Глава 3. Натурные испытания мореходных качеств судов

3.1. Остойчивость судна на тихой воде

3.1.1. Подготовка судна к кренованию

Безопасная эксплуатация судна во многом определяется показателями его остойчивости, которые находятся в прямой зависимости от формы погруженного объема и состояния весовой нагрузки.

Элементы погруженного объема находятся по теоретическому чертежу, а характеристики нагрузки – весовое водоизмещение D и координаты центра тяжести x_g, y_g, z_g – определяются расчетным путем при проектировании.

В процессе постройки корабля осуществляется строгий контроль за соответствием его обводов проектным, поэтому элементы погруженного объема, обычно представляемые гидростатическими кривыми, можно полагать известными с требуемой точностью.

Сложнее обстоит дело с учетом весовой нагрузки, которая в процессе постройки корабля может существенно отклоняться от проектной; такие отклонения происходят и при эксплуатации, при этом не всегда они могут быть правильно учтены расчетом.

Таким образом, возникает необходимость в уточнении параметров весовой нагрузки опытным путем, для чего и выполняется специальный эксперимент, называемый опытом кренования.

Кренование обязательно производится для всех видов построенных судов, а также после капитального ремонта и модернизации. В упрощенных вариантах его рекомендуется периодически повторять в процессе эксплуатации.

3.1.2. Методика эксперимента

Теоретические основы опыта кренования базируются на методе начальной остойчивости. Если при помощи переноса малого груза p на расстояние y создать кренящий момент $M = py$, то возникший при наклонении восстанавливающий момент можно найти по метацентрической формуле остойчивости $M_в = Dh\theta$. Из условия равновесия $M = M_в$, следует, что

$$h = \frac{p \cdot y}{D\theta}.$$

Если при помощи отвесов или инклинографа замерить угол крена θ, то можно найти метацентрическую высоту h, а затем и аппликату центра тяжести судна z_g:

$$z_g = r + z_c - h.$$

Абсцисса центра тяжести x_g определяется из условия равновесия:

$$x_c - x_g = (z_g - z_c)t_g\varphi,$$

где r, x_c и z_c определяются по гидростатическим кривым, а угол дифферента – по маркам углубления.

Кренование выполняется специальной командой с участием представителей Регистра или другой контролирующей организации, выбирается защищенное от ветра, волнения и течения место, определяется рациональная схема швартовки, составляется план размещения грузов и личного состава.

Нагрузка судна должна в максимальной степени соответствовать нагрузке “порожнем”. Масса недостающих грузов не должна превышать 2 %, а излишних, включая крен-балласт, – 4 % от водоизмещения порожнем. Реальное состояние нагрузки фиксируется в ведомостях “излишних” и “недостающих” грузов. Метацентрическая высота на момент кренования должна быть не менее 0,2 м (при необходимости принимается дополнительный балласт).

Наклонение корабля осуществляется при помощи крен-балласта, который укладывается четырьмя-шестью группами на открытой палубе симметрично относительно ДП судна. Каждый из грузов взвешивается и маркируется, его место на палубе очерчивается мелом.

Для регистрации углов крена на судне должно быть установлено не менее 3-х отвесов длиной не менее 3-х метров или не менее двух приборов-инклинографов.

Для оперативного контроля за ходом кренования рекомендуется строить график зависимости кренящего момента от угла крена. При

нормальном ходе опыта все экспериментальные точки должны ложиться на одну прямую линию – касательную к диаграмме статической остойчивости в начале координат.

Для определения водоизмещения судна перед началом и после кренования производится замер осадок по отдельным парам меток (носовым, миделевым и кормовым), а также берутся пробы воды и измеряется ее температура для определения плотности. Наличие трех средних осадок (*Тн*, *Тм, Тк*) позволяет учесть влияние крена, дифферента и продольного изгиба корпуса в момент кренования на величину водоизмещения.

Основным документом, полученным в ходе опыта, является инклинограмма, содержащая запись (8-12) наклонений судна. Ее обработка вместе с расчетами водоизмещения и корректировками весовой нагрузки позволяет найти действительные координаты центра тяжести судна.

