

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ



Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет

Е.Е. Петрова

ТЕОРИЯ И УСТРОЙСТВО СУДНА

Методические указания по выполнению лабораторных работ
студентов и курсантов по специальности 26.05.06
«Эксплуатация судовых энергетических установок»
всех форм обучения

Владивосток

2025

УДК 629.12 (07)

ББК 39.42

Б 772

Утверждено редакционно-издательским советом
Дальневосточного государственного рыбохозяйственного
Университета.

Автор – Е.Е. Петрова

Рецензент – В.В. Ганнесен доцент кафедры
«Судовождение»

© Е.Е. Петрова, 2025

© Дальневосточный государственный технический рыбохо-
зяйственный университет, 2025.

Лабораторное занятие 1

Определение основных размерный судна

Количество исполнителей: 3-4 человека.

Время проведения: 2 часа.

Цель работы: определение геометрических характеристик модели для использования в последующих лабораторных работах.

Теоретические основы: главными размерениями судна являются длина наибольшая $L_{нб}$ - продольное расстояние между крайними точками корпуса судна; L - длина расчетная (длина летней грузовой ватерлинии); B - ширина; D - высота борта.

Методика и последовательность выполнения работы

1. Определение линейных размеров корпуса.

Модель находится на кильблоке. Измеряется длина наибольшая $L_{нб}$, ширина B и высота борта D модели.

2. На всех стенках ванны (примерно посредине стенок) измеряется расстояние от верхней кромки ванны до поверхности воды.

3. В 2-3 местах измеряется расстояние между внутренними стенками ванны и определяется длина l_v и ширина b_v внутреннего объема ванны.

4. Модель помещается в ванну. После прекращения колебаний модели и воды измеряется уровень воды в ванне в районе предыдущих измерений. Рассчитывается изменение уровня воды a_{vi} .

Среднее значение изменения уровня $a_{вср} = \sum a_{vi} / n$ определит высоту изменения уровня воды в ванне. Рассчитывается объемное водоизмещение модели $\Delta = l_v * b_v * a_{в.ср}$, см, и полное водоизмещение $\Delta = \gamma \Delta$, г, где плотность пресной воды $\gamma = 1 \text{ г/см}^3$.

5. По маркам углублений на миделе определяется осадка модели d .

6. Для определения длины модели по ватерлинию измеряется расстояние по поверхности воды от форштевня и от транца до торцевых стенок ванны.

7. В трюм модели принимается груз P массой примерно 10% Δ и снимается новая осадка на миделе d_1 ; рассчитывается изменение осадки от приема груза $d = d_1 - d$ и число граммов на см осадки $q_{г/см} = P / \delta d$. Площадь ватерлинии определится из выражения $q_{г/см} = \rho S$.

Оформление отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы должен содержать:

1. Название и номер работы, номер модели.
2. Вид модели сверху и с борта с указанием основных размерений.
3. Основные размерения модели.
4. Объемное и полное водоизмещение.
5. Площадь ватерлинии.
6. Коэффициенты общей полноты и полноты ватерлинии.

Контрольные вопросы

1. Плоскости, образующие теоретический чертеж судна.
2. Основные размерения судна.
3. Понятие носового и кормового перпендикуляров.
4. Посадка судна.
5. Объемное водоизмещение судна и центр величины.
6. Коэффициенты полноты корпуса судна.
7. Водоизмещение и объемное водоизмещение.
8. Дедвейт, грузоподъемность и грузовместимость судна.

Лабораторное занятие 2

Определение начальной остойчивости судна методом кренования

Цель работы: приобретение навыков определения поперечной и продольной метацентрических высот методом кренования

Время выполнения: 6 часов

Количество исполнителей: 3-4 человека.

Теоретические основы. Критерием начальной остойчивости является метацентрическая высота, представляющая собой расстояние между метацентром и центром масс (ЦМ) судна. Определение поперечной h и продольной H метацентрических высот методом кренования основано на замере угла крена Θ и дифферента Df судна, вызванных создаваемым малым кренящим $M_{кр}$ и дифференцирующим $M_{диф}$ моментами.

Для расчета метацентрических высот используются метацентрические формулы поперечной и продольной остойчивости с заменой синуса угла крена на равный ему в случае малости угла тангенс этого угла

$$h = \frac{M_{кр}}{\Delta \operatorname{tg} \psi}; \quad H = \frac{M_{диф} L_{му}}{\Delta D f};$$

где Δ - водоизмещение (масса) модели; $L_{му}$ - длина модели по ватерлинии между марками углублений. Для замера углов крена используется отвес (нить с подвешенным грузом) и закрепленная на палубе модели линейка с ценой деления 1 мм. Тангенс угла крена определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \theta = K/\lambda;$$

где K - отклонение отвеса, измеренное по линейке; λ - возвышение точки подвеса нити над шкалой линейки в диаметральной плоскости модели.

Методика и последовательность выполнения работы

1. Определение поперечной метацентрической высоты.

Сместить груз P_y на правый борт последовательно на расстояния $l_{y1} = 5$ см, $l_{y2} = 10$ см и $l_{y3} = 15$ см от диаметральной плоскости. Определить соответствующие отклонения нити отвеса K_1 , K_2 и K_3 . Прodefать то же на левый борт. Данные замеров записать в таблицу 1 и после выполнения необходимых вычислений найти h , как среднее арифметическое значение.

2. Определение продольной метацентрической высоты

Эта работа осуществляется в следующем порядке:

- а) снять осадку носом d_n и кормой d_k и определить начальный дифферент D_{fo} ;
- б) последовательно перемещать груз в нос по 10 см и для каждого положения снимать осадку носом d_{ni} и кормой d_{ki} ;
- в) вернуть груз в среднее положение и перемещать его последовательно в корму.

Все данные записать в таблицу 2. Выполнить необходимые вычисления и найти H , как среднее арифметическое значение.

Оформление отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы должен содержать: Название и номер работы, номер модели. Схему образования восстанавливающего момента. Таблицы 1 и 2 с данными кренования. Сравнение между собой значений поперечной и продольной метацентрических высот и объяснение причин, обуславливающих их существенную разницу.

Контрольные вопросы

- Сформулировать понятия:
 - поперечной и продольной метацентрических высот;
 - поперечного и продольного метацентрических радиусов;
 - поперечного и продольного метацентров;
 - центра массы и центра величины (плавучести) судна;
 - силы тяжести и силы поддержания;
 - плеча статической остойчивости.
- Начертить схему образования восстанавливающего момента.
- Перечислить основные внешние силы, способные вызвать статические и динамические наклонения судна.
- Почему метацентрические формулы остойчивости применимы только для малых наклонений судна?
- Какие выводы начальной остойчивости базируются на свойствах кривой центра величины при малых наклонениях судна?

Таблица 1- Определение поперечной остойчивости

Постоянные опыта: $P_y = \dots \text{кг}$; $\lambda = \dots \text{см}$; $\Delta = \dots \text{кг}$; $h = \sum h_i / 6$

Направление перемещения груза P_y	№ замера	l_{yi} , см	$M_{kpi} =$ $P_y \times l_{yi}$, кг $\times$ см	Отклонение нити отвеса K_i , см	$\text{tg}\theta$	$\Delta\theta$, кг	h_i , см

Таблица 2- Определение продольной остойчивости

Постоянные опыта: $P_{xH} = \dots \text{кг}$; $P_{xK} = \dots \text{кг}$; $L = \dots \text{см}$; $\Delta = \dots \text{кг}$;

$D_{f0} = d_{n0} - d_{k0} = \dots \text{см.}$, $H = \sum H_i / 6$

Направление перемещения груза P_y	№ замера	l_{xHi} , см	$M_{\text{диф}}$	d_{Hi} , см	d_{ki} , см	D_{fi} , см	δD_{fi} , см	H_i , см

Влияние на начальную остойчивость и посадку судна переноса малого груза

Цель работы. Установить влияние горизонтального и вертикального перемещения малого груза на начальную остойчивость и посадку судна.

