

› Г. Е. Дроботковский, Ю. А. Ларин,
г. Таганрог



Тестирование парусов

Скорость яхты, а следовательно, и успех в гонке напрямую зависят от качества используемых парусов. Творчество в их создании оставим за изготовителем, спортсмену же надо научиться выбирать именно тот парус, который будет в наибольшей степени соответствовать конкретным условиям для получения наибольшей тяговой силы. На практике почти всегда такая оценка дается спортсменом «на глаз», в соответствии со своим опытом и способностями.

Предлагаемый нами инструментальный метод тестирования парусов был разработан в лаборатории спортивной электроники Таганрогского радиотехнического университета, прошел широкую апробацию в сборной команде страны (в олимпийских классах судов) и дал хорошие практические результаты. Сейчас этот метод применяется и для оценки парусов крейсерских яхт, когда спортсмен, варьируя настройку, достаточно быстро подбирает оптимальный вариант.

Дальнейшая модернизация предлагаемого метода может значительно интенсифицироваться путем применения цифрового фото с компьютерной обработкой результатов.

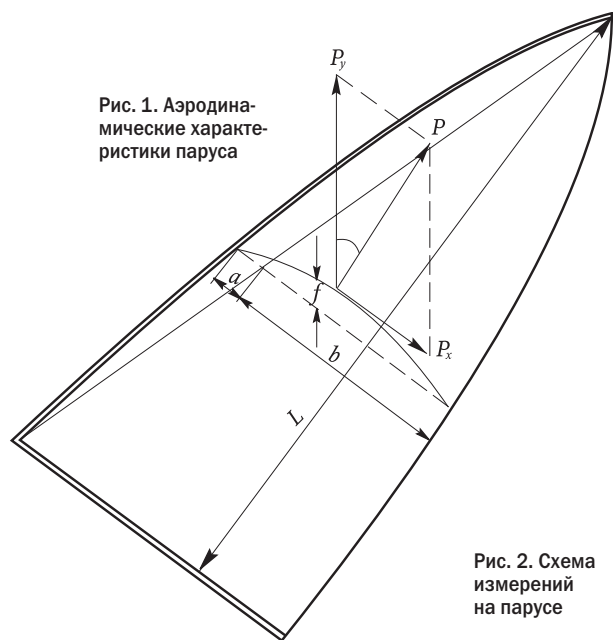


Рис. 1. Аэродинамические характеристики паруса

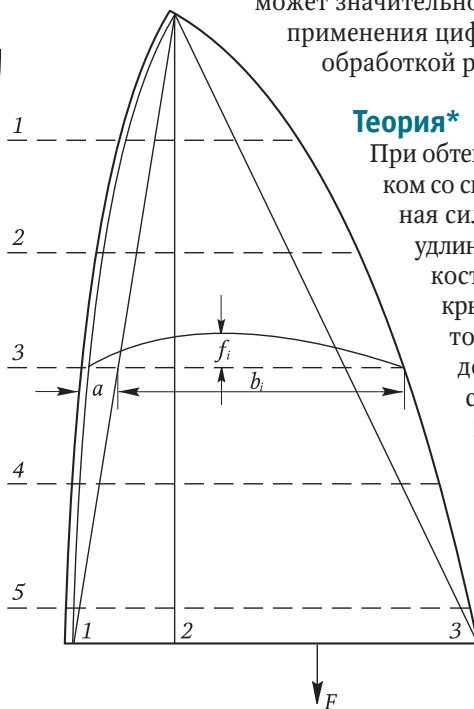


Рис. 2. Схема измерений на парусе

Теория*

При обтекании паруса воздушным потоком со скоростью V_∞ возникает подъемная сила P . Парус является крылом с удлинением L (рис. 1). Проводя плоскости, перпендикулярные размаху крыла через один метр, начиная от топа, получаем профили в каждом сечении. Отрезок прямой, соединяющий две крайние точки профиля, называется хордой l и вычисляется по формуле

* В данном разделе применен математический метод идеализации [2], который практиками парусного спорта для облегчения восприятия материала может быть опущен.

$$l = a + b,$$

где a – прогиб мачты; b – часть хорды, определяемая Правилами класса.