В ряде случаев опыт кренования сопровождается раскачиванием судна для нахождения периода бортовой качки. Раскачивание осуществляется перебежками команды с борта на борт. Полученное значение периода, осредненное по ряду опытов, используют для уточнения коэффициента в “капитанской формуле” для данного судна, и таким образом получают возможность приближенно оценивать остойчивость судна при любом состоянии нагрузки в процессе его эксплуатации, а также прогнозировать параметры его бортовой качки на нерегулярном волнении.

3.1.3. Экспериментальное оборудование и приборы

Для определения угла крена судна при производстве опыта кренования используются вески, инклинографы или другие приборы, одобренные классификационным обществом.

Весок (рис. 3.1) представляет собой подвешенный на нити 1 груз 3, которому придают форму крыльчатки. Для гашения колебаний веска крыльчатка помещается в бак с маслом 4. У нижнего конца веска перпендикулярно к диаметральной плоскости судна устанавливается линейка 2 со шкалой. Весок может быть расположен в любом удобном месте судна.

Обозначив через λ длину веска (мм) от точки подвеса до той грани линейки, по которой производится отсчет, а через δb в (мм) – отклонение нити при крене, найдем угол θ (радиан) по формуле:

$$\theta \approx tg\theta = \frac{\delta b}{\lambda}.$$

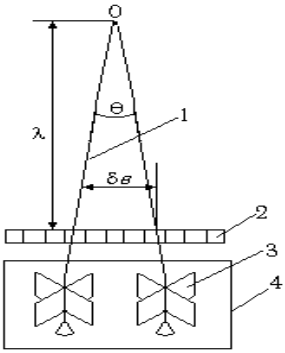

Рис. 3.1. Замер угла крена веском

Погрешность определения угла крена θ при проведении опыта кренования зависит от точности определения перемещения груза. Для уменьшения относительной погрешности определения угла крена θ желательно увеличить δb, чего можно достигнуть, увеличивая угол крена θ и длину веска λ. Однако метацентрическая формула остойчивости справедлива лишь для малых углов крена, и для повышения точности результатов требуется ограничение углов крена. Увеличение длины веска ограничивается конструкцией судна. Чтобы удовлетворить по возможности обоим условиям точности, угол крена выбирают в пределах 2-4°, а длину весков – 4-6 м. Для контроля и повышения точности отсчетов устанавливается несколько весков в разных местах на судне.

Инклинограф системы доцента А.И. Амаева, усовершенствованный в НКИ, представляет собой самопишущий маятниковый кренометр. Устройство прибора показано на рис. 3.2.

Маятник 23 подвешен на призмах 34. При наклонениях судна изменение его положения относительно станины с помощью стрелки 14 и горизонтального рычага 30, соединенных между собой, со станиной и маятником шарнирами, преобразуется в горизонтальные перемещения пера 29.

Перемещение пера записывается на бумажной ленте, закрепленной на барабане 18. Барабан вращается с помощью пружинного привода. Кинематическая система обеспечивает линейность записи углов наклонения в пределах рабочей части инклинограммы. В системе имеет место следующая зависимость между углом наклонения и перемещением пера:

