



ТЕСТ ЛАМБОУЛИ

Из руководства для международных мерителей. Перевод: Сергей Антипов

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС

Большинство яхтсменов хорошо знает, что избыточная масса лодки неблагоприятно влияет на скорость. Тяжелые лодки медленно ускоряются и обладают меньшей ходкостью, поскольку корпус глубже сидит в воде. Длина плеча между центром величины (центром погруженного объема) и лежащего ниже центром тяжести (ЦТ) влияет на располагаемый восстанавливающий момент и, следовательно, на способность нести паруса. Соответственно многие классы яхт имеют правила ограничивающие минимальную массу и положение ЦТ. Продольное положение ЦТ также важно для того, чтобы корпус скользил по волне, не зарываясь носом в воду. Многие яхтсмены, особенно на швертботах, стремятся сместить ЦТ в корму настолько, насколько это возможно. Дополнительная масса экипажа обычно смещает ЦТ назад.

Степень концентрации массы лодки описывается физическим понятием «радиус инерции». Лодка с легким носом и кормой имеет меньший радиус инерции, чем лодка с тяжелым носом и кормой. На самом деле влияние распределения масс вокруг ЦТ, а именно его измеряют в тесте на качание, несколько сложнее. Если мы представим массу сосредоточенной по концам гантели, то ЦТ окажется в ее середине. По мере раздвигания

длины гантели мы ощутим возрастающее сопротивление при попытке начать или затормозить ее вращение. Килевая качка есть один из видов вращательного движения. Чем большая масса сосредоточена в носовом и кормовом окончаниях лодки, тем меньше собственная частота килевой качки. Этот фактор влияет на всхожесть на волну и, следовательно, в некоторой степени на ходкость.

Преимущество теста на качание заключается в том, что отпадает необходимость в отдельных регламентах на массы корпуса, фальшкиля и положение ЦТ. К тому же подобный обмер может проводиться только в период изготовления лодки. Если мы регламентируем величину радиуса инерции, то в правилах класса отпадает необходимость дополнительной регламентации конструктивных габаритов. При надлежащей организации тест на качание может выполняться на большинстве регат в рамках обычной процедуры обмера. Именно так происходит на «Золотом Кубке» класса «Финн». Недостатком процедуры теста на качание служит ее динамический характер, часто вызывающий непонимание спортсменов. Тест на качание требует жесткой опоры для оснастки и должен проводиться в закрытом помещении без сквозняков.

Практически все классы яхт имеют ограничение на минимальную массу, а некоторые «Этчеллз», например,

на максимальную массу. Если ассоциация класса хочет ужесточить требования к распределению массы, то следующим шагом будет регламентирование положения ЦТ или точки равновесия на опоре, при этом проверка этого ограничения выполняется статическими измерениями. Так, правила класса «Инглинг» гласят: «Положение центра тяжести сборки корпуса и палубы в обмерном состоянии, описанном выше не должно быть ниже, нежели то, при котором корпус находится в равновесии, будучи установлен на борт при угле крена 110 градусов». Это требование сводится к тому, что корпус будучи установлен на борт, должен валиться в сторону палубы, как показано на рис. Н.4.1.

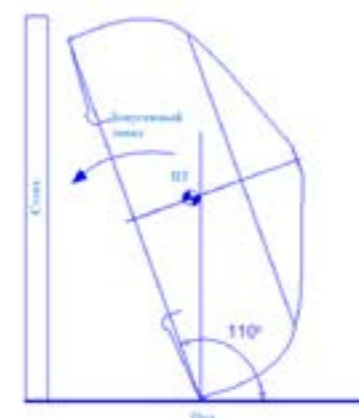


Рис. Н.4.1. Тест на балансирование сборки «корпус+палуба» «Инглинга».

Положение ЦТ можно определить, свободно вывесив корпус, дав ему успокоиться и опустив отвес из точки подвеса. Простой способ контроля по типу «да-нет» для швертботов изображен на рис. Н.4.2. Корпус размещают на шарнире с осью вращения перпендикулярной к диаметральной плоскости. Ось находится на заданном расстоянии λ_{Min} от Точки Привязки Корпуса (ТПК). Корпус удерживают горизонтально, а затем отпускают (на пол кладут амортизирующий коврик). Если корпус в допуске и ЦТ находится спереди от оси вращения, то он наклонится вперед.