Обозначим через f наибольшее значение глубины (толщины) профиля. Вычисления производим для профиля НЕЖ, математически приближенного к профилю реального паруса. Коэффициент подъемной силы C_y и циркуляция Γ высчитываются [3] по формулам

$$C_y = [(a + b)\sin\alpha + 2f\cos\alpha] \times 1/a + b;$$

$$\Gamma = C_y (a + b) \times V_\infty / 2,$$

где α – угол атаки; V_∞ – скорость воздушного потока (считаем постоянной для всех сечений).

После преобразований, отбрасывая постоянные множители, получаем формулу для вычисления циркуляции воздушного потока в i -м сечении (рис. 2):

$$\Gamma_i = (a_i + b_i)\sin\alpha + 2f_i\cos\alpha. \quad (1)$$

Зная величины циркуляций во всех сечениях паруса, можно вычислить [3] подъемную силу P_y и силу сопротивления P_x (см. рис. 1):

$$P_y = \rho V_\infty \Gamma(z) dz; \quad P_x = \rho V_\infty \Gamma(z) a(z) dz. \quad (2)$$

Преобразуя эти формулы для поточечного разбиения паруса n сечениями и отбрасывая постоянные множители, получаем

$$P_y = \Gamma_n + \Gamma_{n-1} + \dots + \Gamma_1 + \Gamma_0; \quad (3)$$

$$P_x = [\Gamma_n + \Gamma_{n-1} (\Gamma_{n-1} - \Gamma_n) + \Gamma_{n-2} (\Gamma_{n-2} - \Gamma_{n-1}) + \dots + \Gamma_0 (\Gamma_0 + \Gamma_1)] \times 1/100. \quad (4)$$

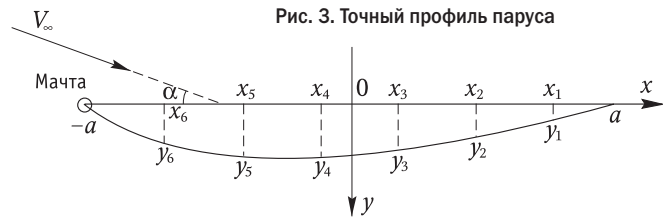


Рис. 3. Точный профиль паруса

Теперь несложно вычислить направление силы тяги паруса (см. рис. 1):

$$\sigma = \arctg P_y/P_x, \quad (5)$$

Величина σ зависит от распределения циркуляций по высоте паруса.

Из теории крыла [3] известно, что минимум индуктивного сопротивления в идеале достигается при распределении циркуляций по эллиптическому закону. Исходя из наибольшего значения величины циркуляции нашего паруса Γ_{\max} , в его нижней части, найдем

$$P_{\text{элл}} = \Gamma_{\max} \times \sum_i \sqrt{1 - \left(\frac{i}{L}\right)^2}. \quad (6)$$

Вычислим величину

$$\xi = (P_y/P_{\text{элл}}) \times 100, \quad (7)$$

показывающую процент отклонения нашего паруса от идеального.

