

# Теория плавания под парусами

Чеслав Мархай / Czesław Marchaj

7 марта 2026 г.

## Содержание

<b>Предисловие</b>	<b>2</b>
<b>1 О силах, движении и яхтах</b>	<b>3</b>
1.1 Основные понятия из механики	3
1.1.1 Свойства силы	3
1.1.2 Общие законы движения	4
1.1.3 Сложение и разложение сил и скоростей	8
1.1.4 Условия равновесия	10
1.1.5 Плавучесть	13
1.1.6 Остойчивость	15
1.2 Задачи механики плавания под парусами	22
<b>2 Общие сведения о яхтах</b>	<b>26</b>
2.1 Теоретический чертеж яхты	26
2.2 Эволюция яхты	30
2.3 Формулы классных обмеров	37
2.4 Международные классы гоночных яхт	43
2.4.1 Швертботы	44
2.4.2 Килевые яхты для прибрежных морских районов и внутренних водоемов	53
2.4.3 Килевые яхты открытого моря	56
<b>3 Аэродинамика паруса</b>	<b>61</b>
3.1 Основы аэродинамики паруса	61
3.2 Уравнение Бернулли	62
3.3 Возникновение аэродинамической силы на парусе	65
3.4 Разложение давлений на парусе	68
3.5 Измерение аэродинамической силы паруса	72
3.6 Центр давления аэродинамических сил паруса	81
3.7 Аэродинамическое сопротивление паруса	83
3.8 Условия подобия потоков	93
3.9 Свойства паруса и его работа	98
<b>Словарь терминов</b>	<b>108</b>

## Предисловие

Несколько лет назад литература по парусному спорту пополнилась новой книгой — «Теория плавания под парусами», написанной польским яхтсменом Чеславом Мархаем. Вскоре книга стала известна не только среди яхтсменов Польши; она привлекла внимание зарубежных спортсменов и получила хорошую оценку Международного парусного союза.

Популярность книги объясняется, во-первых, большой потребностью в руководстве, освещающем вопросы парусного спорта с теоретических позиций, и, во-вторых, новизной изложенного в ней материала.

Большинство руководств по парусному спорту, написанных крупными знатоками, основаны на личном опыте или обобщают опыт ведущих яхтсменов. В них даются апробированные практикой советы, как поступать в том или ином случае, но, как правило, без теоретического обоснования. Теория парусного спорта излагается обычно в отдельной главе, оторванно от практики.

В книге Ч. Мархая теория парусного спорта тесно увязана с практикой: ни одно теоретическое положение не оставлено без подкрепления случаем из практики, и наоборот, многие случаи практики рассмотрены и объяснены с чисто теоретических позиций. Книга дает читателю научный фундамент, который позволит ему самостоятельно разобраться во многих сложных вопросах парусного спорта. Автор сумел теоретические основы парусного спорта изложить со строго научных позиций, не прибегая к упрощениям. Читателю достаточно иметь подготовку в объеме техникума или средней школы, чтобы разобраться во всех положениях книги.

Книга иллюстрирована многочисленными примерами и рисунками. Она, несомненно, будет полезна всем любителям парусного спорта, стремящимся пополнить свой теоретические познания и тем самым повысить уровень своего мастерства.

# 1 О силах, движении и яхтах

## 1.1 Основные понятия из механики

Прежде чем перейти к рассмотрению вопросов теории плавания под парусами, Целесообразно припомнить основные сведения из физики и механики. В дальнейшем, это убережет нас от разноречивых, а иногда и ошибочных толкований положений и понятий, на которых построено изложение материала в книге.

### 1.1.1 Свойства силы

Если яхта или какое-нибудь другое тело движется с определенной скоростью, мы всегда можем без труда убедиться, что на него действуют какие-то силы. В природе постоянно проявляются причинно-следственные связи, а всякое движение может возникнуть только как следствие воздействия силы.

Чтобы предвидеть результаты действия сил, необходимо знать основные свойства последних. Из опыта мы знаем о существовании больших и малых сил. Значит, силу можно представить как некую величину, которая может быть измерена. В технике за единицу измерения силы принят килограмм, т. е. сила, с которой земля притягивает эталонную металлическую гирию, хранящуюся в Международной палате мер в Париже. Вес этой гири соответствует весу 1 л (т. е. 1000 см<sup>3</sup>) воды при температуре 4°C.

Вес любого тела — результат притяжения его массы массой земли, другими словами, вес — результат земного притяжения. В механике вес тела обычно принято обозначать силой, приложенной в определенной точке, называемой центром тяжести этого тела. Центр тяжести однородных тел определяется посредством геометрических построений; например, центр тяжести однородного металлического шара совпадает с его геометрическим центром, а центр тяжести правильной призмы или цилиндра лежит на их оси посередине высоты. Определение центра тяжести яхты требует сложных расчетов по способу Симпсона или трапеций<sup>1</sup>.

Знать положение центра тяжести яхты совершенно необходимо для оценки ее остойчивости, одной из важнейших характеристик яхты. Центр тяжести обладает замечательным свойством: тело, подвешенное или покоящееся в этой точке, находится в положении так называемого безразличного равновесия. Такое тело сохраняет любое произвольно приданное ему положение, не проявляя склонности к его изменению; например, шар, изготовленный из совершенно однородного материала, всегда будет сохранять приданное ему положение, так как центр тяжести его всегда будет находиться точно над точкой опоры.

Величина силы не характеризует ее полностью. Результат действия силы зависит не только от величины, но и от направления действия и точки приложения силы, или, иначе, от линии действия силы. Таким образом, любая сила есть прежде всего величина направленная. Например, сила земного притяжения действует по вертикали, т.е. тело падает перпендикулярно поверхности спокойной воды, а линия действия силы проходит через центр тяжести тела.

---

<sup>1</sup>прим. ред.: в наше время это, конечно же, не так, см. [https://en.wikipedia.org/wiki/Simpson%27s\\_rules\\_\(ship\\_stability\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Simpson%27s_rules_(ship_stability))

В механике принято обозначать величину и направление силы векторами — отрезками прямой линии с тремя характеристиками: величиной, направлением действия и линией действия. Для практических целей полезно строить графики, наглядно показывающие действие сил и облегчающие понимание связи между действием сил и поведением тел, например яхты, на которые они действуют (рис. 1). Кроме векторов силы, применяются векторы скорости и другие, также имеющие направление в пространстве и величину.



Рис. 1: Действие сил на тело

Результат действия сил может быть многообразным: например, находящееся в покое тело можно привести в движение, которое будет равномерным или иметь переменную скорость. Движущееся тело в зависимости от направления действия силы может изменить скорость и направление движения.

В природе каждое движущееся тело находится под действием по крайней мере двух сил. Лишь в лабораторных условиях удастся получить движение тела под действием только одной силы тяжести — это падение тела под действием собственного веса в вакуумном сосуде. Таких условий свободного падения тел в природе не бывает. В практике движение тел, например яхты, происходит при одновременном действии нескольких сил, и вся трудность механики плавания под парусами состоит в выявлении и рассмотрении результатов действия всех этих сил. Однако, установление связи между силами и движением иногда бывает трудным делом. Ведь мы всегда имеем дело с суммарным результатом действия нескольких сил, а надо знать, как действует каждая сила в отдельности. Так, например, давно было известно существование сил трения, но связь между этими силами, смоченной поверхностью корпуса яхты и скоростью хода была установлена относительно недавно. Еще сегодня многие парусники-гонщики не имеют ясного представления о том, насколько сложно, казалось бы простое, движение яхты и как много различных переменных сил вызывают это движение.

### 1.1.2 Общие законы движения

Элементарная механика основывает свои выводы на основных четырех законах, впервые сформулированных Ньютоном. Для рассмотрения интересующего нас явления — движения яхты и определения условия ее равновесия достаточно знать первый и второй законы Ньютона.

Из первого закона Ньютона, иногда называемого законом инерции, известно, что любое тело, на которое действуют взаимно уравновешивающиеся силы, находится в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения. Простейший пример такого состояния — тело, на которое одновременно действуют две силы, равные по величине, но противоположные по направлению. Очевидно, что, если на тело Действуют четыре силы, попарно равные по величине, но также попарно направленные в противоположные стороны, тело будет находиться в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения.

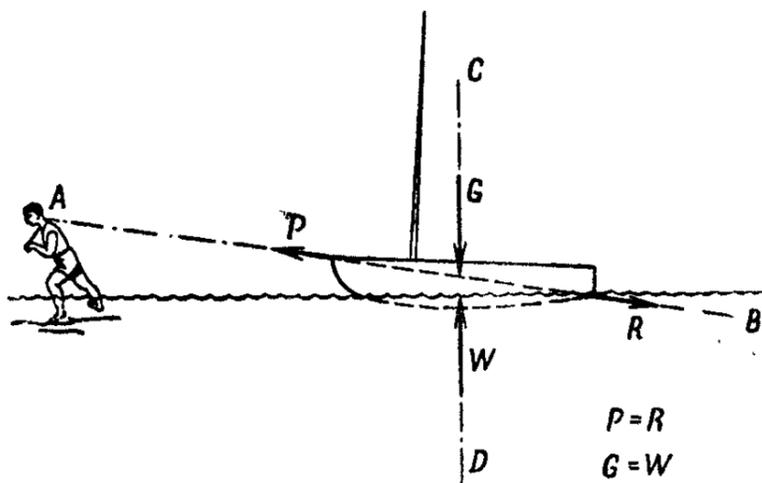


Рис. 2: Буксирование яхты

Теперь рассмотрим пример буксирования яхты (рис. 2). На первый взгляд кажется, что при движении яхты действует только сила  $P$ , приложенная к буксирному концу. Однако одновременно с началом движения немедленно начинает действовать сила сопротивления воды  $R$ , которую требуется преодолевать. При равномерном движении яхты силы  $P$  и  $R$  равны по величине и противоположны по направлению. Если эти силы не равны друг другу, движение яхты или замедляется или ускоряется, в зависимости от того, какая из этих двух сил больше.

Путь, пройденный телом при равномерном движении, пропорционален времени, т.е.,

$$S = v \cdot t$$

где:  $S$  — пройденный путь, м,  $v$  — скорость движения, м/сек,  $t$  — время, сек.

На рис. 3 показан график равномерного движения, возможного для яхты при ровном, установившемся ветре и определенном курсе.

На рис. 2 на яхту, кроме сил  $P$  и  $R$ , действуют еще две силы, расположенные по прямой  $DC$ . Одна из них — сила тяжести яхты  $C$ , другая — сила плавучести  $W$  (сила давления воды на подводную часть корпуса яхты, равная весу вытесняемой яхтой воды). Эти две силы равны и прямо противоположны по направлению. Они постоянно действуют, когда яхта находится на воде, но, уравновешивая друг друга, не могут вызвать движения яхты. Вот еще один пример проявления закона инерции.

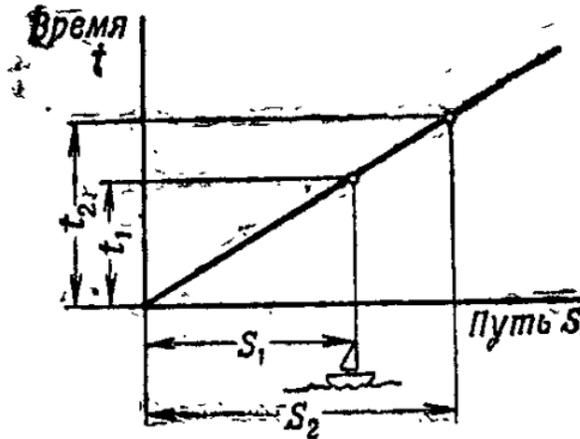


Рис. 3: Равномерное движение яхты

Второй закон Ньютона объясняет поведение тела под действием системы неуравновешенных сил. Лучше всего понять этот закон можно на примере действия определенной силы на тело, находящееся в покое. Начинаем тянуть за буксирный трос с силой  $P$ ; яхта движется по прямой с постепенно возрастающей скоростью от нуля до какой-то определенной величины. В это время движение яхты будет прямолинейно-ускоренным.

