

Практическое занятие №1

Остойчивость судна

Цель работы

Приобретение навыков самостоятельного расчета загрузки транспортного судна и оценка его мореходных качеств по материалам информации об остойчивости.

Содержание отчета

Отчет должен включать:

- цель работы
- данные индивидуального задания
- расчет координат центра тяжести судна и проверка посадки, остойчивости и прочности.

Остойчивость судна

Начальная остойчивость судна

В механике различают три вида статического равновесия тела. Если тело находится в положении равновесия и при малом наклонении возвращается в своё первоначальное положение, то равновесие тела называют *устойчивым*. Если при малом отклонении тело остается в том положении, в какое его отклонили, то равновесие будет *безразличным*. Наконец, если при малом отклонении тело стремится ещё больше отклониться от своего первоначального положения, то его равновесие будет *неустойчивым*.

В статике судна применительно к равновесию плавающего судна в условиях возможного воздействия на него внешних моментов известное в механике свойство статического устойчивости принято называть *статической остойчивостью* или просто *остойчивостью*.

Таким образом, остойчивость можно определить как способность судна, выведенного из положения вертикального равновесия под действием внешних сил, вновь возвращаться в исходное положение равновесия, после прекращения действия этих сил.

Приведенное выше определение показывает, что остойчивость судна тесно связано с его равновесием и служит характеристикой последнего. Судно считается *остойчивым*, если его равновесие устойчиво, и *неостойчивым*, если его равновесие неустойчиво или безразлично.

Изучая остойчивость судна, *различают остойчивость на малых углах наклона*, или *начальную остойчивость*, и *остойчивость на больших углах наклона*. Это вызвано тем, что обычно судно устойчиво лишь при отклонениях, лежащих в определённых пределах, различных для разных судов, и поэтому целесообразно сначала исследовать его остойчивость при весьма малых (теоретически бесконечно малых) отклонениях от положения равновесия, а затем уже определить пределы устойчивости при больших отклонениях. Кроме того, при изучении бесконечно малых наклонов имеется возможность принять ряд допущений и получить простые математические зависимости.

При изучении устойчивости судна рассматривают его наклонения в двух взаимно перпендикулярных плоскостях – поперечной и продольной. Рассматривая наклонения в поперечной плоскости, определяемые углами крена судна, изучают его *поперечную остойчивость*. Наклонения в продольной плоскости, определяемые углами дифферента, характеризуют его *продольную остойчивость*.

В зависимости от характера внешних сил остойчивость делят на *статическую* и *динамическую*. Областью *статической устойчивости* являются случаи постепенного наклона судна, когда силами инерции и сопротивления воды можно пренебречь. К области *динамической устойчивости* относятся быстрые

наклонения судна, когда необходимо учитывать действие сил инерции и сопротивления воды.

Теорема Эйлера

Изучение остойчивости судна проводится в условиях его вертикального равновесия, при которых удовлетворяется первое уравнение равновесия ($\Delta = \gamma \cdot \nabla$). Таким образом, предполагается, что объёмное водоизмещение судна ∇ при его наклонениях остаётся неизменным в силу неизменности веса судна Δ и плотности заборной воды γ . Наклонения, при которых подводный объём судна не изменяется, называются *равнообъёмными наклонениями*, а ватерлинии, отсекающие одинаковые подводные объёмы, – *равнообъёмными ватерлиниями*.

Согласно теореме Эйлера, в общем случае при равнообъёмном наклонении плавающего тела на бесконечно малый угол $d\varphi$ его ватерлинии до и после наклонения пересекаются по прямой, проходящей через их общий центр тяжести F (Рис.1).

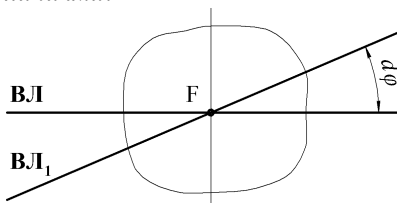


Рис. 1 К формулировке теоремы Эйлера

Другая формулировка теоремы Эйлера гласит: ось бесконечно малого равнообъёмного наклонения плавающего тела лежит в плоскости ватерлинии и проходит через центр тяжести её площади.

Заметим, что, изображая на рисунке наклонения судна, мы будем, как правило, наклонять не само судно, а след ватерлинии (в обратном направлении), как показано на Рис. 1. Это не меняет существа задачи, так как во всех задачах статики судна нас будет интересовать не положение судна в пространстве, а его положение относительно поверхности воды, которая условно принимается наклонной.

В практических расчётах теорему Эйлера считают справедливой не только при бесконечных малых, но и при конечных, но малых наклонениях. Если судно прямобортное, то в

пределах его прямообортности теорема Эйлера справедливо для любого угла наклона.

Схема образования восстанавливающего момента

Поперечное наклонение судна

Момент внешних сил, вызывающий поперечное наклонение (крен) судна, называется **кренящим моментом ($M_{кр}$)**.

При воздействии момента судно наклоняется, но обычно не опрокидывается. Более того, как только прекращается действие момента, оно возвращается в исходное положение.

Восстанавливающий момент (M_v) – это момент сил тяжести и поддержания. Поперечным и продольным наклонениям соответствуют поперечный и продольный восстанавливающие моменты.

Рассмотрим **малое поперечное равнообъемное наклонение судна** (наклонение, в процессе которого водоизмещение судна не изменяется). Схема образования восстанавливающего момента при наклонении судна показана на Рис. 2.

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

В начальный момент судно находилось в равновесии под действием сил тяжести и поддержания $g\Delta = g\gamma\nabla$, находившихся на одной линии. Под воздействием **внешнего кренящего момента ($M_{кр}$)** судно наклонилось на угол крена θ , при этом центр величины *ЦВ* сместился в сторону наклона, и сила поддержания совместно с силой тяжести создали восстанавливающий момент M_v , равный по величине кренящему моменту $M_v = M_{кр}$. Равенство кренящего и восстанавливающего моментов выражает основной закон статического наклонений. Смещение *ЦВ* в сторону наклона обусловлено тем, что при наклонении судна один борт (в приведенной схеме – правый) погружается в воду, а другой (левый) выходит из воды. Это приводит к перераспределению погруженного объема корпуса судна и, как следствие, – к смещению центра тяжести объема.

Согласно **теореме Эйлера**, ось малого равнообъемного наклонения проходит через *ЦТ* площади действующей *ВЛ*. Поскольку на приведенной схеме в начальный момент крен

отсутствовал, то в силу симметрии корпуса *ЦТ* площади действующей *ВЛ* находился в *ДП*. В этой точке пересекаются ватерлинии судна *ВЛ* и *ВЛ_θ*. При малых наклонениях кривую центра величины *СС_θ* можно заменить дугой окружности радиуса *r*, называемого начальным поперечным метацентрическим радиусом. Центр этой окружности находится в точке *m*, которая называется начальным поперечным метацентром.

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

$$M_{\epsilon} = \Delta h \sin \theta. \quad (1)$$

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

$$M_{\epsilon\theta} = \frac{\Delta h \theta^0}{57,3^0}. \quad (2)$$

Приведенное выражение показывает линейную зависимость восстанавливающего момента от угла крена. При положительных значениях *МЦВ* (точка *m* расположена выше точки *G*) восстанавливающий момент положителен; при $h = 0$ (точки *m* и *G* совпадают) восстанавливающий момент равен нулю, и судно остойчивостью не обладает; при отрицательных значениях *МЦВ* (точка *m* расположена ниже точки *G*) возникающий при наклонении

судна момент увеличивает кренящий момент. Таким образом, знак и величина восстанавливающего момента определяются знаком и величиной $M_{\text{ЦВ}}$, и поэтому $M_{\text{ЦВ}}$ используется в качестве показателя начальной остойчивости судна (рис 3). Произведение Δh называется коэффициентом поперечной остойчивости.

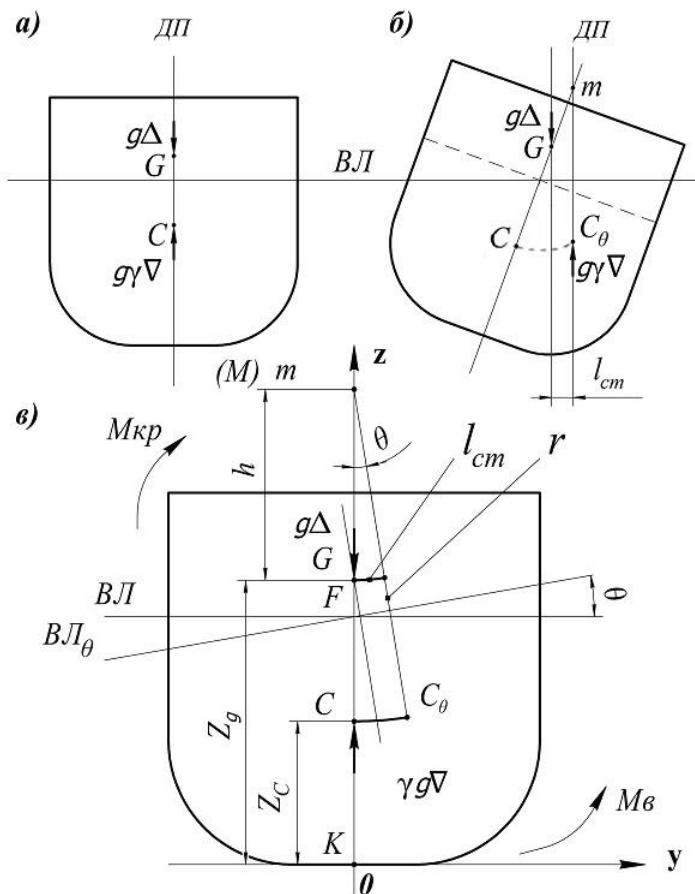


Рис. 2. Схема образования восстанавливающего момента при наклонении судна: а – судно в прямом положении; б – в наклонном положении; в – схема наклонения

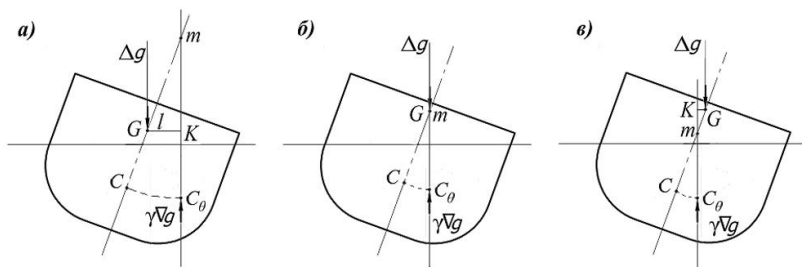


Рис. 3. Восстанавливающий момент при крене:
 а – положительный; б – нулевой; в – отрицательный

Продольное наклонение судна

Момент внешних сил, вызывающий продольное наклонение (дифферент) судна, называется дифферентующим моментом ($M_{\text{диф}}$).

Схема образования восстанавливающего момента при продольном наклонении показана на Рис. 4. В общем случае в силу большой величины отношения длины судна к его осадке любые продольные наклонения можно считать малыми, поэтому все допущения, примененные при рассмотрении поперечных наклонений, применимы для продольных наклонений. Продольный метацентр обозначается M , его координаты – x_M и z_M , $MЦ$ радиус – R , продольная $MЦВ - H = z_M - z_g$. Точкой F на схеме обозначен $ЦТ$ площади действующей $ВЛ$. Выражение (1) для продольных наклонений записывается в виде, тм:

$$M_{\text{в}\psi} = \Delta H \sin \psi \quad (3)$$

Поскольку на практике в качестве параметра продольного наклонения используются величина дифферента, а не его угол, то по Рис. 4 можно определить, что $\text{tg} \psi = D_f / L$. Поскольку угол ψ мал, то в силу свойств малых углов $\sin \psi \approx \text{tg} \psi$, а выражение продольного восстанавливающего момента имеет вид, тм:

$$M_{\text{в}\psi} = \frac{\Delta H D_f}{L} \quad (4)$$

Основной закон статических наклонений для продольных наклонений выражается равенством *дифференцирующего момента* $M_{диф}$ и продольного восстанавливающего момента $M_{вп}$.

Выражение (4) называется *метацентрической формулой продольной остойчивости*, а произведение ΔH – *коэффициентом продольной остойчивости*.

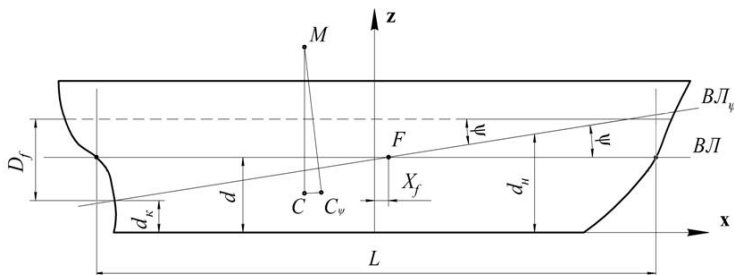


Рис. 4 Схема продольного наклонения

Если в выражении (4) принять дифферент равным одному метру $D_f=1,0$ м, то получим выражение момента, дифференцирующего на 1 метр

$$M_{1M} = \frac{\Delta H}{L} \quad (5)$$

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

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

Осадки носом и кормой определяются по формулам

$$d_n = d + \left(\frac{L}{2} - x_f\right) \cdot \frac{D_f}{L}; \quad d_\kappa = d - \left(\frac{L}{2} + x_f\right) \cdot \frac{D_f}{L}$$

где d – осадка по грузовому размеру.