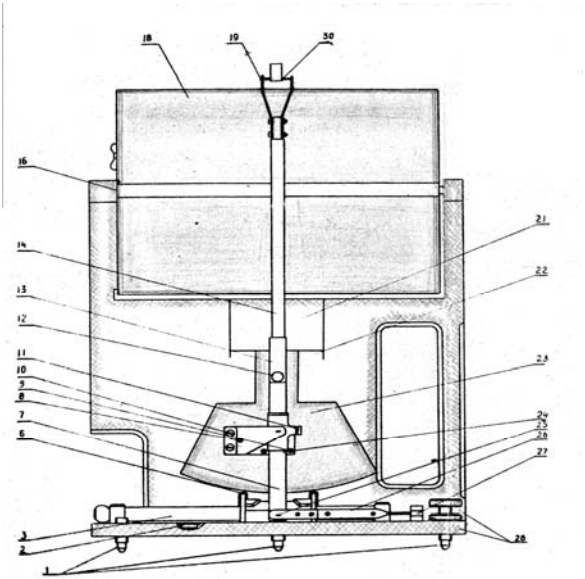

Рис. 3.2, *а*. Инклинограф Амаева

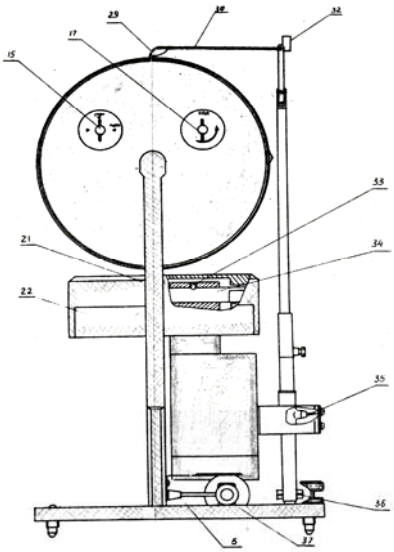

Рис. 3.2, *b* . Инклинограф Амаева (вид сбоку) – НКИ

$$X = \alpha \frac{B}{A} L ,$$

где α – угол наклонения, радианы; A, B, L – плечи рычагов, мм; X – перемещение пера, мм.

Технические данные инклинографа системы А.И. Амаева – НКИ:

1.	Чувствительность не менее, мм/град	18
2.	Скорость движения инклинограммы, мм/мин	50-60
3.	Неравномерность движения барабана не более, %	5
4.	Допустимый предел отклонения маятника, град	3
5.	Погрешность записи не более, %	3
6.	Вес прибора в упаковке не более, кг	12

Перед использованием инклинограф должен быть оттарирован. Тарировка инклинографа производится путем записи наклонений на известный угол. Для наклонения инклинографа может использоваться стенд, схема которого приведена на рис. 3.3.

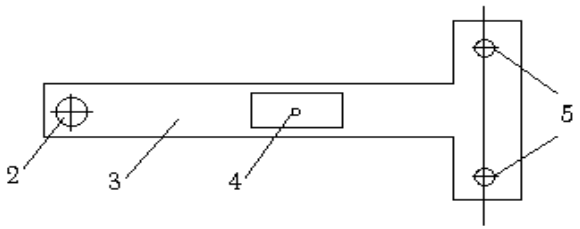

Рис. 3.3. Стенд для тарировки инклинографа

Тарировочный стенд представляет собой платформу 3, снабженную регулировочными винтами 2 и 5 для установки стенда в горизонт. Расстояние между ними должно быть ≈1000 мм и измерено с точностью ±0,5 мм. Платформа устанавливается на прочное горизонтальное основание. На платформу устанавливается инклинограф. Для наклонения платформы под винт 2 ложится подкладка 1 высотой ≈30 мм, измеренная с точностью ±0,01 мм. Угол наклона платформы определяется по формуле:

$$\alpha = b/L,$$

где α – угол наклона платформы, рад; b – высота прокладки, мм; L – база платформы, мм.

Измерив на инклинограмме перемещение пера, соответствующее полученному наклонению, определяют масштаб записи углов. Наклонения платформы проводятся несколько раз, результаты осредняются.

Применение инклинографа как регистрирующего прибора в опыте кренования позволяет существенно упростить измерительные операции. Так, нет никакой необходимости в ожидании затухания колебаний весков, поскольку производится непрерывная запись углов крена судна. Отпадает необходимость наблюдения за показаниями регистрирующего прибора и устраняются субъективные ошибки, неизбежные при кренновании с применением весков. Высокая чувствительность прибора допускает меньшие углы наклонения при проведении опыта кренования, что позволяет снизить вес крен-балласта и даже заменить перенос крен-балласта переходом людей, за счет чего существенно сокращаются время и стоимость опыта кренования.

Осадка судна при проведении опыта кренования производится по маркам углубления. При наличии волнения для точного измерения осадки используются шланги со стеклянными трубками. За уровень спокойной воды при замере осадки принимается уровень в стеклянной трубке.

