

К вопросу о центровке гоночной яхты

Сергей Елистратов

Центровка – это основная операция по настройке парусной яхты на высокие ходовые характеристики, и на протяжении гонок и тренировок она осуществляется постоянно, так как судно движется в переменной колебательной среде «ветер-волна».



Рассмотрим основные факторы, влияющие на центровку, и способы ее контроля.

Парусная яхта представляет собой частично погруженное в воду несимметричное тело, которое влияет на окружающую среду (воздух, вода) и само испытывает ее действие в виде сил и моментов сил [1]. Устойчивое движение яхты обеспечивается при удержании в равновесном состоянии всех аэрогидродинамических сил, возникающих на корпусе, парусе, шверте (киле) и руле – это осуществляется за счет перестройки парусного вооружения и изменения места и позы экипажа (сидя, стоя, откренивая, с креном на трапеции), что вызвано перемещением центра масс. Еще на стадии проектирования судна при выборе основных размерений и парусного

вооружения приходится предусматривать диапазон этих перемещений.

Диапазон центровки парусной яхты распространяется от статической поддержки судна на плаву за счет равновесного (на одной вертикальной оси) состояния центра тяжести (ЦТ) и центра величины (ЦВ) до изменения ЦВ гидродинамической подъемной силой при глиссировании.

При расчетах центровки удобно использовать правые системы координат, которые отнесены к ЦТ системы «яхта – экипаж». Это поточная система в координатах X_n, Y_n, Z_n , O и связанная система (центральные оси инерции) в координатах X', Y', Z', O [1] (рис. 1а).

При расчетах моментов инерции яхту можно представить в виде эллипсоида вращения с тремя или более пла-

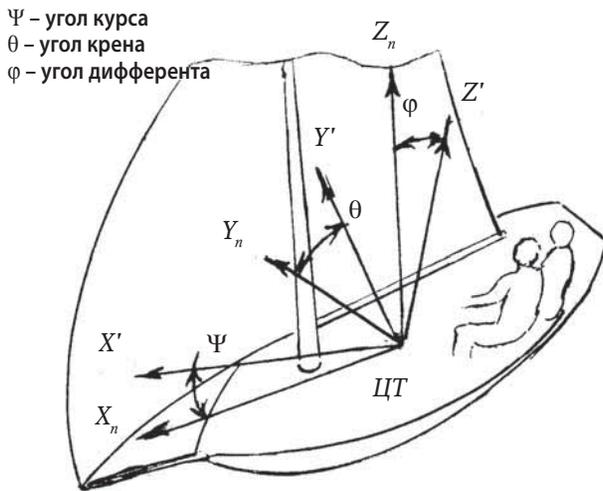


Рис. 1а. Угловые соотношения поточной системы координат $X_n Y_n Z_n$ и системы центральных осей инерции яхты $X'Y'Z'$

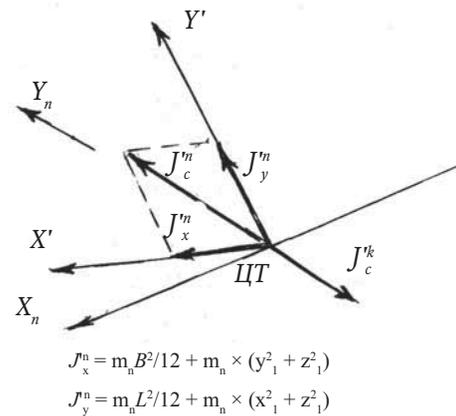


Рис. 1б. Приведение к ЦТ моментов инерции паруса J_x^n и J_y^n и момента инерции команды J_c^k $B \times L$ – габариты эквивалентного паруса

$$J_x^n = m_n B^2 / 12 + m_n \times (y_1^2 + z_1^2)$$

$$J_y^n = m_n L^2 / 12 + m_n \times (x_1^2 + z_1^2)$$

стинами (киль, шверт, паруса, руль), у которого конструктивно и эксплуатационно неравномерно разнесена масса, как собственная, так и переносная от воздуха и воды, плюс перемещаемый балласт в виде экипажа. Движение яхты в общем случае можно представить в виде суммы поступательного и вращательного движения. Практически поступательное сопровождается вращательным почти всегда; движение на «тихой» воде на «ровном» киле – большая редкость, особенно на морской акватории.