Кренящий момент

$$M = 1 \Gamma_n + 2 \Gamma_{n-1} + \dots + n \Gamma_1, \quad (8)$$

Таблица 1

Характеристики паруса класса «Финн»								
	Номер сечения	1	2	3	4	5	Примечания	
«Мисто»	Натяжение N	2.2	0	-0.5	-0.7	-0.2	Настройка на слабый ветер	
	Профиль f	10.5	20	29	31	25		
	Прогиб мачты a	7.0	8.2	8.2	7.1	4.0	Формула (11)	
	Часть хорды b	76	135	192	248	252		
	Циркуляция Γ_i	48	86.3	122.5	145	134		
	Натяжение N	2.5	0.3	-0.4	-0.2	-0.8		
	Профиль f	8	15	22	27	24		
«North»	Прогиб мачты a	9.0	12.5	12.7	10.5	5.5	Настройка на сильный ветер	
	Часть хорды b	76	135	192	248	252		
	Циркуляция Γ_i	43.9	78	111	138.8	132.6	Формула (11)	
	Коэффициент уплотнения k	1.09	1.1	1.1	1.05	1.01		
	Натяжение N	1.2	-0.2	-0.6	-0.4	-0.4		Настройка на слабый ветер
	Профиль f	12.2	23.8	30.5	29.5	25		
	Прогиб мачты a	4.3	6.1	4.9	1.4	0.5		Формула (11)
Часть хорды b	76	135	192	248	252			
Циркуляция Γ_i	50.2	93	124.3	140.5	134			
Натяжение N	1.2	-0.5	-0.6	-0.4	-0.4			
Профиль f	5.8	14	19.6	19	16.7			
«Victory»	Прогиб мачты a	6.7	10	8.7	3.3	1.2	Настройка на сильный ветер	
	Часть хорды b	76	135	192	248	252		
	Циркуляция Γ_i	39.6	75.7	107	121.3	117.5	Формула (11)	
	Коэффициент уплотнения k	1.28	1.22	1.16	1.15	1.13		
	Натяжение N	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3		Настройка на слабый ветер
	Профиль f	16.5	29	40	44	34		
	Прогиб мачты a	5.0	7.7	8.0	5.8	2.0		Формула (11)
Часть хорды b	76	135	192	248	252			
Циркуляция Γ_i	58.6	103	143.2	169	150.3			
Натяжение N	-0.2	-0.2	-0.5	-0.3	-0.4			
Профиль f	10.5	19	26	29	24			
«Victory»	Прогиб мачты a	8.5	13.6	14	10	4	Настройка на сильный ветер	
	Часть хорды b	76	135	192	248	252		
	Циркуляция Γ_i	48.5	86.2	119	142.2	132.2	Формула (11)	
	Коэффициент уплотнения k	1.21	1.19	1.20	1.19	1.14		
	Натяжение N	0.4	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3		Настройка на слабый ветер
	Профиль f	16.5	29	40	44	34		
	Прогиб мачты a	5.0	7.7	8.0	5.8	2.0		Формула (11)
Часть хорды b	76	135	192	248	252			
Циркуляция Γ_i	58.6	103	143.2	169	150.3			
Натяжение N	-0.2	-0.2	-0.5	-0.3	-0.4			
Профиль f	10.5	19	26	29	24			

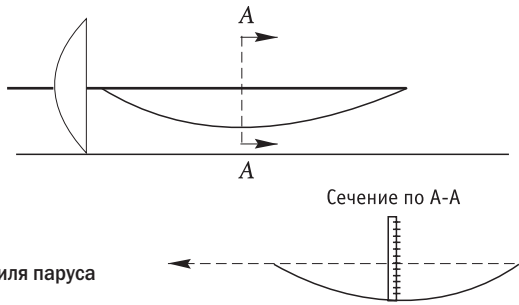


Рис. 4. Способ измерения профиля паруса

где n – расстояние верхнего сечения паруса от поверхности воды, м.

Тестирование паруса проводится в два этапа: при настройке на слабый и на сильный ветер. В каждом сечении имеем два значения циркуляции: $\Gamma^{сл}$ – для слабого и $\Gamma^{сил}$ – для сильного ветра. Назовем величину

$$k = \Gamma_i^{сл} / \Gamma_i^{сил} \quad (9)$$

коэффициентом уплощения паруса в i -м сечении. Эта характеристика позволяет оценить равномерность уплощения паруса за счет прогибов мачты.

Для углубленного тестирования паруса перейдем от профилей НЕЖ к точным профилям, заданным аналитически в виде функции $y = F(x)$ (рис. 3).

Формула для вычисления коэффициента циркуляции [4] имеет вид

$$\Gamma = \int_{-a}^a [F'(x) - \alpha] \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (10)$$

Проводя разбиение интервала интегрирования $(-a, a)$ точками x_1, x_2, \dots, x_n , получаем ординаты профиля y_1, y_2, \dots, y_n (см. рис. 3). Вычисления по (10) приведены в [4]; они довольно сложны и в данной статье не рассматриваются.

Исследование ординат точных профилей паруса в различных сечениях позволяет оценить гладкость поверхности паруса и проследить изменение местоположения наибольших значений профилей от нижних сечений к верхним.

Итак, измерив величины профилей f_i , прогибы мачты a_i и зная геометрию паруса, можем вычислить циркуляции в каждом сечении; тяговые характеристики паруса; процент отличия от идеального; кренящий момент, а также оценить работу системы «мачта–парус».

Методы измерений

На берегу, в защищенном от ветра месте, закрепляем парусный швертбот так, чтобы исследуемый парус располагался горизонтально (рис. 4). На гик укрепляем динамометр силой F (см. рис. 2). От топа к гика протягиваем три шнура с метками через 1 м. Первый шнур идет вдоль мачты и крепится в галсовом углу. На его отметках измеряем величины прогибов мачты a . Второй шнур крепим к гика на расстоянии 1.2 м от мачты. На его отметках специальной линейкой измеряем величины профилей паруса f . Линейка делается из трубки диаметром 13 мм, весом 250 г, подобранным экспериментально, чтобы расправить фалды, появляющиеся под действием силы F динамометра. Профиль паруса измеряется как расстояние от поверхности паруса до визирной прямой, соединяющей кромку задней шкаторины с боком мачты (см. сечение по АА на рис. 4).