И только в том случае, если ассоциация класса понимает, что ей требуется более продвинутый способ контроля распределения массы, она использует тест на маятниковое качание.

Рис. Н.4.2. Тест на допустимое положение ЦТ. ЦТ расположен в нос от λ_{Min} .

Шаблон для установки положения корпуса



Н.4.1. ТЕСТ ЛАМБОУЛИ НА КАЧАНИЕ В ПОДВЕСЕ

В 60-х годах XX-го века стеклопластик начал вытеснять дерево. В силу этого многие Технические комитеты классов стали вводить новые правила с тем, чтобы гарантировать конкурентоспособность старых лодок и разумные ограничения на проектные нормы новых лодок. Масса корпуса, разумеется, оставалась в старых пределах, однако новые технологии допуска

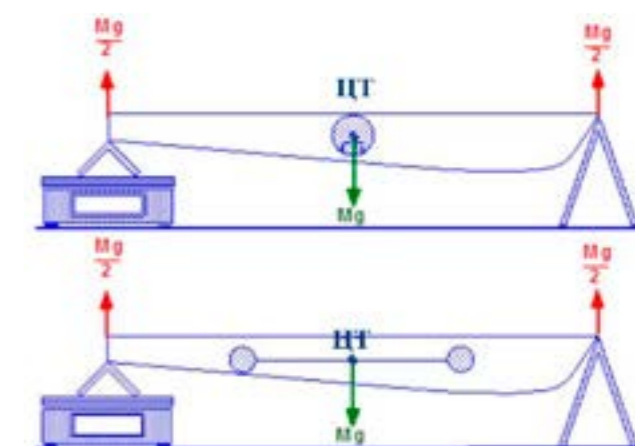


Рис. Н.4.1.1. Взвешивание кормы или носа корпуса не даст понятия о распределении массы.

ли большую свободу в ее распределении. Стало возможно не только менять положение центра тяжести, но и делать легче носовые и кормовые окончания и, соответственно, они оказывались менее прочными. Большое число классов ввело тест на качание с тем, чтобы регулировать эти тенденции. Наибольшую известность приобрел тест Гильберта Лэмбоули (Gilbert Lamboley) в классе «Финн», который получил название «Тест Лэмбоули». Впрочем и многие другие классы с течением времени ввели тесты на качание. Это произошло в «Европе», «Снайпе», «Звездном» и «Драконе». Другие классы, такие, как 470 (Пусан и Барселона), 49-й (Сидней) и «Инглинг» (Афины) ввели тест на качание для Олимпийских регат. Многие другие классы, включая «Летучий Голландец», «Лайтнинг», «Файрболл», «Интерн. 14», «ОК Динги», «Комета», «Во-

рвен», «Торнадо», «Лехнер» и «Солинг», а также классы в системе обмера IMS и даже R/C исследовали применимость тестов на качание, но в итоге решили отказаться от него.

Для случая статических измерений или линейного перемещения применим второй закон Ньютона в виде $F=M \cdot a$, где внешняя сила «F» сообщает ускорение «a» телу массой «M», причем ускорение не зависит от распределения массы внутри тела. При взвешивании лодки ускорение равно нулю, так, что два вектора силы, направленных вверх уравновешены вектором силы веса $M \cdot g$, как показано на рис. Н.4.1.1. для простейшего случая корпуса с центром тяжести точно посередине. Общепринятым заблуждением является мнение о том, что если вывесить форштевень на призматической опоре, а весы разместить под ахтерштевнем, можно определить, что тяжелее, корма или нос. Как в случае, когда вся масса корпуса сосредоточена в ЦТ, так и в случае некоего распределения массы по объему корпуса весы покажут одно и то же значение. На самом деле не существует способа измерить распределение массы статическими методами.

Для вращательного движения, однако, второй закон Ньютона примет вид $\Gamma = I \cdot \alpha$, где Γ внешний вращательный момент силы, $I = M \cdot \rho^2$ момент инерции корпуса относительно оси вращения и α возникающее угловое ускорение. Момент инерции является суммой (а точнее интегралом) величин равных произведению индивидуальных масс, умноженных на квадрат расстояния этих масс от оси вращения и равен $M \rho^2$, где ρ есть радиус инерции.