Угловые скорости ω и ускорения ω' в первую очередь зависят от состояния водной поверхности, порывистости и осцилляции воздушного потока, реакции парусного вооружения и перемещения экипажа.

Проявление угловых колебаний в поточной системе координат фиксируется через моменты рысканья относительно оси Z_n , крена – оси X_n и дифферента – оси Y_n .

Вращение вокруг оси Z_n на лавировке – это острота хода (величина угла дрейфа). Обычно центровка при этом контролируется усилиями на руле; на слабых и средних ветрах при этом тенденция уваливание, на сильных – приведение.

Вращение вокруг оси X_n связано с образованием кренящего момента от пары «парус – корпус». При крене для его уменьшения ЦВ смещается в сторону крена.

Вращение вокруг оси Y_n в первую очередь связано с ходом яхты на волнении. «Просадка» корпуса при сходе с волны или подъеме на нее зависит от полноты обводов, положения миделя по длине корпуса. Различное положение ЦТ и ЦВ по высоте корпуса у швертботов и килевых яхт вызывает различную технику прохода волновых склонов.

Величины моментов инерции на острых курсах в порядке убывания располагаются в ряд: J_x', J_y', J_z' ; на полных курсах из-за влияния дополнительного парусного вооружения ряд выглядит так: J_y', J_x', J_z' .

Решение плоской задачи движения яхты на курсе «полный бейдевинд» при наличии моментов рысканья и крена показало, что яхта движется по логарифмической спирали

[2]. Объяснением этого факта может явиться то, что на вектор движения яхты сильно влияет вращение вокруг мгновенной оси инерции между векторами J_x^n и J_y^n (рис. 1б).

Появление на бушприте генакера (этот парус имеет суммарные, собственный и переносной, моменты инерции) увеличило разбег центровки – центр масс паруса передвинулся вперед, парируя, экипаж сдвинулся к корме яхты. Это позволяет использовать корпус яхты как гидродинамическое полукрыло, и судно может выходить на глиссирование на всех курсах.

Разница моментов инерции парусного вооружения J_e^n и моментов инерции команды J_c^k при угловых ускорениях ω' дает инерционный силовой момент: $(J_e^n - J_c^k) \times \omega' = M_i$.

При движении «несущие» части яхты (парус, корпус, шверт и руль) создают так называемые моменты демпфирования M_d , которые препятствуют изменению положения яхты в пространстве как по курсу, крену и дифференту, так и по угловым скоростям. Это моменты противодействия изменению траектории и режима движения яхты. При демпфировании возникают пары сил: «парус – шверт», «парус – корпус», «корпус – шверт». Прямое определение путем выделения приращения векторов скорости вымпельного ветра и скорости хода яхты [метод И. Остославского] затруднено в силу сложности определения координат приложения сил x_i, y_i, z_i [3] (рис. 1а).

Практические действия экипажа по центровке и настройке яхты

Перечислим основные операции, выполняемые экипажем по центровке яхты.

На берегу:

1. Проводят расчет положения ЦТ яхты для всего диапазона ветро-волновых условий.
2. По теоретическому чертежу корпуса определяют ЦВ.
3. Проводят расчет продольной статической и динамической остойчивости.