Натяжение ткани паруса N измеряем динамометрическим прибором (рис. 5), который ставится на ткань паруса параллельно задней шкаторине под своим весом. Основой прибора является измерительный индикатор, закрепленный на дюралевом уголке. Сила нажима щупа индикатора, при которой происходит начальный сдвиг стрелки, – 130 г;

Рис. 5. Прибор для определения натяжения ткани



подобрана экспериментально. В районе отметок третьего шнура производим по два измерения: вдоль кромки задней шкаторины N_i^* и на расстоянии 25 см в глубь паруса N_i^{**} . Разность $N_i = N_i^{**} - N_i^*$ назовем натяжением ткани. Если $N_i > 0.4$, то задняя шкаторина открыта, если $-0.4 \leq N_i \leq 0.4$, то держит, если $N_i < -0.4$, то закрыта.

Все измерения проводим в два этапа: вначале моделируем настройку паруса для слабого ветра при $F = 30$ кг, затем – настройку паруса для сильного ветра при $F = 45$ кг.

Для измерения ординат точного профиля y_1, y_2, \dots, y_n на исследуемый парус (рис. 6) по отметкам шнуров накладываем цепи параллельно друг другу. На каждой цепи на расстоянии 20 см от кромки задней шкаторины делаем масштабную отметку белой краской, сами цепи окрашиваем в черный цвет. Из района фалового угла производим фотографирование паруса (см. рис. 6) цифровым фотоаппаратом с дальнейшей обработкой информации на компьютере.

Характеристики парусов килевых и крейсерских яхт измеряем методом цифрового фото во время движения яхты под парусами. На исследуемый парус наклеиваем черные полосы параллельно друг другу с масштабными отметками. В фаловом углу закрепляем правильно сориентированный цифровой фотоаппарат; управление – дистанционное. Измерения производятся при ровном ветре скоростью 3–5 м/с, снимаем точные профили при различных вариантах настройки.

Практика расчетов

В качестве примера рассмотрим три паруса класса «Финн»:

Таблица 2

Аэродинамические характеристики парусов класса «Финн»			
	«Мусто»	«North»	«Victory»
1. Ру для слабого ветра	402	408.5	473.8
2. Величина ξ :			
– для слабого ветра	79	83	82
– для сильного ветра	77	81	82
3. Коэффициенты уплощения:			
– в верхнем сечении	1.1	1.28	1.21
– в среднем сечении	1.1	1.16	1.20
– в нижнем сечении	1.01	1.13	1.14
4. Кренящий момент при настройке на сильный ветер	1515	1408	1624
5. Угол направления силы тяги паруса σ	18.5°	17°	17.5°
	18°	17°	17.5°
6. Натяжение ткани:			
– в верхнем сечении	2.5	1.2	-0.2
– в среднем сечении	-0.4	-0.6	-0.5
– в нижнем сечении	-0.8	-0.4	-0.4

Таблица 3

Характеристики грота «Ульман» на мачте «Проктор»						
Номер сечения	1	2	3	4	5	Примечания
Натяжение N	1.6	1.7	1.7	1.5	1.2	Настройка на слабый ветер
Профиль f	15	20	23	24	20	
Прогиб мачты a	6.9	11.7	14.8	13	6.9	
Часть хорды b	72	130	184	230	240	
Циркуляция Γ_i	55	85.8	110.8	127.7	121.6	Формула (11)
Натяжение N	1.4	1.4	1.5	1.3	0.9	Настройка на сильный ветер
Профиль f	10	19	22	22.5	19.5	
Прогиб мачты a	9.5	16	19	15.9	8	
Часть хорды b	72	130	184	230	240	
Циркуляция Γ_i	46.5	85.4	110.4	125.9	121	Формула (11)
Коэффициент уплощения k	1.18	1.01	1.01	1.01	1.01	Формула (9)