Когда сила тяги буксира  $P$  равна силе сопротивления воды движению корпуса яхты  $R$ , скорость яхты становится постоянной. В нашем примере ускорение движения в первую очередь зависит от величины силы  $P$ : чем она больше, тем больше и ускорение. Кроме того, легко заметить, что одна и та же сила, действуя поочередно на различные неодинаковые тела, сообщает им разные ускорения. Следовательно, значение ускорения зависит, с одной стороны, от величины действующей силы и, с другой, от свойства тела, называемого массой. Таким образом, масса тела характеризует его способность сопротивляться действию сил.

Масса тела всегда пропорциональна его весу, но это разные физические понятия. Вес выражает направленную вниз силу, с которой земля притягивает массу тела. Вес зависит от величины земного притяжения, меняющегося в разных точках земного шара. Одно и то же тело, взвешенное на полюсе и на экваторе, имеет неодинаковый вес, в то время как масса этого тела осталась неизменной. Отсюда можно сделать вывод, что масса является собственным неизменным свойством тела, не имеющим направленности и не поддающимся графическому выражению.

Второй закон Ньютона гласит: внешняя сила, приложенная к телу с массой  $m$ , сообщает ему ускорение в направлении действия силы. Ускорение при этом прямо пропорционально величине силы и обратно пропорционально массе тела. Отсюда:

$$a = \frac{P}{m},$$

где  $a$  — ускорение,  $P$  — действующая сила,  $m$  — масса тела, или  $P = m \cdot a$ .

Второй закон Ньютона указывает, что ускорение есть непрременный результат действия неуравновешенной системы внешних сил. Там, где возникает ускорение,

всегда действуют внешние неуравновешенные силы, и наоборот, когда действуют такие силы, всегда возникает ускорение движения.

Если пройденный путь при равномерном движении пропорционален времени этого движения, то при равномерно-ускоренном движении он уже пропорционален времени, взятому во второй степени:

$$S = a \cdot t^2$$

где:  $a$  — ускорение, м/сек,  $t$  — время, сек.

При неровном, порывистом ветре возникающие на парусе силы тяги постоянно меняются, в результате чего меняется и скорость хода. В соответствии со вторым законом Ньютона изменение скорости будет зависеть от массы яхты.

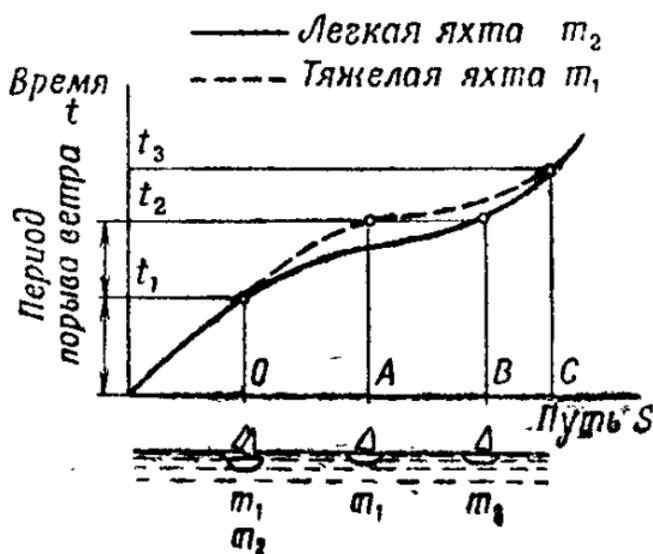


Рис. 4: Движение двух яхт

Представим графически движение двух яхт с разной массой при кратковременном порыве ветра (рис. 4). Предположим, что две яхты с массами  $m_1$  и  $m_2$  перед шквалом находились в точке  $O$  и двигались с равномерной скоростью. Масса  $m_1$  больше массы  $m_2$ . При порыве ветра в промежутке времени  $t_1 - t_2$ , сила тяги на парусах обеих яхт увеличилась одинаково и стала равной  $P$ . Из предыдущей формулы найдем ускорение первой яхты  $a_1 = \frac{P}{m_1}$  и ускорение второй яхты  $a_2 = \frac{P}{m_2}$ . Поскольку  $m_1 > m_2$ ,  $a_1 < a_2$ , т.е. более легкая яхта при порывах ветра получит большее ускорение, чем тяжелая.

Следовательно, за это время она пройдет дальше, и ее путь будет равен отрезку  $OB$ .

В момент окончания порыва ветра легкая яхта опередит тяжелую на отрезок  $AB$ . Последняя будет медленнее разгоняться, но, благодаря большей инерции, после прекращения ветра дольше сохранит свою скорость, чем легкая яхта. Теоретически, в положении  $B$ , обе яхты должны поравняться.

Произведение силы на время действия порыва ветра ( $P \cdot t$ ) называется импульсом силы, а произведение массы на скорость ( $m \cdot v$ ) — количеством движения.

Второй закон Ньютона может быть выражен и иначе: импульс силы равен приращению количества движения, или  $P \cdot t = m \cdot \Delta v$ , где  $\Delta v$  — приращение скорости яхты в результате порыва ветра. Количество движения тяжелой яхты будет:  $m_1 \cdot \Delta v_1 = P \cdot t$ , а количество движения легкой яхты —  $m_2 \cdot \Delta v_2 = P \cdot t$ . Следовательно,  $m_1 \cdot \Delta v_1 = m_2 \cdot \Delta v_2$ .

Таким образом, прирост скоростей будет обратно пропорционален массам этих двух яхт:  $\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} = \frac{m_2}{m_1}$ .

Парусникам практически отлично известна инерция яхт, которой они пользуются при подходе к месту швартовки с убранными парусами.

Понятие «инерция яхты» на основании второго закона Ньютона можно заменить понятием «количество движения» яхты. Количество движения яхты  $m \cdot v$  должно быть затрачено на преодоление сил трения корпуса о воду  $R$  (сопротивление воды), действующих определенное время; следовательно:  $m \cdot v = R \cdot t$ .

Чем больше масса яхты, тем длиннее путь, который она, идя по инерции, должна пройти, чтобы остановиться.

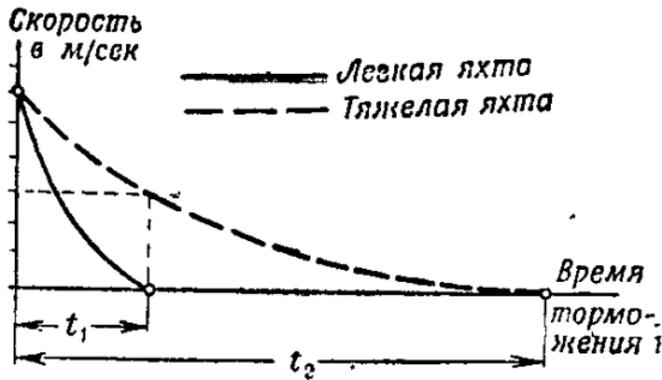


Рис. 5: Торможение двух яхт

На рис. 5 дан график торможения двух одинаково вооруженных яхт, входящих в порт с одной и той же скоростью; одна яхта — швертбот, другая — килевая. Если отношение масс этих яхт будет равно 1:8, то и время потери хода (время торможения) тяжелой яхтой будет в восемь раз больше, чем у швертбота. Тяжелые яхты медленнее берут разбег, но и медленнее теряют скорость.

На волне килевые яхты, как более тяжелые, ведут себя спокойнее, поскольку они менее чувствительны к действию волн. Понятно, что техника управления яхтой в тяжелых и в легких условиях волны и ветра не должна быть одинаковой. Подробнее об этом сказано в следующих главах.

### 1.1.3 Сложение и разложение сил и скоростей

Из второго закона Ньютона известно, что каждая действующая на тело сила сообщает ему соответствующее ускорение, независимо от того, какие еще силы действуют на это тело. Находясь под действием нескольких сил одновременно, тело может получить несколько ускорений, но наблюдатель увидит только одно, являющееся результирующим движением. Представим себе яхту, буксируемую двумя тросами,

составляющими какой-то угол с диаметральной плоскостью яхты (рис. 6). Допустим, что силы натяжения обоих тросов одинаковы и равны  $P$ . Известно, что яхта под действием этих сил будет двигаться в таком направлении, будто вместо двух сил  $P$ , действующих в направлении  $AC$  и  $BD$ , действует одна результирующая сила  $W$ . Величина и направление результирующей двух сил, приложенных в одной точке и имеющих разные направления, определяются как диагональ параллелограмма, построенного на известных силах. Этот способ сложения или разложения сил очень полезен, так как облегчает анализ их взаимодействия.

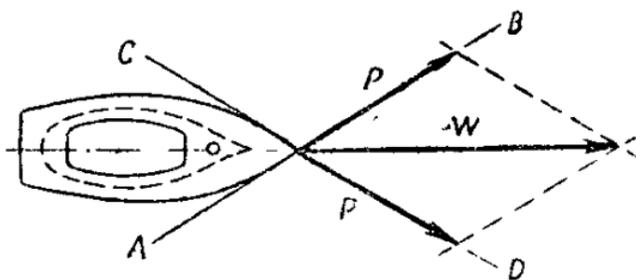


Рис. 6: Сложение сил

При разложении силы ее вектор рассматривается как диагональ параллелограмма, стороны которого направлены по линиям действия двух слагающих сил. Например, аэродинамическая сила тяги паруса раскладывается по оси симметрии яхты и перпендикулярно ему. Очевидно, силу  $P$  и любую силу можно разложить на две, действующие и в других направлениях, например  $OA$  и  $OB$  (рис. 7).

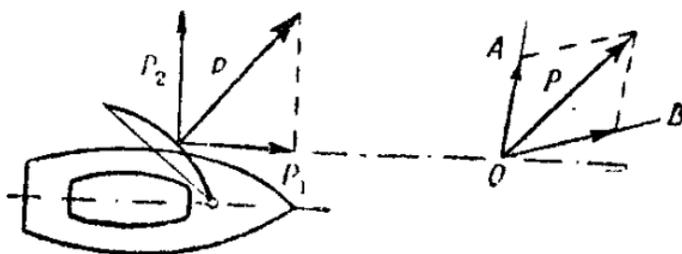


Рис. 7: Разложение сил

Скорости яхт, подобно силам, также могут быть изображены графически в виде векторов, которые можно складывать и раскладывать по правилу параллелограмма.

Представим себе яхту (рис. 8, 1), идущую под действием ветра. На парусе со скоростью  $v_1$ , на знак, который она должна обогнуть правым бортом. Одновременно яхта движется по течению реки, скорость которого  $v_n$ . Действительная скорость яхты определится как результат сложения этих двух скоростей  $v_w$ .

