{KC}_\theta = \overline{KR} + \overline{FP} - \overline{QP}$. Из схемы на рис. 2.29 видно, что

$$\overline{KC}_\theta = a_0 \cos \theta + y_\theta \sin \theta - (z_\theta - z_c) \cos \theta. \quad (2.82, a)$$

Окончательно, в результате преобразования выражения (2.82, а) с учетом (2.82), получим

$$\begin{aligned} d &= a_0 \cos \theta + y_\theta \sin \theta - (z_\theta - z_c) \cos \theta - a_0 = \\ &= y_\theta \sin \theta - (z_\theta - z_c) \cos \theta - a_0(1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad (2.83)$$

Уравнение (2.83) является основным для определения плеча динамической устойчивости при конечных углах крена θ .

2.17 Диаграмма динамической устойчивости (ДДО)

Если результаты расчета по (2.83) откладывать в виде отрезков d по оси Od , то получим точки для построения графика, называемого диаграммой динамической устойчивости $d = f(\theta)$.

Поскольку, учитывая (2.78)

$$d = \int_0^{\theta} l d\theta,$$

то диаграмма $d = f(\theta)$ является интегральной кривой по отношению к диаграмме статической устойчивости (рис. 2.30)

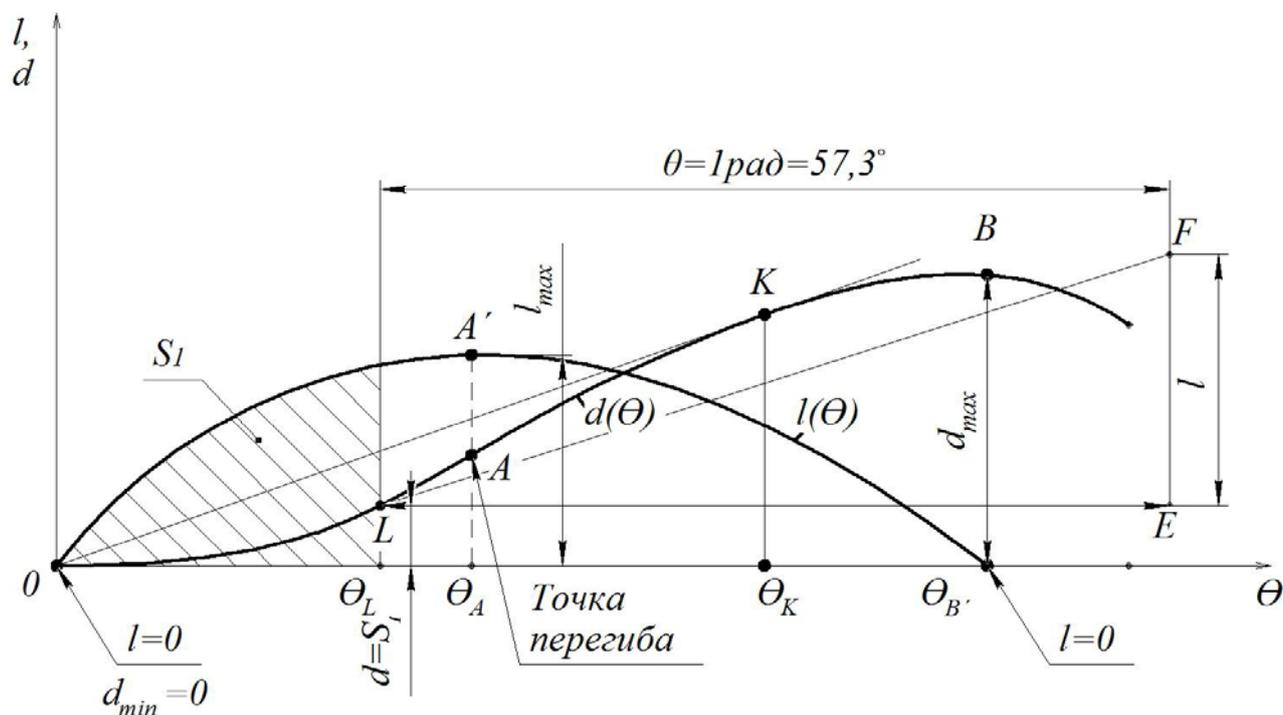


Рис. 2.30. Диаграммы динамической и статической устойчивости при положительной метацентрической высоте h_0

Характерным точкам диаграммы $d(\theta)$ – начало O , точка перегиба A , точка B (максимума диаграммы) соответствуют характерные точки ДСО (см.

рис. 2.30). Так, например, точка А соответствует максимуму диаграммы статической остойчивости (точка А'), а точка В – точке В' её заката, т.е. кривая $d(\theta)$ имеет тах и точку перегиба на восходящем участке. Из сопоставления ДДО и ДСО видно, что тах ДДО имеет место в точке В при значении угла θ_B , соответствующем закату ДСО. С физической точки зрения это объясняется тем, что максимальная работа, затраченная на преодоление сопротивления восстанавливающего момента будет соответствовать потере судном положения устойчивого равновесия.

Точка перегиба А на ДДО будет при значении угла θ_A , которому соответствует максимум на кривой ДСО. Поэтому касательная к ДДО, проведенная через начало координат, может достигнуть положения точки касания К к ДДО, только при угле $\theta_K > \theta_A$. Это свойство касательной к ДДО используется при нормировании динамической остойчивости судов.

Так как первая производная от плеча динамической остойчивости $d' = l_\theta$, то проведя при угле крена θ в точке L касательную к ДДО и отложив на направлении \overline{LE} угол, равный одному радиану, и восстановив перпендикуляр к оси абсцисс, найдем отрезок \overline{FE} , равный плечу статической остойчивости при угле крена $Q_c = 1$ рад ($57,3^\circ$).

Для построения ДДО используются данные ДСО, с которой берутся значения ординат (плечи l) и подставляются в формулу (2.78)

$$d = \int_0^{\theta} l d\theta .$$

Применяя для этого интеграла с переменным верхним пределом формулу квадратур получим

$$d = \frac{\delta\theta}{2} \sum l, \tag{2.84}$$

где $\delta\theta$ – угловой промежуток, рад, равный $\Delta\theta^0/57,3^0$.

Схема вычисления плеч ДДО по формуле (2.78) для заданных значений угла крена θ приведена в таблице 2.2

Таблица 2.2 – Табличная схема расчета плеч динамической остойчивости

Угол крена, θ^0	Плечо статической остойчивости, l	Интегральная сумма, $\sum l_{\text{инт}}$	Плечо динамической остойчивости, $d = \frac{\Delta\theta}{2} \sum l_{\text{инт}}$
0	0	0	0
10^0	l_{10}	A	d_{10}
20^0	l_{20}	B	d_{20}
30^0	l_{30}	C	d_{30}

2.18 Кривые ЦВ и метацентров. Полярная диаграмма

Если для ряда углов крена $\theta = (10^0, 20^0, 30^0, \dots)$ нанести положения ЦВ и метацентров, отложить плечи статической и динамической остойчивости, плечи остойчивости формы и соединить соответствующие точки плавными кривыми, то получится диаграмма, изображенная на рис. 2.31.