$$I = \sum m_i r_i^2 = \rho^2 \sum m_i = M \rho^2$$

Ясно, что эта величина зависит как от направления, так и положения оси вращения и по сути момент инерции является тензором размерности 3x3. Впрочем, яхтсменов больше всего волнует килевая качка, которая сводится к вращению вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной диаметральной плоскости. Именно это будет нашей главной заботой. Существуют впрочем, методы измерения вращательного рысканья по курсу относительно вертикальной оси, которые мы пока отложим в сторону. Для простой визуализации радиуса инерции полезно представить корпус в виде гантели с двумя симметричными массами $M/2$, причем каждая масса находится на расстоянии радиуса инерции от ЦТ, как показано на рис. Н.4.1.2, который также показывает, как расположение оборудования и дельных вещей будет влиять на радиус инерции. Размещение дополнительных масс на расстоянии радиуса инерции от ЦТ не изменит этот радиус. Размещение дополнительных масс ближе к ЦТ уменьшит радиус инерции. Также уменьшит радиус инерции удаление масс из зоны, лежащей от ЦТ дальше, чем этот радиус.

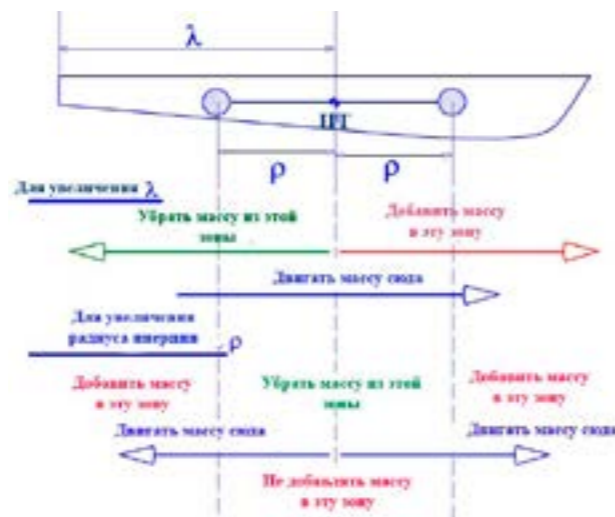


Рис. Н.4.1.2. Для анализа килевой качки корпус можно моделировать гантелью с двумя равными массами, расположенными на расстоянии ρ радиуса инерции в нос и в корму от центра тяжести ЦТ.

Для измерения момента инерции или радиуса инерции нам необходимо стимулировать вращательное движение с известным вращательным моментом силы и вызываемым им угловым ускорением, или $I = \Gamma / \alpha$. Маятник является простейшей системой, где вес создает вращательный момент, а угловое ускорение однозначно связано с периодом колебаний T . К сожалению, расстояние «a» от точки подвеса до ЦТ, где как бы сосредоточена масса, также входит в уравнение для вращательного момента и, следовательно, в выражение для периода. Таким образом, появляются две неизвестные величины.

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{a^2 + \rho^2}{ag}}$$

Гильберт Лэмбоули решил эту задачу измерив второй период качания T_2 при смещении оси подвеса на известное расстояние «b», которое он выбрал равным 200,0 мм. Тогда:

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{(a-b)^2 + \rho^2}{(a-b)g}}$$

Эта система из двух уравнений с двумя неизвестными легко разрешима и положение центра тяжести «a» и радиус инерции « ρ » могут быть найдены с помощью калькулятора или номограммы, используя следующие соотношения:

$$a = \frac{b(gT_2^2 + 4\pi^2 b)}{g(T_2^2 - T_1^2) + 8\pi^2 b}$$

Расстояние от оси качания до ЦТ

$$\rho = \sqrt{a \left(\frac{gT_1^2}{4\pi^2} - a \right)}$$

Радиус инерции

Или можно воспользоваться следующей ниже номограммой (Рис. Н.4.1.3).

Н.4.2 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ И ЦЕНТР ТЯЖЕСТИ: ПРАКТИКА

Современное оборудование используемое для проведения теста на качание Лэмбоули показано на рисунках Н.4.2.1 и Н.4.2.2 (изображенные весы не являются обязательными для теста).

Перед тестом на качание корпус необходимо взвесить, записать в протокол положение корректирующих грузов. Следует убедиться, что корпус гарантировано сухой и находится в обмерном состоянии, как предписано правилами класса. Не должно быть незакрепленного оборудования, способного перемещаться при качании.