Теоретические основы. Критерием начальной остойчивости судна является метацентрическая высота h .

Посадка судна – положение относительно поверхности воды, определяется параметрами посадки: углом крена θ° , углом дифферента φ° , (или дифферентом $Df = d_n - d_k$) и средней осадкой:

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_n + d_k}{2}$$

Влияние перемещения малого груза на остойчивость и посадку судна оценивают сравнением начальной метацентрической высоты и параметров посадки до и после его переноса по вертикали и по горизонтали.

Вертикальный перенос груза.

Перемещение груза по вертикали вверх по направлению оси OZ (рис. 1, а) приводит к вертикальному смещению (подъему) центра тяжести судна на величину δZg .

Посадка судна при этом не изменяется, если начальная остойчивость остается положительной. При уменьшении метацентрической высоты до отрицательных значений, судно теряет способность сидеть прямо – без крена.

Вертикальное смещение центра тяжести определяется по формуле, полученной на основании теоремы перемещения центра масс системы тел:

$$\delta Zg = \frac{Pz(Z2 - Z1)}{\Delta},$$

где Pz – масса перемещаемого груза, кг;

Δ – масса модели, кг;

$Z1, Z2$ – координаты ц.т. перемещаемого груза в начальном и конечном положениях.

Поскольку при неизменной посадке судна положение метацентров не изменяется, то приращение как поперечной δh , так и продольной δH начальных метацентрических высот будет равно приращению аппликаты ц.т. судна δZg , взятому с обратным знаком (рис. 1 б):

8

где $l_z = (Z_2 - Z_1)$ – величина вертикального перемещения груза, положительная, если груз перемещается вверх и отрицательная, если груз перемещается вниз.

Таким образом, при перемещении груза вверх начальные метацентрические высоты уменьшаются, а при перемещении вниз – увеличиваются.

Горизонтальный перенос груза поперек судна. Перемещение груза P_y по горизонтали поперек судна на расстояние l_y создает кренящий момент $M_{кр}$, который наклонит судно на угол θ (рис. 1, в):

$$M_{кр} = P_y * l_y * \cos \theta.$$

В свою очередь наклонение судна приведет к возникновению восстанавливающего момента, который при малых (начальных) наклонениях определяют по формуле:

$$M_B = \Delta * h * \sin \theta.$$

Из условия равновесия $M_B = M_{кр}$ получим угол крена:

$$\operatorname{tg} \theta \approx \theta \approx (P_y * l_y) / \Delta h.$$

Поперечное горизонтальное перемещение груза P_y , изменившее крен судна, не изменило аппликаты центра тяжести судна, поэтому при рассматриваемом малом наклонении, когда метацентр считается сохраняет свое положение в одной точке, метацентрическая высота, а значит, и начальная поперечная остойчивость судна не изменяются. Поэтому опытов с моделью для этого случая не требуется.

Горизонтальный перенос груза вдоль судна. Продольное горизонтальное перемещение груза P_x в направлении оси OX на расстояние l_x создает дифферент (рис. 1д). При малых значениях угла дифферента применимы допущения начальной остойчивости, на основании которых по аналогии с поперечными наклонениями получим угол дифферента ψ и дифферент Df :

$$\varphi = \operatorname{tg} \varphi = \frac{P_x - l_x}{\Delta * H}$$

$$tg\varphi = \frac{d_H - d_K}{L_{my}}$$

$$Df = d_H - d_K = \frac{L_{my} * P_x * l_x}{\Delta * H}$$

Изменение начальной поперечной остойчивости при продольном горизонтальном перемещении груза P_x не связано с изменением аппликаты центра тяжести судна, так как она (аппликата) не изменяется, но вызвано различием полноты обводов корпуса в носу и в корме – в корме судно имеет большую полноту обводов. Поэтому с дифферен- том на корму увеличивается момент инерции площади действующей ватерлинии и увеличивается поперечный метацентрический радиус, что приводит к увеличению метацентрической высоты.

Наоборот при дифференте на нос уменьшается момент инерции площади действующей ватерлинии и уменьшается поперечный мета- центрический радиус, что приводит к уменьшению метацентрической высоты. Именно эту тенденцию изменения поперечной остойчивости при продольном перемещении груза необходимо подтвердить опытом на модели.

Методика и последовательность выполнения работы

1. Перемещение груза по вертикали, см. рис.1а.

а) Для положений груза массой P_z на палубе, на высоте $l_{z1} = 10$ см и $l_{z2} = 15$ см определить поперечные метацентрические высоты мето- дом кренования, как указано в лабораторной работе № 2.

Результаты измерений и необходимые вычисления представить в форме таблицы № 3.

б) Определить приращения метацентрических высот $\delta h_1 = h_1 - h_0$ и $\delta h_2 = h_2 - h_0$ и сравнить затем полученные значения с подсчитанными по формулам

$$\delta h_1 = - \frac{P_z * l_{z1}}{\Delta}, \quad \delta h_2 = - \frac{P_z * l_{z2}}{\Delta},$$

2. Перемещение груза по горизонтали вдоль судна, см. рис. 1д.

а) Принять груз P_x массой, примерно равной $0,1\Delta$, в произвольную точку 1 палубы кормовой части таким образом, чтобы крен модели не превысил $8^\circ \div 10^\circ$. Измерить угол крена θ , осадку носом d_H и кормой

дк. Определить кренованием метацентрическую высоту h_3 , представив результаты всех выполненных измерений и вычислений в форме таблицы № 4 (верхняя ее часть).

б) Перенести груз R_x из точки 1 кормовой части палубы в произвольную точку 2 носовой части и вновь измерить угол крена θ , осадку носом dn , кормой dk и определить кренованием метацентрическую высоту h_4 . Результаты всех измерений и выполненных вычислений, как и в предыдущем случае, записать в таблицу № 4 (нижняя ее часть).

в) Сравнить между собой метацентрические высоты h_3 и h_4 .

Заключение

Сравнивая полученные результаты, сделать вывод о характере влияния на начальную остойчивость и посадку судна перемещений грузов в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также произвольного перемещения грузов.

Контрольные вопросы

1. Что называется посадкой судна?
2. Перечислить параметры, определяющие посадку судна.
3. Сформулировать теорему о перемещении центра масс системы тел.
4. Какое влияние оказывает на величину начальной метацентрической высоты и параметры посадки перемещение грузов: а) Горизонтальное поперек судна? б) Горизонтальное вдоль длины судна? в) Вертикальное? г) Произвольное?
5. Почему при горизонтальном переносе малых грузов метацентрическая высота не изменяется?
6. Почему при выполнении эксплуатационных расчетов в формулах продольной остойчивости можно заменять H на R , а в формулах для поперечной остойчивости заменять h на r нельзя?
7. Почему при выполнении расчетов, связанных с определением изменения начальной остойчивости и посадки судна, вызванных перемещением грузов, вычисления нужно вести в такой последовательности: сначала выполнить расчеты, связанные с вертикальным перемещением грузов, а затем расчеты, связанные с горизонтальным переносом грузов?

Таблица 3

Перемещение груза по вертикали

Постоянные опыта: $P_y = \dots$ кг; $\Delta = \dots$ кг.1. Груз $P_z = \dots$ кг на палубе

Направление перемещения груза P_y	№ замера	l_{yis} см	$M_{kpi} = p_y \cdot l_{yi}$, кг·см	θ , град	$tg\theta$	$h_i = \frac{M_{kpi}}{\Delta \cdot tg\theta}$
На левый борт	1					
	2					
	3					
На правый борт	1					
	2					
	3					
$h_0 = \frac{\sum h_i}{6} = \dots$ см.						

2. Груз $P_z = \dots$ кг на высоте $l_{zj} = 10$ см.

Направление перемещения груза P_y	№ замера	l_{yis} см	$M_{kpi} = p_y \cdot l_{yi}$, кг·см	θ , град	$tg\theta$	$h_i = \frac{M_{kpi}}{\Delta \cdot tg\theta}$
На левый борт	1					
	2					
	3					
На правый борт	1					
	2					
	3					
$h_1 = \frac{\sum h_i}{6} = \dots$ см.						