Такие случаи часто бывают на практике. Результирующую скорость  $v_w$  можно разложить на два направления: в направлении цели движения и перпендикулярно

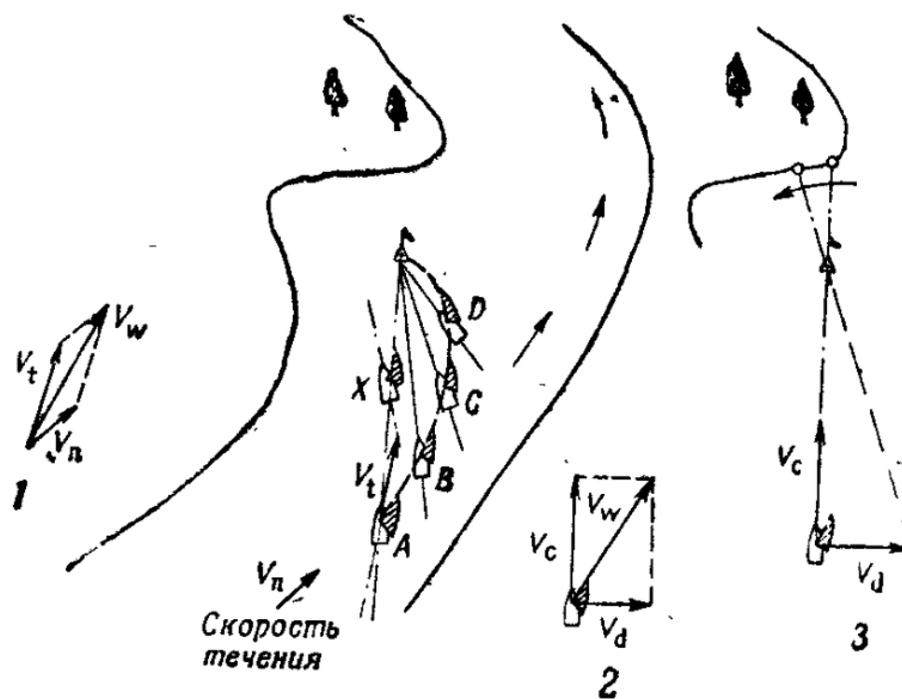


Рис. 8: Курсы яхт при дрейфе

ему. Яхта, двигаясь к цели со скоростью  $v_c$ , одновременно будет дрейфовать в сторону от нее со скоростью  $v_d$  (рис. 8, 2). Если неопытный рулевой будет держать курс прямо на цель, т.е. постоянно держать цель на оси яхты, то путь ее будет  $ABCD$ . Такому рулевому у знака «не хватит высоты», и он потеряет время на контргалс.

Косвенным путем скорость дрейфа можно контролировать, наблюдая за движением поворотного буя на фоне горизонта (рис. 8, 3). Надо держать такой курс, чтобы буй оставался на одном и том же месте на фоне горизонта: при этом путь яхты к бую будет кратчайшим и наиболее выгодным. Неправильный учет дрейфа может поставить рулевого в очень невыгодное и опасное положение у знака при перемене галса, ведущее к нарушению гоночных правил.

стр. 15

#### 1.1.4 Условия равновесия

Представим себе яхту, стоящую у причала без парусов в штилевую погоду (рис. 9, 1). По законам механики яхта находится в равновесии, если ее вес  $G$  уравновешен давлением воды  $W$  на подводную часть корпуса и обе эти силы действуют по одной вертикали, но в противоположных направлениях. Другими словами, сумма проекций сил, действующих по оси  $y - y$ , должна быть равной нулю ( $\sum P_y = 0$ ). Это самый простой случай равновесия системы сил, действующих на яхту. На самом деле приходится сталкиваться с гораздо более сложной системой пространственных сил.

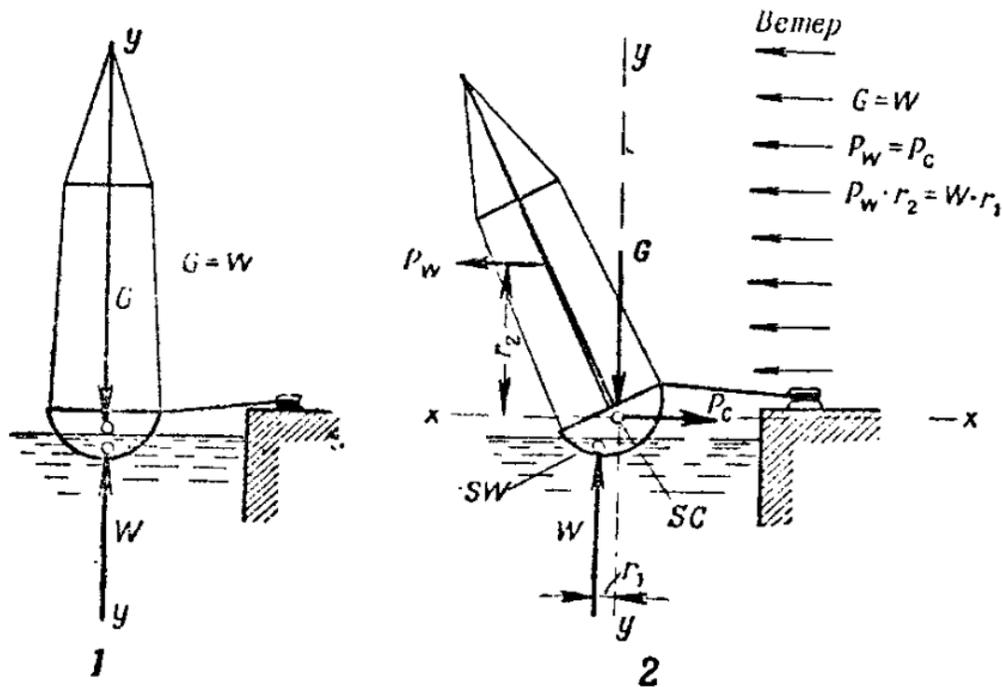


Рис. 9: Яхты у причала

Теперь представим себе ошвартованную яхту без парусов под действием сильного ветра (рис. 9, 2). Под действием ветра  $P_w$ , на рангоут и такелаж яхта наклонится и начнет дрейфовать под ветер. Силе  $P_w$ , вызывающей дрейф, противодействует сила натяжения швартовов  $P_c$ . Кроме того, на яхту действуют: сила тяжести  $G$ , проходящая через центр тяжести яхты, и сила гидростатического давления  $W$ , проходящая через точку, называемую центром водоизмещения. Для упрощения рассуждений допустим, что все эти силы лежат в одной и той же поперечной плоскости шпангоутов.

стр. 16

Через центр тяжести яхты  $SC$  проведем координатные оси  $x-y$ . Чтобы сохранилось равновесие яхты под действием указанных сил, необходимо выполнение следующих трех условий классической механики:

1. сумма проекций сил на ось  $x-x$  должна быть равна нулю;
2. сумма проекций сил на ось  $y-y$  должна быть равна нулю;
3. сумма моментов сил относительно центра тяжести  $SC$  должна быть равна нулю, или иначе:

$$\text{а) } \Sigma P_x = 0; \quad \text{б) } \Sigma P_y = 0; \quad \text{в) } \Sigma M = 0.$$

Момент силы относительно центра тяжести равен произведению силы на плечо, взятое по центру тяжести  $O$  (рис. 10, 1). Плечо силы  $r$  измеряется от центра тяжести перпендикулярно направлению действия силы. Условно примем, что момент

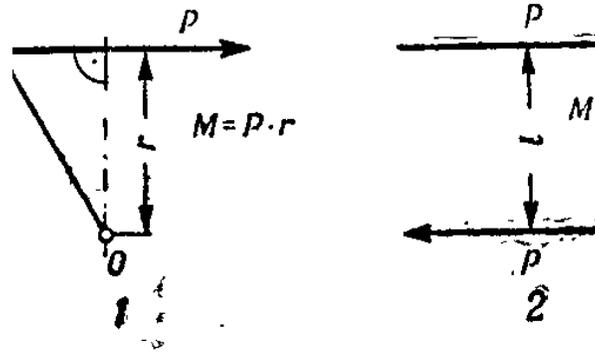


Рис. 10

Рис. 10: Момент силы

обозначается знаком «плюс» (положительный момент) — при вращении тела в направлении движения часовой стрелки и знаком «минус» — при вращении против часовой стрелки (отрицательный момент).

Кроме понятия момента силы, в механике встречается еще понятие момента пары сил: это произведение силы  $P$  на плечо  $l$  между этими силами (рис. 10, 2). Действие момента пары сил подобно действию момента силы, т. е. оно стремится сообщить телу вращательное движение. Момент выражается обычно в кГм, так как величина силы выражается в кГ, а плечо — в м. Возвращаясь к нашему примеру на рис. 9, можем заметить, что проекция силы  $P_w$  на ось  $x-x$  равна силе  $P_c$ , но направлена в противоположную сторону:

$$P_c - P_w = 0.$$

Следовательно, первое условие равновесия выполнено. Проекция силы  $W$  на ось  $y-y$  равна силе  $G$  и противоположна по направлению: отсюда

$$W - G = 0.$$

Относительно центра тяжести силы  $G$  и  $P_c$  не дают никакого момента, поскольку проходят через начало координат и не имеют плеча, которое в данном случае равно нулю. Для равновесия яхты теперь необходимо соблюдение третьего условия — сумма моментов сил  $W$  и  $P_w$  должна быть равна нулю, т. е.  $W \cdot r_1 - P_w \cdot r_2 = 0$ .

Момент  $W \cdot r_1$  будем называть в теории парусного плавания восстанавливающим моментом  $M_p$ . Если этот момент достаточно велик, чтобы уравновесить момент  $P_w \cdot r_2$  (кренящий момент), то яхта, находясь под некоторым углом крена, будет сохранять равновесие. Если сила ветра чрезмерно велика, восстанавливающий момент может оказаться недостаточным и яхта может перевернуться, что и бывает с швертботами. Такие случаи чаще происходят, если порыв ветра направлен на яхту в плоскости шпангоутов. Порывистый и сильный ветер менее опасен, если действует на яхту в плоскости симметрии корпуса, т. е. в плоскости наибольшей устойчивости яхты.

Подводя итоги всему сказанному о силах, можно сделать следующий вывод: результат действия сил на яхту может проявиться как движение или как состояние равновесия (уравновешенного крена). Действующие на яхту внешние силы могут также вызывать внутренние напряжения в материале, из которого построена яхта.

Вопросами прочности конструкции, сопротивляемости яхты действию сил занимаются конструкторы-судостроители. В наших дальнейших рассуждениях мы будем заниматься прежде всего вопросами движения и равновесия яхты, так как они имеют решающее значение в соревнованиях парусных судов.

### 1.1.5 Плаву́честь

Плаву́честь — одна из основных характеристик яхты. Плаву́честь — это способность яхты держаться на воде при погружении корпуса (осадке  $T$ ) до уровня теоретической ватерлинии. Это — следствие давления воды на погруженную часть корпуса яхты, действующего перпендикулярно поверхности корпуса. С глубиной погружения давление воды увеличивается (рис. 11).

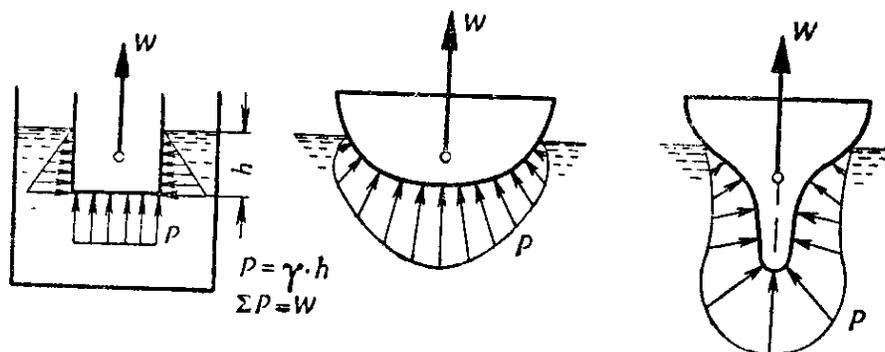


Рис. 11

Рис. 11: Гидростатическое давление

В результате суммарного действия давления частиц воды на всю погруженную часть корпуса образуется равнодействующая сила гидростатического давления  $W$ . Она приложена в центре тяжести вытесненной корпусом воды, называемом центром величины, и направлена вертикально вверх, т. е. в сторону, противоположную действию силы веса яхты ( $G$ ). Законом Архимеда установлено, что вес плавающего тела равен весу вытесненной им воды. Но объем вытесненной телом воды также равен объему погруженной части тела и, следовательно:

$$G = W = \gamma V,$$

где:  $\gamma$  — удельный вес воды,  $\text{кГ/м}^3$ ,  
 $V$  — объем погруженной части корпуса яхты,  $\text{м}^3$ ,  
 $W$  — гидростатическое давление,  $\text{кГ}$ .

Объем  $V$  погруженной части корпуса яхты в известной степени является мерой плаву́честь и называется водоизмещением. Объем надводной части корпуса, находящейся над конструктивной ватерлинией, называется запасным водоизмещением.