Метацентрические радиусы

Рассмотрим равнообъёмное наклонение плавающего тела произвольной формы (Рис. 5). Тело имеет погружённый объём V ,

площадь ватерлинии S , ЦТ площади ватерлинии находится в точке F , ось ординат O_y лежит в плоскости $ВЛ$. При бесконечно малом наклонении тела на угол $d\varphi$ центр величины тела – точки C – смещается в сторону наклонения по дуге окружности радиуса ρ , центр этой окружности находится в точке m .

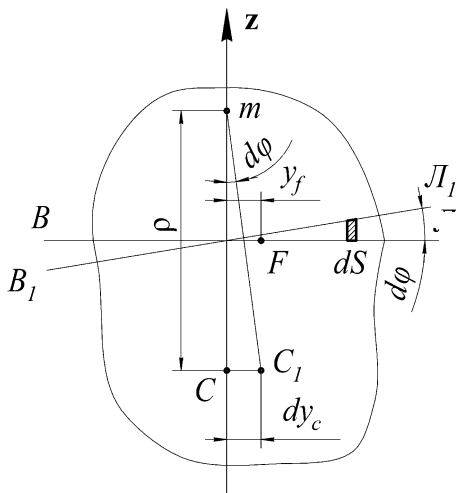


Рис. 5 Схема наклонения тела произвольной формы

Пусть $ВЛ$ – начальная ватерлиния плавающего тела, соответствующая его прямому положению, а $В_1Л_1$ – близкая к ней равнообъемная ватерлиния после наклонения тела на бесконечно малый угол $d\varphi$. Согласно теореме Эйлера, ось рассматриваемого равнообъемного наклонения проходит через точку F – ЦТ площади ватерлинии $ВЛ$ (по нормали к плоскости чертежа). В результате входа в воду клина FL_1L и выхода из воды равновеликого ему клина FB_1B центр величины переместится из точки C в точку C_1 с ординатой dy_c . Статический момент погруженного объема тела изменится на величину $dM_V = V dy_c$. Поскольку $d\varphi$ бесконечно малый, dy_c можно считать равной дуге CC_1 , тогда $dy_c = \rho d\varphi$, а $dM_V = V \rho d\varphi$. Изменение статического момента погруженного объема тела равно статическому моменту объема, вызвавшему это изменение – объема тела, заключенного между ватерлиниями $ВЛ$ и $В_1Л_1$.

Для определения последнего выделим элементарный объем, представляющий собой призму с основанием dS и вертикальными

образующими. Объём призмы равен $dS(y - y_f)d\varphi$, а статический момент объёма – $dSy(y-y_f)d\varphi$. Проинтегрировав полученный элементарный статический момент по площади ватерлинии S , получим искомое значение dM_V

$$V\rho d\varphi = d\varphi \int_S y(y - y_f) dS = d\varphi \left[\int_S y^2 dS - y_f \int_S y dS \right] \quad (6)$$

В полученном выражении $\int_S y^2 dS = I_x$ – момент инерции площади ватерлинии относительно ее продольной оси O_x ; $\int_S y dS = y_f S$

Следовательно, выражение (27) принимает вид

$$V_\rho = I_x - y_f S = I_F, \quad (7)$$

где I_F – момент инерции площади ватерлинии относительно оси наклонения.

В итоге получаем выражение для начального метацентрического радиуса

$$\rho = \frac{I_F}{V}. \quad (8)$$

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

$$r = \frac{I_x}{\nabla}; \quad R = \frac{I_{yf}}{\nabla}, \quad (9)$$

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

Момент инерции площади плоской фигуры, имеющей размеры I вдоль оси O_x и b вдоль оси O_y , определяются выражением

$$i_x = k_x I b^3; i_y = k_y I^3 b, \quad (10)$$

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

Для судна выражения (10) имеют вид

$$l_x = k_x L B^3; l_y = k_y L^3 B. \quad (11)$$

Выражения (11) позволяют оценить соотношения между продольным и поперечным метацентрическими радиусами

$$R/r = (k_y L^3 B / \nabla) / (k_x L B^3 / \nabla) = k_1 (L/B)^2, \quad (12)$$

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

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

Выразим метацентрические высоты через метацентрические радиусы

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

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

Выражение (11) позволяет также оценить влияние главных размерений судна на его начальную остойчивость. Поскольку $МЦВ$ отличается от $МЦ$ радиуса на постоянную для данной загрузки величину, то последний также может быть использован в качестве показателя начальной остойчивости. Если поставить в выражение $МЦ$ радиусов $\nabla = C_B L B d$, то получим

$$r = I_x / \nabla = k_x L B^3 / C_B L B d = k_r B^2 / d;$$

$$R = l_y f / \nabla = k_y L^3 B / C_B L B d = k_R L^2 / d,$$

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

Таким образом, поперечный $МЦ$ радиус прямо пропорционален квадрату ширине судна, а продольный – квадрату длины судна.

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

Метацентрические высоты

Метацентрические формулы остойчивости показывают, что метацентрические высоты являются критериями начальной остойчивости судна. Действительно, при $h > 0$, $M_B > 0$ судно остойчиво, при $h \leq 0$, $M_B \leq 0$ судно не остойчиво. Таким образом, для суждения остойчивости судна необходимо научиться вычислять метацентрические высоты. В соответствии с Рис. 7 легко получить следующие зависимости для определения метацентрических высот:

$$(13) \quad \left. \begin{aligned} h &= z_c + r - z_g; \\ h &= z_m - z_g; \\ h &= r - a, \end{aligned} \right\}$$

где a – возвышение центра тяжести над центром величины;
 z_c – возвышение центра величины над основной плоскостью $ОП$ (аппликата центра тяжести);
 z_g – возвышение центра тяжести над $ОП$ (аппликата центра тяжести);
 z_m – возвышение поперечного метацентра над $ОП$ (аппликата поперечного метацентра);
 r – поперечный метацентрический радиус.

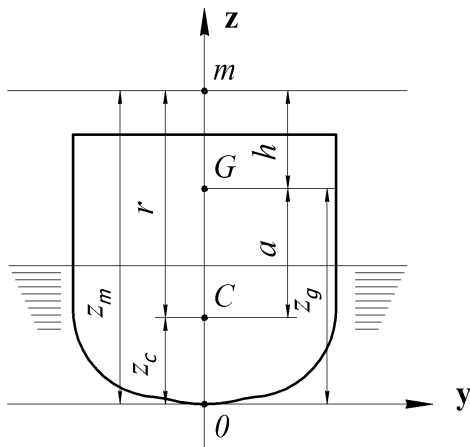


Рис. 6. К определению поперечной начальной метацентрической высоты

По аналогии для продольной метацентрической высоты получим Рис. 7.

$$\left. \begin{aligned} H &= z_c + R - z_g; \\ H &= z_M - z_g; \\ H &= R - a. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где R – продольный метацентрический радиус;

z_m – возвышение продольного метацентра над $ОП$ (апликата продольного метацентра).

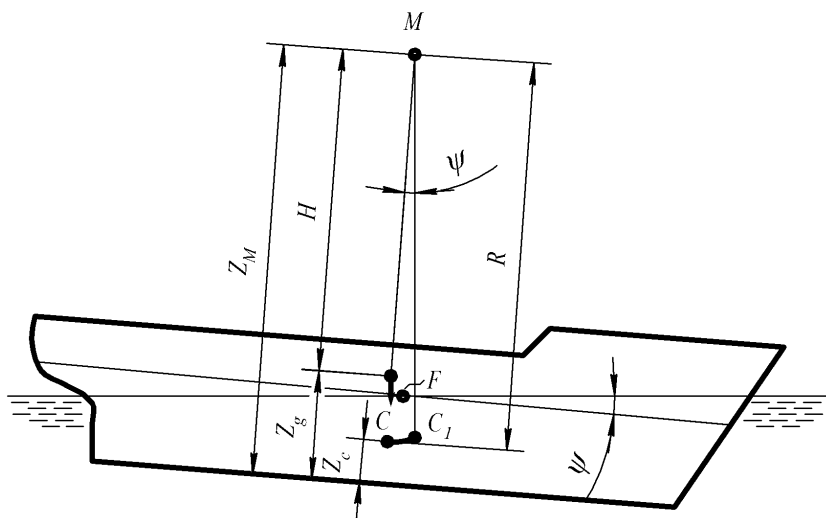


Рис. 7. К определению продольной метацентрической высоты
Факторы, влияющие на остойчивость судна

I Прием и выгрузка грузов

При приеме и выгрузке грузов поперечная метацентрическая высота судна может сильно изменяться. При низком расположении в трюмах тяжелых грузов (металл, руда) понижается центр тяжести всего судна и увеличивается метацентрическая высота. При погрузке тяжелых грузов в твиндек и приеме габаритных грузов (лес, машины) центр тяжести повышается и, следовательно,

уменьшается метацентрическая высота. Такие же изменения происходят при вертикальном перемещении грузов, приеме балласта (жидкого или твердого). Таким образом, при понижении центра тяжести судна остойчивость увеличивается, а при повышении – уменьшается.

II Самопроизвольное перемещение грузов

При качке большую опасность для судна представляет перемещение плохо закрепленного или неправильно уложенного груза (бочек, листового металла и др.) к одному из бортов. Появление большого постоянного крена при бортовой качке может привести к потере остойчивости. Подобное положение может возникнуть и при перемещении сыпучих грузов (зерна, рудных концентратов), которые перевозятся в трюме насыпью. Это случается, когда в трюме есть свободное пространство, а угол крена будет достаточно большим.

Каждый сыпучий груз имеет свой угол естественного откоса, например, льняное семя приближается по этим свойствам к жидкости.

Для предупреждения возможного пересыпания зерна в трюмах устанавливают прочные временные продольные переборки (шифтингбордсы). Если зерно заполняет весь трюм, то делают питатели для заполнения трюма зерном, так как оно при качке подвержено усадке. Если зерно не заполняет весь трюм, его выравнивают и сверху укладывают несколько рядов мешков с зерном.

При перевозке других сыпучих грузов, например, рудных концентратов, следует учитывать их влажность, которая резко меняет их подвижность.

Немногие случаи опрокидывания судов, имеющие место в мировой практике мореплавания, происходили чаще всего из-за несоблюдения правил перевозки сыпучих грузов.

III Влияния жидких грузов на остойчивость судна

Вода и жидкое топливо, имеющиеся на всех судах обычно в

большом количестве (сотни тонн и более), в случае неполного заполнения танков представляют серьезную опасность для судна, так как жидкость, имеющая свободную поверхность, при крене начнет переливаться в сторону крена, уменьшая этим остойчивость, поскольку центр тяжести будет перемещаться в сторону центра величины (рис. 8, а). Остойчивость уменьшается тем больше, чем больше площадь свободной поверхности жидкости.

Снижение остойчивости из-за наличия на судне жидкости предупреждается несколькими путями: запрессовкой танков (т. е. заполнение их доверху, когда жидкость не будет переливаться), установкой продольных переборок (рис. 8, б), сужением верхней части танков.

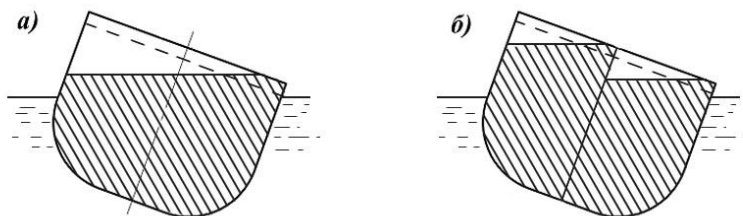


Рис. 8. Влияние жидкого груза на остойчивость: а – судно без продольной переборки; б – судно с продольной водонепроницаемой переборкой

IV Обледенение

При плавании зимой в северных и умеренных широтах случается обледенение судов. Это возникает при штормовом волнении и морозном ветре, когда брызги воды, попадая на надводные части судна, замерзают, покрывая слоем льда верхние палубы, борта, надстройки, мачты, шлюпки и пр. Толщина льда достигает иногда 10-20см и тросы превращаются в колонны, а палубные механизмы в глыбы льда. В практике мореплавания были случаи гибели небольших судов из-за потери остойчивости при сильном обледенении, так как лед увеличивает вес судна, повышает его центр тяжести и увеличивает парусность корпуса.

Расчет судовых запасов

1.1 Расчет количества всех видов запасов на рейс

Для расчета судовых запасов на рейс дальностью D миль используется таблица «Расположение судовых запасов на 5000 миль» из Типовых случаев нагрузки Информации об остойчивости (приложение 2), из которой выбирается количество каждого вида запасов.

Выбранные из типового случая значения запасов вносятся в таблицу 1.

Таблица 1

Расчет судовых запасов на рейс дальностью D м.м.