3. Груз $P_z = \dots$ кг на высоте $l_{zj} = 15$ см.

Направление перемещения груза P_y	№ замера	l_{yis} см	$M_{kpi} = p_y \cdot l_{yi}$, кг·см	θ , град	$tg\theta$	$h_i = \frac{M_{kpi}}{\Delta \cdot tg\theta}$
На левый борт	1					
	2					
	3					
На правый борт	1					
	2					
	3					
$h_2 = \frac{\sum h_i}{6} = \dots$ см.						

Таблица 4

Перемещение груза по горизонтали вдоль судна

Постоянные опыта: $P_y = \dots \text{кг}$; $P_x = \dots \text{кг}$; $\Delta_l = \Delta + P_x = \dots \text{кг}$.1. Груз $P_x = \dots \text{кг}$ в корме

Направление перемещения груза P_y	№ замера	l_{yi} , см	$M_{kpi} = p_y l_{yi}$, кг·см	θ , град	$tg\theta$	$h_i = \frac{M_{kpi}}{\Delta_l \cdot tg\theta}$
На левый борт	1					
	2					
	3					
На правый борт	1					
	2					
	3					
$h_3 = \frac{\sum h_i}{6} = \dots \text{см.}$						

$$x_1 = \dots \text{см};$$

$$d_n = \dots \text{см};$$

$$d_k = \dots \text{см};$$

$$d_{cp} = (d_n + d_k)/2 = \dots \text{см};$$

$$\theta = \dots;$$

$$D_f = (d_n - d_k) = \dots \text{см.}$$

2. Груз $P_x = \dots \text{кг}$ в носу

Направления перемещения груза P_y	№ замера	l_{yi} , см	$M_{kpi} = p_y l_{yi}$, кг·см	θ , град	$tg\theta$	$h_i = \frac{M_{kpi}}{\Delta_l \cdot tg\theta}$
На левый борт	1					
	2					
	3					
На правый борт	1					
	2					
	3					
$h_4 = \frac{\sum h_i}{6} = \dots \text{см.}$						

$$x_2 = \dots \text{см};$$

$$d_n = \dots \text{см};$$

$$d_k = \dots \text{см};$$

$$d_{cp} = (d_n + d_k)/2 = \dots \text{см};$$

$$\theta = \dots;$$

$$D_f = (d_n - d_k) = \dots \text{см.}$$

**Жидкий груз со свободной поверхностью.
Исследование отрицательного влияния жидких грузов на
начальную остойчивость судна**

Цель работы: экспериментальное определение влияния на начальную остойчивость судна жидкого груза со свободной поверхностью.

Время выполнения: 2 часа

Количество исполнителей: 3-4 человека.

1. Теоретические основы

Присутствие на судне жидких грузов в частично заполненных помещениях, имеющих свободную поверхность и поэтому способных перетекать при крене, вызывает дополнительный кренящий момент, т.к. центр тяжести груза смещается в сторону наклона. Это приводит к уменьшению начальной остойчивости и значений плеч статической остойчивости при всех углах наклона.

При малых наклонах изменение метацентрической высоты (МЦВ) определяется выражением

$$\delta h = \frac{\rho_{ж} i_x}{\Delta},$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости;

Δ - водоизмещение (масса) модели судна;

i_x - момент инерции площади свободной поверхности жидкости относительно продольной оси.

Момент инерции площади свободной поверхности относительно продольной оси вычисляется по формуле

$$i_x = k_x \ell b^3,$$

где k_x - коэффициент, зависящий от формы свободной поверхности (для прямоугольника $k_x = 1/12$); ℓ , b - длина и ширина цистерны.

Используя выражение для определения i_x , можно определить, что установка в цистерне n продольных переборок приводит к уменьшению поправки на свободную поверхность жидкого груза в этой цистерне в $(n+1)^2$ раз.

Если на судне несколько не сообщающихся между собой отсеков, заполненных жидкостью, имеющих свободную поверхность, величина поправки определится

$$\delta h = \frac{\rho \sum i_x}{\Delta},$$

где i_x - момент инерции для каждой свободной поверхности – берется относительно оси, проходящей через её центр тяжести и параллельной оси ОХ.

Сообщающиеся между собой отсеки, заполненные жидким грузом со свободной поверхностью, должны рассматриваться как один отсек, а совокупность их свободных поверхностей – как единая свободная поверхность.

Если жидкий груз принимается на судно, то изменение МЦВ от его приема определится выражением

$$\delta h = \frac{P}{\Delta + P} \left(d_o + \frac{\delta d}{2} - h_o - Z_{*} \right),$$

где P - масса принимаемого груза;

d_o - начальная осадка от приема жидкого груза;

δd - изменение осадки от приема жидкого груза;

h_o - начальная метацентрическая высота до приема жидкого груза;

а Z_{*} определяется по формуле

$$Z_{*} = Z_{*c} + \frac{\rho_{*} i_x}{P},$$

где Z_{*c} - аппликата центра тяжести жидкого груза в цистерне.

В Информации об остойчивости для всех судовых цистерн приводятся значения поправок на свободную поверхность в виде поправок к статическому моменту водоизмещения $\delta h = \delta m_z / \Delta$.

2. Последовательность выполнения работы

1. При положении твердого груза P в центре палубы трюма модели, пользуясь методом кренования, определить начальное значение поперечной метацентрической высоты h_o .

Вместо твердого груза в трюм вставить ванну без переборки и налить в нее воды весом P затем методом кренования определить значение h_1 . Определить изменение МЦВ $\delta h_1 = h_o - h_1$.

Вставить в трюм ванну с продольной переборкой p и налить в каждую секцию ванны воды весом $P/2$ и методом кренования определить значение h_2 . Определить изменение МЦВ $\delta h_2 = h_1 - h_2$.

2. По приведенной выше формуле для δh определить расчетное изменение МЦВ при приеме воды весом P и сравнить результаты с величиной определенной опытным путем.

3. Сравнить значения δh_1 и δh_2 определить влияние продольной переборки на величину поправки на свободную поверхность

Для расчета метацентрических высот использовать таблицу 5.

Таблица 5 - Определение влияния свободной поверхности жидкого груза на остойчивость судна.

Постоянные опыта: $P_y = \text{кг}$; $P = \text{кг}$; $\lambda = \text{см}$; $\Delta = \text{кг}$.

Направление перемещения груза P_y	№ замера	I_{yi} , см	$M_{kpi} =$ $P_y \times I_{yi}$, кг $\times$ см	Отклонение нити отвеса K_i , см		$\theta_i = \frac{K_i}{\lambda}$	$\Delta\theta_i$, кг	$h_i = \frac{M_{kpi}}{\Delta\theta_i}$, см
В трюме твердый груз P								
На левый борт	1							
	2							
	3							
На правый борт	1							
	2							
	3							
В трюме жидкий груз P								$h = \sum h_i / 6$
На левый борт	1							
	2							
	3							
На правый борт	1							
	2							
	3							
В трюме жидкий груз P , в цистерне – продольная переборка								$h = \sum h_i / 6$
На левый борт	1							
	2							
	3							
На правый борт	1							
	2							
	3							
								$h = \sum h_i / 6$

Контрольные вопросы

1. В чем состоит различие в поведении твердых и жидких грузов при наклонениях судна?
2. Какие параметры свободной поверхности жидкого груза влияют на потерю судном остойчивости?
3. Как влияет на потерю остойчивости плотность жидкости?
4. Каковы меры борьбы с отрицательным влиянием жидких грузов на остойчивость судна?
5. Как влияет на остойчивость судна при больших наклонениях жидкий груз в узких и широких цистернах?
6. Что такое фактор балластировки?