От величины запасного водоизмещения сильно зависит способность яхты хорошо держаться на волне и ее остойчивость. Важное значение имеет распределение запасного водоизмещения между носовой и кормовой частями корпуса: яхта с низкими надводными бортами легко заливаема волнами. Высоту надводного борта устанавливают в зависимости от условий акватории, где будет плавать яхта.

Обычно для швертботов и небольших яхт высота надводного борта  $F$  берется 0,3–0,4 м, а для более крупных морских яхт 0,7–1,2 м.

У неподвижной яхты вес  $G$  всегда уравновешен гидростатическим давлением  $W$ . На ходу же возникают дополнительно гидродинамические силы, вследствие чего меняется положение ватерлинии, предусмотренной в проекте яхты.

рез определенный промежуток, например 1 м. По этс

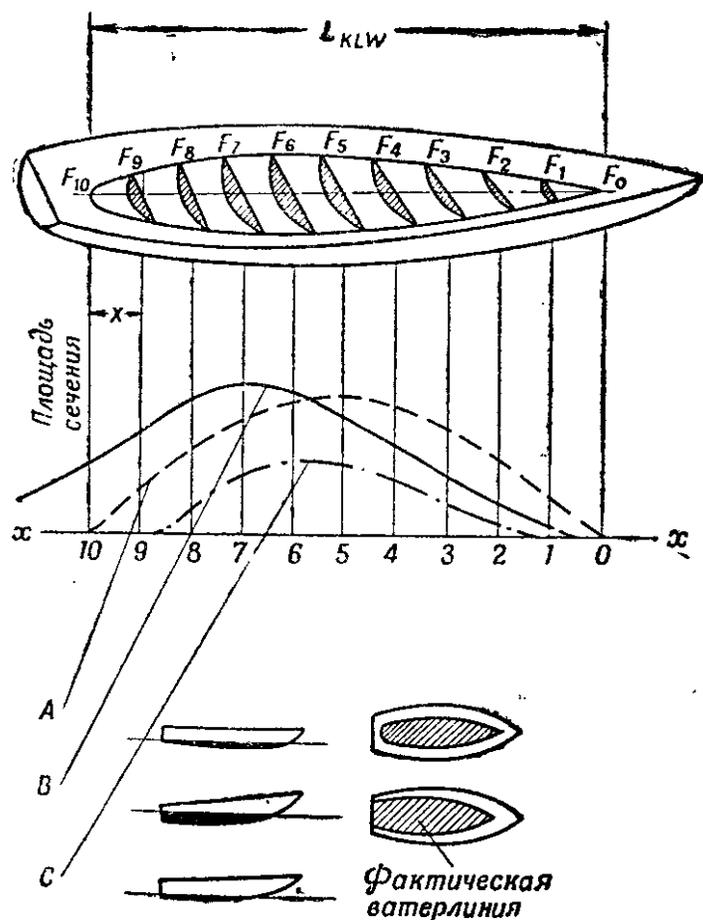


Рис. 12: Строевая по шпангоутам

На теоретических чертежах часто дается кривая сечений корпуса яхты в плоскости шпангоутов, взятых через определенный промежуток, например 1 м. По этой кривой можно составить представление о распределении водоизмещения яхты по длине корпуса. На рис. 12 показаны сечения подводной части корпуса от  $F_0$  до  $F_{10}$ . Точки поперечных сечений корпуса переносятся на горизонтальную ось  $x-x$ , после чего проекция ватерлинии будет разбита на десять равных частей. Из полу-

ченных на проекции ватерлинии точек восстанавливаем перпендикуляры, а на них в условном масштабе соответственно откладываем величину половин поверхности погруженной части корпуса, вычисленных по шпангоутным сечениям.

Соединив линией полученные на перпендикулярах точки, получим кривую поверхности сечений по шпангоутам —  $A$ , так называемую строевую по шпангоутам. Площадь между полученной кривой и осью  $x-x$  представляет собой водоизмещение яхты в определенном, выбранном нами, масштабе. Строевая по шпангоутам  $A$  служит для нахождения центра величины  $S$ .

Характер строевой по шпангоутам будет меняться в зависимости от осадки яхты: например, если увеличится осадка на корму, то соответственно уменьшится осадка на нос яхты (см. кривую  $B$ ). При этом изменится и положение центра величины  $S$ , что, в свою очередь, повлияет на продольную остойчивость яхты. Когда яхта идет с большой скоростью, вследствие действия гидродинамических сил ее осадка заметно уменьшается и строевая по шпангоутам может принять вид, указанный на кривой  $C$ .

На небольших скоростях у яхт наблюдается несколько большее углубление кормы сравнительно с носом. На больших скоростях хода гидродинамические силы растут столь быстро, что при благоприятной форме корпуса яхты могут полностью уравновесить вес яхты. Водоизмещение такого корпуса при этом может уменьшиться почти до нуля, и яхта войдет в состояние глиссирования, т. е. скольжения по поверхности воды.

Итак, плавучесть яхты зависит не только от гидростатического, но и от гидродинамического давлений. Теперь в проектировании яхт учитываются новые факторы, которые прежде не принимались в расчет. Классический закон Архимеда, закон гидростатического давления, уже не может полностью объяснить явления, происходящие при плавании с большими скоростями. Особенно это стало ясным во время опытов со скоростными моторными глиссерами — водолетами. В связи с этим в проектировании и строительстве яхт, особенно небольшого размера, все больше видно стремление использовать прежде всего гидродинамические силы. Новое направление расширяет возможности достижения высоких скоростей, немислимых для яхт, при проектировании которых учитывались только гидростатические силы.

### 1.1.6 Остойчивость

Остойчивость — одна из самых важных характеристик яхты. Остойчивостью называется способность яхты сохранять на воде равновесие под действием внешних сил — ветра и волны.

Из физики известны три рода равновесия: устойчивое, неустойчивое и безразличное. Для безопасности плавания яхты должны обладать устойчивым равновесием. Устойчивое равновесие характеризуется стремлением тела сохранить свое начальное положение вопреки действию внешних сил.

Равновесие яхты может быть нарушено в трех возможных плоскостях: 1) в поперечной, т. е. в плоскости шпангоутов (рис. 13, 1); 2) в плоскости симметрии (рис. 13, 2) и 3) в горизонтальной плоскости движения яхты (рис. 13, 3). В соответствии с этим обычно говорят об остойчивости яхты поперечной, или продольной, или в направлении движения.

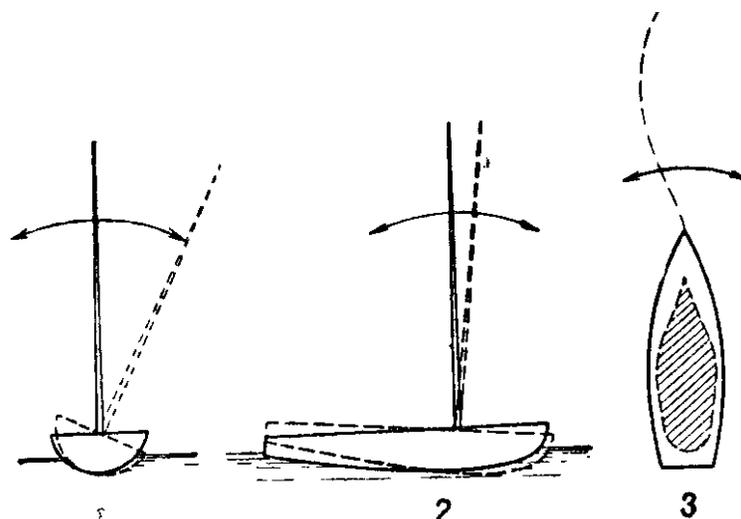


Рис. 13: Плоскости устойчивости яхты

Для безопасности плавания наибольшее значение имеет поперечная устойчивость. Она заметно влияет на основные гоночные качества яхты — ее скорость и способность идти круто на ветер.

Устойчивость зависит от: 1) формы корпуса, 2) взаимного положения центра тяжести и центра величины, 3) степени волнения воды, 4) характера действующих на паруса аэродинамических сил.

стр. 22

**Поперечная устойчивость (устойчивость формы)** Представим себе, что в результате давления ветра на паруса (рис. 14) на швертботе возникает кренящий момент  $M$ . В положении 1 кренящему моменту  $M$  не противостоит никакой другой уравнивающий момент; швертбот, очевидно, не сможет сохранить вертикальное положение и начнет наклоняться в плоскости шпангоутов, вращаясь вокруг центра водоизмещения  $SW$ . Крену будет противодействовать возникающий при этом восстанавливающий момент  $M_p$  (рис. 14, 2). Когда швертбот наклонится на угол  $\varphi$ , центр величины  $SW$  переместится в направлении крена, так как соответственно изменится форма погруженной части корпуса. Центр величины всегда лежит в центре тяжести плоскости, ограниченной новой ватерлинией.

Восстанавливающий момент  $M_p$  есть результат действия пары сил  $W$  и  $G$ , удаленных друг от друга на величину плеча  $l$ . Момент  $M_p$  можно определить по формуле:

$$M_p = W \cdot l = G \cdot l.$$

Величина момента зависит от величины гидростатического давления  $W$ , равного весу яхты  $G$ , и от величины плеча пары сил  $l$ . Будем считать  $M_p$  положительным, когда его действие направлено против кренящего момента  $M$ .

стр. 23

Если кренящий момент  $M$  действует постоянно, яхта будет крениться до тех пор, пока оба момента  $M$  и  $M_p$  не станут равными: тогда крен прекратится и яхта будет находиться в положении равновесия и плыть с креном под углом  $\varphi$ . С увеличением момента  $M$  крен будет увеличиваться, и, пройдя через положения 3, 4 и 5 (рис. 14), яхта, наконец, опрокинется.

W. Крену будет противодействовать возникающий п

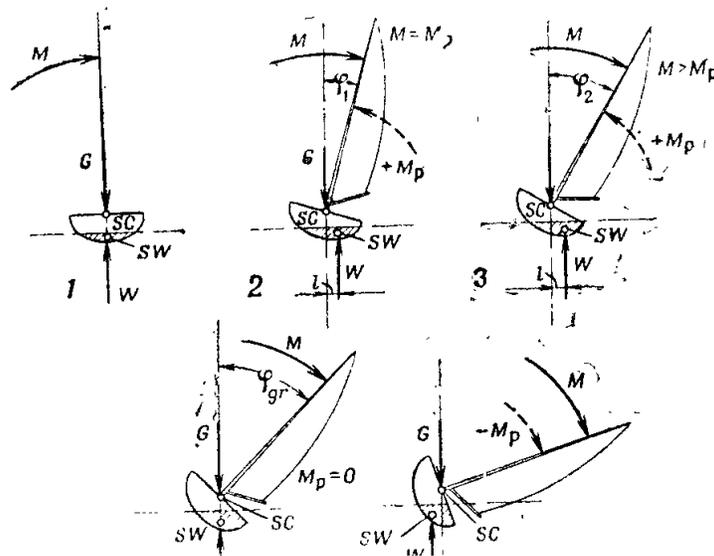


Рис. 14: Крен швертбота

В положении 4 силы  $W$  и  $G$  действуют по одной вертикали и не образуют момента, поскольку плечо  $l$  равно нулю: яхта находится в неустойчивом равновесии. Теперь, если крен увеличивается, действие пары сил становится отрицательным, совпадающим с действием кренящего момента. Таким образом, значение восстанавливающего момента  $M_p$  в зависимости от угла крена может быть положительным и отрицательным.

Наглядно это можно представить в виде графика кривой остойчивости (рис. 15).

На оси ординат откладываем восстанавливающий момент  $M_p$ , а на оси абсцисс — угол крена  $\varphi$ . С ростом угла крена увеличивается и восстанавливающий момент, достигая своего максимального значения  $M_{p \text{ макс}}$  при угле крена  $\varphi_{\text{макс}}$ . В этом положении плечо  $l$  пары сил  $G$  и  $W$  имеет наибольшую величину.