Вид запасов	Количество запасов, т	
	5000 м.м.	D м.м.
1	2	3
Тяжелое топливо		
Дизельное топливо		
Смазочное масло		
Пресная вода		
Грязная вода		
Всего запасов		

Количество каждого вида запасов рассчитывается пропорционально дальности рейса D :

- тяжелое топливо $P_{mm} = D * P_{mm5000} / 5000$;
- дизельное топливо..... $P_{dm} = D * P_{dm5000} / 5000$;
- смазочное масло..... $P_m = D * P_{m5000} / 5000$;
- пресная вода..... $P_{ne} = D * P_{ne5000} / 5000$;
- грязная вода..... $P_{zg} = D * P_{zg5000} / 5000$;

где P с индексом 5000 – соответствующее количество запасов на 5000 миль выбираются из таблицы запасов «на отход» или на приход (приложение 2).

1.2 Распределение судовых запасов

Запасы, рассчитанные на рейс дальностью D , необходимо распределить по танкам и заполнить таблицу расположения запасов (Приложение 3).

При распределении по танкам судовых запасов необходимо учитывать следующее:

- каждый вид запасов размещается в танках, предназначенных именно для этих запасов (тяжелое топливо в танках для тяжелого топлива, пресная вода в танках для пресной воды и т. д.);

- в первую очередь заполняются расходные танки (для пресной воды – танки питьевой воды), затем – отстойные и последние – остальные;

- танки должны заполняться симметрично относительно ДП;

- по каждому виду запасов неполным может быть только один танк;

- поправка на свободную поверхность статического момента выбирается одна для каждого вида запасов, имеющая максимальную величину из поправок всех используемых танков, поскольку танки опорожняются последовательно.

Данные по судовым танкам (вместимость, координаты ЦТ, поправка δM_z на свободную поверхность), необходимые для распределения запасов, приведены в приложении 5.

Расчет начинается с подбора танков и распределения запасов.

Во второй столбец дополнительного бланка (Приложение 3) заносится масса запаса, размещенного в выбранный танк. В третий и пятый столбцы записываются соответственно координаты ЦТ танка (Z и X), а в седьмой столбец вносим поправки статических моментов δM_z на свободную поверхность для не полностью заполненных танков.

Умножая массу каждого танка P на соответствующую координату, вычисляем статические моменты массы каждого танка относительно основной плоскости (ОП) – $M_z = P \cdot Z$ и относительно плоскости мидель-шпангоута $\bowtie$ – $M_x = P \cdot X$, результаты заносим соответственно в столбцы четвертый и шестой.

Сумма чисел второго столбца составит суммарную массу запасов на рейс P_{Σ} , сумма чисел четвертого – статический момент массы всех запасов относительно ОП, сумма чисел шестого –

статический момент массы всех запасов относительно мидель-шпангоута Σ . Сложив числа седьмого столбца, получаем суммарную поправку δM_z на запасы. Результаты расчетов (последняя строка дополнительного бланка) записываются в основной бланк в третью строку. (Приложение 3А).

1. Составление предварительного грузового плана

2.1 Расчет грузоподъемности судна

Грузовой план должен быть составлен таким образом, чтобы грузоподъемность и грузовместимость судна были использованы полностью. Это означает, что водоизмещение судна «на отход» Δ должно быть равно водоизмещению по соответствующую грузовую марку Δ_{zm} , а грузовые трюма должны быть полностью заполнены грузом.

Осадка по зимнюю грузовую марку меньше осадки по летнюю грузовую марку на $1/48$ последней, т.е. $d_3 = d_n - 1/48 * d_n$.

Грузоподъемность судна рассчитывается по формуле

$$P_{zp} = \Delta_{zm} - \Delta_n - P_{эк} - P_z,$$

где Δ_{zm} - определяется по таблице гидростатических элементов (Приложение 9), по величине соответствующей осадки;

Δ_n - водоизмещение порожнем (Приложение 4);

P_z - количество запасов «на отход»;

$P_{эк}$ - масса экипажа, провизии и снабжения (Приложение 4).

2.2 Определение факультативных грузов

В качестве факультативного груза может быть выбран любой из грузов, приведенных в Приложении 7, а также рыбий жир, рыбная мука, топливо, смазочное масло и пресная вода.

Масса факультативных грузов рассчитывается по формуле

$$P_{\phi} = P_{zp} - P_{об},$$

где $P_{об}$ - минимальное количество обязательного груза.

Минимальное количество обязательного груза определяется в зависимости от величины его удельно-погрузочного объема μ (Приложение 7).

Для $\mu \geq 4.0$ - $P_{об} = 1000$ т;

$$\begin{aligned}
4.0 > \mu \geq 3.0 - P_{об} &= 2000 \text{ т;} \\
3.0 > \mu \geq 2.5 - P_{об} &= 2500 \text{ т;} \\
2.5 > \mu \geq 2.0 - P_{об} &= 3000 \text{ т;} \\
\mu < 2.0 - P_{об} &= 5000 \text{ т.}
\end{aligned}$$

Объем грузовых помещений для размещения факультативных грузов W_{ϕ} рассчитывается по формуле

$$W_{\phi} = W_{тр} - W_{об},$$

где $W_{тр}$ - суммарная вместимость всех грузовых помещений (объем трюмов), Приложение 6; $W_{об} = P_{об} * \mu_{об}$ - объем трюмов, необходимый для размещения минимального количества обязательного груза.

Из таблицы грузов (Приложение 7) выбирается факультативный груз, совместимый с обязательным. Если при полностью заполненных трюмах обязательным и факультативным грузом грузоподъемность использована не полностью, то остаток можно выбрать жидким грузом. Груз по трюмам распределяется по объему. Более тяжелый груз распределяется с носа в корму и снизу вверх.

Далее составляется схема грузового плана с наименованием груза и его количества в каждом грузовом помещении по образцу типового случая загрузки (Приложение 4А).

2.3 Расчет водоизмещения и координат центра тяжести судна

Для расчета водоизмещения и координат ЦТ судна заполняется таблица загрузки (Приложение 3А).

В первую строку таблицы вносятся данные порожнего судна, во вторую – данные об экипаже, провизии и снабжении (Приложение 3Б), в третью – судовые запасы из таблицы (Приложение 3). В следующие четыре строки – груз в трюмах, далее в танках снабжения, палубный груз и балласт.

В строке «Водоизмещение» рассчитывается: водоизмещение судна Δ , как сумма масс статей загрузки (сумма чисел столбца 2); статический момент водоизмещения относительно основной плоскости M_z как сумма статических моментов всех статей загрузки относительно основной плоскости (сумма чисел столбца 4); статический момент водоизмещения относительно плоскости мидель-шпангоута M_x как сумма статических моментов всех статей

нагрузки относительно плоскости мидель-шпангоута (сумма чисел столбца 6). В 3-й и 5-й ячейках строки записываются аппликата Z_g и абсцисса X_g центра тяжести судна, рассчитанные по формулам:

$$Z_g = M_z / \Delta \quad \text{и} \quad X_g = M_x / \Delta.$$

В следующих строках записываются поправки на свободную поверхность запасов, наливного груза, балласта и сумма этих поправок $\Sigma \delta M_z$.

Расчетный статический момент водоизмещения относительно ОП M_{zpac} (с учетом всех поправок) определится по формуле

$$M_{zpac} = M_z - \Sigma \delta M_z.$$

Тогда расчетная аппликата центра тяжести судна Z_{gpac} находится

$$Z_{gpac} = M_{zpac} / \Delta.$$

Допустимая аппликата центра тяжести судна определяется по таблице Приложения 8 по водоизмещению Δ и дифференту D_f судна.

Дифферент судна определяется по формуле

$$D_f = \Delta * (x_g - C) / M_{I.M}.$$

Осадка носом d_n , осадка кормой d_k , средняя осадка d_{cp} находятся по формулам

$$d_n = d + (L/2 - x_f) * D_f / L;$$

где d_n - абсцисса ЦВ;

$M_{I.M}$ - момент дифферентующий на 1 м;

x_f - абсцисса центра тяжести площади ватерлинии;

d - осадка по грузовому размеру.

Все эти величины определяются из таблицы гидростатических элементов (Приложение 9) по величине водоизмещения.

2. Проверка грузового плана

В Информации об остойчивости в разделе «Ограничения и рекомендации капитану» указываются ограничения по посадке, остойчивости и прочности.

3.1 Посадка судна и остойчивость

Загрузка и бункеровка судна должна производиться всегда так, чтобы были обеспечены следующие значения параметров посадки:

- статический крен должен отсутствовать;
- дифферент должен быть на корму;
- средняя осадка в морской воде не должна превышать осадку по действующую грузовую марку;
- при плавании в ледовых условиях средняя осадка не должна превышать 8,0 м;
- чтобы избежать ударов носовой части днища о воду, рекомендуется иметь осадку носом не менее 3,4 м;
- для обеспечения наименьшей потери скорости на волнении и предотвращения перегрузки двигателя из-за недостаточного погружения гребного винта, рекомендуется иметь осадку кормой не менее 5,7 м;
- для обеспечения требований к аварийной посадке судна осадка кормой не должна превышать 9,8 м.

Проверка остойчивости производится по расчетной аппликате ЦТ судна и метацентрической высоте. Если расчетная аппликата ЦТ судна меньше допустимой, то судно остойчиво по основным критериям, а начальная метацентрическая высота $h > 0$. Z_{gdon} находится из Приложения 8.

Все расчетные значения величин сравниваются с вышеприведенными ограничениями и оформляются в виде таблицы 4.

Таблица 4

Проверка грузового плана

Расчетные величины	Требуемые ограничения	Удовлетворяют/ не удовлетворяют
d_{cp}	$d_{cp} < d_{zm}$	
D_f	$D_f < 0$	
d_n	$d_n > 3,4$	
d_k	$5,7 < d_k < 9,8$	
Z_{gpac}	$Z_{gpac} < Z_{gdon}$	
h	$h > 0$	

3.2 Прочность судна

Местная прочность проверяется по величине удельной нагрузки на палубу в каждом грузовом помещении.

Удельная нагрузка на палубу q определяется выражением

$$q = h_{zp} / \mu,$$

где h_{zp} - высота штабеля груза в грузовом помещении;

μ - удельный погрузочный объем груза.

Если грузовое помещение заполнено полностью, то высота груза в нем равна высоте трюма $h_{zp} = h_{mp}$.

Если в грузовом помещении два разных груза, то удельная нагрузка на палубу складывается из нагрузок, создаваемых этими грузами.

$$q = h_{zp1} / \mu_1 + h_{zp2} / \mu_2.$$

Рассчитанная удельная нагрузка сравнивается с допустимой, приведенной в Приложении 10.

Общая продольная прочность корпуса судна проверяется сравнением расчетного момента от сил дедвейта относительно плоскости мидель-шпангоута M_{DW} с допустимым моментом. Величина M_{DW} определяется как половина суммы моментов масс, составляющих дедвейт:

$$M_{DW} = \sum (P_i * /x_i /) / 2,$$

где P_i , $/x_i /$ - масса и абсолютная величина абсциссы i -той статьи дедвейта, соответственно.

Проверка производится по диаграмме контроля продольной прочности.

Для этого по оси абсцисс, соответствующей нулевому D_f судна откладывают величину DW , затем следуют по кривой вниз до нужного D_f и из этой точки проводят вертикаль вверх, на которой откладывают M_{DW} и фиксируют точку. Прочность корпуса считается достаточной, если точка находится в безопасной зоне между «опасно-прогиб» и «опасно-перегиб».

3. Корректировка грузового плана

Выполнив оценку параметров предварительного грузового плана по посадке, остойчивости и прочности, необходимо наметить мероприятия по его исправлению.

Так как все жидкие запасы находятся в средней и кормовой части корпуса судна, то заполнение носовых трюмов более тяжелым грузом приводит к изменению дифферента на нос и к увеличению осадки носом и уменьшению осадки кормой и наоборот.

Остойчивость увеличивается при распределении более тяжелого груза в нижних грузовых помещениях.

Если судно имеет опасный перегиб, то более тяжелый груз распределяется в трюмах в районе мидель-шпангоута, если опасный прогиб – в концевых трюмах.