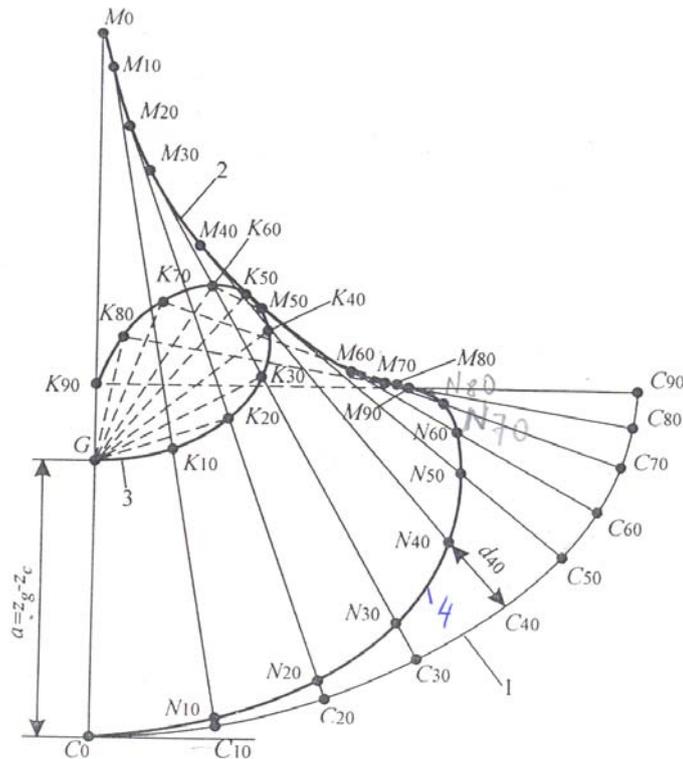


Рис. 2.31. Кривая ЦВ (1), кривая метацентров (2), полярная диаграмма (3)

На этой диаграмме кривая метацентров (2) будет геометрическим местом центров кривизны кривой ЦВ (1), т.е. эволютой или огибающей нормалей; кривая ЦВ (1) будет эвольвентой или разверткой кривой метацентров.

Эти кривые обладают следующими свойствами:

1. Касательная к кривой ЦВ (1) показывает положение ватерлинии при заданном угле крена θ ;

2. Линия действия силы поддержания, проведенная из соответствующего ЦВ перпендикулярно плоскости действующей ватерлинии, будет нормальной к кривой ЦВ (1);

3. Радиус кривизны кривой ЦВ (1) в данной точке равен метацентрическому радиусу, вычисленному для площади действующей ватерлинии.

Зная положение лишь M_θ и C_θ для различных углов крена θ , можно быстро получить графическим способом плечи статической и динамической остойчивости, плечи остойчивости формы, метацентрические радиусы и т.п.

Если из ЦТ точки G опустить перпендикуляр на линию действия силы поддержания в точку K , то длина этого перпендикуляра \overline{GK} будет характеризовать плечо статической остойчивости (l). Производя это построение для нескольких углов θ , получим ряд точек K_θ и соответствующих плеч статической остойчивости. Огибающая всех точек K_θ называется полярной диаграммой статической остойчивости (плеч статической остойчивости).

Если от точек диаграммы статической остойчивости отложить отрезки длиной $a = z_g - z_c$, то получим плавную кривую $C_0N_{10}\dots N_{90}$, называемую полярной диаграммой динамической остойчивости 4.

На этой диаграмме будут расположены окончания плеч динамической остойчивости d . А сами плечи будут характеризоваться отрезками $N_{10}C_{10}\dots N_{90}C_{90}$, расположенными между кривой ЦВ (1) и полярной диаграммой динамической остойчивости 4.

Литература

1. Статика корабля: учебное пособие / Р.В. Борисов, В.В. Луговский, Б.В. Мирохин, В.В. Рождественский. – 2-е изд., перераб. и доп. СПб: Судостроение, 2005. – 256 с.
2. Расчеты по статике корабля: методические пособия / Р.В. Борисов, И.В. Качанов, Н.Н. Юрков. Мн.: БНТУ, 2007. – 87 с.
3. Ходкость судна: методическое пособие / В.Б. Жинкин, И.В. Качанов. Мн.: БНТУ, 2010. – 56 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Глава 2 Остойчивость	5
2.1 Общее понятие остойчивости	5
2.2 Теорема Эйлера для равнообъемных ватерлиний.....	7
2.3 Перемещение ЦВ при малых равнообъемных наклонениях	10
2.4 Метацентры и метацентрические радиусы.....	14
2.5 Восстанавливающий момент. Метацентрические формулы остойчивости. Понятие о метацентрической высоте.....	17
2.6 Метацентрическая высота как мера начальной остойчивости	21
2.6.1 Анализ начальной остойчивости судна при $z_m > z_g$ и $z_g > z_c$	22
2.6.2 Анализ начальной остойчивости судна при $z_c > z_g$ и $z_m > z_c$	22
2.6.3 Анализ начальной остойчивости судна при соотношении ординат $z_g > z_m$	23
2.6.4 Анализ начальной остойчивости судна при равенстве ординат z_m и z_g ($z_m = z_g$).....	24
2.7 Составляющая восстанавливающего момента. Остойчивость формы и остойчивость веса	26
2.8 Остойчивость на больших углах крена. Определение координат центра величины и метацентра при больших наклонениях	28
2.9 Способ расчёта плеч статической остойчивости при равнообъемных наклонениях (Способ Крылова-Дарньи).....	31
2.10 Расчёт поперечного метацентрического радиуса r_θ по методу Крылова-Дарньи.....	35
2.11 Графический метод определения толщины поправочного слоя ε и центра тяжести равнообъемной ватерлинии ВЛ ₁	37
2.12 Порядок расчета J_{x_θ} и r_θ на больших углах крена.....	38
2.13 Плечо статической остойчивости и восстанавливающий момент при больших наклонениях. Диаграмма статической остойчивости (ДСО). Диаграмма Рида	43
2.13.1 Плечо статической остойчивости и восстанавливающий момент при больших наклонениях	43
2.13.2 Диаграмма статической остойчивости (ДСО). Диаграмма Рида.....	45
2.14 Составляющие восстанавливающего момента и плеча статической остойчивости при больших углах крена	49
2.15 Производная от плеча статической остойчивости по углу крена. Обобщенная метацентрическая высота	50
2.16 Динамическая остойчивость. Плечо динамической остойчивости.....	52
2.17 Диаграмма динамической остойчивости (ДДО)	56

2.18 Кривые ЦВ и метацентров. Полярная диаграмма	58
Литература	60
Приложение А Экзаменационные вопросы по дисциплине «Теория корабля»	63
Приложение Б Учебная программа дисциплины «Теория корабля».....	68