Отрезок кривой остойчивости  $OA$  характеризует, таким образом, устойчивое равновесие яхты, что можно пояснить следующим примером. Предположим, что под действием кренящего момента  $M_1$  яхта накренилась на угол  $\varphi_1$  и наступило равновесие, так как кренящий и восстанавливающий моменты стали равны друг другу (см. точку  $D$  на кривой рис. 15). Из рис. 16 видно, что

$$M_1 = P \cdot h.$$

Угол крена  $\varphi_1$  будет постоянным при  $M_1 = M_{p1}$ , а следовательно, и  $P \cdot h = G \cdot l$ .

Если сила давления ветра на парус возрастет на  $\Delta P$ , то соответственно увеличится кренящий момент на  $\Delta M$  (см. рис. 15). Яхта накренится на угол  $\varphi_2$ , при котором

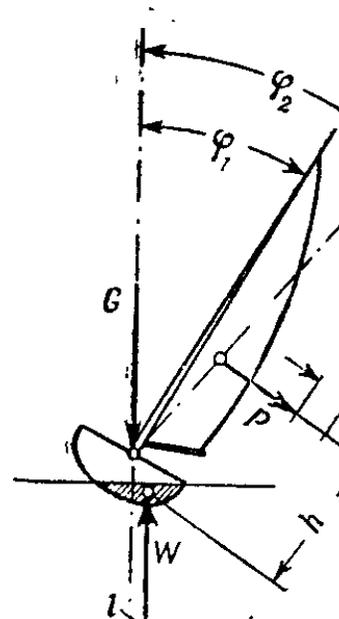


Рис. 16: Крен яхты

станут равными: тогда крен прекратится и яхта вернется в исходное положение.

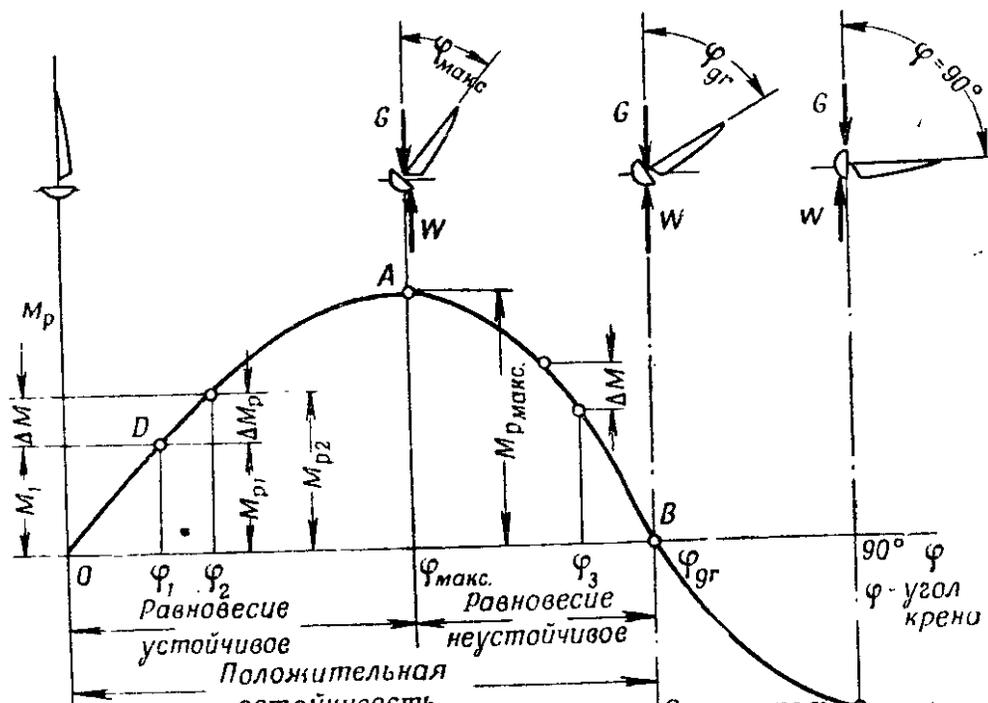


Рис. 15: Кривая остойчивости

$$\Delta M = \Delta M_p, \quad M_1 + \Delta M = M_{p2}.$$

Увеличению кренящего момента  $\Delta M$  противостоит соответственное увеличение восстанавливающего момента  $\Delta M_p$ . Когда кренящий момент уменьшается до величины  $M_1$ , яхта автоматически возвращается в прежнее положение с углом крена  $\varphi_1$ .

Такой резерв восстанавливающего момента возникает на кривой остойчивости только на участке  $OA$ . Угол  $\varphi_{\max}$  является максимальным углом крена, границей сохранения яхтой устойчивого равновесия.

Если швертбот будет находиться в положении равновесия при крене, равном углу  $\varphi_3$ , то увеличение кренящего момента на  $\Delta M$  может опрокинуть яхту.

Опрокидывание можно предупредить умелым использованием команды в качестве дополнительного балласта. В этом положении яхта не имеет устойчивого равновесия, поскольку приросту кренящего момента  $M$  не противостоит соответствующий прирост восстанавливающего момента  $M_p$ . В границах углов крена от  $\varphi_{\max}$  до  $\varphi_{gr}$ , величина восстанавливающего момента уменьшается с увеличением угла крена, т. е. обратно тому, что происходило на участке  $OA$  кривой остойчивости. Участок  $AB$  характеризует положение неустойчивого равновесия. При углах крена больше чем  $\varphi_{gr}$ , восстанавливающий момент  $M_p$  становится отрицательным; это значит, что яхта опрокинется даже в том случае, если на нее не действуют никакие внешние силы.

Отсюда следует, что швертботы могут плавать без риска опрокинуться при углах крена, меньших  $\varphi_{\max}$ . В границах крена от  $\varphi = 0$  до  $\varphi_{\max}$  швертботы авто-

матически поддерживают положение устойчивого равновесия. При крене от  $\varphi_{\text{макс}}$  и больше яхта находится в неустойчивом равновесии, и малейшее увеличение кренящего момента приведет к опрокидыванию судна. Для предотвращения опрокидывания единственным выходом будет растравливание шкотов, чтобы уменьшить давление ветра на паруса. Для швертботов характерные значения углов крена таковы:  $\varphi_{\text{макс}} = 30\text{--}45^\circ$ ,  $\varphi_{gr} = 60\text{--}80^\circ$ .

Остойчивость швертботов, определяемая с помощью кривой (см. рис. 15), называется остойчивостью формы.

**Влияние параметров яхты на поперечную остойчивость** Большое значение для поперечной остойчивости имеет форма корпуса яхты. От нее зависит величина восстанавливающего момента  $M_p$  и величина характерных углов крена  $\varphi_{\text{макс}}$  и  $\varphi_{gr}$ , играющих большую роль в безопасности плавания и достижении наилучших результатов в гонках.

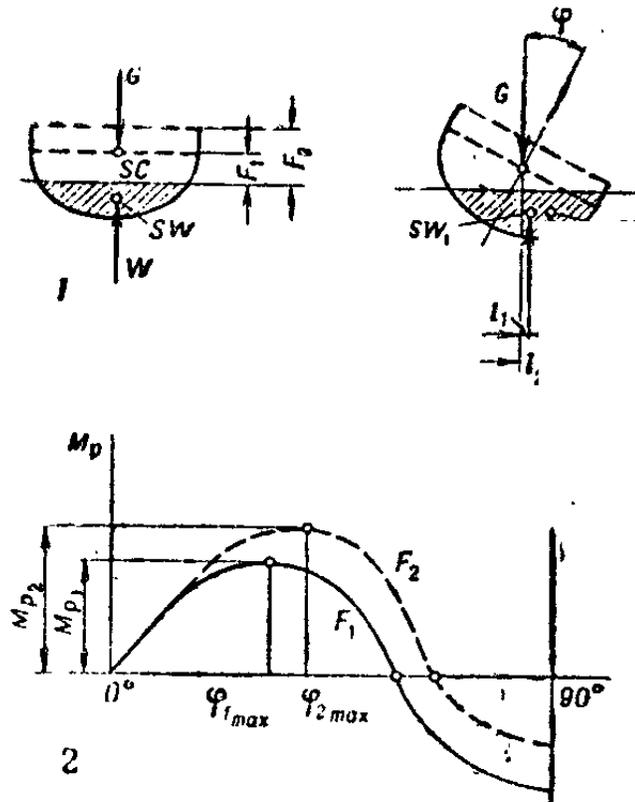


Рис. 17

Рис. 17: Влияние высоты борта

Сравним две яхты с одинаковой шириной, но с разной высотой надводного борта  $F_1$  и  $F_2$  (рис. 17, 1). Графики остойчивости этих яхт даны на рис. 17, 2. Яхта с высоким надводным бортом  $F_2$  остойчивее, так как восстанавливающий момент

$M_{p2}$  у нее больше и больше максимально допустимый угол крена.  $M_{p2}$  больше  $M_{p1}$  и  $\varphi_{2\text{макс}}$  больше  $\varphi_{1\text{макс}}$ . Обе яхты имеют одинаковую начальную остойчивость, т. е. остойчивость при малых углах крена, но при увеличении угла крена яхта с высокими бортами сохраняет значительно большую остойчивость, чем низкобортная.

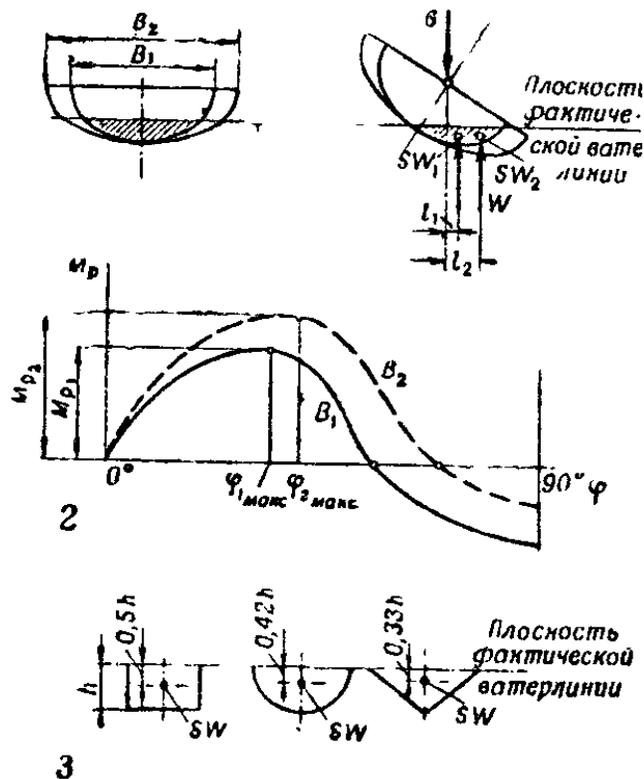


Рис. 18

Рис. 18: Влияние ширины корпуса

Сравним теперь графики остойчивости двух яхт, отличающихся друг от друга шириной корпуса —  $B_1$  и  $B_2$ . Кривые остойчивости показаны на рис. 18. И начальная и конечная остойчивости у этих яхт разные, причем более широкая яхта — более остойчива, поскольку плечо  $l_2$  пары сил  $GW$  больше плеча  $l_1$ . Величина плеча данной пары сил  $GW$  зависит от положения центра величины  $SW$ , а последний, как известно, находится в центре тяжести поля, ограниченного формой погруженной в воду части корпуса и действительной фактической ватерлинией. Рис. 18, 3 дает наглядное представление положения центра величины в зависимости от формы погруженной части корпуса яхты.

В новейших конструкциях швертботов можно подметить стремление к увеличению ширины корпуса с одновременным увеличением площади парусов с целью создания более быстроходного судна.

Увеличение ширины корпуса яхты обосновано не только интересами остойчивости, но и другими обстоятельствами, важнейшее из которых — необходимость учета сил гидродинамического давления. В связи с этим в настоящее время под-

вергаются пересмотру традиционные взгляды на величину отношения длины яхты  $L$  к ее ширине  $B$  (удлинение), являющегося основной характеристикой формы корпуса.