Многие современные суда оборудованы стационарными устройствами – осадкомерами. На рис. 3.4 приведена схема *поплавкового* осадкомера, который также широко используется для измерения уровня жидкости в береговых резервуарах. Мерительная трубка 3 соединена с забортной водой. В трубке находится поплавок 2, соединенный тросом с барабаном 4 следящей системы (1, 5, 6). Величина осадки определяется в зависимости от длины троса на барабане.

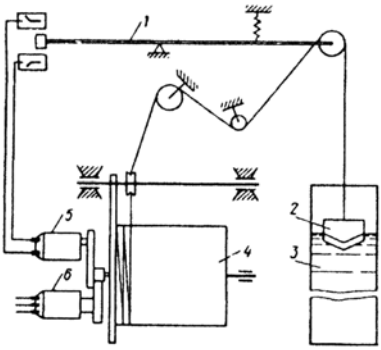

Рис. 3.4. Осадкомер поплавкового типа

Пневмеркаторный осадкомер (рис. 3.5, *а*) в качестве датчика имеет мембранную коробку 2, воспринимающую давление столба воды. При изменении давления мембрана прогибается и перемещает плунжер 1 индукционной катушки. Изменение тока в катушке регистрируется амперметром, проградуированным по результатам тарировки.

Вакуумный осадкомер (рис. 3.5, *б*) имеет герметичный сосуд, содержащий жидкость и некоторый объем воздуха 1. Степень разреженности этого воздуха зависит от изменения уровня жидкости в сосуде $h_{ж}$ и осадки судна h, снимаемой со шкалы 2.

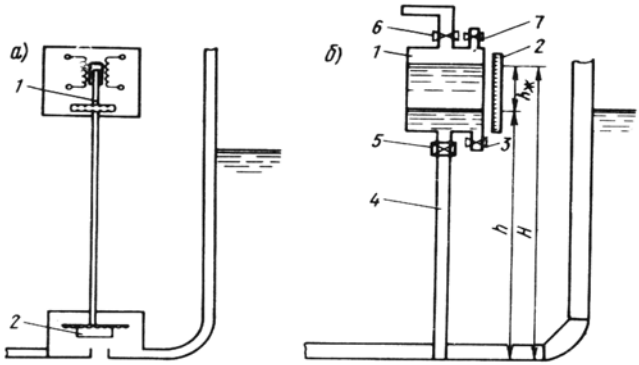

Рис. 3.5. Пневмеркаторный *(а)* и вакуумный *(б)* осадкомеры

3.1.4. Обработка результатов опыта кренования

Расчет объемного водоизмещения V и абсциссы центра величины X_c в условиях опыта

При плавании судна на тихой воде

$$V = \int_L w dx; \quad x_c = \frac{\int_L wx dx}{V}.$$

Для нахождения погруженных площадей шпангоутов w_j на масштаб Бонжана наносят след действующей ватерлинии (по данным замеров осадок), фиксируют точки пересечения ватерлинии с

проекциями теоретических шпангоутов, и через эти точки проводят горизонтали до пересечения с кривыми $w_i = f(z_i)$.

Вычисления соответствующих интегралов производят по правилу трапеции в табличной форме; форму таблиц можно найти в любом пособии по статике корабля.

Эту же задачу можно решить при помощи диаграммы Фирсова, если она имеется в судовой документации.

Если дифферент и прогиб судна во время опыта незначительны, V и X_c допустимо определять по гидростатическим кривым для среднего значения осадки.

Обработка инклинограммы. Для оценки действительного значения метацентрической высоты используют два параметра – среднее значение h_0 и абсолютную погрешность опыта Δh, их расчет выполняется в табличной форме, форму таблиц можно найти в пособии [3]. В таблицу № 1 для каждого из опытов (переноса груза) заносятся значения отклонения пера инклинографа x_i (рис. 3.6), угла крена, кренящего момента и метацентрической высоты. После нахождения среднего значения

$$h_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} h_i$$

в эту же таблицу заносят отклонения от среднего

$$\varepsilon_i = h_i - h_0$$

и квадрат этой величины ε_i^2.