Приложение А Экзаменационные вопросы по дисциплине «Теория корабля»

Экзаменационные вопросы по дисциплине «Теория корабля» для студентов специальности 1-37 03 02 (Часть 1)

1. Мореходные качества судна – плавучесть, остойчивость, непотопляемость, ходкость, умеренность качки, управляемость
2. Теоретический чертеж судна (ТЧС); проекции «Бок», «Корпус», «Полуширота»; главные плоскости ТЧС; понятие о батоксах, ватерлиниях, шпангоутах
3. Связанная и полусвязанная системы координат. Формулы перехода от связанной к полусвязанной системе координат
4. Главные размерения судна (L_{\max} , $L_{п.п}$, $L_{квл}$, B_{\max} , B , T , T_m , H , F)
5. Соотношения главных размерений. Коэффициенты (α , β , δ , φ , χ)
6. Посадка судна и ее параметры
7. Силы, действующие на плавающее судно. Условия равновесия судна
8. Масса и координаты центра тяжести судна. Водоизмещение порожнего судна; водоизмещение судна с полным грузом; водоизмещение с полным грузом и с 10% запасов топлива. Дедвейт судна
9. Объемное водоизмещение судна
10. Координаты ЦВ при посадке судна прямо и на ровный киль
11. Элементы плавучести судна. Кривые элементов плавучести
12. Приближенное вычисление определенных интегралов по формулам правила квадратур (трапеции)
13. Повышение точности правила трапеции (добавочные, приведенные, исправленные ординаты)
14. Вычисление площадей и объемов по ординатам теоретического чертежа
15. Интегральные кривые и их свойства
16. Вертикальная и горизонтальная схемы для вычисления ординат интегральной кривой
17. Строевая по шпангоутам и ее свойства
18. Строевая по ватерлиниям и ее свойства
19. Вычисление координат ЦВ
20. Вычисление абсциссы, центра тяжести площадей ватерлинии и шпангоута
21. Кривая водоизмещения $V(Z)$ и грузовой размер $M(Z)$
22. Свойства кривой водоизмещения $V(Z)$
23. Грузовая шкала. Грузовая марка
24. Кривая абсциссы центра величины (вывод)
25. Кривая ординаты центра величины (вывод)
26. Вычисление координат кривых X_c и Z_c при прямой посадке корабля
27. Площадь шпангоута: вычисление по правилу трапеции

28. Масштаб Бонжана. Расчет объемного водоизмещения V и абсциссы ЦВ X_c для судна, плавающего с дефферентом
29. Масштаб Бонжана. Расчет площади шпангоута при посадке судна с креном
30. Интегральные кривые Власова
31. Диаграмма Фирсова. Запас плавучести. Грузовая марка
32. Добавочный слой и клинья водоизмещения
33. Равнообъемные наклонения. Правило представления изменения посадки корабля
34. Условие изменения посадки без наклонения судна

Экзаменационные вопросы
по дисциплине «Теория корабля»
для студентов специальности 1-37 03 02
(часть 2)

1. Добавочный слой и клинья водоизмещения при изменении углубления.
2. Равнообъемные наклонения.
3. Условие изменения посадки без наклонения судна.
4. Изменение средней осадки судна при приеме или расходовании малого груза.
5. Прием и расходование большого груза.
6. Изменение посадки при изменении плотности воды.
7. Моменты инерции площади ватерлинии.
8. Кривые элементов теоретического чертежа.
9. Общее понятие остойчивости.
10. Теорема Эйлера для равнообъемных ватерлиний.
11. Перемещение ЦВ при малых равнообъемных наклонениях.
12. Метацентры и метацентрические радиусы.
13. Восстанавливающий момент. Метацентрические формулы остойчивости. Понятие о метацентрической высоте.
14. Метацентрическая высота как мера начальной остойчивости.
15. Составляющие восстанавливающего момента. Остойчивость формы и остойчивость веса.
16. Определение координат центра величины и метацентра при больших наклонениях.
17. Способ расчета плеч статической остойчивости при равнообъемных накоплениях (способ Крылова-Дарньи).
18. Порядок расчета момента инерции $I_{x\theta}$ и поперечного метацентрического радиуса r_θ на больших углах крена.
19. Плечо статической остойчивости и восстанавливающий момент при больших наклонениях. Диаграмма статической остойчивости (ДСО).

20. Составляющие восстанавливающего момента и плеча статической устойчивости при больших углах крена.
21. Производная от плеча статической устойчивости по углу крена. Обобщенная метацентрическая высота.
22. Динамическая устойчивость. Плечо динамической устойчивости.
23. Диаграмма динамической устойчивости.
24. Кривые ЦВ и метацентров. Полярная диаграмма.
25. Расчет плеч устойчивости формы. Расчет и построение диаграмм статической и динамической устойчивости.
26. Интерполяционные кривые плеч устойчивости формы.
27. Диаграмма Рида и пантокарены.
28. Определение статических углов крена с помощью диаграммы статической устойчивости.
29. Определение динамических углов крена и предельных кренящих моментов с помощью ДСО.
30. Определение угла крена и предельных динамических моментов судна, плавающего с начальным креном, с помощью ДСО.
31. Определение углов крена и предельных кренящих моментов с помощью диаграммы динамической устойчивости.
32. Определение по ДДО предельных угла опрокидывания и динамического (опрокидывающего) момента при качке с амплитудой θ_0 .
33. Определение предельно допустимого момента $M_{доп,2}$, соответствующего углу заливания $\theta_{зал}$.
34. Нормирование устойчивости судна. Дополнительные требования по устойчивости судна.
35. Изменение начальной устойчивости при вертикальном перемещении груза.
36. Поперечно- и продольно-горизонтальные перемещения груза.
37. Изменение начальной устойчивости при приеме и расходовании малого груза.
38. Влияние подвешенного груза на устойчивость.
39. Влияние перекатывающихся грузов на устойчивость.
40. Влияние жидкого груза на устойчивость.
41. Изменение устойчивости при приеме и расходовании относительно большого груза.
42. Непотопляемость. Общие положения. Способы расчета непотопляемости.
43. Изменение средней осадки и координат центра тяжести площадки ВЛ после затопления отсека III-й категории.
44. Изменение координат ЦВ после затопления отсека. Угол крена θ после затопления отсека.
45. Изменение поперечного метацентрического радиуса после затопления отсека III-й категории.
46. Изменение продольного метацентрического радиуса после затопления отсека III-й категории.

47. Расчет непотопляемости при затоплении группы отсеков.
48. Кривая предельных объемов отсеков.
49. Кривая предельных длин отсеков. Проверка размещения поперечных длин отсеков.
50. Учет влияния внутреннего насыщения на характер кривой предельных длин отсеков.
51. Спрявление поврежденного корабля по методам А.Н.Крылова и В.Г.Власова.
52. Требования к остойчивости повреждённого судна.