После перераспределения грузов и запасов производится расчет новой посадки и ее проверка, а также проверка остойчивости и прочности.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№	Порт назначения	Д, м.м.	Обязательный груз	Затопление		Посадка на мели		
				Танк	Отсек	δd_n	δd_k	$\ominus$
1	Петропавловск	1323	Рыба охл./чср.	16	1	-0.10	-0.10	8
2	Сингапур	3023	Рыба сол.	1.7	1	-0.10	-0.08	7
3	Нагаева	1412	Рыба охл./ящ.	1.8	1	-0.10	-0.06	6
4	Сидней	5751	Масло жив.	1.9	1	-0.10	-0.04	5
5	Рангун	4140	Консервы	1.6	2	-0.10	-0.12	4
6	Окленд	5569	Дом. птица	1.7	2	-0.12	-0.10	3
7	Охотск	1376	Мясо	1.8	2	-0.12	-0.08	4
8	Линтлетон	5938	Фрукты сух.	1.9	2	-0.12	-0.06	5
9	Анадырь	2345	Цитрусовые	1.6	3	-0.12	-0.04	6
10	Ванкувер	4132	Чай	1.7	3	-0.08	-0.12	7
И	Эгвекино	2407	Табак	1.8	3	-0.08	-0.10	8
12	Манила	1904	_Горох	1.9	3	-0.08	-0.08	7
13	Провидения	2397	Кофе	1.6	4	-0.08	-0.06	6
14	Мельбурн	5579	Мука	1.7	4	-0.08	-0.04	5
15	Корсаков	555	Сахар	1.8	4	-0.08	-0.02	4
16	Панама	7731	Рис	1.9	4	-0.11	-0.09	3
17	Бангкок	3038	Яйца	1.6	1	-0.11	-0.07	4
18	Калькутта	4673	Каучук	1.7	1	-0.11	-0.05	5
19	Далянь	1045	Шелк	1.8	1	-0.11	-0.03	6
20	Сайгон	2502	Кожа	1.9	1	-0.11	-0.01	7
21	Дарвин	3124	Шерсть	1.6	2	-0.09	-0.11	8
22	Инчхон	855	Джут	1.7	2	-0.09	-0.09	7
23	Гонолулу	3770	Хлопок	1.8	2	-0.09	-0.07	6
24	Джакарта	3338	Цемент	1.9	2	-0.09	-0.05	5
25	Хай(Юн	2098	Бумага	1.6	3	-0.09	-0.03	4
26	Сиэтл	4200	Рыба охл./ящ.	1.7	3	-0.09	-0.01	3
27	Гонконг	1639	Кабель	1.8	5	-0.07	-0.07	4
28	Шанхай	976	Канат	1.9	3	-0.07	-0.05	5
29	Кам-Рань	2289	Пром. обор.	1.6	4	-0.07	-0.03	6
30	Иокогама	937	Кирпич	1.8	3	-0.08	-0.10	8

Расположение запасов на ОТХОД при дальности плавания 5000 миль

Наименование	P , т	Z , м от ОП	M_z , тм	X , м от 	M_x , тм	Поправка δM_z , тм
<i>Тяжелое топливо, $\rho = 0,92 \text{ т/м}^3$</i>						
Танк 1.10 ПрБ	139.0	0.75	104	-8.34	-1159	694
Танк 1.11 ЛБ	139.0	0.75	104	-8.34	-1159	694
Танк 1.12 перелива ЛБ	30.7	0.93	29	-37.66	-1156	
Танк 1.18 отстойный ПрБ	74.0	9.09	673	-36.53	-2703	
Танк 1.19 отстойный ПрБ	70.0	8.88	622	-36.54	-2558	
Танк 1.20 расх. кот. топ. ПрБ	15.0	11.85	178	-36.57	-549	
Танк 1.21 расходный ПрБ	15.0	11.85	178	-36.57	-549	
Танк 1.22 расходный ДП	60.0	11.33	680	-36.42	-21.85	
Итого тяжелого топлива	542.7		2568		-12018	1388
<i>Дизельное топливо, $\rho = 0,86 \text{ т/м}^3$</i>						
Танк 2.4 перелива ПрБ	30.0	0.97	29	-39.42	-1183	
Танк 2.5 отстойный ЛБ	22.4	11.86	266	-36.57	-819	
Танк 2.6 расходный ЛБ	24.1	11.33	273	-36.77	-886	
Итого диз. топлива	76.5		568		-2888	
<i>Смазочное масло, $\rho = 0,90 \text{ т/м}^3$</i>						
Танк сточн. масла 3.5 ДП	16.0	0.95	15	-47.83	-765	
Танк цилиндр масла 3.9 ПрБ	20.4	11.83	241	-65.30	-1332	
Танк запаси, масла 3.10 ПрБ	25.4	11.91	303	-65.14	-1655	
Танк запасн.масла 3.11 ПрБ	38.9	12.35	480	-69.10	-2688	
Итого смазочного масла	100.7		1039		-6440	
<i>Пресная вода, $\rho = 1,00 \text{ т/м}^3$</i>						
Танк охлаждающей в.4.1 ЛБ	17.1	0.98	17	-40.94	-700	
Танк кот. питат.в. 4.2 ПрБ	57.8	7.25	419	-57.96	-3350	77
Танк кот. питат.в. 4.3 ЛБ	57.8	7.25	419	-57.96	-3350	77
Танк питьевой воды 4.6 ДП	115.0	11.74	1350	-66.03	-7593	76
Танк питьевой воды 4.7 ЛБ	125.0	12.03	1504	-66.70	-8338	60
Танк охлаждающей в.4.8 ДП	2.4	3.00	7	-62.81	-151	
Итого пресной воды	375.1		3716		-23482	290
<i>Грязная вода, $\rho = 1,00 \text{ т/м}^3$</i>						
Фекальный танк 3.12 ЛБ	7.9	11.37	90	-36.14	-286	
Цист, льяльн. воды 3.15 ЛБ						
Танк гр. п. мед. бл. 3.16 ЛБ						
Т. шлами. фильтр. 3.17 ПрБ						
Итого грязной воды	7.9		90		-286	
ВСЕГО ЗАПАСОВ:	1103		7981		-45114	1678

Расположение запасов на ОТХОД

Наименование	P , т	Z , м от ОП	M_z , тм	X , м от 	M_X , тм	Поправ ка δM_z , тм
<i>Тяжелое топливо, $\gamma = 0,92 \text{ т/м}^3$</i>						
Итого тяжелого топлива						
<i>Дизельное топливо, $\gamma = 0,86 \text{ т/м}^3$</i>						
Итого диз. топлива						
<i>Смазочное масло, $\gamma = 0,90 \text{ т/м}^3$</i>						
Итого смазочного масла						
<i>Пресная вода, $\gamma = 1,00 \text{ т/м}^3$</i>						
Итого пресной воды						
<i>Грязная вода, $\gamma = 1,00 \text{ т/м}^3$</i>						
Итого грязной воды						
ВСЕГО ЗАПАСОВ:						

СЛУЧАЙ НАГРУЗКИ

Наименование		$P, \text{ т}$	$Z, \text{ м}$	$M_z, \text{ тм}$	$X, \text{ м}$ от 	$M_x, \text{ тм}$
1		2	3	4	5	6
Судно порожнем						
Экипаж, провизия, снабжение						
Судовые запасы						
Груз в трюмах:						
Трюм 1						
Трюм 1						
Трюм 1						
Трюм 2						
Трюм 2						
Трюм 2						
Трюм 3						
Трюм 3						
Трюм 3						
Трюм 4						
Трюм 4						
Трюм 4						
Всего груза:						
Груз на палубе						
Всего балласта						
Водоизмещение						
Поправка на запасы						
Поправка на наливной груз						
Поправка на балласт						
Всего поправка $\delta M_z, \text{ тм}$						
Момент M_z расчетный, тм						
ЦМ судна Z_g расчетный, м						
ЦМ судна Z_g допустимый, м						
Апplikата метacentра над ОП $Z_m, \text{ м}$						
Метacent- рическая высота	Без поправки $h_o = Z_m - Z_g, \text{ м}$					
	Поправка $\delta h, \text{ м}$					
	Исправленная $h = h_o - \delta h, \text{ м}$					
Осадка	Средняя $d_{cp}, \text{ м}$					
	Носом $d_n, \text{ м}$					
	Кормой $d_k, \text{ м}$					

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАЗМЕРЕНИЯ СУДНА

НАЗВАНИЕ	«ОЛЮТОРСКИЙ ЗАЛИВ» (Пр. № 222, стр. № 229)		
ПОРТ ПРИПИСКИ			
ВЛАДИВОСТОК			
ИДЕНТИФИКАЦИОННЫЙ НОМЕР ИМО			
8422711			
РАДИОПОЗЫВНОЙ			
УКТU			
ГОД ПОСТРОЙКИ			
1985			
МЕСТО ПОСТРОЙКИ	ВИСМАР, ГДР, НП верфь им. Матиаса Тезена		
КЛАСС СУДНА	КМ Л1 [1] А2		
ТИП СУДНА	транспортное рефрижераторное судно		
НАЗНАЧЕНИЕ	перевозка охлаждаемых грузов, рыбной муки в мешках, рыбьего жира и доставка топлива, смазочного масла, питьевой воды, провизии, снабжения, упаковочного материала промысловым судам		
РАЙОН ПЛАВАНИЯ	неограниченный		
ДАЛЬНОСТЬ ПЛАВАНИЯ	9000 миль		
СКОРОСТЬ ХОДА	14,5 узл		
ДЛИНА НАИБОЛЬШАЯ	152,94 м		
ДЛИНА МЕЖДУ ПЕРПЕНДИКУЛЯРАМИ	142,00 м		
ШИРИНА	22,20 м		
ВЫСОТА БОРТА	13,60 м		
ОСАДКА ПО ЛЕТНЮЮ ГРУЗОВУЮ МАРКУ	8,307 м		
(от нижней кромки киля НКК)			
ВОДОИЗМЕЩЕНИЕ	17375 т		
ДЕДВЕЙТ	10113,1 т		

РАЗМЕРЫ ГРУЗОВЫХ ТРЮМОВ, м

Грузовое помещение	Трюм 4			Трюм 3			Трюм 2			Трюм 1		
	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>	<i>b</i>	<i>h</i>
Верх	20,1	19,2	3,3	19,0	20,0	3,3	18,9	18,5	3,3	20,3	15,9	3,3
Середина	20,0	19,2	3,0	19,3	20,0	3,0	18,9	18,3	3,0	20,3	13,2	3,0
Низ	21,7	19,2	3,0	22,4	20,0	3,0	18,9	19,7	3,0	20,3	11,9	3,0

СУДНО ПОРОЖНЕМ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Наименование	P , т	Z , м	M_z , тм	X , м от 	M_x , тм
Судно порожнем, Протокол кренования № 996.800.000-25.	7261,9	10,09	73307	-13,82	-100383
Экипаж, провизия, снабжение	16,3		301		-745
Судовые запасы	1103,0		7981		-45114
Груз в трюмах	9016,0		68017		50674
Груз в танках	0,0		0,0		0,0
Груз на палубе	0,0		0,0		0,0
Всего балласта	0,0		0,0		0,0
Водоизмещение	17375,3	8,62	149748	-5,25	-91296
Поправка на запасы			1678		
Поправка на наливной груз			0		
Поправка на балласт			0		
Всего поправка δM_z, тм	1678				
Момент M_z расчетный, тм	151426				
ЦМ судна Z_g расчетный, м	8,72				
ЦМ судна Z_g допустимый, м	9,16				
Аппликата метацентра над ОП Z_m , м	9,37				
Метацентрическая высота	Без поправки $h_o = Z_m - Z_g$, м	0,75			
	Поправка δh , м	0,10			
	Исправленная $h = h_o - \delta h$, м	0,65			
Осадка	Средняя d_{cp} , м	8,23			
	Носом d_n , м	6,59			
	Кормой d_k , м	9,87			

ТИПОВЫЕ СЛУЧАИ НАГРУЗКИ**Случай нагрузки № 1****Рейс дальностью 5000 миль****Судно с однородным грузом в трюмах ($\mu = 1,487 \text{ м}^3/\text{т}$)
при осадке по зимнюю грузовую марку****ГРУЗОВОЙ ПЛАН****Т/Х «ОЛЮТОРСКИЙ ЗАЛИВ»****Рейс: Владивосток – Петропавловск-Камчатский**

Трюм 4	Трюм 3	Трюм 2	Трюм 1
Рыба, 849 т	Рыба, 779 т	Рыба, 701 т	Рыба, 701 т
Рыба, 780 т	Рыба, 782 т	Рыба, 909 т	Рыба, 752 т
Рыба, 845 т	Рыба, 755 т	Рыба, 542 т	Рыба, 790 т

Расположения грузов в грузовых помещениях

Наименование	Вид груза	$P, \text{ т}$	$Z, \text{ м}$	$M_Z, \text{ тм}$	$X, \text{ м}$	$M_X, \text{ тм}$
Трюм 1 низ	Рыба охл.	492,0	3,78	1860	40,86	20103
Трюм 1 середина	Рыба охл.	5428,0	7,21	3908	41,73	22618
Трюм 1 верх	Рыба охл.	721,0	11,46	8263	41,88	30195
Трюм 2 низ	Рыба охл.	755,0	3,73	2816	22,43	16935
Трюм 2 середина	Рыба охл.	701,0	7,18	5033	23,03	16144
Трюм 2 верх	Рыба охл.	779,0	11,42	8896	22,97	17894
Трюм 3 низ	Рыба охл.	909,0	3,69	3354	-4,46	-4054
Трюм 3 середина	Рыба охл.	782,0	7,18	5615	-4,81	-3761
Трюм 3 верх	Рыба охл.	849,0	11,42	9696	-4,65	-3948
Трюм 4 низ	Рыба охл.	845,0	3,72	3143	-24,37	-0593
Трюм 4 середина	Рыба охл.	780,0	7,18	5600	-24,83	-194450
Трюм 4 верх	Рыба охл.	861,0	11,42	9833	-24,87	-21413
ВСЕГО ГРУЗА:		016,0		68017		5067 4