Корпус вывешивают с помощью скоб-захватов, подвешенных под отбойный буртик. Корпус не должен перемещаться относительно скоб-захватов. Положение скоб-захватов следует совместить с положением центра тяжести. Следует внимательно убедиться, что скобы стоят правильно и соблюдать осторожность — в противном случае лодка может упасть! (Под лодкой следует разместить амортизирующий коврик). Скобы должны быть выставлены вертикально (иначе не удастся выдержать номинал на расстояние «b») 200 мм. Опорные поверхности скоб из мягкой малоуглеродистой стали следует периодически осматривать и удалять риски надфилем. Ножевидные призмы, на которых висят скобы, вварены в фиксирующие цилиндры, перемещающиеся сквозь боковые стойки ферменной конструкции с двух сторон. Их можно легко вдвигать и выдвигать для быстрой смены оси качания не перемещая корпус. Цилиндры надежно фиксируются зажимом, оставаясь неподвижными в момент теста. Опорные поверхности ножевидных призм должны быть выставлены горизонтально.

К форштевню лодки прикрепляют с помощью изолянты легкую пластиковую шторку. Рядом со шторкой



Рис. Н.4.1.4. «Летучий Голландец» проходит тест Лэмбоули на Олимпийских играх 1976 в присутствии Королевы Елизаветы II.

в состоянии покоя лодки устанавливают кронштейн с фотоэлементом. Начинают качать корпус на сравнительно малый угол — правила класса «Финн» регламентируют амплитуду колебаний форштевня не более 200 мм. Измеряют период колебаний. Для этого фиксируют время 10 полных зачетных качаний (после некоторого числа начальных качаний для установления процесса), подсчитывают период одного колебания и записывают в протокол. Для других классов начальная амплитуда и число зачетных колебаний иногда регламентируются правилами класса.

Наибольшая точность достигается если секундомер запускают и останавливают в моменты перехода метки через начало отсчета с наибольшей скоростью. Если начало отсчета не совпадает с положением равновесия, то в процессе затухания амплитуды возникает ошибка, как показано на рис. Н.4.2.3. Зафиксируйте время 10 полных колебаний с точностью 0,1 секунды и рассчитайте период с точностью 0,01 секунды. Повторите процедуру для второго положения оси качания и рассчитайте радиус инерции с по-

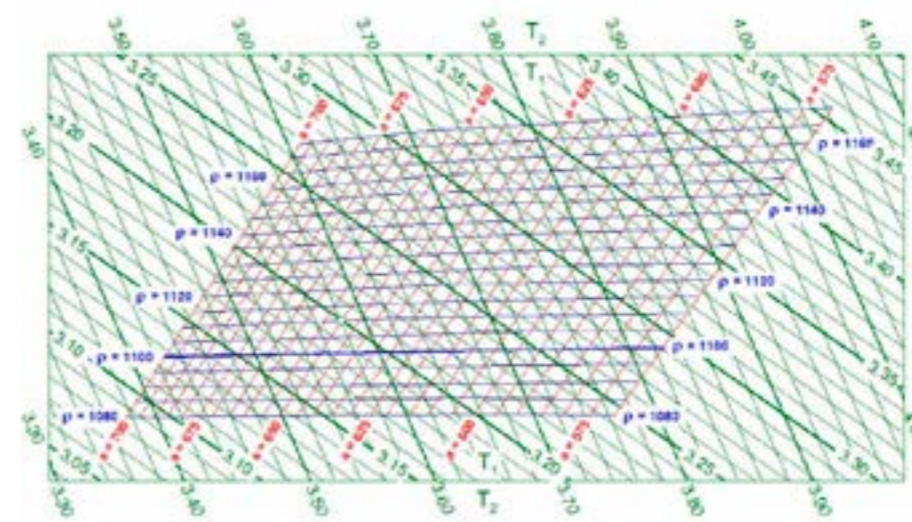


Рис. Н.4.1.3. Номограмма для «Финна» разработанная Гильбертом Лэмбоули для определения параметров «a» и « ρ » из периодов T_1 и T_2 , при условии $b=200,0$ мм



Рис. Н.4.2.1. Современная система для теста Лэмбули швертбота «Финн». Показаны: пара выдвижных ножевых призматических опор, скобы-захваты для «Финна» с разнесением точек подвеса на 200 мм и фотоэлемент для фиксации процесса качаний.