**Поперечная остойчивость (балласт)** Поперечная остойчивость зависит не только от формы корпуса, но и от взаимного положения центра тяжести и центра величины.

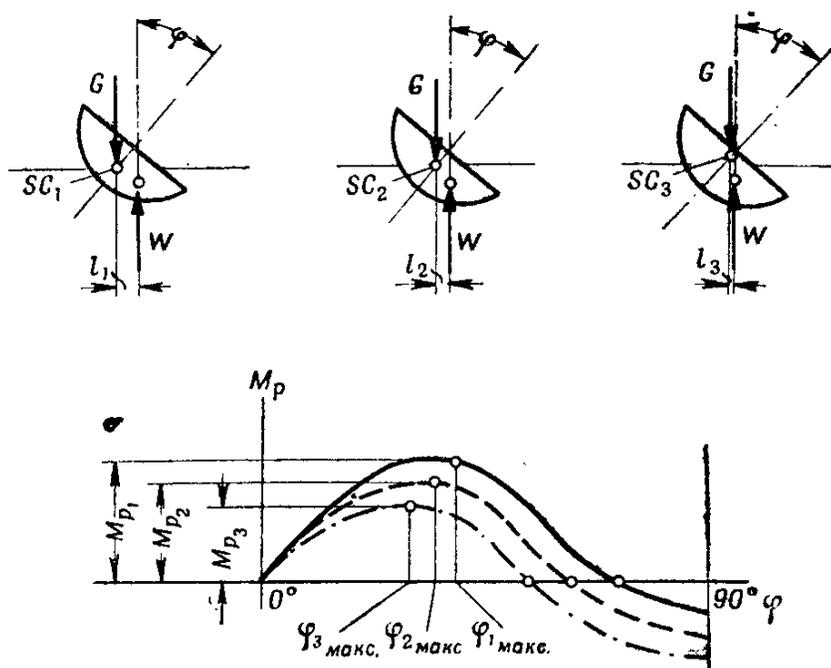


Рис. 19

Рис. 19: Влияние положения центра тяжести

Допустим, что три яхты одинаковой формы отличаются только расположением центров тяжести  $SC_1$ ,  $SC_2$ ,  $SC_3$  (рис. 19). Сравнивая соответствующие схемы действия сил при крене и кривые остойчивости, нетрудно заметить, что чем ниже центр тяжести яхты, тем она остойчивее. Дело в том, что чем ниже центр тяжести, тем больше плечо и восстанавливающий момент пары сил  $GW$ . Низкое положение центра тяжести особенно успешно используется при конструировании килевых яхт, когда применяются железные или свинцовые фальшкили, находящиеся в наиболее погруженной части корпуса.

Вес балластного килея колеблется от 30 до 75% общего веса яхты. Для внутренних водоемов строятся яхты с меньшим весом балластного килея, чем для плавания в открытом море.

Форма кривой остойчивости килевой яхты  $B$  сильно отличается от таковой для швертбота  $A$  (рис. 20). По мере увеличения угла крена килевой яхты плечо  $l$  возрастает, из-за чего восстанавливающий момент  $M_p$  остается всегда положительным и

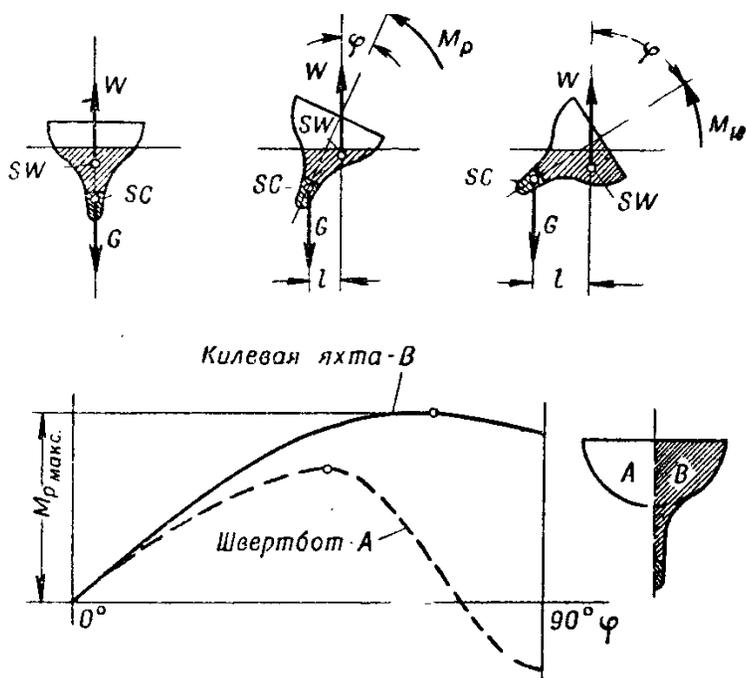


Рис. 20

Рис. 20: Сравнение остойчивости швертбота и килевой яхты

килевая яхта никогда не теряет положения устойчивого равновесия. По сравнению со швертботом килевая яхта более безопасна для плавания в условиях штормовой погоды, причем взятие рифов, с точки зрения остойчивости, не обязательно.

Остойчивость швертбота и килевой яхты в известной мере зависит от степени волнения моря и шквалистости ветра. Неожиданный порыв ветра и волна могут создать опасный крен и даже послужить причиной опрокидывания швертбота. Особенно опасны динамические, т. е. резкие, ударные, ветровые нагрузки на парус. Они могут привести к утрате судном остойчивости даже при меньших углах крена, чем при той же самой нагрузке, но возрастающей постепенно.

Подробнее эти вопросы будут рассмотрены в главе «Гидромеханика парусной яхты».

## 1.2 Задачи механики плавания под парусами

В отличие от ряда других областей спорта в плавании под парусами недостаточно одного хорошего физического развития. Рулевой и команда должны обладать значительными познаниями судоводителя и матроса: они должны не только уметь отлично справляться с яхтой в любых условиях волнения и ветра, но и наиболее выгодным образом использовать их. Преобразование энергии естественных сил природы (воды и ветра) в энергию движения яхты производится ее вооружением, работающим в соответствии с законами физики и механики. Следовательно, чтобы успешно управлять яхтой, правильно и максимально использовать возможности ее вооружения, рулевой и команда должны хорошо знать основы механики плавания под парусами. Знания эти необходимы и для достижения прогресса в парусном спорте.

В соревнованиях побеждает обычно тот рулевой, который сумел пройти дистанцию с большей скоростью, который провел яхту круче к ветру, чем другие. Именно в этом состоит задача наиболее выгодного использования окружающей среды: воды и ветра. Параграф 24 «Правил парусных соревнований» гласит: «Для движения яхты не должны использоваться никакие другие средства, кроме естественного воздействия ветра на паруса». Парус, получая энергию из атмосферы, трансформирует ее в силу тяги, под действием которой яхта движется по курсу, преодолевая сопротивление воды.

стр. 30

Совершенство гоночной яхты определяется прежде всего скоростью хода и способностью ее идти круто к ветру. Эти качества зависят от возможности получения максимальной силы тяги на парусе, т. е. от аэродинамики паруса и от возможности снижения до минимума всякого рода сопротивлений движению, и в первую очередь гидродинамических сопротивлений корпуса. Умение добиться работы вооружения яхты с большим коэффициентом полезного действия и знание теории и механики плавания под парусами — самые главные после тактики гонок условия успеха. Задачи механики или теории плавания под парусами прежде всего сводятся к следующему:

1. нахождение условий и путей для получения наивысшей при данных обстоятельствах силы тяги на парусах;
2. определение причин возникновения всех видов вредных сопротивлений яхты, с одной стороны, и способов их снижения — с другой.

Современный уровень аэро- и гидродинамики позволяет правильно решить эти насущные вопросы. Несмотря на это, многие яхтсмены трактуют основные вопросы теории парусного плавания на основании устарелых представлений.

В качестве примера критически рассмотрим очень популярную «теорию паруса», которую можно найти почти во всех руководствах по парусному спорту. Обычно эта теория излагается так: «Сила давления ветра на парус  $AB$ , приложенная в центре парусности, раскладывается по правилу параллелограмма (рис. 21, 1) на: 1) перпендикулярную поверхности паруса силу  $AD$  и 2) параллельную поверхности паруса силу  $AC$ . Силу  $AC$  из дальнейших рассуждений можно исключить, так как она, «скользя» по парусу, не оказывает никакого действия на движение яхты. Сила  $AD$ , в свою очередь, раскладывается на две слагающие. Одна из них —  $AE$  — перпендикулярна направлению движения яхты, другая —  $AF$  — направлена параллельно этому движению. Сила  $AE$  вызывает дрейф яхты, которому противодействует сравнительно большая площадь бокового сопротивления судна. Сила  $AF$  вызывает движение яхты с некоторой скоростью по курсу, отклоненному от диаметральной плоскости яхты на угол дрейфа».

стр. 31

Ошибочность приведенной «теории паруса» состоит в неправильной оценке сил. В самом деле, если на жесткую систему, какой является парусное вооружение с заложенными шкотами, действуют известные силы, то их действием нельзя пренебрегать. Никакая сила не может бесследно «скользить» или «сплывать», так как такое утверждение противоречит законам механики.

Для обоснования «теории паруса» ссылаются на уравнение Ньютона, устанавливающее зависимость между силой ветра и давлением ее на препятствие. Ветер —

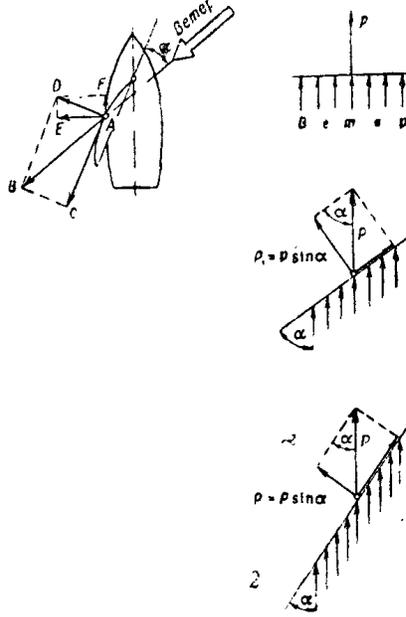


Рис. 21

Рис. 21: К «теории паруса»

это поток огромного количества бесконечно малых материальных частиц, налетающих на преграду с определенной скоростью. При ударе о преграду они полностью или в какой-то степени сообщают свою энергию преграде.

На преграде, установленной к ветру под углом  $90^\circ$ , энергия движения ветра тратится полностью (рис. 21, 2). Если преграда стоит к ветру под углом меньше  $90^\circ$ , давление ветра  $P_1$  будет соответственно меньше. Чем больше скорость ветра, тем больше энергия материальных частиц, тем больше энергии поглощается преградой. Сила давления ветра будет также зависеть от величины площади преграды. Встречается следующая формула для определения силы давления ветра на парус:

$$P = \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} \cdot S \cdot \sin \alpha,$$

где:  $P$  — сила давления ветра,  
 $\gamma$  — удельный вес воздуха около  $1,25 \text{ кГ/м}^3$ ,  
 $v$  — скорость ветра, м/сек,  
 $g$  — ускорение земного притяжения —  $9,81 \text{ м/сек}^2$ ,  
 $S$  — поверхность паруса,  $\text{м}^2$ ,  
 $\alpha$  — угол установки паруса относительно направления ветра.

Эта формула в определенных границах вполне применима для установления давления ветра на здания и т. п. В условиях, значительно более сложных, с какими приходится иметь дело яхтсмену, она не гарантирует правильных результатов.

Если бы, пользуясь этой формулой, мы построили график сил, действующих на парус в зависимости от его положения к направлению ветра, то смогли бы убедиться, что наибольшими силы будут при ветре фордевинд, т. е. когда направление

ветра перпендикулярно плоскости паруса. Казалось бы, в этом случае под действием максимальных сил яхта должна получить и наибольшую скорость. Такие как будто логичные выводы находятся в явном противоречии с ежедневной практикой. Каждый парусник знает, что наибольшая скорость бывает не на курсе фордевинд, а на курсах, близких к галфвинду.