Данные по танкам

Наименование		Район располо- жения, шпангоуты	P , т	Z , м от ОП	X , м от 	Поправка на свободн. пов-ть δM_z , тм
Балласт $\rho = 1.025 \text{ т/м}^3$						
Форпик 1.1		184...нос	191.7	11.00	67.62	103
Танк 1.2	ПрБ	168...184	552.5	9.01	57.32	124
Танк 1.3	ЛБ	168...184	563.7	8.98	57.30	124
Танк 1.4	ПрБ	140...168	78.4	0.83	39.69	88
Танк 1.5	ЛБ	140...168	78.4	0.83	39.69	88
Танк 1.6	ПрБ	115...140	180.4	0.77	21.75	564
Танк 1.7	ЛБ	115...140	174.4	0.78	21.81	564
Танк 1.8	ПрБ	94...115	196.8	0.75	5.06	996
Танк 1.9	ЛБ	94...115	198.8	0.75	5.13	996
Тяжелое топливо $\rho = 0.92 \text{ т/м}^3$						
Танк 1.10	ПрБ	78...94	139.0	0.75	-8.34	694
Танк 1.11	ЛБ	78...94	139.0	0.75	-8.34	694
Танк 1.12 перелива	ЛБ	44...50	30.7	0.93	-37.66	---
Танк 1.13*	ДП	46...51	167.0	5.59	-36.49	89
Танк 1.14*	ПрБ	46...51	81.0	3.92	-36.57	57
Танк 1.15*	ЛБ	45...51	176.0	7.12	-36.56	98
Танк 1.16**	ПрБ	105...115	448.0	9.23	9.34	768
Танк 1.17**	ЛБ	105...115	763.6	7.00	9.49	771
Танк 1.18 отстойный	ПрБ	46...51	74.0	9.09	-36.53	---
Танк 1.19 отстойный	ПрБ	46.51	70.0	8.88	-36.54	---
Танк 1.20 расх.ког.топ	ПрБ	46...51	15.0	11.85	-36.57	---
Танк 1.21 расходный	ПрБ	46...51	15.0	11.85	-36.5.	---
Танк 1.22 расходный	ДП	46...51	60.0	11.33	-36.42	---
Дизельное топливо $\rho = 0.86 \text{ т/м}^3$						
Танк 2.1***	ПрБ	105...112	203.0	3.53	8.42	504
Танк 2.2***	ПрБ	48...178	181.4	0.78	-24.6.:	636
Танк 2.3***	ЛБ	50...178	172.0	0.78	-23.48	612
Танк 2.4 перелива	ПрБ	41...48	30.0	0.97	-39.42	---
Танк 2.5 отстойный	ЛБ	46...51	23.4	11.86	-36.57	---
Танк 2.6 расходный	ЛБ	46...51	24.1	11.33	36,77	---
Смазочное масло $\rho = 0.90 \text{ т/м}^3$						
Танк утечн.топ. 3.1	ПрБ	42...44	1.9	1.16	-40.70	---
Танк утечн.масла 3.2	ПрБ	25...27	1.9	1.16	-53.45	---
Танк сепарир.масла 3.3	ЛБ	28...41	25.4	1.07	-46,00	---
Танк сепарир.мас.3.4	ПрБ	28...41	20.0	1.10	-46,24	---
Танк сточи.масла 3.5	ДП	27...40	24.6	1.16	-47.83	---
Танк утечн.масла 3.7	ЛБ	25...27	1.9	1.16	-53.47	---
Танк отрлб.маела 3.8	ЛБ	17...24	25.7	1.10	-57.55	---
Танк цилиндр м 3.9	ПрБ	6...13	20.4	11.83	-65,30	---
Танк запасн.м. 3.10	ПрБ	6...13	25.4	11.41	-65.14	---
Танк запасн.м. 3.11	ПрБ	0...6	38.9	12.35	-69.10	---

Продолжение приложения 5

Наименование		Район располо- жения, шпангоуты	P , т	Z , м от ОП	X , м от 	Поправка на свободн. пов-ть δM_z , тм
Пресная вода $\rho = 1.00 \text{ т/м}^3$						
Танк охлажден. воды 4.1	ЛБ	41...44	17,1	0.98	-40.94	—
Танк кот.питат.в. 4.2	ПрБ	15...24	57.8	7.25	-57.96	77
Танк кот.питат.в. 4.3	ЛБ	15...24	57.8	7.25	-57.96	77
Т. конленс.пит.в. 4.4	ПрБ	3.13	40.3	9.03	-65.82	76
Т. конденс.пит.в. 4.5	ЛБ	3...13	40.3	9.03	-65.82	76
Т. питьевой воды. 4.6	ДП	4...13	115.0	11.74	-66.03	76
Т. питьевой воды 4.7	ЛБ	0...13	125.0	12.03	-66.70	60
Т. охлажден.воды 4.8	ДП	13...14	2.4	3.00	-62.81	...
Грязная вода $\rho = 1.00 \text{ т/м}^3$						
Танк грязн.воды 1.13*	ДП	46...51	182.0	5.59	-36.49	96
Танк грязн.воды 1.14*	ПрБ	46...51	88.0	3.92	-36.57	62
Танк грязн.воды 1.15*	ЛБ	46...51	191.0	7.12	-36.56	107
Фекальный танк 3.12	ЛБ	46...51	15.8	11.89	32.92	...
Цистерна льяльн.в.3.15	ЛБ	46...51	27.5	3.05	24.84	...
Т. гр.в.мед.блока 3.16	ЛБ	49,5...51	2.1	11.86	24.84	...
Т.шламн. фильтр. 3.17	ПрБ	35...36	1.1	0.93	-46.32	...
Рыбий жир $\rho = 0.95 \text{ т/м}^3$						
Танк 3.13	ЛБ	105...115	87.0	11.89	9.81	
Танк 3.13	ПрБ	105...115	87.0	11.89	9.81	

* - тяжелое топливо или грязная вода

** - тяжелое топливо (для снабжения судов) или рыбная мука в мешках

*** - дизельное топливо (для снабжения судов)

Данные по грузовым трюмам

Наименование	Расположение, шп-ты	Вместимость $V, \text{ м}^3$	Координаты центра объема	
			$Z, \text{ м от ОП}$	$X, \text{ м от } \begin{array}{c} \nearrow \\ \nwarrow \end{array}$
Трюм №1 низ	51...78	727	3.78	40.86
середина	51...78	801	7.21	41.75
верх	51...78	1066	11.46	41.88
ВСЕГО №1		2591	8.00	41.55
Трюм №2 низ	78...105	1115	3.73	22.43
середина	78...105	1036	7.18	23.03
верх	78...105	1151	11.42	22.97
ВСЕГО №2		3302	7.35	22.81
Трюм №3 низ	115...140	1343	3.69	-4,46
середина	115...140	1157	7.18	-4.10
верх	115...140	1254	11.42	-4.65
ВСЕГО №3		3754	7.37	-4.63
Трюм №4 низ	140...168	1249	3.72	-24.37
середина	140...168	1154	7.18	-24.95
верх	140...168	1273	11.12	-24.87
ВСЕГО №4		3676	7.47	-24.72
ВСЕГО №1...№4		13326	7.54	5.62

**Удельный погрузочный объем μ и коэффициент
проницаемости χ грузов**

№ п/п	Груз	Тип упаковки	μ , м ³ /т	χ
1	Асбест	Мешки	1,55	0,75
2	Бумага газетная	Рулоны	2,30	0,55
3	Горох	Мешки	1,50	0,55
4	Джут	Тюки	2,30	0,65
5	Домашняя птица	Ящики	2,60	0,60
6	Кабель	Вьюшки	0,85	0,50
7	Канат стальной	Бухты	2,00	0,55
8	Каучук	Кипы	1,60	0,40
9	Кирпич огнеупорный	Ящики	1,15	0,71
10	Кожа	Тюки	2,80	0,30
11	Консервы	Ящики	1,36	0,30
12	Кофе	Мешки	1,60	0,42
13	Краска	Бочки	0,70	0,30
14	Краска	Банки	1,00	0,30
15	Масло сливочное	Ящики	2,70	0,45
16	Мука	Мешки	1,45	0,25
17	Мясо	Туши	2,60	0,66
18	Пробка	Тюки	8,40	0,52
19	Пром. оборудование (легкое)	Ящики	5,00	0,89
20	Пром. оборудование (тяжелое)	Ящики	2,50	0,89
21	Рис	Мешки	1,45	0,52
22	Рыба охлажденная	Чердаки	1,35	0,30
23	Рыба охлажденная	Ящики	1,70	0,45
24	Рыба соленая	Чердаки	1,30	0,35
25	Сахар	Мешки	1,30	0,56
26	Табак	Кипы	3,30	0,68
27	Фрукты сухие	Ящики	2,00	0,58
28	Хлопок - полотно	Тюки	1,90	0,32
29	Цемент	Мешки	0,99	0,63
30	Цитрусовые	Ящики	2,40	0,60
31	Чай	Ящики	2,75	0,75

32	Шелк	Тюки	2,20	0,30
33	Шерсть	Тюки	4,40	0,30
34	Яйца	Ящики	2,70	0,45

Приложение 8

Таблица допустимых возвышений центра массы судна

Водоизмещение Δ , т	Допустимые возвышения центра массы		
	По аварийной остойчивости $Z_{g^{ae}}^{доп}$, м		По основной остойчивости $Z_{g^{осн}}^{доп}$, м
	Дифферент 0.0 м	Дифферент -3.0 м	
8000	9.22	9.37	9.460
8500	9.14	9.29	9.530
9000	9.09	9.24	9.570
9500	9.03	9. 17	9.580
10000	8.97	9.09	9.590
10500	8.92	9.03	9.610
11000	8.91	8.97	9.610
11500	8.90	8.93	9.600
12000	8.90	8.91	9.560
12250	8.90	8.90	9.530
12500	8.90	8.90	9.500
12750	8.90	8.90	9.475
13000	8.90	8.90	9.450
13250	8.91	8.91	9.425
13500	8.91	8.91	9.400
13750	8.92	8.92	9.380
14000	8.93	8.93	9.360
14250	8.95	8.95	9.350
14500	8.96	8.96	9.340
14750	8.98	8.98	9.330
15000	9.00	9.00	9.330
15250	9.02	9.02	9.330
15500	9.03	9.03	9.320
15750	9.06	9.06	9.310
16000	9.09	9.09	9.300
16250	9.10	9.10	9.270
16500	9.11	9.11	9.250
16750	9.12	9.12	9.230
17000	9.14	9.14	9.200
17250	9.14	9.14	9.180
17500	9.16	9.16	9.160

Гидростатические элементы

Водоизм. Δ , т	Осадка от НКК d , м	Абсц. ЦВ X_c , м	Абсц. ЦТ плещ. ВЛ X_f , м	Диф. момент M_{IM} , тм/м	Возв. МЦ над ОП Z_m , м
7000	3.80	-1.37	-0.82	12782	11.48
500	4.04	-1.32	-0.77	13043	11.13
8000	4.27	-1.29	-0.74	13300	10.83
500	4.50	-1.26	-0.73	13555	10.57
9000	4.75	-1.23	-0.72	13817	10.35
500	4.97	-1.20	-0.72	14114	10.15
10000	5.20	-1.17	-0.74	14371	9.98
250	5.32	-1.16	-0.75	14514	9.91
500	5.43	-1.15	-0.77	14647	9.85
750	5.54	-1.14	-0.79	14781	9.79
11000	5.65	-1.13	-0.82	14934	9.74
250	5.76	-1.13	-0.84	15068	9.69
500	5.87	-1.12	-0.87	15221	9.65
750	5.98	-1.12	-0.90	15385	9.60
12000	6.09	-1.12	-0.95	15539	9.56
250	6.20	-1.12	-0.98	15703	9.53
500	6.31	-1.12	-1.02	15867	9.50
750	6.42	-1.12	-1.07	16041	9.47
13000	6.53	-1.12	-1.12	16195	9.45
250	6.63	-1.12	-1.18	16380	9.43
500	6.74	-1.12	-1.24	16554	9.40
750	6.85	-1.12	-1.32	16780	9.38
14000	6.96	-1.13	-1.40	16954	9.36
250	7.06	-1.14	-1.47	17189	9.35
500	7.16	-1.15	-1.53	17414	9.34
750	7.26	-1.15	-1.69	17650	9.33
15000	7.36	-1.16	-1.82	17917	9.33
250	7.46	-1.17	-1.95	18163	9.33
500	7.56	-1.17	-2.09	18419	9.32
750	7.66	-1.20	-2.27	18696	9.32
16000	7.76	-1.22	-2.43	19014	9.32
250	7.86	-1.23	-2.64	19300	9.32
500	7.96	-1.25	-2.79	19598	9.33
750	8.06	-1.27	-3.00	19885	9.34
17000	8.16	-1.30	-3.20	20213	9.35
250	8.26	-1.33	-3.33	20500	9.35
500	8.36	-1.37	-3.50	20808	9.37

Допустимые удельные нагрузки на палубу

Наименование	Допустимая нагрузка q , т/м ²
2-я палуба	2.56
3-я палуба	2.33
Второе дно	2.32

Практическое занятие №2

Ходкость судна

Цель работы:

Закрепить представление о ходкости судна.