Рис. 2. Приведение сил и моментов сил яхты к ЦТ в плоскости $X_n O Y_n$.
 R_n – сила в парусе, $R_{шв}$ – усилие на шверте, R_p – усилие на руле,
 $Q_{корп}$ – сопротивление корпуса

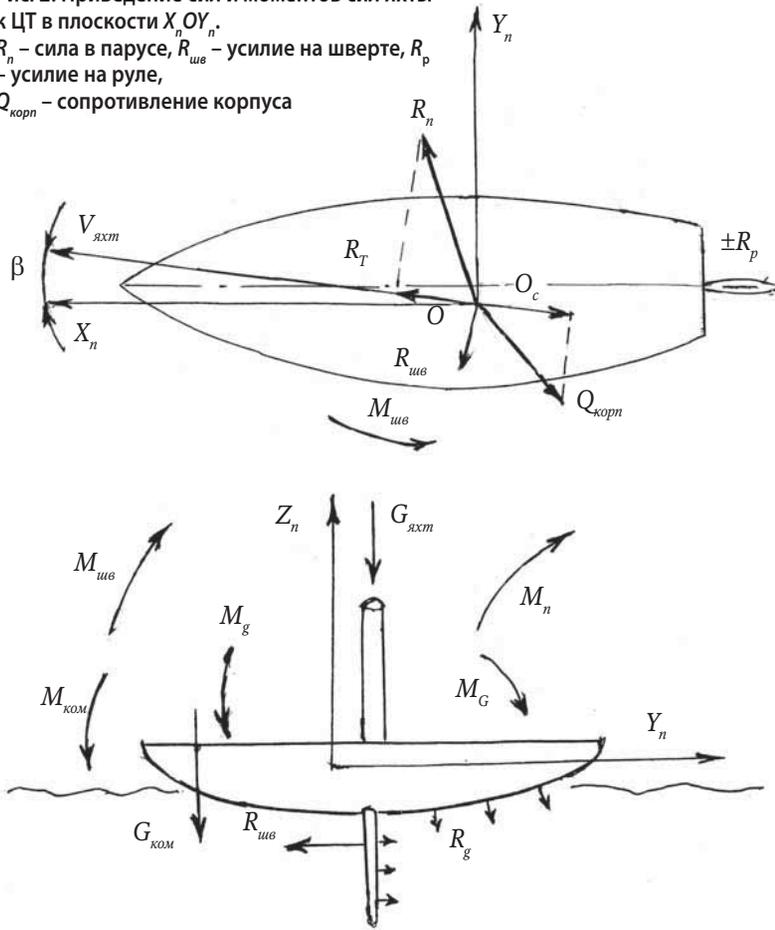


Рис. 3. Силы и моменты в плоскости ZOY .
 $G_{ком}$ – вес команды, $G_{яхт}$ – вес яхты,
 R_g – сила демпфирования шверта и корпуса. $M_{ком} + M_g = M_n + M_G + M_{шв}$

4. Путем креновых испытаний уточняют положение ЦТ корпуса относительно осей симметрии.
5. Устанавливают диапазон перемещения мачты, шверта с целью определения разбега центровки ($X_m - X_{шв}$).
6. Устанавливают мачту с учетом ее наклона и перемещения, а стоячий такелаж с возможностью перемещения по точкам крепления к корпусу яхты.

На воде:

1. Уточняют наклон и изгиб мачты по силе ветра.
2. «Добивают» такелаж, через динамометрию регулируют усилия в вантах, стаксель- и грота-фалах для оптимального взаимного положения парусов и натяжения шкаторин.
3. Уточняют положение и диапазон работы кипок стакселя, каретки погона гика-шкота, оттяжек грота.
4. Устанавливают диапазон перемещения шверта.

На ходу:

1. Устанавливают паруса под углом атаки к вымпельному ветру, окончательно регулируют бегучий такелаж, а также утяжки по углам паруса.
2. Перемещением экипажа по ветро-волновым условиям устанавливают оптимальный крен и дифферент яхты.

3. Контролируют настройку яхты по нагрузке на руле.

4. По соотношению угла дрейфа к скорости хода яхты на острых курсах определяют оптимальную скорость хода «прямо на ветер» и находят максимальную скорость хода на полных курсах.