Лабораторная работа 3

Расчет объемного водоизмещения и координат центра величины судна

Цель работы: отработка методики определения необходимых для расчетов параметров по гидростатическим таблицам и гидростатическим кривым

Время проведения: 4 часа

Значение объемного водоизмещения и его распределение по длине и высоте судна характеризуют строевые по шпангоутам и ватерлиниям. Строевая по шпангоутам представляет собой огибающую площадей шпангоутов в координатах x – A (абсцисса – погруженная площадь шпангоута), вычисленных для заданной ватерлинии.

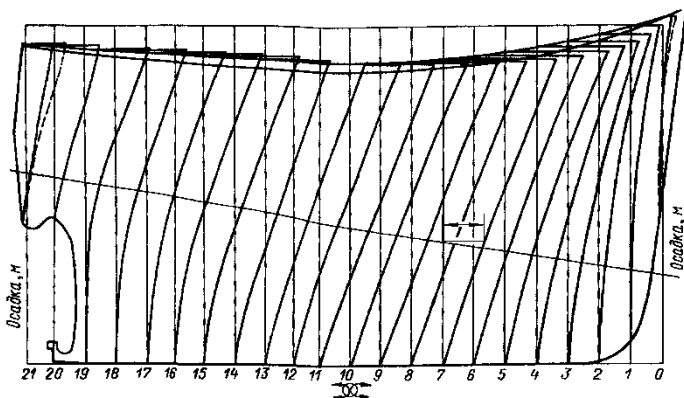


Площадь, ограниченная строевой, соответствует объемному водоизмещению ∇ , абсцисса ЦТ этой площади – величине x_c .

Строевая по ватерлиниям представляет собой огибающую площадей ватерлиний в координатах $z - S$. Площадь, ограниченная строевой, соответствует объемному водоизмещению ∇ , аппликата ЦТ этой площади – величине z_c . Величина объемного водоизмещения и абсцисса ЦВ определяются выражениями $\nabla = \int d S dz$; $z_c = (1/\nabla) \int d S z dz$. Используя способ трапеций для вычисления определенных интегралов, входящих в приведенные выражения, получаем $\nabla = \delta d[S_1 + \dots + S_{m-1} + \frac{1}{2}(S_0 + S_m)]$; $z_c = [(\delta d)^2 / \nabla][S_1 + S_2 + \dots + (m-1)S_{m-1} + (S_0 + (2m-1)S_m)/4]$.

Наиболее распространенной диаграммой является масштаб Бонжана представляющий собой совокупность интегральных кривых площадей шпангоутов $A(z)$, рассчитанных для 21 теоретического шпангоута для значений z от 0 до $z_{\max}$, соответствующего палубе переборки. Для определения ∇ и x_c на масштабе Бонжана необходимо на соответствующих шкалах отложить осадки носом и кормой, провести ватерлинию и отметить точки ее пересечения с линиями теоретических шпангоутов. Площади шпангоутов A_i снимаются по горизонтали и представляют собой расстояние от точки пересечения ватерлинии с линией шпангоута до соответствующей интегральной кривой.

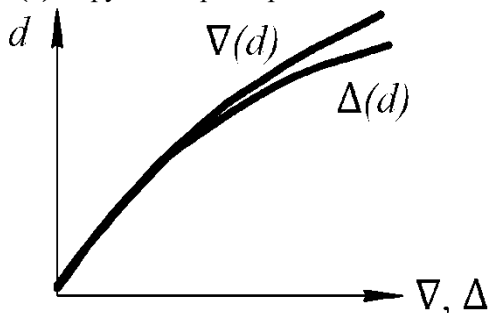
Подставляя снимаемые с масштаба Бонжана значения A_i в выражения получают искомые ∇ и x_c .



Масштаб Бонжана

[illegible]

Шкала осадки располагается вдоль горизонтальной оси диаграммы. В некоторых случаях указанные параметры приводятся в виде таблицы, называемой таблицей гидростатических элементов. Масштабы кривых выбирают исходя из обеспечения необходимой точности и удобства их использования в практических расчетах. Совокупность кривых γ и z_m называют метacentрической диаграммой, а зависимость $\Delta = f(d)$ – грузовым размером.



Методика и последовательность выполнения работы

- 1) По заданному значению осадки рассчитываются значения всех остальных параметров плавучести и остойчивости
- 2) Используя данные гидростатических таблиц, строятся гидростатические кривые - зависимости всех параметров от осадки
- 3) С построенных кривых снимаются значения параметров и сравниваются с рассчитанными ранее по таблицам.

Лабораторное занятие 4-5

Построение ДСО по пантакаренам и Универсальной диаграмме. Определение параметров ДСО.

Цель работы: Изучить статическую остойчивость при больших углах крена.

Построить диаграмму статической остойчивости. Теоретические основы Диаграмма статической остойчивости (ДСО) это графическая зависимость плеча статической остойчивости l (рис. 2, в) от угла крена θ для определенного водоизмещения Δ и ZG судна.

На вид и параметры ДСО влияет форма корпуса судна. Наклонение судна на малый угол θ_A (рис. 2, а) характеризуется положительным плечом статической остойчивости l_A и расположением метаци-

тра выше центра тяжести судна.

Наклонение на большой угол θ_B (рис. 2, б) также характеризуется положительным плечом l_B , но при этом метациентр располагается ниже центра тяжести судна. Судно, наклоненное на углы крена θ_A и θ_B , имеет восстанавливающие моменты: $M_{BA} = \Delta \cdot l_A$ и $M_{BB} = \Delta \cdot l_B$.

Кренящий момент от поперечного переноса груза массой p на плечо ly_1 определяется по формуле:

$$M_{kpi} = p \cdot ly_1 \cdot \cos\theta_i.$$

Под действием кренящего момента $M_{kpi} = \Delta \cdot l_{kpi}$ (рис. 2, а) судно может находиться в двух равновесных состояниях: при угле θ_{Ai} – устойчивом, и при угле θ_{Bi} – неустойчивом (рис. 2, б).

В неустойчивое равновесное состояние (точка Bi) судно приводится дополнительным кренящим моментом $M_{кр}$ доп. В обоих равновесных состояниях сила тяжести и сила поддержания действуют по одной прямой навстречу друг другу. Но при этом линия их действия отстоит от центра тяжести G_0 (который имело судно до переноса груза p) соответственно на l_{Ai} и l_{Bi} . l_{Ai} и l_{Bi} , являются плечами ДСО (рис. 3) при углах крена θ_{Ai} и θ_{Bi} . При наклонениях судна на углы θ_{Ai} и θ_{Bi} выполняются равенства $M_{BA} = M_{kpi}$ и $M_{BB} = M_{kpi}$, которые позволяют получить соотношения:

$$l_{Ai} = p \Delta \cdot ly_1 \cdot \cos\theta_{Ai} \text{ и } l_{Bi} = p \Delta \cdot ly_1 \cdot \cos\theta_{Bi}.$$

Поведение судна в равновесном состоянии при угле крена θ_A аналогично поведению судна в точке начала кривой ДСО, а поведение судна при угле крена θ_A – в угле заката ДСО θ_v . Кривая линия плеча кренящего момента $l_{kpm} = M_{kpm} \Delta = p \Delta \cdot ly_m \cdot \cos\theta$ касается кривой линии ДСО в точке $A_m = B_m$, которая характеризуется неустойчивым положением судна. При незначительном увеличении M_{kpm} или малейшем дополнительном воздействии другого момента судно перевернется.