Содержание отчета

Отчет по работе должен включать:

- цель работы
- данные задачи
- расчетные формулы и решение

Теоретическая часть

Основные сведения из гидромеханики

Жидкостью называется физическое тело, для которого характерно свойство текучести, обусловленное тем, что частицы жидкости обладают высокой степенью подвижности относительно друг друга. Различают капельные и газообразные жидкости. Капельные жидкости, к числу которых относится, например, вода, почти несжимаемы. Помещенные в сосуд, они могут занимать часть его объема, имея свободную поверхность. Газообразные жидкости сжимаемы и всегда распространяются по всему объему сосуда. При решении некоторых задач гидромеханики воздух

(газообразная жидкость) также может считаться несжимаемым, если скорость его движения относительно невелика. При изучении силового взаимодействия между жидкой средой и находящимся в ней твердым телом в гидромеханике не принимают во внимание молекулярного движения жидкости и рассматривают ее как сплошную среду, не имеющую межмолекулярных промежутков. Такое предположение называется гипотезой непрерывности или сплошности жидкой среды.

Режимы течения жидкости.

В гидромеханике различают два основных режима течения жидкости - ламинарный (слоистый) и турбулентный. При ламинарном движении связь между движущимися слоями осуществляется силами молекулярного сцепления частиц, в результате которого слой жидкости, перемещающийся с большей скоростью, увлекает за собой соседний слой, движущийся с меньшей скоростью, и, наоборот, частицы первого слоя задерживаются частицами второго.

При турбулентном движении перенос количества движения из одного слоя в другой осуществляется главным образом путем перехода отдельных объемов жидкости из слоя в слой.

Физические свойства жидкости.

Основными механическими свойствами жидкости являются весомость, плотность и вязкость. Весомость жидкости характеризуется её удельным весом (или объемным весом).

Удельный вес равен удельной силе тяжести, приложенной к единице занимаемого этой жидкостью объема. Иначе говоря, равен весу единицы объема жидкости.

Плотностью называется масса единицы объема жидкости. Чем отличается масса от веса?

Вес = Масса * ускорение свободного падения

Масса измеряется в килограммах, а вес в ньютонах.

Вязкостью жидкости называют свойство, в результате которого в ней появляются силы внутреннего трения, препятствующие сдвигающим усилиям. То есть способность жидкости оказывать сопротивление при скольжении одной её

части относительно другой. Например, когда две жидкости равного объёма помещены в идентичные капиллярные вискозиметры (приборы, определяющие вязкость вещества) и двигаются самотеком, вязкой жидкости требуется больше времени для протекания через капилляр. Если одной жидкости требуется для вытекания 200 секунд, а другой - 400 секунд, вторая жидкость в два раза более вязкая, чем первая.

Ходкость судна.

Ходкостью называется способность судна поддерживать заданную скорость при наименьшей затрате мощности двигателя.

Судно движется на границе двух сред - воды и воздуха. Поскольку плотность воды примерно в 800 раз больше плотности воздуха, то и сопротивление воды значительно больше воздушного сопротивления.

Сила, с которой среда препятствует движению судна, называется полным сопротивлением R . Физически полное сопротивление соответствует усилию в тросе при буксировке судна с заданной скоростью, поэтому его часто называют **буксировочным сопротивлением**. Полное сопротивление состоит из сопротивления воды $R_{вод}$ и воздушного сопротивления $R_{возд}$, т.е.

$$R = R_{вод} + R_{возд}$$

На преодоление этого сопротивления расходуется буксировочная мощность

$$N_{б} = RV, \text{ где} \quad (16)$$

$N_{б}$ - буксировочная мощность, кВт

R - буксировочное сопротивление, кН

V - скорость судна, м/с

Наибольшее влияние на ходкость судна оказывает сопротивление воды.

$$R_{вод} = R_T + R_p, \text{ где} \quad (17)$$

R_T - сила сопротивления трения

R_p - сила сопротивления давления

Сопротивление трения обуславливается вязкостью жидкости. Благодаря этому свойству жидкости у поверхности движущегося тела образуется пограничный слой, в котором происходит изменение скорости частиц жидкости – от нуля у поверхности тела до так называемой скорости внешнего потока (рис. 9). Понятие толщины пограничного слоя δ является довольно условным, поскольку влияние вязкости распространяется от поверхности тела неограниченно, поэтому полагают, что на расстоянии δ

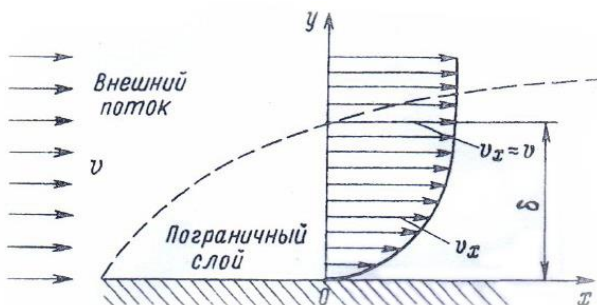


Рис. 9 Пограничный слой.

от поверхности тела скорость в пограничном слое составляет 0,995 скорости внешнего потока.

Сопротивление давления возникает частично вследствие влияния вязкости жидкости, частично за счет весомости жидкости. Часть сопротивления давления, обусловленная вязкостью жидкости, называется сопротивлением формы R_f . Оно образуется благодаря тому, что суммарное давление на кормовую часть корпуса меньше чем, на носовую. Уменьшение давления в кормовой части судна происходит из-за потери энергии на преодоление сил вязкости. Это падение давления по природе аналогично падению давления при движении жидкости в трубе. Часть сопротивления, обусловленная весомостью жидкости, называется волновым сопротивлением R_w . Причиной возникновения волнового сопротивления являются волны, образуемые движущимся судном на поверхности воды. При

образовании волны происходит перераспределение давления вдоль судна, в результате чего появляется составляющая сопротивления, направленная против движения судна.

Таким образом, сопротивление воды можно представить в виде трех составляющих: $R_{\text{вод}} = R_{\text{т}} + R_{\text{ф}} + R_{\text{в}}$ (18). Эти составляющие принято рассчитывать для так называемого «голового» корпуса (корпус без выступающих частей). Выступающие части – рули, кили, кронштейны и т. п. – создают дополнительное сопротивление, которое называется сопротивлением выступающих частей $R_{\text{вч}}$. Поэтому окончательно сопротивление воды движению судна записывается в виде

$$R_{\text{вод}} = R_{\text{т}} + R_{\text{ф}} + R_{\text{в}} + R_{\text{вч}}. \quad (19)$$

Подставив (19) в (15), получим зависимость для определения буксировочного сопротивления:

$$R = R_{\text{т}} + R_{\text{ф}} + R_{\text{в}} + R_{\text{вч}} + R_{\text{возд}}. \quad (20)$$

При исследовании ходкости судов принимают, что отдельные составляющие сопротивления не зависят друг от друга; хотя это положение в известной мере условно, оно не вносит большой погрешности в результаты расчета.

Определение всех составляющих сопротивления теоретическим путем представляет большие трудности, главным образом из-за сложности обводов судна. Поэтому широко используется экспериментальная оценка сопротивления по результатам испытаний моделей судов. При пересчете результатов модельных испытаний на натурное судно пользуются гипотезой Фруда, который предложил разделять сопротивление воды на сопротивление трения $R_{\text{т}}$ и остаточное сопротивление $R_{\text{о}}$, т. е.

$R_{\text{вод}} = R_{\text{т}} + R_{\text{ф}} + R_{\text{в}} = R_{\text{т}} + R_{\text{о}}$. Как видим, остаточное сопротивление при таком подходе представляет собой сумму сопротивления формы и волнового сопротивления, т. е. сумму сил разной природы. Тем не менее метод Фруда в разделении и пересчете сопротивления получил широкое распространение при экспериментальных работах и в расчетной практике, главным образом благодаря простоте и приемлемой точности конечных результатов.

При расчете судовых движителей и энергетической установки буксировочную мощность (в кВт) определяют по формуле:

$$N_{\sigma} = \frac{R_{\text{в}}}{1000} \quad (21)$$

В связи с потерями энергии при работе движителя мощность на гребном валу N_p (мощность, подводимая к движителю) всегда больше буксировочной мощности:

$N_p = N_\delta / \eta_d$, где η_d – коэффициент полезного действия движителя.

Еще большее значение имеет мощность на валу двигателя – эффективная мощность N_e , определяемая по формуле:

$$N_e = \frac{N_p}{\eta_v \eta_n} = \frac{N_\delta}{\eta_d \eta_v \eta_n} = \frac{N_\delta}{\eta} \quad (22)$$

Где η – пропульсивный коэффициент судна; η_v – к.п.д. валопровода, учитывающий потери на трение в подшипниках валопровода; η_n – к.п.д. передачи (редуктора, гидромуфты и т. п.)

Ниже приведены примерные числовые значения к.п.д. некоторых механизмов:

Движитель.....	0,50 – 0,75
Валопровод.....	0,95 – 0,99
Редуктор.....	0,94 – 0,98
Гидромуфта.....	0,95 – 0,97

Сопротивление трения

Сопротивление трения зависит от режима движения жидкости в пограничном слое. В зависимости от числа Рейнольдса $Re = \frac{VL_\delta}{\nu}$

режим движения жидкости может быть ламинарным и турбулентным. В ламинарном потоке, который наблюдается при $Re < 5 \cdot 10^5$, жидкость перемещается параллельными слоями не перемешиваясь. При более высоких числах Рейнольдса частицы жидкости начинают перемещаться поперек пограничного слоя, их движение становится более сложным, приобретая зигзагообразный пульсирующий характер. Такой режим движения жидкости называется турбулентным (беспокойным, бурным). При $Re = 5 \cdot 10^5 \div 5 \cdot 10^7$ возможно существование обоих видов движения – в носовой части поток будет ламинарным, в кормовой турбулентным. Ламинарный участок пограничного слоя не исчезает полностью и при более высоких числах Рейнольдса, но его влияние на общее сопротивление становится ничтожно малым. Поэтому считают, что при $Re > 5 \cdot 10^7$ поток будет полностью

турбулентным. Поскольку при турбулентном потоке сопротивление трения больше, чем при ламинарном, ламинаризация пограничного слоя может в принципе являться одним из путей уменьшения сопротивления трения.

При определении сопротивления трения судна его корпус принято представлять в виде так называемой эквивалентной гидромеханически гладкой пластины, которая имеет длину и смоченную поверхность, равные длине и смоченной поверхности корпуса судна. Термин «гидромеханически гладкая пластина» означает, что дальнейшее уменьшение шероховатости такой пластины практически не скажется на величине сопротивления трения.

На основании выражения для подсчета сопротивления трения судна, представленного в виде пластины, предложить формулу

$$R_{\tau} = \frac{1}{2} \zeta_{\text{тп}} \gamma v^2 S \quad (23)$$

где V - скорость судна, м/с; S - смоченная поверхность корпуса, м²; $\zeta_{\text{тп}}$ - коэффициент сопротивления трения гладкой пластины; γ - плотность морской воды, равная 1025 кг/ м³. Поскольку сопротивление трения обусловлено вязкостью жидкости, коэффициент $\zeta_{\text{тп}}$ зависит от числа Рейнольдса. Для турбулентного потока $\zeta_{\text{тп}}$ можно подсчитать по формуле Прандтля – Шлихтинга: $\zeta_{\text{тп}} = 0,455 / \lg Re^{2,58}$.

Ниже приводятся средние значения чисел Рейнольдса и коэффициентов сопротивления трения для основных типов промысловых судов:

Тип судна	$Re \cdot 10^{-8}$	$\zeta_{\text{тп}} \cdot 10^3$
Большие сейнеры	0,9 – 1,2	2,16 – 2,09
Базы и консервные заводы	3,7 – 8,9	1,79 – 1,60
Производственные суда	1,4 – 7,5	2,05 – 1,63
Приемно – транспортные суда	1,5 – 8,4	2,03 – 1,61
Большие рыболовные траулеры	13,0 – 5,8	1,83 – 1,68

Корпус судна отличается от пластины кривизной и значительной шероховатостью.

Кривизна корпуса учитывается с помощью коэффициента k , на который умножают коэффициент сопротивления пластины $\zeta_{\text{тп}}$.

Коэффициент k зависит от отношения $\frac{L_{\text{в}}}{B}$. При изменении $\frac{L_{\text{в}}}{B}$ от 0,5 до 10 значения k лежат в пределах 1,08 – 1,02, т.е. коэффициент сопротивления гидродинамически гладкого корпуса $k \zeta_{\text{тп}}$ мало отличается от коэффициента сопротивления пластины $\zeta_{\text{тп}}$.

Влияние шероховатости учитывается увеличением коэффициента сопротивления трения гидродинамически гладкого корпуса $k \zeta_{\text{тп}}$ на величину $\zeta_{\text{ш}}$. В пределах измерения скорости судна величину $\zeta_{\text{ш}}$ можно считать постоянной, характерной для данного вида судна и технологии постройки. Для судов со сварной обшивкой, имеющих средние и малые относительные скорости, $\zeta_{\text{ш}} = (0,3 \div 0,6) \cdot 10^{-3}$. Большие значения $\zeta_{\text{ш}}$ характерны для судов меньших размеров. Примерно 40 – 60% надбавки на шероховатость приходится на дополнительное сопротивление, обусловленное окраской листов наружной обшивки; 20 – 30% - на сопротивление от вырезов и ниш; 10 – 20% - на сопротивление сварных швов. Вследствие шероховатости сопротивление трения возрастает на 20 – 30 %.