В вышеприведенной теории и формуле определения давления ветра величина сил на парусе зависит от его площади, форма паруса при этом не учитывается. Но опыт убедительно показывает, что форма паруса, его «пузо», оказывает большое влияние как на скорость хода яхты, так и на ее способность идти круче к ветру. Поскольку вышеупомянутая теория ничего не могла ответить в отношении наивыгоднейшей формы паруса и его положения по отношению к ветру, пришлось создавать дополнительные «теории» на этот счет. Появилась «теория биссектрисы угла», согласно которой парус лучше всего работает, когда находится на биссектрисе угла, составленного направлением ветра и диаметральной плоскостью яхты. По этой «теории» при курсе галфвинд плоскость паруса должна находиться под углом  $45^\circ$  к ветру.

стр. 33

Противоречия между выводами, вытекающими из этих популярных «теорий», и парусной практикой служат источником пренебрежения многих парусников теорией вообще. Вместо серьезного повышения своей квалификации путем приобретения подлинных знаний, начинается погоня за «секретами» чемпионов, разгадыванием «тайн», «патентов» и т. п. На этой почве среди парусников возникают быстропроходящие «моды», основанные на ложном выпячивании одного какого-нибудь фактора за счет других, не менее важных в искусстве парусного плавания. Примером такой моды может служить применение огромного количества всевозможных паст для уменьшения сопротивления трения корпуса в воде, как будто только это является важнейшим препятствием на пути к победе в гонках. При этом особенно усердствуют недостаточно квалифицированные рулевые или те, кто поленивее, стараясь скрыть под смазкой все дефекты корпуса неряшливо содержащейся яхты. Другой пример ничем не оправданной моды — распространение яхт класса «Снайп» в качестве гоночных судов. В наши дни «Снайп» не что иное, как яркий образец анахронизма, однако более 10 тысяч владельцев яхт этого класса почему-то уверены в ее высоких гоночно-спортивных данных.

## 2 Общие сведения о яхтах

Яхтой может быть названо любое парусное судно с характерными размерами и вооружением, служащее исключительно для спортивных целей. Большая килевая яхта с каютой для плавания в открытом море и маленький швертбот, не имеющий палубы, одинаково могут называться яхтами. Само слово «яхта» голландского происхождения: еще в XVI в. так назывались небольшие парусные суда, на которых плавали для развлечения. И в настоящее время в Голландии устраиваются гонки старинных парусных яхт, снабженных забортными шверцами.

### 2.1 Теоретический чертеж яхты

Оценивая гоночные качества яхты какого-либо класса, прежде всего мы обращаем внимание на ее скорость, способность идти круто к ветру, остойчивость и т. п. Эти свойства зависят одновременно от формы и величины корпуса яхты и от характера и величины парусности. Имея хороший опыт, можно на основании теоретических чертежей корпуса и плана парусности оценить хотя бы приблизительно гоночные свойства яхты.

Теоретический чертеж дает основные размеры яхты, характерные разрезы корпуса, т. е. определяет тип яхты и род вооружения. На чертеже размеры корпуса всегда даются по наружной стороне обшивки. На основе теоретических чертежей составляются рабочие чертежи с указанием всех конструктивных размеров, допусков и материалов. По ним и ведется постройка яхты.

Теоретические разрезы корпуса получаются сечением тремя взаимно перпендикулярными плоскостями (рис. 22). Вертикальная плоскость, проходящая через продольную ось корпуса и делящая его на две симметричные части, называется *плоскостью симметрии, или диаметральной плоскостью*. Линия пересечения плоскости симметрии с палубой называется *диаметральной линией*.

Горизонтальная плоскость, секущая корпус снаряженной яхты на уровне поверхности спокойной воды, называется *плоскостью ватерлинии (WK)*, а след этой плоскости на наружной стороне обшивки — *конструктивной ватерлинией (KLW)*. Вертикальная плоскость, проходящая по самому широкому месту корпуса перпендикулярно диаметральной плоскости, называется *плоскостью миделя*. Она делит корпус яхты на носовую и кормовую части.

На теоретическом чертеже помещают проекции сечений корпуса, сделанных на равных расстояниях плоскостями, параллельными трем вышеупомянутым плоскостям (рис. 23). Так как плоскость симметрии делит корпус на две совершенно одинаковые части, на чертеже показывают линии сечения только одной стороны: эти линии называются *батоксами*, а сам чертеж — *«бокком», или боковой проекцией корпуса яхты* (рис. 24, 1). На рисунке нанесены и другие линии, о которых будет сказано дальше, а также *базисная линия*, по которой определяется положение шпангоутов при закладке.

Проекции сечений корпуса горизонтальными плоскостями на плоскость конструктивной ватерлинии называются *ватерлиниями* (см. рис. 23). Поскольку обе

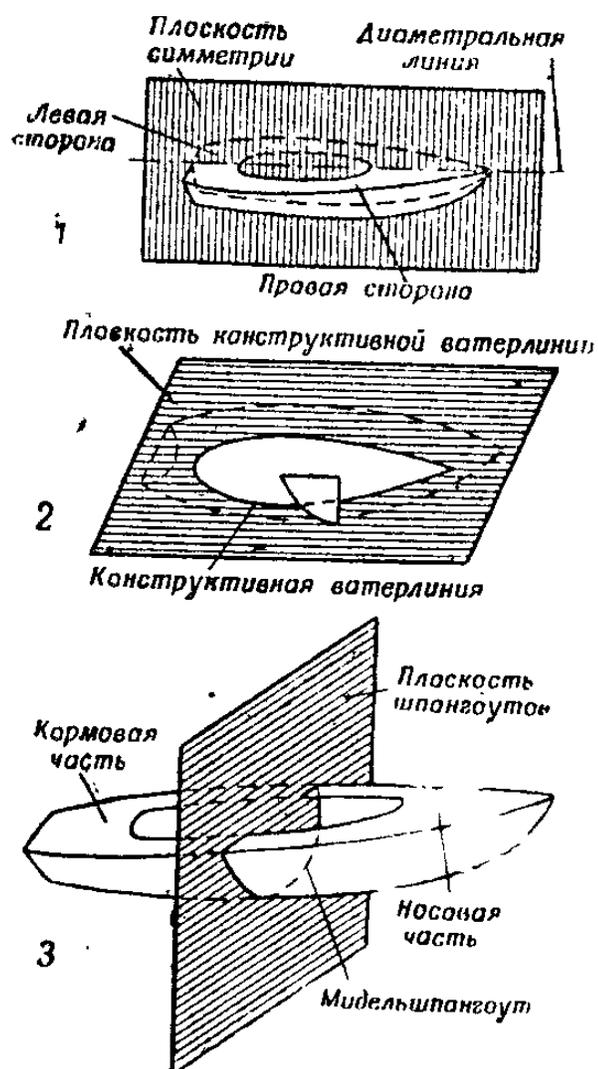


Рис. 22

Рис. 22: Три основные плоскости корпуса яхты

стороны корпуса одинаковы, на чертеже даются всегда ватерлинии правой стороны (рис. 24, 2). Такой чертеж называется *полуширотой*. На нижней его части показаны еще две кривые: одна — так называемая *строевая по шпангоутам*, позволяющая судить о водоизмещении подводной части корпуса у любого из шпангоутов и форме обводов носа и кормы, и вторая — *линия смоченной поверхности*. Эта кривая дает величину смоченной поверхности корпуса (его подводной части) и распределение ее по длине яхты, что сильно влияет на возникновение сопротивления трения на ходу яхты.

Линии сечений  $S_1$ ,  $S_2$  и т. д. получены от пересечения корпуса наклонными плоскостями, проходящими между плоскостью симметрии и самой верхней ватерлинией  $W = 5$ . Эти линии имеют вспомогательное значение и служат для контроля плавности обводов корпуса и коррекции теоретических чертежей (см. рис. 24, 2).

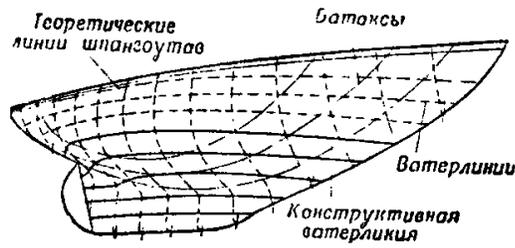


Рис. 23

Рис. 23: Боковая проекция корпуса яхты

Проекции сечений корпуса теоретическими шпангоутами на плоскость мидель-шпангоута показаны на третьем теоретическом чертеже — поперечных сечений, или шпангоутов (рис. 24, 3). На правой стороне рисунка помещаются линии сечения носовой, а на левой — кормовой части корпуса.

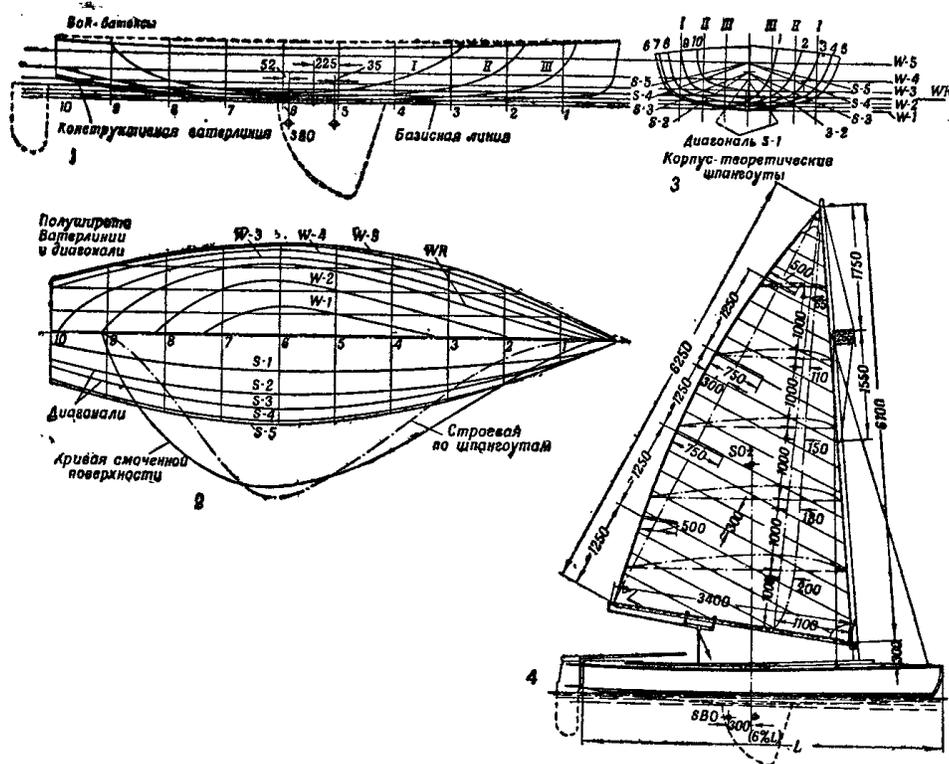


Рис. 24: Теоретический чертеж яхты: 1 — бок, батоксы; 2 — полуширота, ватерлинии и диагонали; 3 — корпус, теоретические шпангоуты; 4 — план парусности

Вышеупомянутые три основные проекции (боковая, поперечная и горизонтальная) в сочетании с планом парусности (рис. 24, 4) составляют основу теоретической документации каждой яхты.