При расчетах аэродинамических сил для паруса в целом вводится понятие средняя аэродинамическая хорда $B_{сax}$, то есть условная хорда прямоугольного паруса, имеющего площадь и размах, эквивалентные исходному парусу. Тогда распределенные аэродинамические силы, возникающие на парусе, условно приводят к равнодействующей R_a , приложенной в центре давления (ЦД). В первом приближении без учета индуктивного перетекания воздушного потока под гиком и отвалом топовой части паруса «под ветер» перемещение равнодействующей аэродинамических сил R_a значительное, это связано с ростом приводного слоя воздушного потока по высоте и стреловидностью паруса (рис. 4).

При движении яхты профиль паруса изменяет свою геометрию в зависимости от набегающего воздушного потока и действий экипажа с такелажем. Особенностью выпукло-вогнутых профилей, к которым относится профиль паруса, является неустойчивое положение ЦД аэродинамических сил. Характер перемещения ЦД на парусе напоминает движение по кривой типа «ложки» в зависимости от кривизны профиля f , ее местоположения на профиле X_f и угла атаки профиля α_n . Так, малые и большие α_n перемещают ЦД к середине профиля, а уменьшение f , X_f профиля способствует перемещению всей «ложки» вперед (рис. 5, 6).

На острых курсах задача яхтсмена, в первую очередь, уменьшить f и перегнать X_f вперед за счет растяжки паруса по рангоуту такелажем. В то же время, оттяжка Канингхема с уменьшением скорости ветра позволяет «круглить» переднюю кромку паруса, т.е. делать парус более «несущим» при постоянных значениях f и X_f . Это относится, главным образом, к яхтам классов «470», Laser.

У системы «стаксель – грот», чтобы уменьшить f стакселя, необходимо наклонить мачту назад, но при этом сдвигаются назад, соответственно, и средняя аэродинамическая хорда грота, и ЦД. Иногда за счет открытия задней шкаторины паруса происходит уменьшение f , т.е. возникает новый, более плоский профиль; это обстоятельство часто применяют на яхтах класса Star.

Комбинацию парусов «стаксель – грот» можно считать одним парусом, т.к. возникает общая циркуляция скорости набегающего воздушного потока вокруг парусов, и можно определить эквивалентную среднюю аэродинамическую хорду $B_{сax}$.

Центровку яхты рекомендуется начинать при слабых ветрах, контролируя разбег центровки через усилия, возникающие на подветренном руле. С увеличением скорости

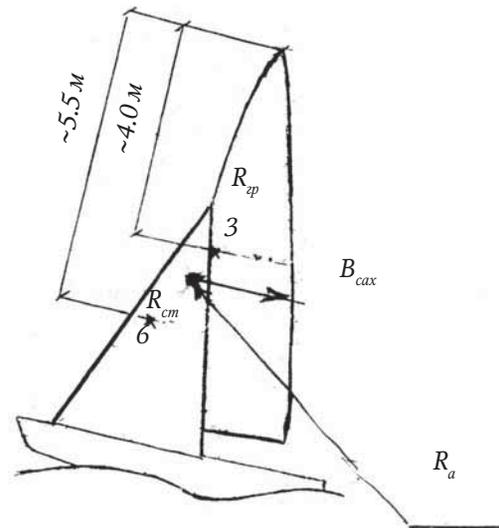
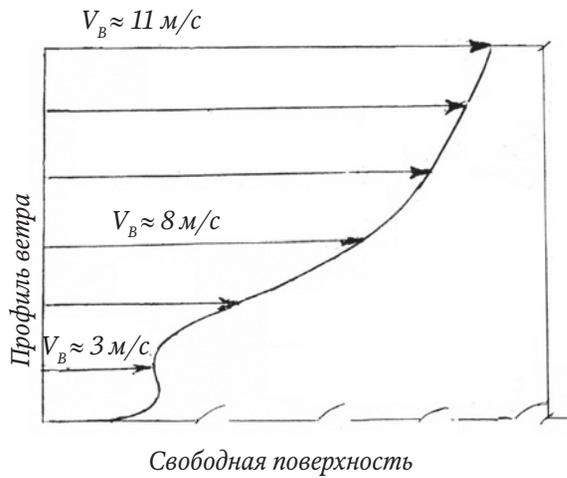


Рис. 4. Влияние профиля ветра на аэродинамическую силу паруса R_a для системы парусов «стаксель – грот». Аэродинамические силы паруса: R_{cm} – стакселя, R_{ep} – грота

ветра смещают ЦТ системы «яхта – экипаж» в корму, при ослаблении ветра – в нос.