С введением коэффициентов k и $\zeta_{\text{ш}}$ формулу для вычисления сопротивления трения судна можно записать в виде

$$R_{\text{т}} = \frac{1}{2} (k \zeta_{\text{тп}} + \zeta_{\text{ш}}) \gamma v^2 S, \quad (24)$$

Где $k \zeta_{\text{тп}} + \zeta_{\text{ш}} = \zeta_{\text{т}}$ - коэффициент сопротивления трения судна.

Смоченную поверхность добывающих судов (БМРТ, траулеров типа РТ, СРТ, МРТ, сейнеров) можно определить по формулам Денни – Мумфорда и Роза с поправками Ю. И. Нечаева

$$S = L_{\text{в}} d (1,45 + 1,12 \delta \frac{B}{d}), \quad (25)$$

$$S = 1,91\sqrt[3]{V}(\sqrt[3]{V} + 0,4L_b). \quad (26)$$

В смоченную поверхность, вычисленную по этим формулам, не входят выступающие части. Чтобы учесть их влияние, необходимо смоченную поверхность увеличить на 4,0 – 10%. Поскольку надбавка на выступающие части растет с уменьшением длины судна, верхний предел относится к сравнительно небольшим судам. Погрешность в определении смоченной поверхности по формулам (25) и (26) не превышает 3%.

Для вычисления смоченной поверхности траулеров можно также воспользоваться формулами Тейлора и Денни – Мумфорда с корректирующими коэффициентами предложенными М. С. Трубом:

$$S = 2,55 \sqrt{VL_b} \text{ и } S = 1,02 L_b d (1,45 + 1,12\delta \frac{B}{d}).$$

Точность этих формул примерно совпадает с точностью формул (25) и (26).

Неплохие результаты для транспортных судов дают формулы В. А. Себеки и Денни – Мумфорда с коэффициентами С. П. Мурагина:

$$S = L_b d \left[2 + 1,37(\delta - 0,274) \frac{B}{d} \right],$$

$$S = L_b d \left(1,36 + 1,13\delta \frac{B}{d} \right).$$

Формулу В. А. Себеки можно использовать для подсчета смоченной поверхности плавучих баз и приемно – транспортных судов, имеющих большой коэффициент общей полноты.

Сопrotивление формы

Сопrotивление формы, так же как и сопротивление трения, обусловлено вязкостью жидкости. При обтекании тела вязкой жидкостью пограничный слой как бы стекает с кормовой оконечности тела и создает гидродинамический след. Стеkanie пограничного слоя может быть плавным (рис. 10а) и отрывным (рис. 10б). В последнем случае гидродинамический след занимает довольно широкую область за кормой тела, ограниченную вихревыми дорожками. В этих двух случаях причина образования и величина сопротивления формы различны.

Рассмотрим характер обтекания корпуса судна реальной жидкостью при плавном стекании пограничного слоя. В районе форштевня в точке А скорость обтекания равна нулю, а давление, согласно уравнению Бернулли, достигает максимума (рис. 10в). По мере продвижения жидкости к миделю скорость частиц жидкости возрастает, а давление падает, т.е. энергия давления потока переходит в кинетическую энергию. В идеальной жидкости этот переход совершается без потерь, в реальной – часть энергии теряется на преодоление сил вязкости. При дальнейшем продвижении жидкости к ахтерштевню скорость частиц падает, давление растет. В идеальной жидкости полностью совершается обратный переход кинетической энергии в энергию давления, в результате чего суммарное давление на кормовую и носовую части будет одинаковым

(кривая I на рис.10в). В реальной жидкости из-за потери части энергии потока на преодоление сил вязкости давление в корме оказывается ниже, чем в носу (кривая II на рис. 10в), что и обуславливает появление сопротивления формы. Описанная картина наблюдается у так называемых хорошо обтекаемых тел. При безотрывном стекании пограничного слоя сопротивление формы создается только в результате перепада давления по длине тела.

У плохо обтекаемых тел потери энергии настолько велики, что частицы жидкости вблизи корпуса теряют скорость, не доходя до ахтерштевня (точка D на рис. 10г). Точка D называется точкой отрыва пограничного слоя.

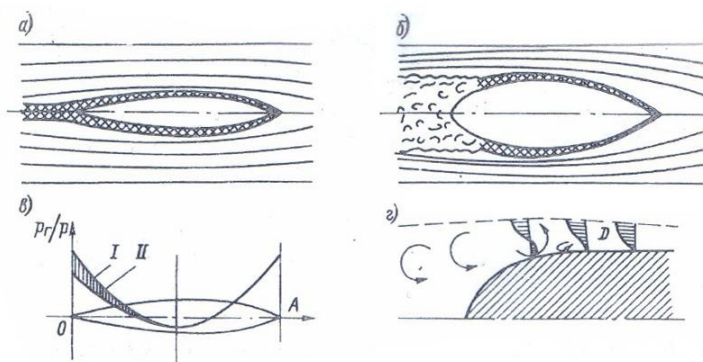


Рис. 10. Сопротивление формы: а – плавное обтекание; б – отрывное обтекание; в – эпюра давления; г – отрыв пограничного слоя.

Поскольку частицы жидкости потеряли скорость вблизи корпуса, к нему устремляются более отдаленные слои потока и вовлекают пограничный слой во вращательное движение. За кормой судна идет непрерывное вихреобразование, которое, как бы оттесняя от корпуса пограничный слой, еще больше снижает давление на кормовую часть судна. Таким образом, при отрывном обтекании сопротивление формы создаётся главным образом за счет затраты энергии на образование вихрей.

Сопротивление формы можно посчитать по формуле

$$R_{\phi} = \frac{1}{2} \zeta_{\phi} \gamma v^2 S, \text{ где } \zeta_{\phi} - \text{коэффициент сопротивления формы,}$$

зависящий от Re . У судов с хорошо обтекаемыми обводами сопротивление формы невелико и обычно составляет 15 – 20% полного сопротивления R . Сопротивление формы судов с плохо обтекаемыми обводами может достигать до 50 – 70% R .

Сопротивление формы зависит от положения точки отрыва пограничного слоя: чем раньше наступает отрыв, тем больше сопротивление. Положение точки отрыва зависит от скорости судна, формы корпуса и состояния смоченной поверхности, поэтому при правильном выборе обводов судна можно значительно снизить сопротивление формы. Поскольку точка отрыва пограничного слоя при плавном его стекании всегда располагается на крайней кромке кормы, коэффициент сопротивления формы не зависит от числа Рейнольдса. При отрывном обтекании коэффициент сопротивления формы зависит от числа Рейнольдса. Однако в диапазоне чисел Рейнольдса, характерном для морских судов, точка отрыва пограничного слоя практически не меняет своего положения, т.е. можно считать, что коэффициент сопротивления формы промысловых судов не зависит от числа Рейнольдса.

Коэффициент сопротивления может быть определен по приближенным формулам или экспериментально. Приближенные формулы позволяют провести лишь оценку сопротивления формы, так как они имеют малую степень точности. Экспериментальное определение сопротивления формы производится путем испытания дублированной модели судна (двух одинаковых

подводных частей модели, сложенных ватерлиниями) в погруженном состоянии.

Волновое сопротивление

При движении судна на свободной поверхности воды возникают волны, которые являются причиной появления волнового сопротивления. В соответствии с уравнением Бернулли, в носу и корме движущегося судна создаются зоны повышенного давления, в средней части – пониженного (рис 11а, кривая I). Поскольку свободная поверхность воды не препятствует вертикальным перемещениям жидкости, в носу и в корме уровень жидкости повышается, а в средней части – понижается. Однако изменение уровня жидкости не будет в точности соответствовать распределению давления, так как корпус судна встречается при движении с новыми массами воды, которая в следствии ускорения перемещается на больший уровень, чем это требуется для уравнивания давления. Частицы жидкости, выведенные из положения равновесия, в следствии весомости начинают совершать колебания, т.е. на поверхности создаются корабельные волны, которые распространяются по ходу движения судна.

Наблюдения показывают, что при движении судна на поверхности образуются две группы волн: носовая и кормовая. Носовая группа зарождается несколько позади форштевня, кормовая - несколько впереди ахтерштевня. Каждая группа волн состоит из поперечных и расходящихся волн (рис. 11б). расходящиеся волны представляют собой расположенные в эшелонном порядке ряды коротких волн. Середины гребней расходящихся волн располагается по прямой, составляющей с диаметральной плоскостью угол $\alpha = 18 \div 20^\circ$. Гребни отдельных расходящихся волн образуют с направлением движения судна угол β , который приблизительно равен 2α . Поперечные волны образуют с диаметральной плоскостью угол 90° и располагаются внутри сектора, ограниченного расходящимися волнами правого и левого бортов. Первая поперечная волна носовой группы начинается вершиной, первая волна кормовой группы – впадиной. Гребни по следующих поперечных волн отстоят друг от друга на расстоянии

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} V^2. \quad (27)$$

Поперечные и расходящиеся волны при постоянной скорости судна V остаются неизменными. На поддержание этой установившейся

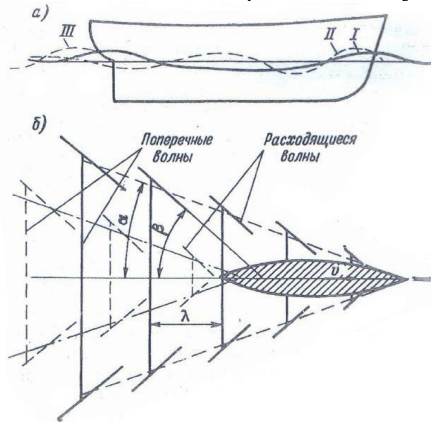


Рис. 11 Волновое сопротивление: а – распределение давления; б – система волн.

I – давление; II – носовая волна; III – кормовая волна.

системы волн необходимо затратить определенную энергию, которая представляет собой работу волнового сопротивления.

Волновое сопротивление судна определяют экспериментальным и аналитическим методами. Аналитическое определение волнового сопротивления связано с трудоемким и сложными вычислениями, поэтому в практических расчетах волнового сопротивления используют методы подобия и результаты модельных испытаний. Формула для подсчета волнового сопротивления имеет вид $R_v = \frac{1}{2} \zeta_v \gamma v^2 S$, где ζ_v -

коэффициент волнового сопротивления, зависящий от числа Фруда $Fr = V/\sqrt{gL_v}$. Зависимость коэффициента волнового сопротивления ζ_v от числа Фруда показана на рис. 12а, откуда видно, что с увеличением скорости коэффициент волнового сопротивления интенсивно растет. Следовательно, волновое

сопротивление зависит от скорости в степени значительно больше двух, т.е. оно нарастает с увеличением скорости намного быстрее вязкостного сопротивления. Как следует из графика, при числах Фруда $Fr < 0,2$ волновое сопротивление практически отсутствует. Характерной особенностью кривой $\zeta_b(Fr)$ является неравномерность увеличения коэффициента волнового сопротивления с повышением числа Фруда. На кривой $\zeta_b(Fr)$ наблюдаются бугры и впадины, которые связаны с интерференцией носовых и кормовых поперечных волн.

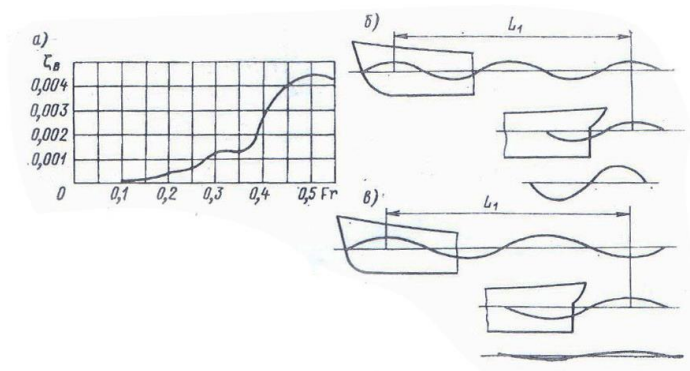


Рис. 12 Интерференция волн: а – график зависимости ζ_b от числа Фруда; б – совпадение волн по фазе; в – гашение волн.

Из формулы (13) видно, что с изменением скорости судна меняется длина волны. Поэтому может оказаться, что при каком-то соотношении между скоростью и длиной судна гребни носовых волн совпадут с гребнями кормовых волн (рис. 12,б). В этом случае за кормой наблюдается повышенное волнообразование, и волновое сопротивление судна резко увеличивается. Этому режиму движения соответствуют бугры на кривой волнового сопротивления. При других скоростях происходит частичное гашение носовыми поперечными волнами кормовых волн, что приводит к уменьшению волнового сопротивления (рис. 12,в).