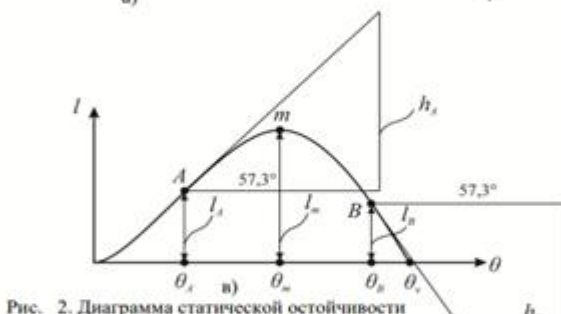
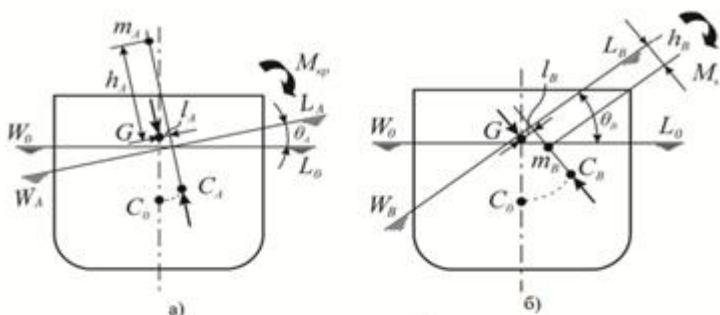


Рис. 2. Диаграмма статической остойчивости

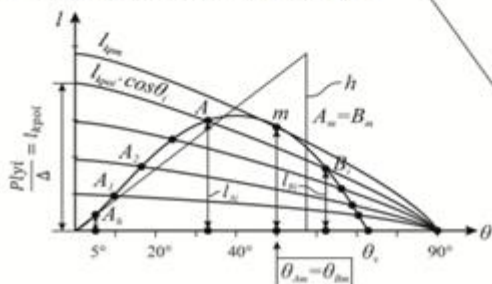


Рис. 3. Построение ДСО

Касательная к начальному участку кривой ДСО является гипотенузой проверочного треугольника (рис. 3) с катетами, равными соответственно $57,3^\circ$ (1 радиан) и начальной поперечной метацентрической высотой h .

Методика и последовательность выполнения работы

Соотношение $lAi = p \Delta \cdot lyi \cdot \cos\theta Ai$ и $lBi = p \Delta \cdot lyi \cdot \cos\theta Bi$ позволяет получить значения плеч статической остойчивости θAi на восходящей и θBi на нисходящей ветвях кривой ДСО.

Для этого следует выполнить следующие действия и замеры:

1. Переместить груз p по верхней поперечной траверсе на плечо $ly1 = 2 \div 3$ см и зафиксировать его. Измерить угол крена модели $\theta A1$.

2. Не меняя положения груза p принудительно наклонить модель на угол $\theta B1$, при котором ее равновесие будет неустойчивым. Если модель наклонена на угол $\theta B1$, то незначительное отклонение модели от этого состояния в сторону уменьшения угла крена приводит к ее самопроизвольному спрямлению до угла $\theta A1$, а отклонение в сторону увеличения угла крена – к опрокидыванию модели. Замерить угол $\theta B1$.

3. Увеличить плечо кренящего момента в два раза, обозначив его $ly2$, получить и замерить углы $\theta A2$ и $\theta B2$.

4. Выполнить еще 3–4 замера углов θAi и θBi для кренящих моментов $Mkpi = p \cdot lyi \cdot \cos\theta i$ с таким же шагом для плеча lyi .

5. Получить угол крена $\theta Am = \theta Bm$. Для этого плавным перемещением груза p по верхней траверсе найти и зафиксировать такое состояние модели, при котором малейшее увеличение угла крена приводит к опрокидыванию модели. Замерить угол $\theta Am = \theta Bm$.

6. Получить угол заката кривой ДСО θv . Для этого установить и зафиксировать груз p посередине траверсы (в диаметрально плоскость (ДП) модели). Принудительно наклонить модель до состояния неустойчивого равновесия. Замерить угол θv , соответствующий этому состоянию.

7. Для построения начального участка ДСО получить из опыта кренования начальную поперечную метацентрическую высоту h . Для этого выполнить по три наклонения модели на каждый борт с помощью груза p на нижней поперечной траверсе.

Расчеты и оформление результатов

1. Значение плеч кренящих моментов $ly1, ly2, \dots, lyi, lym$ и соответствующие им значения углов $\theta A1, \theta A2, \dots, \theta Ai, \theta B1, \theta B2, \dots, \theta Bi, \theta Am = \theta Bm$ занести в таблицу 5.

2. Заполняя соответствующие столбцы таблицы 6, рассчитать значения плеч lAi, lBi, lm . В строчке, соответствующей углу заката

θv , плечо кренящего момента $l_{yv} = 0$, и как следствие этого $lv = 0$.

Таблица 5

Постоянные опыта: $p = \dots$ кг; $\Delta = \dots$ кг.

l_y , мм	θ_A , град	$l_A = \frac{p}{\Delta} \cdot l_y \cdot \cos \theta_A$	θ_B , град	$l_B = \frac{p}{\Delta} \cdot l_y \cdot \cos \theta_B$
$l_{y1} =$	$\theta_{A1} =$	$l_{A1} =$	$\theta_{B1} =$	$l_{B1} =$
$l_{y2} =$	$\theta_{A2} =$	$l_{A2} =$	$\theta_{B2} =$	$l_{B2} =$
$l_{y3} =$	$\theta_{A3} =$	$l_{A3} =$	$\theta_{B3} =$	$l_{B3} =$
$l_{yi} =$	$\theta_{Ai} =$	$l_{Ai} =$	$\theta_{Bi} =$	$l_{Bi} =$
$l_{ym} =$	$\theta_{Am} =$	$l_{Am} =$	$\theta_{Bm} =$	$l_{Bm} =$
0	0	0	$\theta_v =$	0

2. Метацентрическую высоту рассчитывают по таблице 10

Таблица 6

Постоянные опыта: $p_y = \dots$ кг; $\Delta = \dots$ кг.

Направление перемещения груза P_y	№ замера	l_{yi} , см	$M_{ypi} = p_y \cdot l_{yi}$, кг·см	θ , град	$tg \theta$	$h_i = \frac{M_{kpi}}{\Delta \cdot tg \theta}$
На левый борт	1					
	2					
	3					
На правый борт	1					
	2					
	3					
$h_0 = \frac{\sum h_i}{6} = \dots$ см.						

$d_{n0} = \dots$ см; $d_{к0} = \dots$ см; $d_{cp0} = (d_{n0} + d_{к0})/2 = \dots$ см; $\theta^\circ = \dots$; $D_{f0} = (d_n - d_k) = \dots$ см.

3. По значениям плеч статической остойчивости $l_{Ai} = f(\theta_{Ai})$, $l_{Bi} = f(\theta_{Bi})$, $l_m = f(\theta_{Am} = \theta_{Bm})$ и значению угла заката θv построить диаграмму статической остойчивости.

4. Начальный участок ДСО построить с помощью проверочного треугольника. Для этого провести гипотенузу треугольника с катетами $57,3^\circ$ и h . Из точки на оси θ , соответствующей углу крена $\theta = 5^\circ$, возвести перпендикуляр и получить точку Ah на гипотенузе проверочного треугольника. Если метацентрическая высота h определена с необхо-

димой точностью, то полученная точка Ah будет принадлежать кривой ДСО.

5. Используемый в работе способ построения ДСО не позволяет получить угол максимума θm и максимальное плечо ДСО lm . Поэтому при построении ДСО участок кривой соответствующий максимуму, можно получить плавным соединением точек Ai и Bi . Для приближенной оценки величины угла θm можно воспользоваться утверждением, что он соответствует углу входа палубы модели в воду.

Заключение

После выполнения работы, проведения расчетов и оформления отчета, который должен содержать описание цели работы, таблицы 5 и 6, построенную ДСО.

Контрольные вопросы

1. Как в эксплуатационной практике строится ДСО?
2. Что такое проверочный треугольник ДСО?
3. Как изменится начальный участок кривой ДСО при увеличении метацентрической высоты?
4. Как располагаются по отношению к действующей ватерлинии центр тяжести и метацентр при наклонении судна на угол в диапазоне от 0 до θm ?
5. Как располагаются по отношению к действующей ватерлинии центр тяжести и метацентр при наклонении судна на угол в диапазоне от θm и θv ?
6. Чем характеризуется положение судна при наклонении на угол θm ?
7. Как изменится ДСО судна при увеличении его осадки, если положение центра тяжести при этом останется неизменным?
8. Что такое плечо формы и плечо веса?
9. Как по ДСО определить опрокидывающий статический момент?
10. Как по ДСО определить опрокидывающий динамический момент?
11. Какие параметры ДСО нормируются общими требованиями Правил Регистра?
12. Что такое критерий погоды?