Экзаменационные вопросы

по разделу «Динамика корабля» для студентов специальности 1-37 03 02
по дисциплине «Теория корабля» (часть 3)

1. Режимы движения судов
2. Основные составляющие сопротивления движению судна
3. Коэффициент полного сопротивления и его составляющие
4. Вязкостное сопротивление, пограничный слой и его характеристики (длина и толщина)
5. Сопротивление трения, понятие технически гладкой эквивалентной пластины, учет шероховатости и кривизны судовой поверхности
6. Сопротивление формы корпуса корабля
7. Волновое сопротивление корпуса корабля. Носовые и кормовые (расходящиеся и поперечные) волны
8. Сопротивление выступающих частей и воздуха
9. Сопротивление движению на мелководе
10. Сопротивление движению судов в каналах
11. Сопротивление судна при плавании в штормовых условиях
12. Буксировочное сопротивление R , буксировочная мощность движителя N_E и эффективная мощность двигателя P_S , пропульсивный коэффициент η_d и КПД передачи η_S
13. Приближенные методы расчета буксировочной мощности N_E
14. Модельный эксперимент. Экспериментальные установки для изучения сопротивления
15. Требования, предъявляемые к модельному эксперименту
16. Способы пересчета вязкостного сопротивления. Остаточное сопротивление
17. Приближенные способы расчета сопротивления
18. Способ приближенного расчета сопротивления для водоизмещающих судов (серия быстроходных и среднескоростных судов)
19. Способы приближенного расчета сопротивления для универсальных среднескоростных судов
20. Сопротивление среды движению судов с динамическим поддержанием
21. Сопротивление среды движению судов на подводных крыльях
22. Сопротивление среды движению судов на воздушной подушке

23. Соппротивление среды движению судов-экранопланов
24. Движители. Назначение и классификация (активные и гидрореактивные). Крыльчатые и водометные движители
25. Теория идеального двигателя. Параметры идеального движителя (упор, полезная мощность, КПД, коэффициент нагрузки)
26. Основы теории крыла. Гидродинамические и геометрические характеристики крыла. Авиационный и сегментный пр – офиль крыла.
27. Конструкция и геометрия гребного винта
28. Шаг винта, винтовая поверхность, шаговый треугольник, дисковое и шаговое отношения
29. Гидродинамические характеристики гребного винта (поступь, скольжение, относительная поступь)
30. Упор и момент сопротивления вращению винта. Коэффициенты упора и момента K_T и K_Q
31. Кривые действия гребного винта $T(h_A)$, $Q(h_A)$
32. Гидродинамические характеристики (ГДХ) гребного винта $K_T(J)$; $K_Q(J)$; $\eta_0(J)$
33. Требования, предъявляемые к моделированию работы гребных винтов
34. Влияние геометрии гребных винтов (шагового отношения P/D , дискового отношения A_E/A_0 , количества лопастей Z_p , формы сечения лопасти) на их ГДХ
35. Диаграммы (корпусная, машинная) для проектирования гребных винтов. Коэффициенты задания. Типы заданий при проектировании гребных винтов
36. Попутный поток, коэффициент расчетного попутного потока W_T
37. Влияние неравномерности потока на работу гребного винта
38. Засасывание потока. Коэффициент засасывания t , пропульсивный коэффициент η_D
39. Кавитация гребных винтов. Кавитация лопастей винта
40. Негативные последствия кавитации и способы ее устранения

Проектирование гребных винтов

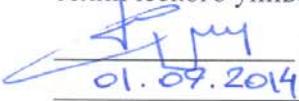
41. Выбор геометрических характеристик (диаметр D , число лопастей Z_p , относительная толщина δ , дисковое отношение $(A_E/A_0)_{\min}$, количество винтов Z
42. Подбор гребных винтов по диаграммам. Основные 4 расчетные схемы при проектировании гребных винтов
43. Движители быстроходных судов
44. Сильно кавитирующие гребные винты
45. Работа пропульсивного комплекса судна. Поле устойчивой работы ДВС
46. Винтовые характеристики судна. Гидродинамически легкий и тяжелый винты
47. Ходовые характеристики судна

Приложение Б Учебная программа дисциплины «Теория корабля»

Белорусский национальный технический университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной,
воспитательной, аналитической и
информационной работе
Белорусского национального
технического университета


Г.Ф. Ловшенко

01.09.2014

Регистрационный № УД-Р70 55-8/104

ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ

Учебная программа учреждения высшего образования

по учебной дисциплине для специальности

1-37 03 02 Кораблестроение и техническая эксплуатация водного
транспорта

2014 г.

СОСТАВИТЕЛИ:

И.В. Качанов, заведующий кафедрой «Кораблестроение и гидравлика» Белорусского национального технического университета, доктор технических наук, профессор

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

Кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство» Белорусского национального технического университета
(протокол № 11 от 4 июля 2014 г.);

А.П. Афанасьев, Зав. отделом «Исследования направлений развития водного транспорта» БелНИИТ «Транстехника»

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой «Кораблестроение и гидравлика» Белорусского национального технического университета
(протокол № 14 от 8 июля 2014 г.)

Заведующий кафедрой



И.В. Качанов

Методической комиссией факультета энергетического строительства Белорусского национального технического университета
(протокол № 9 от 7 июля 2014 г.)

Председатель методической комиссии



М.И. Богданович

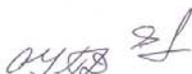
Научно-методическим советом Белорусского национального технического университета
(протокол № 6 от 20.06.2014)

Ответственный за редакцию:



д.т.н., проф. И.В. Качанов

Ответственный за выпуск:



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Типовая учебная программа учебной дисциплины «Теория корабля» разработана в соответствии с требованиями образовательного стандарта по специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта».

Целью изучения учебной дисциплины является подготовка студентов к проектно-конструкторской и научно-исследовательской деятельности; освоение ими методов расчета и экспериментального определения мореходных качеств кораблей и судов.

Основными задачами учебной дисциплины являются:

- формирование у студентов необходимого объема знаний о физических процессах взаимодействия кораблей с жидкостью при их движении, методах расчета мореходных качеств;

- обеспечение освоения студентами методов расчета характеристик плавучести, остойчивости, непотопляемости, а также спуска судов на воду;

- формирование у студентов необходимого объема знаний о физике и законах взаимодействия судов с жидкостью при их поступательном движении, обеспечение освоения ими методов расчета сопротивления сферы движения судов;

- обеспечение студентов знаниями по классификации и принципам действия основных типов судовых движителей, основ теории расчета гребных винтов;

- формирование у студентов знаний о гидродинамической теории качки;

- обеспечение студентов знаниями вопросов устойчивости на курсе и поворотливости, а также методов расчета основных динамических и маневренных качеств судна;

- обеспечение студентов практическими навыками выполнения расчетов по теории корабля при проектировании, постройке, эксплуатации, ремонте и модернизации судов различных классов и типов.