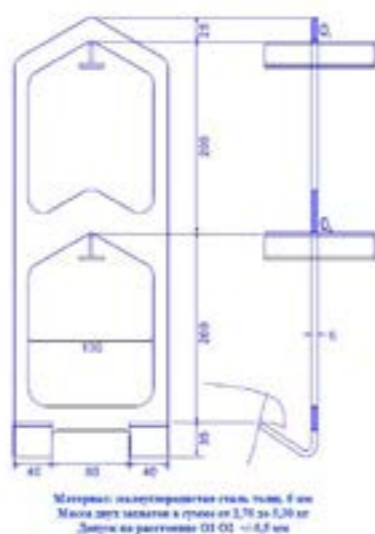


Рис. Н.4.2.2. Скобы-захваты для класса «Финн» образца 2009 г. с разнесением точек подвеса на 200 мм. ИСАФ рекомендует их в качестве стандарта для всех классов

мощью калькулятора, номограммы или программы компьютера.

Электронный секундомер в паре с триггером на фотоэлементе даст наилучшие результаты, исключив физиологическую реакцию мерителя на пуск/останов. Можно обойтись меньшим числом зачетных колебаний. Можно определить период одного колебания и сравнить результаты нескольких последовательных качаний на совпадение. При массовом обмере корпусов в начале регаты, электронный секундомер весьма важен. Подсоединив фотоэлемент непосредственно к ноутбуку, который фиксирует время последовательных периодов, вы исключите возможные описки (а их легко сделать в процессе массового контроля на регате!). Станет возможной фиксация непостоянства периода качаний из-за возможного наличия воды в корпусе, например.

Весьма важно, чтобы измерения проходили в закрытом помещении. Правила класса «Финн» предписывают вывешивание корпуса на скобах-захватах на осях качания O1, O2 и измерение периодов качаний T1 и T2. Эти данные наносят на номограмму и получают значения «а» и «р» по кривым. Расстояние «д» замеряют параллельно базовой линии от шпангоута O до оси O1. Если «д» оказывается близкой к предельному значению, следует убедиться, что базовая линия выставлена по горизонту, как показано на рис. Н.4.2.4.

Расстояние «d» от оси O1 до нижней части киля (исключив накладку киля) обычно можно измерить с помощью линейки или рулетки, пропущенной через швертовый колодец, или с помощью горизонтального лазерного уровня. Полезно подложить под лодку страховочный коврик, которого лодка касаться не должна. Колебания должны быть невелики и не должны существенно затухать менее, чем за 100 периодов.

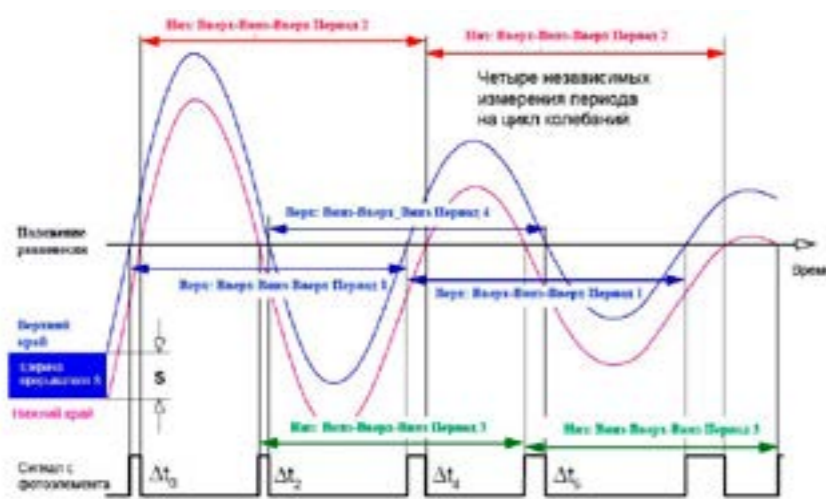


Рис. Н.4.2.3. Осциллограмма сигнала с фотоэлемента с прерывателем шириной S, отъюстированного так, что верхний край находится в нейтральном положении. Затухание амплитуды намеренно преувеличено для ясности, откуда становится понятно, что периоды два и три, фиксируемые по нижнему краю, не совсем точны. Амплитуда может быть пересчитана на основе длительности интервалов Δt .