Лабораторное занятие 6-7

Расчет буксировочного сопротивления и мощности

Цель работы: наработка навыков расчета ходкости судна

Время выполнения: 8 часов

Количество исполнителей: 3-4 человека.

Теоретическая часть

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 $N_б = RV$.

1. Расчеты сопротивления движению и буксировочной мощности

Смоchenная поверхность корпуса судна

При выполнении оценочных расчетов ходкости и на начальных стадиях проектирования используется различного рода приближенные формулы.

Чаще других используются:

- для транспортных судов всех типов – формула Вагенингенского опытового бассейна (1):

$$\Omega = \Lambda^{\frac{1}{3}}(3,4 * \Lambda^{1/3} + 0,5_{\perp\perp}) \quad (1)$$

- для промысловых судов – формула Ерошина В.А. (2):

$$\Omega = L_{\perp\perp} d(1 + 0,5 \frac{B}{d})(0,55 + 1,52C_B) \quad (2)$$

К значениям площадей, вычисленным по приведенным формулам, необходимо добавить площадь выступающих частей в виде поправки, увеличивающей полученные значения на 1,5÷7% в зависимости от их конструкции и размеров [1-2].

Определение сопротивления трения

С учетом кривизны судовых обводов в подводной части и шероховатости наружной обшивки корпуса сопротивление трения судна **любых размеров и любого типа** подсчитывается по формуле (3):

$$R_f = (\zeta_{f0} * K + \zeta_n) \rho V^2 \Omega / 2 \quad (3)$$

- в которой ζ_{f0} коэффициент трения технически гладкой плоской пластины, называемый чаще всего экстраполятором трения.

Его численные значения снимаются с графиков Рис.1. функцией от числа Рейнольдса - $Re = VL/\gamma$;

- $K = 1,02 \div 1,08$ коэффициент влияния кривизны корпуса судна на трение при вариации относительного удлинения судов в диапазоне $L/B = 10/6$;

ρ – плотность забортной воды;

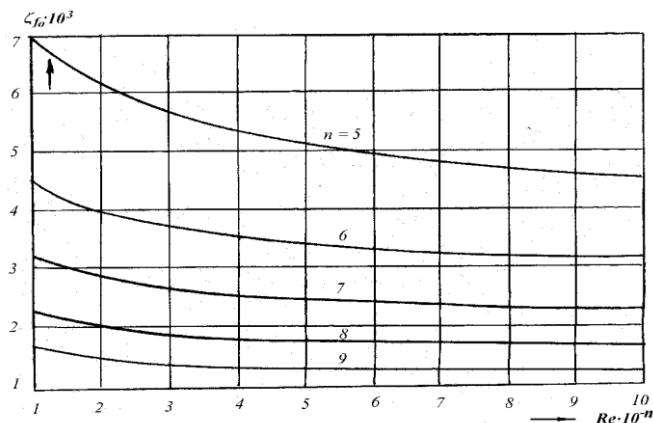


Рис. 1. Коэффициенты сопротивления трения
технически гладких пластин

$\zeta_{\text{п}}$ - надбавка на шероховатость наружной обшивки, принимаемая для свежеокрашенного корпуса $\zeta_{\text{п}} \cdot 10^{-3}$:

- сухогрузных транспортных судов $0,3 \div 0,5$;
- пассажирских судов $0,2 \div 0,4$;
- крупных танкеров и балкеров $0,1 \div 0,2$;
- рыбопромысловых судов $0,3 \div 0,6$;

V – скорость судна в м/с, которая связана со скоростью в узлах V_s соотношением $V = \frac{1853,3}{3600} V_s = 0,515 V_s$ м/с;

Ω – смоченная поверхность корпуса судна в м^2 , определяемая по формулам 1-2.

Диаграммы и графики, по которым определяется остаточное сопротивление судов этой группы, приведены на Рис. 2÷7.

Поскольку обычно все расчеты ходкости оформляются в виде кривых зависимостей сопротивления движению $R = f(V_s)$ и буксировочной мощности $N_b = f(V_s)$, то целесообразно все необходимые вычисления выполнять в форме таблицы 3 для 5÷6 значений скорости хода, что сокращает время и гарантирует от возможных ошибок в процессе производства вычислений.

В таблице 1 приведены постоянные и исходные величины.

Таблица 1

Постоянные и исходные величины	
$\rho=1,025 \text{ т/м}^3$ $g=9,81 \text{ м/с}^2$	$C_B = \delta = \Delta / \rho L B d$; $\psi = \frac{L}{\sqrt[3]{\Delta/\rho}}$; $\gamma=1,61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Таблица 2

№ п/п	Расчетные величины	Обозначения и формулы	Ед.изм.	Числовые значения	Примечание
1	2	3	4	5	6
1	Скорость хода	V_{Si}	узлы	$V_{S1} \dots V_{S5}$	Задаемся
2	Скорость хода	$V_i=0,514 \cdot V_{Si}$	м/с		
3	Квадрат скорости	V_i^2	$\text{м}^2/\text{с}^2$		
4	Число Фруда	$F_r = V_i / \sqrt{gL}$	-		
5	Базовый коэффициент остаточного сопротивления	$\zeta_0=f(C_B; Fr) \cdot 10^3$	-		По кривым рис. 2
6	Поправочный коэффициент	$K_\psi=a_\psi/a_{\psi 0}$	-		По кривым рис. 3
7	Поправка на влияние В/d	$K_{B/d} \cdot a_{B/d}=f(B/d; Fr)$	-		По кривым рис. 4
8	Поправка на положение центра величины Xс	$K_{\bar{X}\bar{C}} = f(Xc; Fr)$	-		По кривым рис. 5÷7
9	Коэффициент остаточного сопротивления	$\zeta_r \cdot 10^3 = [5] \cdot [6] \cdot [7] \cdot [8]$	-		
10	Число Рейнольдса	$Re=V_i L / \gamma$	-		
11	Коэффициент трения гладкой пластины	$\zeta_0 \cdot 10^3 = f(Re)$	-		По кривым рис. 1
12	Коэффициент буксировочного сопротивления	$\zeta \cdot 10^3 = [9] \cdot 4 [11] + K + \zeta_n \cdot 10^3$	-		
13	Буксировочное сопротивление	$R=0,5 \cdot \rho \cdot \Omega \cdot [12] \cdot [3] \cdot 10^{-3}$	кН		
14	Буксировочная мощность	$N_\delta = [13] \cdot [2]$	кВт		