При «навстрелном» руле – с отклонением 2.5° у швертботов и до 6° у килевых яхт – подводная часть корпуса дает меньшее сопротивление, что связано с конструкцией руля (руль навесной или часть киля) [5].

яхты возможны в результате следующих действий: смещения ЦД паруса (или его части); сброса нагрузки за счет гибкости топовой части мачты или изменения затяжки задней шкаторины. Швертбот, кроме того, позволяет изменить центр давления гидродинамических сил путем сдвига или подбора шверта при фиксированных положениях ЦТ системы «яхта – экипаж».

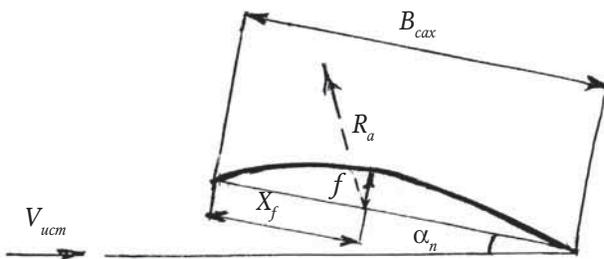


Рис. 5. Текущие координаты профиля паруса, где f – кривизна профиля, x_f – расстояние до данной кривизны, α_n – угол атаки паруса

У килевых яхт с протяженным килем возникает индуктивное перетекание водного потока (подветренная сторона) в зону пониженного давления (навстрелная сторона) плюс возникает концевой вихрь, что в общем ведет к увеличению угла дрейфа.

Килевые яхты выгоднее настраивать на легкое приведение к ветру начиная со средних ветров. При такой настройке в лавировку легче «выкручивать» на ветер.

Таким образом, приведение или уваливание килевой

Заключение

Неравномерное движение яхты в подвижных средах «вода – воздух» требует постоянной динамичной работы экипажа во всех плоскостях координат яхты. Контроль ее центровки осуществляется через контроль положения на воде (крен и дифферент) и через величину нагрузки на руль.

Способность поддерживать скорость яхты с одновременным уменьшением угловых ускорений, возникающих относительно мгновенных осей инерции в ритме смены ветро-волновых условий, характеризует степень мастерства экипажа.

Периоды колебаний волн в прибрежной зоне и собственные колебания яхты, при нелинейном увеличении скорости ветра по высоте в приводном слое атмосферы, когда экипаж находится в более низкоскоростном ветровом поле по отношению к уровню положения средней аэродинамической хорды паруса – все это в итоге предъявляет жесткие требования к яхтсменам по общей и специальной физической подготовке.

Список литературы

1. Фаворин, М. В. Моменты инерции тел. М. : Машиностроение, 1977.
2. Соловьев, А. И. Динамика движения яхты // Сб. науч. трудов НКИ. Николаев, 1980.
3. Елистратов, С. В. К вопросу настройки яхт олимпийских классов (выбор управляющих факторов) // Сб. науч. трудов НКИ. Николаев, 1984.
4. Елистратов, С. В. Электронные тренажеры в парусном спорте // Ученые записки университета им. П. Ф. Лесгафта, № 12. СПб., 2007.
5. Sutcliffe, P.L. Whether the helm? AVCO Systems, Div, Wilmington, 1983.
6. Newman, V. G. The aerodynamics of flexible membranes. Proc. of Congres mechanics. Moncten, 1981.
7. Кошелев, Е. Г. Школа яхтенного капитана. М. : ФИС, 1968.