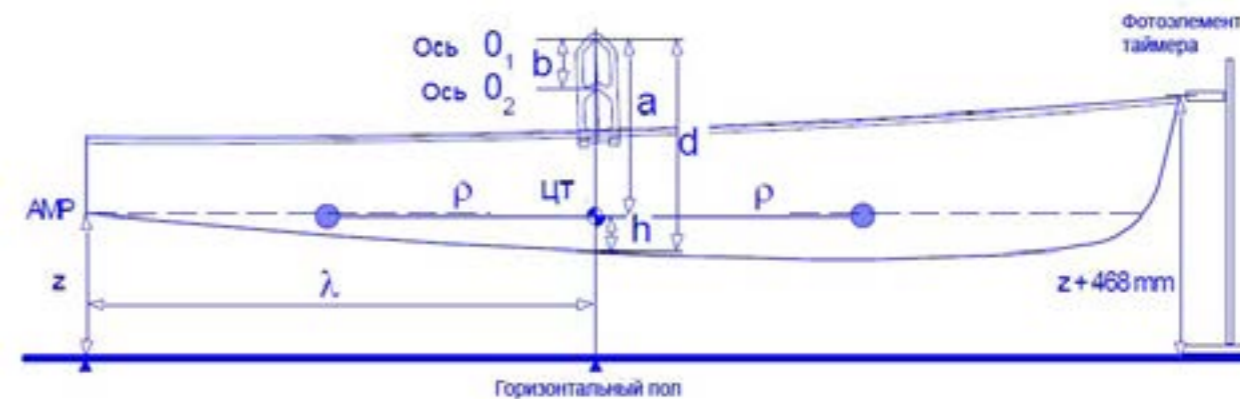


Рис. Н.4.2.4. Тест Лэмбули для класса «Финн». Измеряются периоды колебаний T1 и T2 относительно осей O1 и O2. Находят положение ЦТ расчетом длины отрезка «а» и радиуса инерции «р». Величины отрезков «д» и «b» позволяют рассчитать «h» — высоту ЦТ в корпусе.

Не должно быть крутильных колебаний относительно вертикальной оси. Опорная конструкция должна быть жесткой.

Н.4.2.1 ОШИБКИ И ИХ МИНИМИЗАЦИЯ

Источники ошибок

Калибровка таймера. Обычно электронные таймеры весьма точны, однако весьма полезно поверять их по сертифицированным сигналам точного времени, таким, как www.time.gov, перед началом ответственных обмеров. В принципе следует брать значение местного ускорения силы тяжести g, а также поправку на архимедову силу(?).

Бракованные скобы-захваты. Скобы качаются вместе с корпусом, так, что фактически мы измеряем суммарный момент инерции. Слишком тяжелые скобы или скобы неправильной геометрии (в частности не следует использовать скобы от «Европы» для «Финна» и наоборот) ведут к ошибочным результатам.

Неправильная амплитуда качаний. В отличие от элементарной теории, амплитуда качаний может влиять на их период, так, что зачетные качания должны иметь амплитуду в регламентированном поле допуска.

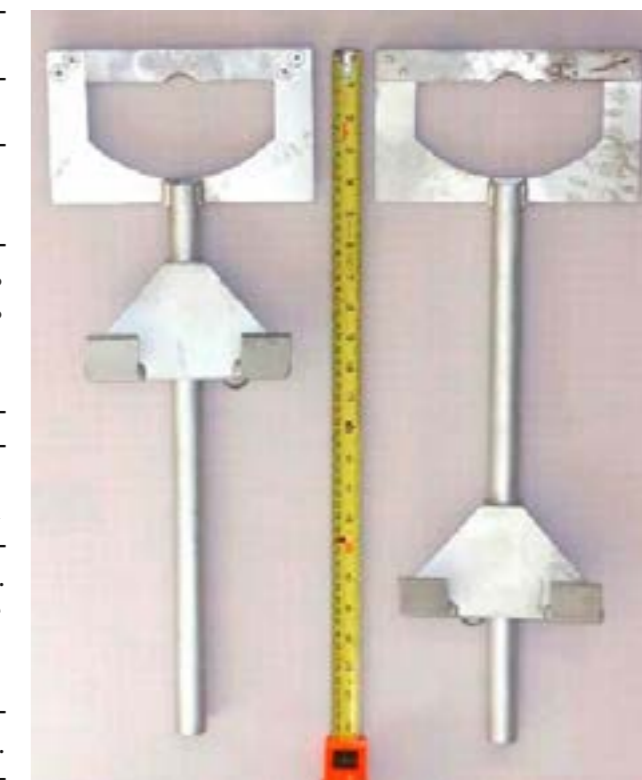
Сквозняки (например, от открытой двери). Меритель должен потребовать для работы замкнутое помещение с фундаментом, не палатку. Возмущения от сквозняков проявляются, когда одно из нескольких последовательных качаний, замеренных электронным таймером, сильно выделяется на фоне остальных. Обычно порыв сквозняка можно уловить. Подобные замеры отбрасываются.