Учебная дисциплина базируется на знаниях, полученных при освоении общенаучных и общепрофессиональных дисциплин таких, как «Математика», «Физика». Полученные в процессе освоения дисциплины знания, умения и навыки используются при изучении специальных дисциплин, например, «Технология судостроения», «Проектирование судов», «Техническая эксплуатация судов».

В результате изучения учебной дисциплины «Теория корабля» студент должен:

знать:

- основные законы изменения плавучести и остойчивости речных и морских судов, методы их расчета;

- основные положения теории сопротивления среды движению судов;

- основы теории судовых движителей и методы их расчета;

- основные методы расчета характеристик качки;

- основы теории управляемости;

уметь:

- выполнять расчеты характеристик плавучести, остойчивости и спуска судов, оценивать степень соответствия характеристик плавучести и остойчивости требованиям Белорусского Речного Регистра;

- рассчитывать сопротивление судна и использовать полученные знания для решения задач ходкости при проектировании судов;

- рассчитывать гребные винты с целью определения их основных характеристик и характеристик ходкости судов;

- рассчитывать характеристики качки при любых ветро-волновых режимах;

- рассчитывать и анализировать характеристики управляемости судов.

владеть:

- навыками расчета сопротивления воды движению судна на море, мелководье и в каналах;

- методами расчета характеристик качки;

- выполнять расчеты характеристик плавучести и остойчивости судов;

- исследовательскими навыками;

- междисциплинарным подходом при решении проблем;

- способностью к межличностным коммуникациям.

быть способен:

- находить оптимальные решения при создании техники водного транспорта с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения и безопасности жизнедеятельности;

- составлять описание проводимых исследований, подготовку отчетов, обзоров и другой технической документации.

На изучение дисциплины «Теория корабля» по специальности отведено 294 учебных часа, из них 148 часов – аудиторные занятия (лекции – 116 часов; практические занятия – 32 часов).

ПРИМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ВИДАМ ЗАНЯТИЙ

Наименование раздела и темы	Количество аудиторных часов			
	лекции	практические занятия	лабораторные занятия	всего

Раздел I. Статика корабля	66	16	-	82
Тема 1.1. Введение. Основные определения. Задачи «Теория корабля»	8	4	-	12
Тема 1.2. Приближённые вычисления при решении задач теории корабля	8	4	-	12

Тема 1.3. Посадка судна	4	4	-	8
Тема 1.4. Центры тяжести и величины судна	10	4	-	14
Тема 1.5. Остойчивость при малых углах крена	6	-	-	6
Тема 1.6. Остойчивость при больших углах крена	8	-	-	8
Тема 1.7. Непотопляемость	10	-	-	10
Тема 1.8. Практическое приложение теории плавучести	6	-	-	6
Тема 1.9. Практические приложения теории остойчивости	6	-	-	6
Раздел II. Динамика корабля	50	16	-	66
Тема 2.1. Сопротивление воды движению судна	10	4	-	14
Тема 2.2. Основные положения теории идеального движителя	8	4	-	12
Тема 2.3. Экспериментальные исследования работы гребных винтов	8	4	-	12
Тема 2.4. Управляемость корабля	7	-	-	11
Тема 2.5. Качка судна. Виды качки и ее отрицательные последствия	7	4		7
Тема 2.6. Спуск судов на воду	6	-	-	6
Тема 2.7. Пути совершенствования мореходных качеств судна	4	-	-	4
ВСЕГО	116	32	-	148

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

РАЗДЕЛ I. СТАТИКА КОРАБЛЯ

Тема 1.1. Введение. Основные определения. Задачи дисциплины «Теория корабля»

Классификация кораблей и классификация организации. Геометрия и основные сечения корпуса судна. Теоретический чертеж и коэффициенты полноты. Вычисление геометрических характеристик ватерлиний и шпангоутов. Системы координат (связанная и полусвязанная).

Тема 1.2. Приближённые вычисления при решении задач теории корабля

Назначение приближенных вычислений. Правило трапеции (ПТ), методы Чебышева и Симпсона. Интегральные кривые и их свойства. Применение ПТ к построению интегральных кривых. Вычисление площадей ватерлиний и шпангоутов с помощью коэффициентов полноты подводной части судна. Статические моменты площадей и объемов и координаты их центров тяжести. Моменты инерции. Применение ПТ при решении задач теории корабля.

Тема 1.3. Посадка судна

Главные размерения. Соотношение главных размерений. Посадка судна и её параметры. Силы, действующие на плавающее судно. Условия равновесия судна. Прием и расходование малого груза. Кривая числа тонн на 1 см осадки. Прием и расходование большого груза. Изменение посадки при изменении плотности воды.

Тема 1.4. Центры тяжести и величины судна

Масса и координаты центра масс (тяжести) судна. Объемное водоизмещение и координаты центра величины (ЦВ) при посадке судна прямо и на ровный киль. Строевые по ватерлиниям и по шпангоутам. Кривая водоизмещения и грузовой размер. Грузовая шкала. Элементы площади ватерлинии. Кривые абсцисс. ЦВ и центров тяжести площадей ватерлиний. Кривые аппликат ЦВ. Площадь шпангоута. Интегральные кривые Власова. Масштаб Бонжана.

Определение водоизмещения и координат ЦВ для различных случаев посадки судна. Кривые элементов теоретического чертежа.

Тема 1.5. Остойчивость при малых углах крена

Общее понятие остойчивости. Малые равнообъемные наклонения. Теорема Эйлера. Перемещение ЦР при малом равнообъемном наклонении. Метacentры и метacentрические радиусы. Восстанавливающий момент. Метacentрические формулы остойчивости. Метacentрическая высота как мера начальной остойчивости. Составляющие восстанавливающего момента. Остойчивость формы и веса.

Тема 1.6. Остойчивость при больших углах крена

Остойчивость на больших углах крена. Определение координат ЦВ при больших углах крена.

Производная от плеча статической остойчивости по углу крена. Обобщённая метацентрическая высота. Динамическая остойчивость. Плечо динамической остойчивости. Кривые ЦВ и метацентров. Полярная диаграмма. Способы расчета плеч статической остойчивости при равнообъемных наклонениях. Интерполяционные кривые плеч остойчивости формы. Задачи, решаемые с помощью диаграмм статической и динамической остойчивости.

Тема 1.7. Непотопляемость

Основные определения и требования. Расчет непотопляемости судна. Определение элементов затапливаемых отсеков. Способ приема груза (способ переменного водоизмещения). Способ исключения отсека (способ постоянного водоизмещения). Расчет непотопляемости при заполнении группы отсеков. Диаграмма непотопляемости Благовещенского. Кривые предельных длин отсеков. Практические способы спрямления повреждённого корабля. Способы расчета диаграммы статической остойчивости у повреждённого корабля. Требования БИРР к элементам непотопляемости транспортных судов.