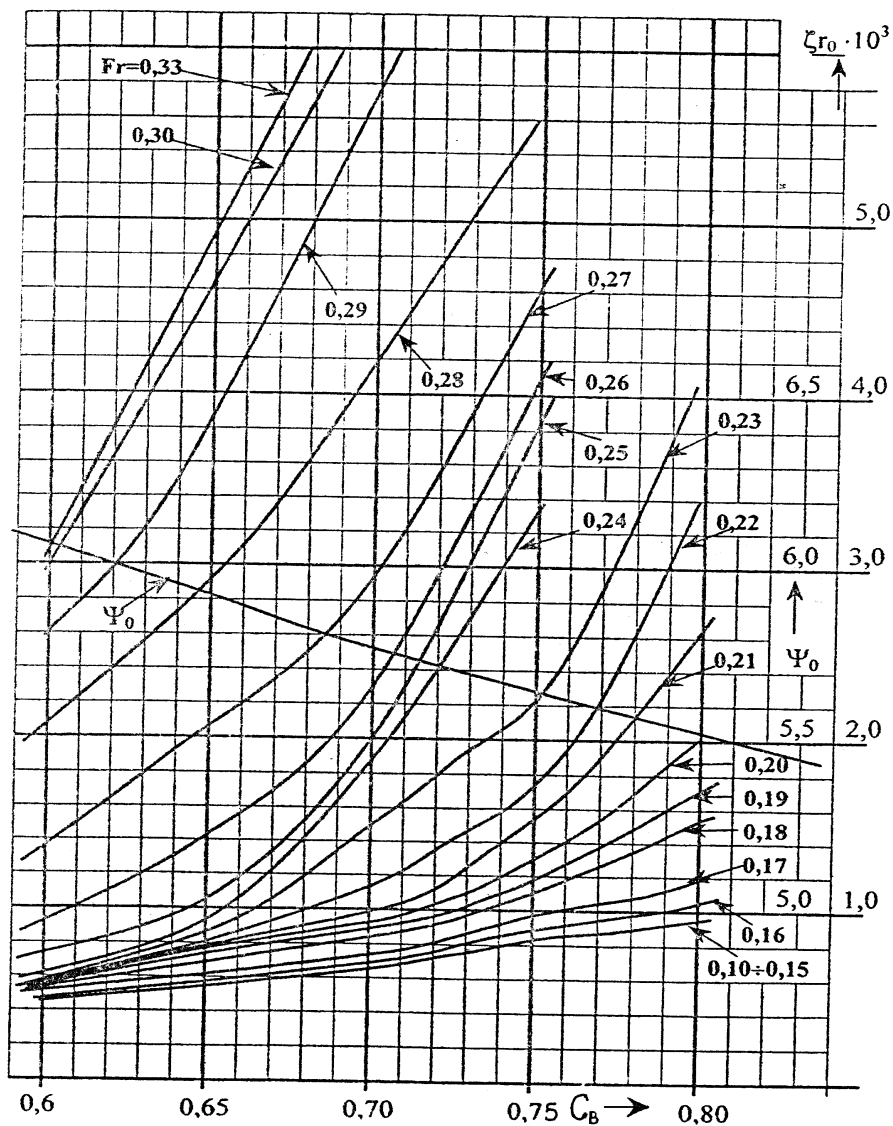


Рис. 2. Кривые зависимости $\zeta_{r_0} = f(C_B, Fr)$ и стандартных значений относительной длины $\psi_0 = f(C_B)$

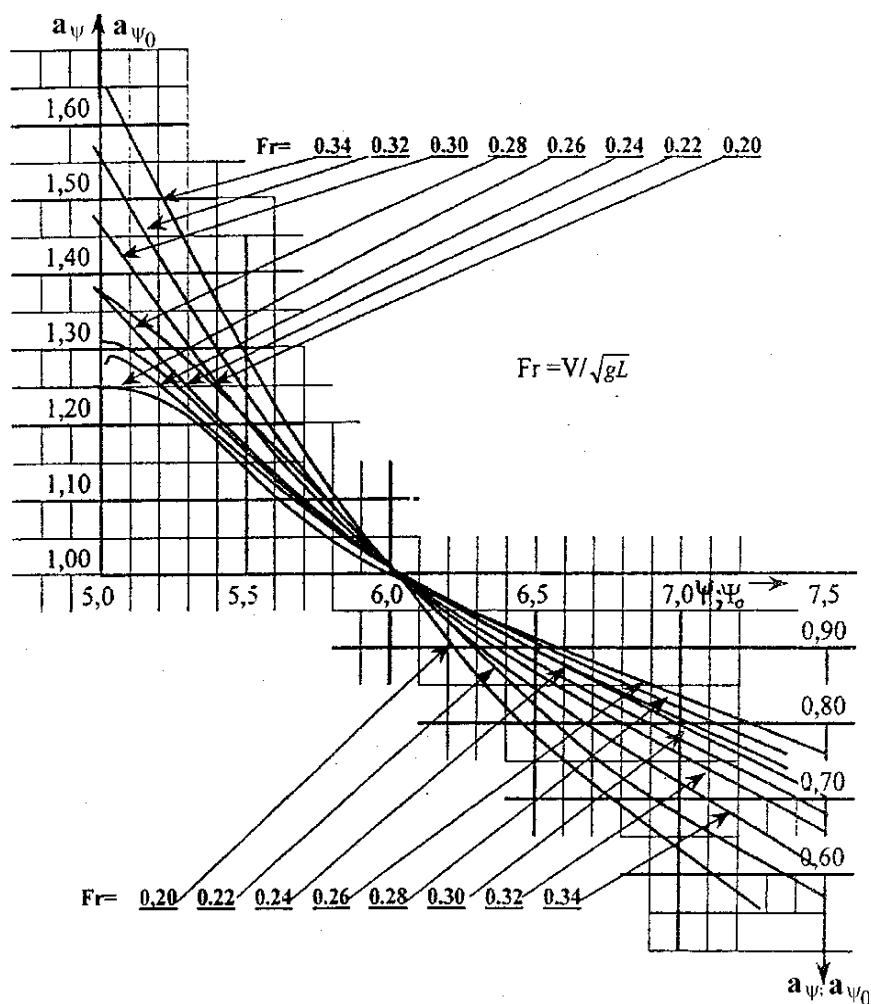


Рис.3. Кривые зависимостей коэффициентов влияния
относительной длины $\Psi = L / \sqrt[3]{\Delta / \rho}$ рассматриваемого судна
 $a_\psi = f(\psi; Fr)$ и стандартной относительной длины
 $\psi_0 = f(C_B)$ рис. 2 - $a_{\psi 0} = f(\psi_0; Fr)$

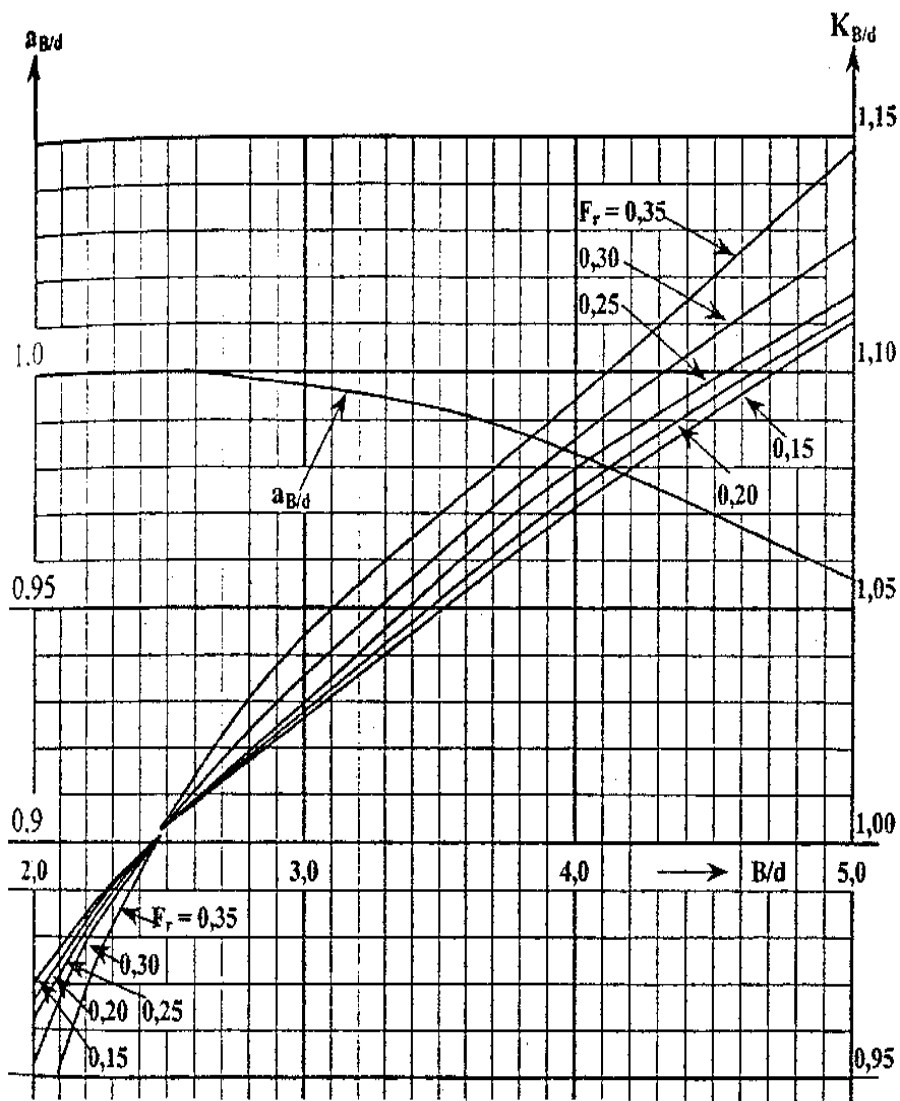


Рис.4. Кривые зависимости коэффициентов влияния $K_{B/d}$ и $a_{B/d}$ от B/d и Fr