Недостаток жесткости. Опорная ферменная конструкция для качания должна быть весьма жесткой. В частности она должна стоять на бетонном или ана-

логичном полу. В противном случае периоды качаний станут слишком велики, а рассчитанный радиус инерции слишком большим. Перемещение скоб-захватов по корпусу во время перестановки оси качания также приводит к ошибкам. До начала процедуры обмена на регате проверьте заведомо известный корпус в первую очередь!

Вода в корпусе. Незакрепленное оборудование и посторонние предметы Неустойчивые, изменчивые результаты являются индикатором свободного объема воды где-либо (отсеки непотопляемости, двойное дно и т.д.). При взвешивании до начала регаты, лодка должна быть чистой и сухой. Если в течение регаты

Рис. Н.4.2.5 Скобы-захваты для класса «Европа» в положении ось O1 (слева) и ось O2.





ты потребовался дополнительный обмер, лодка уже не будет сухой. В частности хорошо впитывают воду ремни откренивания и мягкие подкладки под бедра, которые скорее всего будут ближе в ЦТ лодки, чем радиус инерции. Если лодку испытать на качание в этом состоянии, радиус инерции может оказаться ниже допуска, смотри рис Н.4.1.2.

Хорошее понимание вопроса о кондиционности сухой лодки дает понятие о моменте инерции. Поскольку момент инерции есть

$$M \cdot \rho^2 = \sum (m_i \cdot r_i^2 + m_n \cdot r_n^2),$$

его нельзя уменьшить добавлением массы m_n , то есть «Мокрый» $M_{\text{мр}} \rho^2 >$ «Сухой» $M_{\text{дп}} \rho^2$. Если происходит повторное взвешивание и качание проблемной лодки, то новый момент инерции никогда не будет меньше чем у изначально сухой лодки, даже если g_n меньше ρ , а вот радиус инерции может стать меньше.

Это приводит к интересной особенности старых лодок, которые подобно их владельцам имеют тенденцию набирать массу в районе миделя. Если новый

«Финн» имеет минимальную массу $M=116$ кг и минимальный радиус инерции $\rho=1100$ мм, то момент инерции составит $I=140,36$ кг*м².

Если теперь корпус наберет массу, скажем 5 кг, на расстоянии 200 мм от ЦТ, то новый момент инерции составит $I=M\rho^2+m\rho^2=140,36+5 \times 0,22=140,56$ кгм², т.е. больше, а радиус инерции будет $\sqrt{I/(M+m)} = \sqrt{140,56/(116+5)} = 1083,3$ мм, меньше допуска. Таким образом, потребуется добавить корректирующие веса на окончания корпуса, чтобы соответствовать правилам класса «Финн», а это фактически двойной штраф. Вот почему класс «Европа» регламентирует момент инерции, но не радиус инерции.

Существует много видов конструктивного исполнения скоб-захватов и призматических опор, цель которых состоит в облегчении быстрой смены положения оси качания, не меняя положения скоб на корпусе. В классе «Европа» используют скобы переменной длины, не меняя положения призматических опор. На практике это не совсем идеально и теоретически некорректно, поскольку объект качания, включающий скобы, меняет геометрию. При условии, что все корпуса обмеривают при помощи одного набора скоб, эта

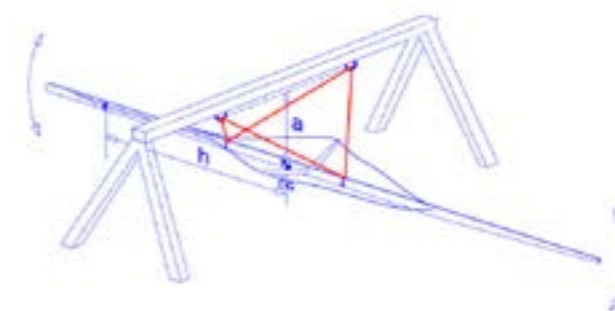


Рис. Н.4.9.1 Для измерения радиуса инерции мачты ее подвешивают горизонтально и перпендикулярно опертой балке с помощью легких нитей, пропущенных в петли. Измеряют расстояние «а» до ЦТ и период собственных колебаний Т.