Тема 1.8. Практическое приложение теории плавучести

Изменение посадки и остойчивости при переносе, приема и расходовании груза. Понятие о нейтральной плоскости. Метацентрическая диаграмма. Перенос груза.

Тема 1.9. Практические приложения теории остойчивости

Прием и расходование груза. Влияние на остойчивость подвешенного, перекачиваемого, жидкого и сыпучего грузов. Изменение остойчивости при движении на волнении.

РАЗДЕЛ II. ДИНАМИКА КОРАБЛЯ

Тема 2.1. Сопротивление воды движению судна

Общее понятие о сопротивлении воды. Сопротивление трения и формы. Волновое сопротивление. Сопротивление выступающих частей и воздуха. Сопротивление воды на мелководье и в каналах. Сопротивление воды при движении судна в штормовых условиях. Модельный эксперимент, пересчет его результатов на натуру. Приближенные способы расчета сопротивления. Определение мощности главных двигателей.

Тема 2.2. Основные положения теории идеального движителя

Назначение и классификация движителей. Основные положения теории идеального движителя. Конструкция и геометрия гребного винта. Гидродинамические характеристики гребного винта, потери энергии в гребном винте, коэффициент полезного действия.

Тема 2.3. Экспериментальные исследования работы гребных винтов

Экспериментальные исследования работы гребных винтов. Диаграммы для расчета гребных винтов. Взаимодействие гребного винта с корпусом судна.

Пропульсивный коэффициент. Кавитация и ее влияние на работу гребных винтов. Способы отдаления кавитации. Проектирование гребных винтов. Двигатели быстроходных судов. Совместная работа гребного винта и судовой энергетической установки. Винты регулируемого шага. Ходовые (пропульсивные) испытания судов.

Тема 2.4. Управляемость корабля

Управляемость корабля как совокупность двух качеств – устойчивости на курсе и поворотливости. Силы и моменты, действующие на корпус судна и судовой руль. Влияние гребных винтов на управляемость. Устойчивость судна на курсе, поворотливость. Циркуляция судна и ее элементы. Падение скорости и крен судна на циркуляции. Ухудшение управляемости при заднем ходе. Экспериментальные методы исследования управляемости.

Тема 2.5. Качка судна. Виды качки и ее отрицательные последствия

Системы координат и уравнение движения. Бортовая качка на тихой воде. Килевая и вертикальная качка. Линейная теория качки на тихой воде и на регулярном волнении. Качка корабля на нерегулярном волнении. Элементы нелинейной теории бортовой качки. Стабилизация судна на волнении. Экспериментальные методы изучения качки.

Тема 2.6. Спуск судна на воду

Понятие о спуске судов. Диаграммы спуска. Боковой спуск.

Тема 2.7. Пути совершенствования мореходных качеств судов

Общие положения. Способы снижения сопротивления воды движению судна. Методы повышения эффективности работы гребных винтов. Способы умерения качки. Вспомогательные средства управления судном.

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Список литературы

Основная литература

1. Борисов, Р.В. Статика корабля: учебное пособие / Р.В. Борисов, В.В. Луговский, Б.В. Мирохин. – 2-е изд. – СПб.: Судостроение, 2005. – 256 с.
2. Жинкин, В.Б. Теория и устройство корабля: учебник / В.Б. Жинкин. – 3-е изд. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с.
3. Мирохин, Б.В. Теория корабля: учебник / Б.В. Мирохин, В.Б. Жинкин, Г.Н. Зильман. – Л.: Судостроение, 1989. – 352 с.
4. Алферьев, М.Я. Теория корабля: учебник / М.Я. Алферьев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1972. – 448 с.

5. Лесюков, В.А. Теория и устройство судов внутреннего плавания: учебник для вузов водн. транспорта / В.А.Лесюков. – М.: Транспорт, 1982. – 303 с.

Дополнительная литература

1. Магула, В.Э. Сборник задач по теории, устройству судов и движителям / В.Э. Магула, Б.И. Друзь, С.К. Кулагин. – Л.: Судостроение, 1968. – 296 с.

2. Грамузов, Е.М. Специальные главы теории корабля: учебное пособие / Е.М. Грамузов. – Н.Новгород: изд. центр Нижегород. техн. ун-та, 1992. – 247 с.

3. Кагановский, М.С. Теория и устройство судов. Расчеты и задачи / М.С. Кагановский. – М.: Транспорт, 1968. – 228 с.

4. Жинкин, В.Б. Теория корабля. Ходкость судна. Методическое пособие для практических занятий по теории корабля / В.Б. Жинкин, И.В. Качанов, И.Е. Товстых. Мн.: БНТУ, 2009. – 58 с.

5. Борисов, Р.В. Расчеты по статике корабля / Р.В. Борисов, И.В. Качанов, Н.Н. Юрков. – Мн.: БНТУ, 2007. – 85 с.

6. Мирохин, Б.В. Расчеты по теории корабля. Ч I. Метод. указ. к расчетам по статике и ходкости корабля / Б.В. Мирохин, В.Б. Жинкин, Г.И. Зильман. – Изд. центр ЛКИ, 1987. – 67 с.

7. Мирохин, Б.В. Расчеты по теории корабля. Ч. II. Метод. указ. к расчетам по качке и управляемости корабля / Б.В. Мирохин, В.Б. Жинкин, Г.И. Зильман. – Изд. центр ЛКИ, 1987– 57 с.

Организация самостоятельной работы студентов

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие формы самостоятельной работы:

– самостоятельная работа в виде решения индивидуальных задач в аудитории во время проведения практических занятий под контролем преподавателя в соответствии с расписанием;

– управляемая самостоятельная работа, в том числе в виде выполнения индивидуальных расчетных заданий с консультациями преподавателя;

– подготовка рефератов по индивидуальным темам, в том числе с использованием патентных материалов;

– подготовка курсовой работы по индивидуальным заданиям, в том числе разноуровневым заданиям.

Рекомендуемые средства диагностики

Для оценки достижений студента рекомендуется использовать следующий диагностический инструментарий:

– устный и письменный опрос во время практических занятий;

– проведение текущих контрольных работ (заданий) по отдельным темам;

– защита выполненных на практических занятиях индивидуальных заданий;

- защита выполненных в рамках управляемой самостоятельной работы индивидуальных заданий;
- собеседование при проведении индивидуальных и групповых консультаций;
- выступление студента на конференции по подготовленному реферату;
- защита курсовой работы, состоящей из 2-х частей;
- сдача зачета по дисциплине;
- сдача экзамена.

Примерный перечень тем практических занятий

1. Расчет кривых элементов теоретического чертежа.
2. Расчет остойчивости судна при поперечных наклонениях.
3. Расчет буксировочного сопротивления судна по результатам модельных испытаний.
4. Расчет гребного винта.
5. Расчет и построение паспортной диаграммы.