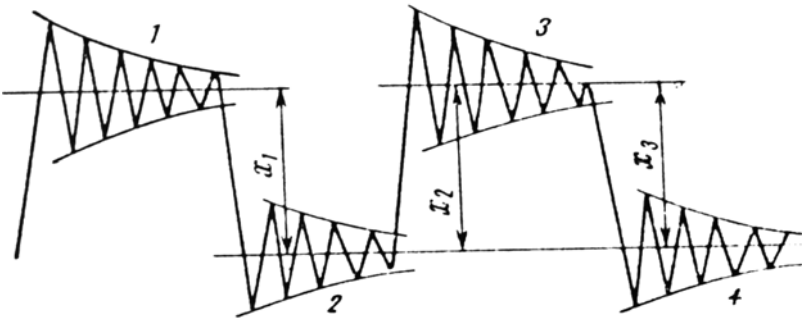

Рис. 3.6. Обработка инклинограммы

Если для каждого из замеров выполняется условие:

$$\left|h_i - h_0\right| \le 2\sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n-1}},$$

то кренование считается качественным и оценкой метацентри-ческой высоты считается ее среднее значение h_0.

Замеры, не удовлетворяющие этому требованию, исключаются из обработки с соответствующим изменением n и повторным вычислением h_0. Кренование признается качественным и в том случае, если вероятная ошибка опыта Δh удовлетворяет условию [23]:

$$\Delta h \le 0{,}02(1+h_0) \text{ при } h_0 \le 2 \text{ м},$$
$$\Delta h \le 0{,}04h_0 \text{ при } h_0 > 2 \text{ м}.$$

Для расчета Δh используется таблица № 2, в которую заносят среднее значение Δh, выборочное среднее квадратичное отклонение метацентрической высоты:

$$S = \sqrt{\frac{\sum^{n} \varepsilon_i^2}{(n-1)}},$$

абсолютная ошибка опыта

$$\Delta h = \frac{t_n \cdot S}{\sqrt{n}},$$

где параметр t_n определяется в зависимости от числа опытов n (см. п. 1.2.3.5).

Если ошибка опыта выходит за указанные выше пределы, в качестве оценки метацентрической высоты принимается ее расчетное значение:

$$h_p = h_0 - \Delta h.$$

Расчетная аппликата центра тяжести судна:

$$z_g = z_c + r - h_p.$$

Рассмотренная схема обработки опыта кренования основана на предположении, что в пределах измеренных углов крена сохраняется линейная зависимость для восстанавливающего момента. Для судов с так называемой S-образной диаграммой остойчивости можно ввести поправку к метацентрической высоте на неточность метацентрической формулы. Эта поправка имеет вид:

$$\Delta h_0 = -\frac{1}{3}\left(r_5 - r_0\right)\left(\frac{\theta^o}{5}\right)^2,$$

где r_0 и r_5 – метацентрические радиусы в прямом положении и при крене $\theta = 5''$; θ'' – угол крена в градусах при креновании.

В результате кренования получают фактические значения весовой нагрузки D и координат центра тяжести x_g и z_g на момент опыта.

Используя ведомость избыточных и недостающих грузов, можно подсчитать их суммарные характеристики и получить параметры нагрузки судна порожнем, являющиеся исходными при составлении планов загрузки судна и оценке его остойчивости при различных вариантах нагрузки. Ниже приведена заключительная таблица протокола опыта кренования грузового судна.

	Наименование	**Масса, т**	**Плечи, м**		**Моменты, т*м**	
			X	**Y**	**Mx**	**Mz**
1	Судно при кренов.	375,9	–4,270	1,864	–1605,2	700,8
2	Недостающ. грузы	0,0	0,000	0,000	0,0	0,0
3	Излишние грузы	14,9	–22,100	1,417	–329,3	21,1
4	Крен-балласт	2,076	0,000	3,850	0,0	8,0
Судно порожнем		**358,9**	**–3,555**	**1,871**	**–1275,9**	**671,6**
D = 358,9	X_g = Mx/D = -3555			Z_g = M_g/D = 1,871		
Руководитель кренования				В.В. Хазов		
Исполнитель, доцент				В.Р. Шестопал		
Ст. инженер-инспектор РУ				А.А. Баландин		