Таблица 4

Характеристики паруса фирмы «North» на мачте «Спар»						
Номер сечения	1	2	3	4	5	Примечания
Натяжение N	1.1	1.4	0.8	0.9	0.8	Настройка на слабый ветер
Профиль f	18	27	34	34	28	
Прогиб мачты a	4.0	5.8	6.8	5.5	2.2	
Часть хорды b	72	130	184	230	240	
Циркуляция Γ_i	59.7	97	129	144	135	Формула (11)
Натяжение N	0.5	0.7	0.4	0.5	0.2	Настройка на сильный ветер
Профиль f	13	22	29	27	22	
Прогиб мачты a	7.0	10.5	11.5	9.2	4.0	
Часть хорды b	72	130	184	230	240	
Циркуляция Γ_i	51.3	89.1	121	132	124.3	Формула (11)
Коэффициент уплощения k	1.16	1.09	1.07	1.09	1.08	Формула (9)

- фирмы «Мусто» 1976 г. На нем был выигран чемпионат Европы среди юниоров в 1976 г.;
- фирмы «North» олимпийский 1980 г.;
- «Victory» олимпийский 2000 г. (табл. 1).

Сравнение аэродинамических характеристик приведенных выше парусов выполнено в табл. 2.

В формуле (1) принимаем угол $\alpha = 20^\circ$, тогда

$$\Gamma_i = 0.34(a_i + b_i) + 1.88f_i. \quad (11)$$

Рассмотрим ординаты точного профиля в третьем сечении:

«Мусто» – (2.3; 12.7; 23; 28.1; 27.2; 20.4)

«North» – (8.8; 18.8; 25; 28.7; 28.1; 21.8) – от задней шкаторины к мачте.

При $\alpha = 20^\circ = 0.35$ рад. По формуле (10) вычисляется $\Gamma_{т.пр}$ – циркуляция точного профиля и сравнивается с $\Gamma_{НЕЖ}$.

Для «Мусто» $\Gamma_{т.пр} = 130$; $\Gamma_{НЕЖ} = 122.6$;

$$\frac{\Gamma_{т.пр}}{\Gamma_{НЕЖ}} = \frac{130}{122.6} = 1.06;$$

для «North» $\Gamma_{т.пр} = 154$; $\Gamma_{НЕЖ} = 124.3$;

$$\frac{\Gamma_{т.пр}}{\Gamma_{НЕЖ}} = \frac{154}{124.3} = 1.24.$$

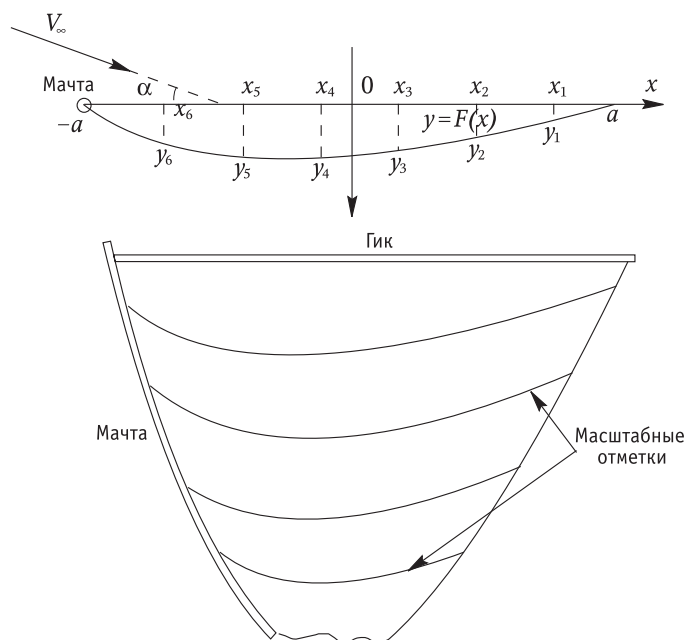
Как видим, парус фирмы «North» имеет более эффективный точный профиль, чем парус фирмы «Мусто».

В классе «470» рассмотрим грот «Ульман» на мачте «Проктор» и «North» на мачте «Спар» (табл. 3, 4).

Как следует из сравнения данных табл. 3 и 4, на «North» можно идти круче, но в открене он труднее. Максимум точного профиля у «North» – 51–32%, у «Ульмана» – 48–49% от мачты к задней шкаторине.

За прошедшие годы паруса стали мощнее, полнее в верх-

Рис. 6. Схема измерения характеристик точного профиля



ней части, максимум профиля смещен от мачты к задней шкаторине, особенно в верхней части, до 55%, что привело к увеличению их тяговых характеристик. Современные мачты стали мягче в нижней части.

Аналогичные сравнения характеристик парусов можно привести и в других классах парусных судов.