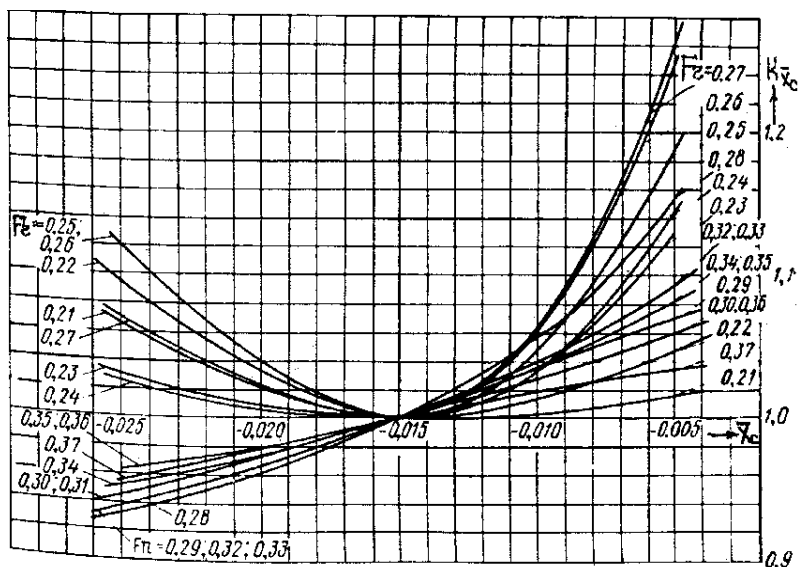


Рис.5. Кривые зависимости коэффициента влияния
 $K_{\overline{Xc}} = f(Xc; Fr)$ при $Sv = 0,60$

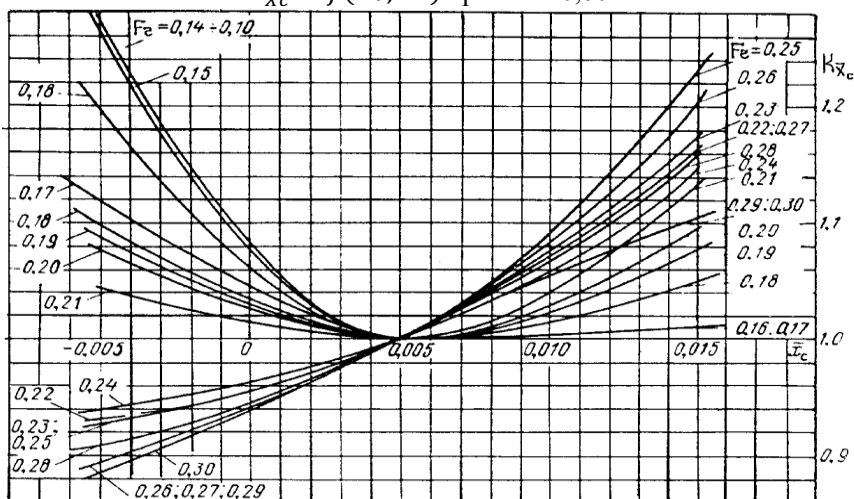


Рис. 6. Кривые зависимости коэффициента влияния
 $K_{\overline{Xc}} = f(Xc; Fr)$ при $Sv = 0,70$

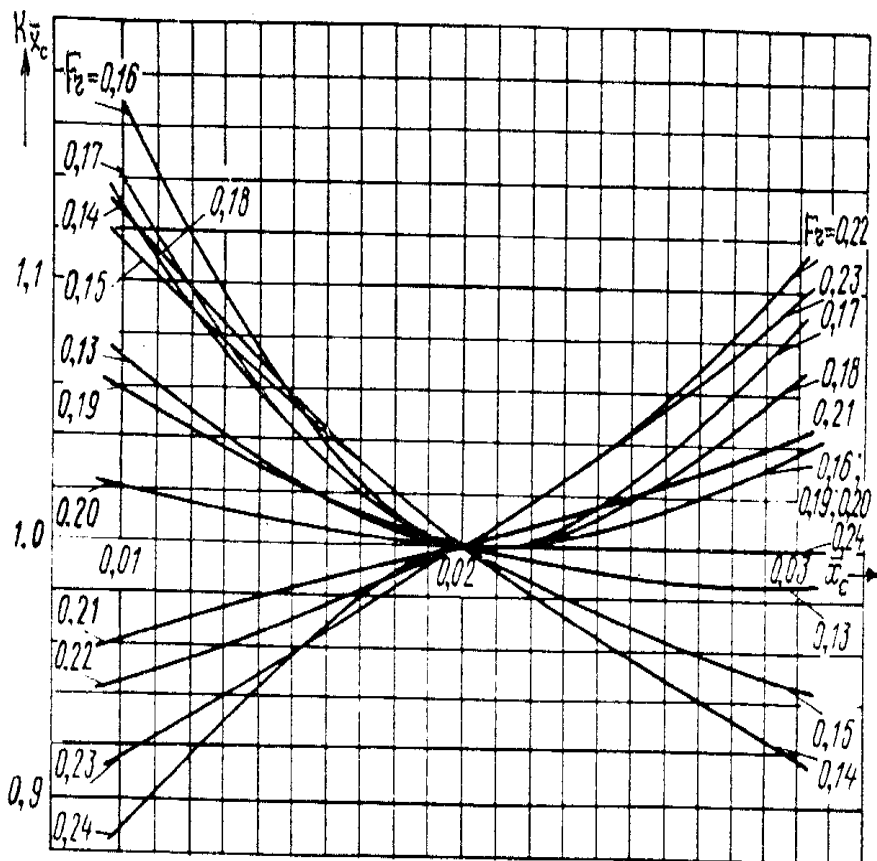


Рис.7. Кривые зависимости коэффициента влияния
 $K_{\bar{x}_c} = f(\bar{x}_c; Fr)$ при $C_v = 0,80$

Библиографический список

1. Бойко В.В. Теория и устройство судна:уч. пос. Владивосток: Дальрыбвтуз, 2018. 211 с.
2. Самсонов С.В. Остойчивость судна учебное пособие, Владивосток, 2021 г.65с.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Морской Регистр Судоходства РФ, 2024 г.
4. Друзь Б.И. и др. Задачник по теории, устройству судов и движителям. Л.: Судостроение, 1986 г. 240с.
5. Азовцев А. И., Огай А. С., Огай С. А., Петрашев С. В., Бокий А. Н. / Теория и устройство судна. Учебно-методическое пособие для выполнения лабораторных работ.2025г.
6. Кулагин В.Д. Теория и устройство промысловых судов. Л.: Судостроение, 1986 г. 392с.
7. Баранов Н.В. Конструкция корпуса морских судов. Л.: Судостроение, 1981. 696с.
8. Кацман Ф.М., Дорогостайский Д.В. Теория судна и движителя. Л.: Судостроение, 1979 г. 280с.
9. Бронский А.И. Корпусные конструкции судов промыслового флота. Л.: Судостроение, 1978 г. 200с.
10. Горячев А.М., Подругин Е.М. Устройство и основы теории морских судов. Л.: Судостроение, 1971 г. 325с.