Примерное содержание курсового проекта

В соответствии с программой практических занятий по темам «Статика корабля», «Сопротивление воды движению судна» и «Судовые (корабельные) движители» студентами планируется выполнение курсового проекта состоящего из двух частей I и II. Часть I включает в себя следующие виды работ:

- 1) расчет кривых элементов теоретического чертежа;
- 2) расчет масштаба Бонжана, а также водоизмещение и координат центра величины для судна, имеющего дифферент;
- 3) расчет остойчивости на больших углах крена;
- 4) расчет непотопляемости;
- 5) расчет продольного спуска судна.

Часть II предусматривает:

- 1) расчет сопротивления и буксировочной мощности в функции от скорости судна;
- 2) расчет гребного винта, обеспечивающего заданную скорость движения судна;
- 3) выбор главного двигателя;
- 4) расчет гребного винта, обеспечивающего при полном использовании мощности двигателя максимальную скорость движения судна;
- 5) расчет и построение паспортной диаграммы судна.

Рекомендуемые методы (технологии) обучения

Основными методами обучения, отвечающими целям изучения дисциплины, являются:

- элементы проблемного обучения (проблемное изложение, вариативное изложение, частично-поисковый метод), реализуемые на лекционных занятиях;

- элементы учебно-исследовательской деятельности, реализуемые на практических занятиях и при самостоятельной работе;
- коммуникативные технологии (дискуссия, учебные дебаты, «мозговой штурм» и другие формы и методы), реализуемые на практических занятиях и конференциях;
- проектные технологии, используемые при проектировании конкретного объекта, реализуемые при выполнении курсового проекта.

Примерная тематика рефератов

1. Форма судового корпуса.
2. Элементы теоретического чертежа.
3. Плавучесть судна.
4. Изменение посадки и остойчивости при проведении грузовых операций.
5. Влияние на остойчивость перемещающихся грузов.
6. Остойчивость на больших углах крена.
7. Динамическая остойчивость.
8. Нормирование остойчивости судна.
9. Непотопляемость.
10. Основные составляющие сопротивления движению судна.
11. Буксировочная мощность судна.
12. Определение сопротивления экспериментальным путем.
13. Приближенные способы расчета сопротивления движению судна.
14. Конструкция и геометрия гребных винтов.
15. Гидродинамические характеристики гребных винтов.

Примерный перечень контрольных вопросов и заданий для проведения самостоятельной работы

Раздел I. Статика корабля.

1. Что представляет собой теоретический чертеж судна?
2. Начертите систему координат, принятую в статике корабля.
3. Какими параметрами характеризуется посадка судна? Какими бывают частные случаи посадки судна?
4. Дайте определение центра величины. Какие силы действуют на плавающее судно? Условия равновесия судна.
5. Напишите формулы для объемного водоизмещения и координат центра величины при посадке прямо и на ровный киль.
6. Укажите свойства строевых по ватерлиниям и шпангоутам.
7. Будут ли равны площади, ограниченные строевыми по шпангоутам и ватерлиниям и осями координат?
8. Какая связь существует между строевой по ватерлиниям и грузовым размером?

9. Напишите формулы для площади ватерлинии, абсциссы ее центра тяжести и моментов инерции относительно продольной и поперечной осей, проходящих через ее центр тяжести.

10. Какая зависимость существует между кривыми абсцисс центра величины и центра тяжести площади ватерлиний?

11. Какие задачи решаются с помощью интегральных кривых площадей шпангоутов В.Г. Власов?

12. Объясните принцип построения масштаба Бонжана и укажите, какие задачи решаются с его помощью.

13. Объясните методику построения диаграммы Г.Н. Фирсова.

14. Какие зависимости включают в себя кривые элементов теоретического чертежа?

15. Что такое запас плавучести, и какими мерами он обеспечивается?

16. Объясните назначение грузовой марки.

17. Сформулируйте условия приема на судно малого и большого груза без крена и дифферента.

18. Как влияет изменение плотности воды на посадку судна?

19. Дайте определение остойчивости корабля.

20. Сформулируйте теорему Эйлера для равнообъемных наклонений.

21. Покажите, как перемещается центр величины при равнообъемных наклонениях, укажите свойства поверхности и кривой центров величины.

22. Что такое метацентры и метацентрические радиусы, как вычисляются метацентрические радиусы?

23. Разъясните природу возникновения восстанавливающего момента при накренивании корабля. Что такое плечо статической остойчивости?

24. Что является мерой начальной остойчивости? Напишите формулы для начальной метацентрической высоты.

25. Как определяются плечи остойчивости формы и остойчивости веса?

26. Объясните методику построения и назначение интерполяционных кривых плеч остойчивости формы.

27. Изобразите диаграмму статической остойчивости с положительной и отрицательной начальной метацентрической высотой.

28. Что такое динамическая остойчивость корабля и что представляет собой диаграмма динамической остойчивости?

29. Укажите связь между плечами динамической и статической остойчивости и обобщенной метацентрической высотой.

30. Какая связь существует между диаграммами статической и динамической остойчивости?

31. Укажите все характеристики точки на диаграмме статической остойчивости, определите обобщенную метацентрическую высоту при произвольном угле крена.

32. Как определить угол крена корабля при воздействии на него произвольно заданного кренящего момента, приложенного статически?

33. Как определить предельный угол крена корабля и предельный момент, приложенный статически?

34. Как по диаграмме статической остойчивости определяется угол крена от динамически приложенного кренящего момента?

35. Как по диаграмме статической и динамической остойчивости определить предельный угол крена и предельный кренящий динамически приложенный момент?

36. Объясните методику и последовательность расчета плеч остойчивости по второму способу А.Н. Крылова–Дарньи.

37. Как меняются посадка и остойчивость корабля при вертикальном и горизонтальном переносе груза?

38. Поясните методику определения изменения остойчивости корабля при приеме и расходовании малого груза.

39. Дайте определение нейтральной плоскости, напишите ее уравнение.

40. В какой последовательности решается задача об определении изменения остойчивости и посадки корабля при приеме и расходовании большого груза?

41. Как оценить влияние подвешенного груза на остойчивость корабля?

42. В каких случаях, почему и как жидкий груз сможет оказать влияние на остойчивость корабля?

43. Как уменьшить вредное влияние жидкого груза на остойчивость корабля?

44. Разъясните физическую природу процесса влияния сыпучего груза на остойчивость корабля.

45. Какое положение корабля относительно набегающих волн наиболее опасно с точки зрения потери остойчивости и почему?

46. Что такое критерий погоды и как он определяется?

47. Какие требования предъявляют Правила Российского Морского Регистра судоходства к диаграммам статической остойчивости и начальной метацентрической высоте судов и кораблей?

48. Опишите методику выполнения опыта кренования и объясните цель его проведения.

49. Дайте определение непотопляемости.

50. Разъясните, какой тип затопляемых отсеков наиболее опасен и почему.

51. Какие существуют способы расчета непотопляемости, и для каких типов затопляемых отсеков они используются?

52. Объясните подробную суть способа постоянного водоизмещения.

53. Как соотносятся между собой значения метацентрических высот аварийного судна, определенные способами приема груза и постоянного водоизмещения.