Благоприятным в отношении волнового сопротивления скоростям соответствуют впадины на кривой волнового сопротивления. Следовательно, каждой длине судна соответствуют определенные зоны благоприятных и неблагоприятных скоростей судна. Благоприятными будут те скорости, при которых в так называемую волнообразующую длину судна L_1 (рис.12,в) укладывается целое число волн с половиной, т.е. когда

$$\frac{L_1}{\lambda} = \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \dots \quad (28)$$

В соответствии с эмпирическими данными Кента волнообразующую длину судна можно определить по формуле

$$L_1 = \phi L_{\epsilon} + \frac{3}{4} \lambda$$

(29)

Подставив (27) и (29) в соотношение (28), получим формулу для определения благоприятных скоростей с точки зрения волнового

сопротивления $V = 2,5 \sqrt{\frac{\phi L_{\epsilon}}{3 + 4k}}$, в которой $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Если в

волнообразующую длину судна укладывается целое число волн (рис. 12,б): $L_1 / \lambda = 1, 2, 3, \dots$, то скорости будут неблагоприятными. Используя приведенные выше зависимости для подсчета благоприятных скоростей получим выражение

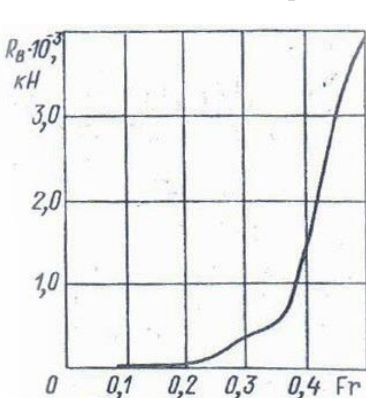


Рис. 13. Зависимость волнового сопротивления от числа Фруда

$$V = 2,5 \sqrt{\frac{\phi L_{\epsilon}}{3 + 4k}}, \text{ где } k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Приведенные соображения играют большую роль при решении вопроса о назначении скорости эксплуатируемых судов. В зоне неблагоприятных скоростей даже небольшое увеличение скорости требует значительного повышения мощности машин. В то же время в зоне благоприятных скоростей можно увеличить скорость судна

без существенного изменения мощности.

Зависимость волнового сопротивления от числа Фруда показана на рис. 27. Как видно из рисунка, при числах Фруда более 0,35 волновое сопротивление резко растёт, поэтому увеличение скорости небольших добывающих судов (малых рыболовных траулеров сейнеров), которые плавают при $F_r \approx 0,35$, требует значительного увеличения мощности двигателя. Если длину таких судов увеличить, то при той же мощности двигателей их скорость практически не изменится, так как волновое сопротивление с увеличением длины судна заметно уменьшается.

Сопротивление выступающих частей

Выступающими частями являются ахтерштевни, кронштейны, гребные валы, выкружки гребных валов, рули, скуловые и брусковые кили. Судовые движители к выступающим частям не относятся: их сопротивление учитывают при определении к.п.д. движителя. Сопротивление выступающих частей небольших судов может достигать 25% сопротивления голого корпуса.

Сопротивление выступающих частей можно определить экспериментальным или теоретическим путем.

В первом случае по формулам гидромеханики подсчитывают сопротивление отдельных выступающих частей и, сложив их, находят значение $R_{вч}$. В сопротивлении коротких выступающих частей основную роль играет сопротивление формы, в частях большой протяженности – сопротивление трения. Сопротивление выступающих частей можно так же определить по формуле

$$R_{вч} = \frac{1}{2} \zeta_{вч} \gamma V^2 S,$$
 где $\zeta_{вч}$ – коэффициент сопротивления выступающих частей, который меняется в довольно широких пределах. В среднем для одновинтовых судов $\zeta_{вч} = (0,05 \div 0,15) \cdot 10^{-3}$ (верхний предел относится к сравнительно небольшим добывающим судам).

Экспериментально сопротивление выступающих частей определяют в опытовых бассейнах или аэродинамических трубах. В бассейнах производится испытание моделей судна с голым корпусом и выступающими частями. В аэродинамических трубах производится продувка изолированных выступающих частей или

их моделей. При приближенных расчетах ходкости полагают, что суммарное сопротивление выступающих частей добывающих и приемно-транспортных судов составляет соответственно 4 – 10 и 2 – 5% сопротивления голого корпуса. Следует отметить, что с увеличением размеров и скорости судна надбавка на выступающие части уменьшается.

Сопротивление воздуха движению судна

При обтекании потоком воздуха надводной части судна возникает аэродинамическая сила R_a (рис. 14,а). Проекция этой силы на направление движения судна представляет сопротивление воздуха движению судна (воздушное сопротивление) $R_{возд}$, которое определяется по формуле

$$R_{возд} = \frac{1}{2} \zeta_{возд} \rho_v V_k^2 S_{\otimes}, \quad (30) \text{ где}$$

$\zeta_{возд}$ - коэффициент воздушного сопротивления; $\rho_v = 1,25 \text{ кг/м}^3$ – массовая плотность воздуха; $S_{\otimes}$ - площадь проекции надводной части судна на плоскость мидельшпангоута, м^2 ; V_k - скорость обтекания воздухом надводной части судна, м/с .

Коэффициент воздушного сопротивления, определяемый по результатам продувки моделей судов в аэродинамических трубах, зависит от угла атаки α (рис.14,б). При α , близких к нулю, надстройки и рубки экранируют друг друга, в результате чего воздушное сопротивление может несколько уменьшиться. При $\alpha = 20 \div 40^\circ$ надстройки и рубки оказываются невыгодно расположенными, поэтому воздушное сопротивление возрастает. Коэффициент воздушного сопротивления при углах атаки более

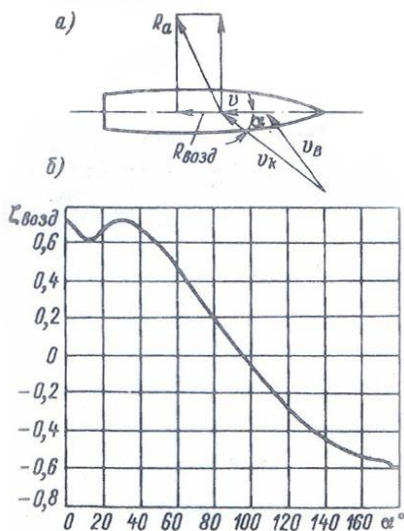


Рис. 14. Воздушное сопротивление:
а - схема сил; б - зависимость $\zeta_{возд}$ от угла атаки.

90° принимает отрицательное значение, т.е. $R_{\text{возд}}$ совпадает с направлением движения судна. Однако вследствие неблагоприятного влияния морского волнения даже при попутном ветре скорость судна снижается. Воздушное сопротивление $\zeta_{\text{возд}}$ рассчитывается для встречного потока воздуха, в среднем $\zeta_{\text{возд}}$ промысловых судов составляет 0,7 – 1,2.

Скорость обтекания воздухом надводной части судна при встречном ветре определяют по формуле $V_k = V + V_b$, где V - скорость судна; V_b - скорость ветра, определяемая по шкале Бофорта. В сравнительно тихую погоду воздушное сопротивление составляет 1,5 – 3,0% полного. При встречном ветре в 4 – 5 баллов оно может достигнуть 10 – 15%, а при сильном шторме – 30 – 40%.

Расчет буксировочного сопротивления и эффективной мощности главного двигателя

Расчет производится для случая нагрузки судна «на отход». Буксировочное сопротивление судна R_{σ} рассматривается как сумма трех составляющих: сопротивления трения R_T , вихревого сопротивления (сопротивления формы) R_{ϕ} и волнового сопротивления R_{ϵ} :

$$R_{\sigma} = R_T + R_{\phi} + R_{\epsilon} \quad (31)$$

Сопротивление трения и вихревое сопротивление обусловлены вязкостью жидкости, волновое сопротивление – весомостью жидкости.

В практических расчетах используют гипотезу Фруда, согласно которой буксировочное сопротивление находится как сумма сопротивления трения R_T , зависящего от числа Рейнольдса и остаточного сопротивления $R_{\text{ост}}$, зависящего от числа Фруда.

Число Рейнольдса $Re = \frac{VL}{\nu}$ выражает вязкость жидкости, а число

$$\text{Фруда } Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} - \text{силу тяжести.} \quad (32)$$

В приведенных выражениях V , L – скорость и длина судна; ν – коэффициент кинематической вязкости для морской воды при 4 °С $\nu = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; g – ускорение свободного падения.

Величина сопротивления трения рассчитывается по эмпирическим формулам, а остаточное сопротивление определяется с использованием кривых, полученных на основе систематических испытаний моделей судов.

Для расчета буксировочного сопротивления используется выражение

$$R_g = 0,5 \zeta_v \gamma V^2 \Omega, \quad (33)$$

Где ζ_v – коэффициент буксировочного сопротивления; γ – плотность забортной воды; V – скорость судна, м/с; Ω – площадь смоченной поверхности корпуса судна.

Площадь смоченной поверхности можно определить по формуле

$$\Omega = \sqrt[3]{\nabla} \cdot (3,4 \sqrt[3]{\nabla} = 0,5L). \quad (34)$$

Коэффициент буксировочного сопротивления определяется как сумма коэффициента сопротивления трения $\zeta_{тр}$ и коэффициента остаточного сопротивления $\zeta_{ост}$

$$\zeta_v = \zeta_{тр} + \zeta_{ост}. \quad (35)$$

Коэффициент сопротивления трения рассчитывается как сумма коэффициента трения эквивалентной (по площади смоченной поверхности) технически гладкой пластины ζ_f и надбавок на шероховатость $\zeta_{ш}$ и выступающие части $\zeta_{в.ч.}$

$$\zeta_{mp} = \zeta_f + \zeta_{ш} + \zeta_{в.ч.} \quad (36)$$

$$\zeta_f = \frac{0,075}{(\lg Re - 2)^2} \quad (37)$$

$\zeta_{ш} = 0,4 \cdot 10^{-3}$ - надбавка на шероховатость судов длиной до 150 м;
 $\zeta_{в.ч.} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ - надбавка на выступающие части одновинтового судна длиной 130...200 м.

Величина коэффициент остаточного сопротивления $\zeta_{ост}$ определяется по диаграмме, приведенной в Приложении Р.

Эффективная мощность главного двигателя N_e определяется выражением

$$N_e = \frac{R_{\sigma} V}{\eta}, \quad (38)$$

Где η - пропульсивный коэффициент (в работе принимается $\eta=0,6$).

Расчеты выполняются в табличной форме (см. табл. 1). По результатам расчетов строятся графики зависимости буксировочного сопротивления и эффективной мощности от скорости судна.

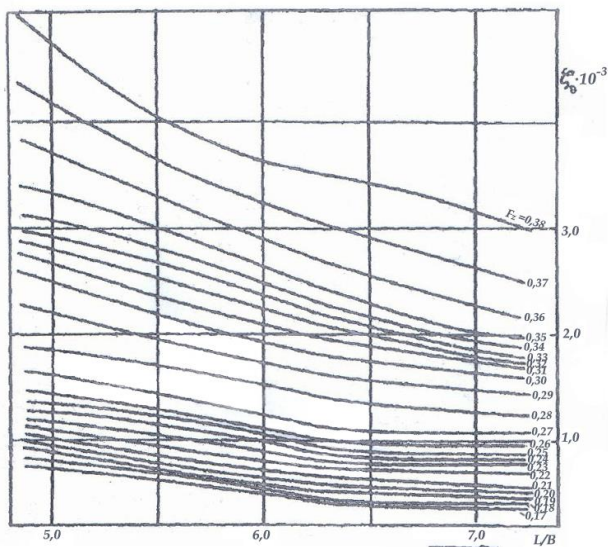
Таблица 1

Расчет буксировочного сопротивления и эффективной мощности главного двигателя

№ п/п	Наименование расчетных величин	Обозначение и формула	Размерность	Числовые значения расчетных величин
1	Скорость судна	V_s	уз	
2	Скорость судна	$V = 0,515 V_s$	м/с	
3	Число Рейнольдса	$Re = \frac{VL}{\nu}$	-	
4	Число Фруда	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$	-	
5	Коэффициент трения пластины	$\zeta_f = \frac{0,075}{(\lg Re - 2)^2}$	-	
6	Коэффициент остаточного сопротивления	$\zeta_{ост}$	-	
7	Коэффициент буксировочного сопротивления	$\zeta_0 = \zeta_f + \zeta_m + \zeta_{в.ч.} + \zeta_{ост}$	-	
8	Буксировочное сопротивление	$R_0 = 0,5 \zeta_0 \rho V^2 \Omega$	кН	
9	Эффективная мощность	$N_e = \frac{R_0 V}{\eta}$	кВт	

Приложение Р

Коэффициент остаточного сопротивления



Библиографический список

1. Самсонов С. В. Остойчивость судна – Владивосток; Дальрыбвтуз, 2008г – 80с
2. Самсонов С. В. Расчет загрузки и оценка мореходных качеств транспортного судна - Дальрыбвтуз, 2012г – 64с
3. Гулько Л. М. Расчет координат центра тяжести и посадки судна – Владивосток; Дальрыбвтуз, 2012г – 26с
4. Кулагин В. Д. Теория и устройство морских промышленных судов. л.: Судостроение, 1974г – 440с
5. Бойко В. В. Теория и устройство судна – Владивосток; Дальрыбвтуз, 2014г – 220с