систематическая погрешность является константой и не создает проблем.

Н.4.9 ЛОДКА ЦЕЛИКОМ В ТЕСТЕ НА КАЧАНИЕ

Тест Лэмбоули на качание проводился для «Летучего Голландца» в полной комплектации, включая паруса, однако это не стало общей практикой. Вспомним, что лодки благополучно ходят с экипажем на борту. Таким образом, для оценки мореходных свойств, следует исследовать всю яхту полностью. К счастью, в рамках упрощенной модели твердого тела можно легко вычислить радиус инерции всей лодки, введя данные индивидуальных компонентов в таблицу.

Центр тяжести (ЦТ) каждого плоского компонента можно определить, подвесив его по очереди в двух точках на гвозде и опустив вниз вертикальную линию с помощью отвеса. Точка пересечения этих линий есть ЦТ. Подвесив теперь тело на гвозде, можно опреде-

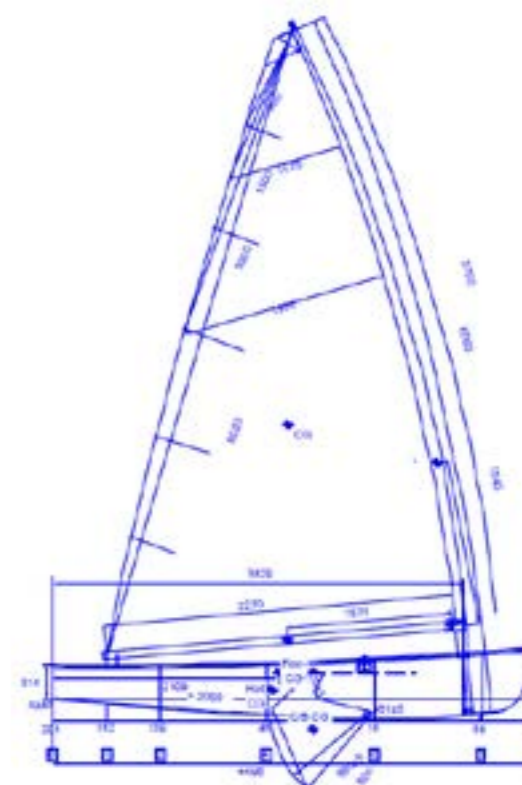


Рис. Н.4.9.2 Компоненты «Финна», с положением их ЦТ на остром курсе.

Таблица Н.4.9.1 Положения ЦТ, радиусы инерции и моменты инерции компонентов швертбота «Финн» на остром курсе

Наименование	Масса		Положение		Радиус инерции k	Момент инерции		
	кг	%	x м	y м		I_0 кг*м ²	$I_{\text{ЦТ}}$ кг*м ²	$I_{\text{ЦТ}}$ %
Тест Лэмбоули	кг	%	м	м	м	кг*м ²	кг*м ²	%
Корпус, шверт, скобы и т.п.	122,75		2,100	0,10	1,100	148,5		
«Финн» на остром курсе								
Корпус	106,34	75,5	2,05	0,08	1,16	143,9	147,1	52,5
Мачта	8,00	5,7	3,59	2,20	1,77	25,1	73,4	26,2
Парус	2,38	1,7	2,19	2,91	1,84	8,09	25,0	8,91
Перо руля	3,98	2,8	-0,04	0,08	0,44	0,77	19,3	6,87
Гик	5,60	4,0	2,19	0,55	0,98	5,36	5,92	2,11
Шверт (опущенный)	11,11	7,9	2,42	-0,28	0,31	1,03	5,16	1,84
Весло	0,57	0,4	0,30	0,00	0,29	0,05	1,95	0,69
Компас	1,41	1,0	2,91	0,33	0,04	0,00	0,91	0,32
Носовой конец	0,23	0,2	0,30	0,00	0,03	0,00	0,77	0,27
Черпак	0,14	0,1	0,30	0,00	0,01	0,00	0,47	0,17
Удлинитель румпеля	0,23	0,2	0,90	0,35	0,01	0,00	0,34	0,12
Гикашкот	0,91	0,6	2,10	0,42	0,08	0,01	0,03	0,01
«Финн» целиком	140,9	100	2,11	0,24	1,41		280,3	100