54. Что понимается под определением «эквивалентный отсек» при затоплении группы отсеков?

55. Нарисуйте диаграмму С.Н. Благовещенского и разъясните методику ее использования.

56. Дайте определение предельной линии погружения, предельной аварийной ватерлинии и предельной длины отсека.

57. Расскажите последовательность построения кривой предельных длин отсеков.

58. Опишите пять характерных случаев состояния аварийного корабля. Какие методы спрямления используются на практике?

59. Что представляют собой таблицы непотопляемости А.Н.Крылова?

60. Какие требования предъявляет Российский Морской Регистр судоходства к элементам остойчивости поврежденного судна?

61. Какие виды спуска корабля существуют?

62. Опишите основные элементы спускового устройства.

63. Какие силы действуют на корабль при спуске до и после его входа в воду?

64. Что такое потерянная сила плавучести?

65. Кратко охарактеризуйте периоды продольного спуска.

66. Может ли произойти опрокидывание корабля при продольном спуске, если его центр тяжести не перешел порога?

67. Какие меры принимаются для предотвращения опрокидывания?

68. Как определяется момент начала всплытия при спуске?

69. Что такое баксово давление?

70. Разъясните явление соскакивания при спуске, вероятность его появления, возможные последствия.

71. Расскажите, как определяются возможности опрокидывания, момент начала всплытия и величина баксова давления по английской и французской диаграммам спуска.

72. В чем состоит принципиальное отличие английской и французской диаграмм спуска?

73. Объясните различие между явлениями опрокидывания при продольном и боковом спуске.

Раздел II. Динамика корабля

74. Какие разделы включает в себя раздел «Ходкость судна»?

75. В чем физические причины возникновения сопротивления движению судна?

76. Каким критерием динамического подобия определяется режим движения судна?

77. Перечислите типы высокоскоростных судов с динамическим поддержанием.

78. Почему подавляющее количество судов движется в режиме плавания?

79. Какие составляющие сопротивления движению судна являются основными?

80. Каково соотношение величин вязкостного и волнового сопротивлений и от чего оно зависит?

81. Что включает в себя вязкостное сопротивление?

82. В чем отличие тел хорошо- и плохообтекаемых?

83. Как зависит волновое сопротивление от скорости движения и глубины погружения судна?

84. Какие дополнительные составляющие сопротивления вы знаете?

85. Чем определяется буксировочная мощность судна?
86. На чем основываются приближенные способы расчета сопротивления?
87. Почему способы первой группы наименее точные?
88. В чем заключается основная идея способов второй группы?
89. Каковы основные причины неточности расчетов сопротивления с использованием приближенных способов?
90. Каковы причины роста сопротивления в штормовых условиях?
91. Перечислите основные характеристики ледяного покрова.
92. Какие суда предназначены для движения в сплошных льдах, в битых льдах?
93. Чем объясняется изменение сопротивления судна при движении на мелкой воде? В каналах?
94. Какие требования предъявляются к глубине воды на мерной миле?
95. Какие обводы характерны для глиссирующих судов?
96. Перечислите основные составляющие глиссирующих судов.
97. В чем заключаются условия равновесия СПК?
98. Назовите составляющие сопротивления СПК в переходном и расчетном режимах движения.
99. Какие типы СВП существуют и в чем их различия?
100. В чем главная особенность зависимости сопротивления СЭП от скорости движения?
101. Почему быстроходные суда с динамическим поддержанием не бывают большого водоизмещения?
102. Какие из методов снижения вязкостного сопротивления находят применение на практике?
103. Назовите два основных пути снижения волнового сопротивления.
104. На каких судах реализуются способы снижения волнового сопротивления?
105. Как образуются винтовая линия, винтовая поверхность?
106. Дайте определения шагового и дискового отношений.
107. Что является рабочим элементом гребного винта?
108. Дайте определение поступи и скольжения гребного винта.
109. Суммой каких скоростей является результирующая скорость обтекания элемента лопасти?
110. Дайте определение силы упора и момента сопротивления вращению гребного винта.
111. Какие режимы работы гребного винта вы знаете?
112. С какой целью проводятся испытания моделей гребных винтов?
113. Почему испытываются модели, а не натурные гребные винты?
114. Какие требования должны выполняться при моделировании работы гребных винтов?
115. Какие критерии динамического подобия являются определяющими при моделировании работы различных типов гребных винтов?
116. Какие геометрические характеристики гребных винтов оказывают наибольшее влияние на их гидродинамические характеристики?

117. В чем заключается способ построения диаграмм для расчета гребных винтов?
118. Какие коэффициенты задания используются при проектировании гребных винтов?
119. За счет чего возникает попутный поток?
120. Какие составляющие попутного потока вы знаете?
121. В чем заключаются различия между коэффициентами попутного потока: номинального, эффективного и расчетного?
122. Как влияет неравномерность поля скоростей на работу гребного винта?
123. Почему полезная тяга не равна упору гребного винта?
124. Что представляет собой пропульсивный коэффициент?
125. Как влияют коэффициенты попутного потока и засасывания на пропульсивный коэффициент?
126. Дайте определение кавитации.
127. В чем причина возникновения кавитации крыльев и лопастей гребных винтов?
128. Какой критерий динамического подобия определяет степень развития кавитации?
129. Как изменяются гидродинамические характеристики винтов в первой и во второй стадиях кавитации?
130. В чем причины кавитационной эрозии?
131. Каким образом можно отдалить кавитацию гребного винта?
132. В каких режимах работают кавитирующие и частично погруженные гребные винты?
133. Почему большинство морских транспортных судов являются одновинтовыми?
134. Из каких условий выбираются количество лопастей, направление вращения и дисковое отношение гребного винта?
135. Сколько имеется основных схем проектирования гребных винтов по диаграммам? Когда они используются?
136. В чем заключаются основные особенности некавитирующих гребных винтов быстроходных судов?
137. Каковы особенности гребных винтов ледоколов?
138. Что собой представляют характеристики двигателя, гребного винта?
139. Что собой представляет винтовая характеристика двигателя?
140. В чем заключается соответствие гребного винта двигателю?
141. Что общего между гидродинамически тяжелыми и легкими винтами?
142. Перечислите основные достоинства и недостатки гребных винтов регулируемого шага.
143. Что собой представляет паспортная диаграмма судна? Какие задачи решаются с ее помощью?
144. В чем назначение ходовых испытаний? Какие требования предъявляются к их проведению?
145. Что называется реверсом судна?

146. Как протекает процесс реверса ВФШ, ВРШ?

147. Что такое статическая неуравновешенность гребного винта и в чем она проявляется?

148. Какие причины вызывают динамическую неуравновешенность винта и к чему приводит такая неуравновешенность?

149. Назовите четыре основные составляющие шумности гребного винта и их порождающие причины.

150. Когда имеют место парциальные режимы работы гребных винтов и чем они сопровождаются?