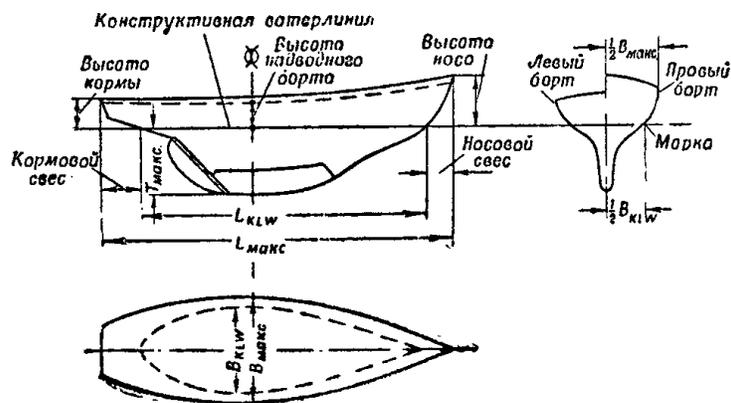


Рис. 25

Рис. 25: Основные размеры яхты

При проектировании и оценке качеств яхты прежде всего внимание обращается на следующие размеры и данные (рис. 25):

$L_{KLW}$  — длина яхты по конструктивной ватерлинии (английское обозначение —  $LWL^2$ , немецкое —  $KWL$  или  $OWL^3$ ). Часто действительная длина по ватерлинии несколько отличается от теоретической благодаря разнице в нагрузке (весе яхты) или разнице в осадке носа и кормы.

$L_{макс}$  — максимальная длина корпуса, измеряемая между перпендикулярами, опущенными с крайних точек носа и кормы (английское обозначение —  $LOA^4$ , немецкое —  $LüA^5$ ).

$B_{макс}$  — максимальная ширина корпуса, измеряемая между отвесами, касательными к борту в самой широкой части яхты, обычно в плоскости мидельшпангоута, замаркированной специальным знаком (английское обозначение — *beam*, немецкое —  $BüA$ ).

$T_{макс}$  — максимальная осадка яхты, измеряемая от плоскости конструктивной ватерлинии  $KLW$  до самой заглубленной точки корпуса, например до пятки руля (английское обозначение — *draft*, немецкое — *Tiefgang*).

$F_6$  — высота надводного борта, измеренная в плоскости миделя от палубы до плоскости ватерлинии ( $KLW$ ).

Величина яхты определяется также ее водоизмещением  $D$  и площадью парусности  $S$ . Водоизмещение — мера полного веса яхты, корпус которой погружен как раз по ватерлинию; оно выражается в тоннах или  $m^3$  объема вытесненной корпусом воды (английское обозначение — *displacement*, немецкое — *Verdrängung*).

Для килевых яхт часто дается вес фальшкиля  $G_6$ . Величина гоночных килевых яхт часто определяется посредством специальных обмерных формул ( $RORC$ ,  $KR$ ), о которых речь будет дальше.

Полная площадь парусности  $S$  складывается из площади отдельных парусов,

<sup>2</sup>Length Water Line (Прим. ред.).

<sup>3</sup>Konstruktionswasserlinie (Прим. ред.).

<sup>4</sup>Length Overall (Прим. ред.).

<sup>5</sup>Länge über Alles (Прим. ред.).

например:

Грот .....	м <sup>2</sup>
Стаксель .....	”
Бизань .....	”
Спинакер .....	”
.....	
Общая площадь парусности	м <sup>2</sup>

На теоретическом чертеже «бок» (см. рис. 24, 1) часто указывают две характерные точки:

1) центр парусности  $SOz$ , определяемый как центр тяжести поверхности всех парусов;

2) центр бокового сопротивления  $SBO$ , определяемый как центр тяжести проекции подводной части корпуса на плоскость симметрии яхты. Принято считать, что через центр бокового сопротивления  $SBO$  проходит линия действия сил, противостоящих силам дрейфа. Центр бокового сопротивления смещен на расстояние, равное 6–12% длины яхты, к корме по отношению к плоскости, проходящей через центр парусности и параллельной плоскости мидельшпангоута.

## 2.2 Эволюция яхты

Конструкция яхты, предназначенной для развлечения и спорта, появилась только в XIX в. В более ранние времена яхты создавались по образцу небольших парусных судов, более или менее приспособленных к специальным целям плавания. Первая гоночная яхта была построена в Америке в 1848 г. по проекту Георга Стирса, конструктора и строителя быстроходных лоцманских судов «Мэри Тэйлор» и «Купер», принесших ему широкую известность.

В гонках вокруг острова Уайт в 1851 г. яхта Стирса, названная «Америка» (рис. 26), победила четырнадцать лучших английских яхт, считавшихся образцовыми по конструкции и парусному вооружению. Эта гонка положила начало традиционным гонкам на Кубок Америки, устраиваемым и в наше время.

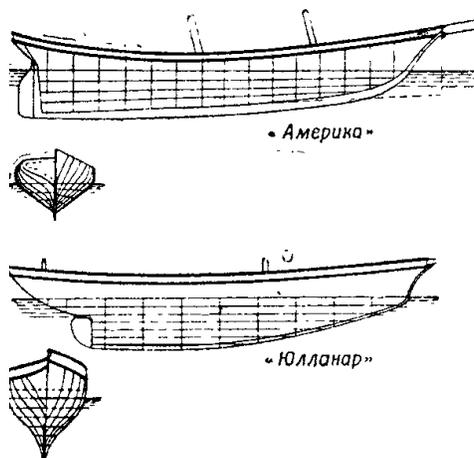


Рис. 26: Яхты «Америка» и «Юлланар»

В отличие от своих конкурентов «Америка» ходила под плоскими парусами, дававшими ей большое преимущество в лавировке: американские конструкторы и спортсмены, специализировавшиеся в строительстве шхун, уже познали преимущество плоских парусов тогда, когда англичане употребляли пузатые, которые давали хорошую тягу только на полных курсах. В то время еще никто не занимался изучением влияния формы («пузатости») паруса на силу тяги. Второй причиной поражения английских яхт была разница в форме их корпуса с «Америкой». Англичане считали, что формой корпус яхты должен походить на тело рыбы — с полными носовыми и острыми кормовыми образованиями. Ошибочность такого представления заключалась в том, что рыбы полностью погружены в воду и не подвержены воздействию тех сил, с которыми сталкиваются плавающие на поверхности воды яхты.

Стирс проектировал корпус «Америки», руководствуясь другими принципами: носовая часть была сравнительно острой, кормовая же — более полной. Наибольшее водоизмещение приходилось на корму, и на ходу «Америка» не давала значительной носовой волны, как английские яхты, и поэтому шла с большей скоростью. Наконец яхта Стирса имела высокий выступающий киль почти по всей длине корпуса, т. е. развитую поверхность бокового сопротивления, и, следовательно, меньше дрейфовала и круче шла к ветру.

Гонимые достоинства «Америки» оказали большое влияние на всех конструкторов и строителей яхт. Выяснилось, что скорость яхты прежде всего зависит от сопротивления корпуса, т. е. от формы корпуса. Отсюда вывод — яхты надо строить более удлиненными.

В конце 80-х годов прошлого столетия в результате исследований известного ученого В. Фруда было правильно оценено значение сопротивления трения. Стронники нового направления старались по возможности уменьшить поверхность подводной части корпуса, от величины которой в первую очередь зависело сопротивление трения. Английская яхта «Юлланар», построенная в 1875 г. Бенталом, послужила прототипом яхт новой конструкции (см. рис. 26).

Обмерная формула, учитывающая длину корпуса и поверхность парусности, по которой тогда классифицировали яхты, давала преимущество яхтам с меньшей длиной корпуса, т. е. с меньшим расстоянием между штевнями. Используя это свойство формулы, Бентал удлинил кормовой свес, но для сохранения положения центра бокового сопротивления на прежнем месте ему пришлось одновременно подрезать и переднюю часть корпуса. Как часто бывает на практике, при этом были получены неожиданные результаты, которыми конструктор не задавался: заметно уменьшилась поверхность погруженной части корпуса, а вместе с тем снизилось сопротивление трения.

Погруженная часть корпуса представляет собой геометрическое тело определенной формы и объема для каждой яхты. Отношение поверхности тела к его объему является достаточно характерной величиной, дающей представление о форме данного тела; например, известно, что наименьшее отношение поверхности к объему имеет шар. Чем более вытянута форма тела, тем больше отношение его поверхности к объему. Следовательно, при одном и том же водоизмещении поверхность трения погруженной части корпуса (смоченная поверхность) больше у более длинной яхты. Введение Бенталом кормового и носового свесов способствовало

одновременно уменьшению отношения поверхности к объему погруженной части корпуса (водоизмещения). Кроме того, благодаря уменьшению долевых размеров погруженной части корпуса и сосредоточению массы яхты около центра тяжести сильно возросла маневренность яхты. Концентрация водоизмещения в средней части яхты увеличила осадку, создала более благоприятные условия работы корпуса и уменьшила дрейф. «Юлланар» показал в гонках замечательные качества, что подтвердило правильность теории Фруда.

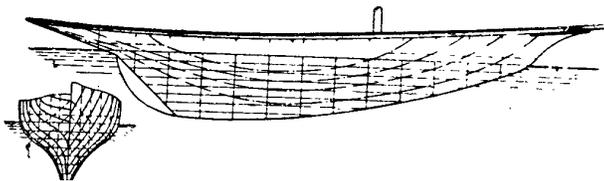


Рис. 27: Яхта «Thistle»

Стремясь еще больше сократить сопротивление трения, английский конструктор Л. Ватсон построил в 1887 г. яхту «Thistle» с очень пологим ахтерштевнем (рис. 27).

Идеи Бентала и Ватсона лучше всего удалось конструктивно воплотить шотландскому судостроителю В. Файфу в проекте знаменитой яхты «Минерва», созданной в 1888 г. «Минерва» при сравнительно небольшой длине имела значительную осадку, низкое расположение центра тяжести и могла нести соответственно большую площадь парусности (рис. 28).

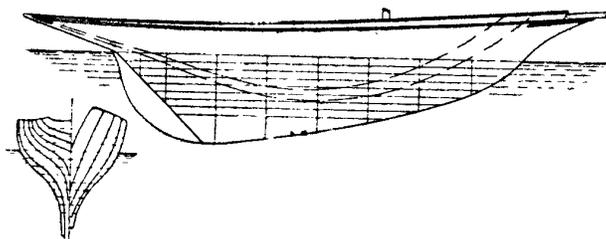


Рис. 28: Яхта «Минерва»

В это же время в Америке строительство яхт развивалось совершенно в ином направлении. Стремление к уменьшению площади трения проявилось в иных конструктивных решениях. В 1887 г. конструктор Е. Бургесс построил яхту с выдвижным килем «Волонтер» исходя из следующего основного положения. При лавировке нужна большая площадь бокового сопротивления для борьбы с дрейфом, а на полных курсах она вредна, так как увеличивает сопротивление трения, поэтому надо сделать ее изменяемой с помощью выдвижного киля. «Волонтер» действительно победил «Thistle», но оказался беспомощным перед «Минервой». Успехи «Минервы» на гонках окончательно подорвали веру в превосходство яхт с выдвижным килем, которые развивались в Америке (рис. 29). Необходимо подчеркнуть, что в те времена яхты еще не имели тяжелых свинцовых фальшкилей и задача откренивания решалась с помощью веса корпуса и самой команды. Имея сравнительно небольшую остойчивость, те яхты, не могли иметь большую парусность, а

откренивание за счет использования веса команды было и тяжелым и рискованным. На гонках эти яхты, будучи перегружены парусами, часто опрокидывались.

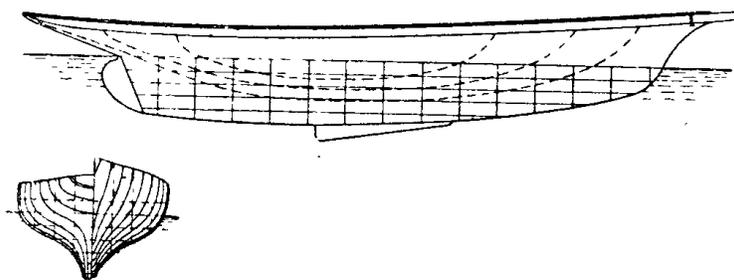


Рис. 29: Яхта «Волонтер»

стр. 42

Почти до конца XIX в. конструкторы обращали особое внимание на гидродинамическое сопротивление корпуса. Наконец была найдена такая форма корпуса, при которой в равной мере учитывалось сопротивление формы и сопротивление трения. Тем самым был достигнут некоторый предел в поисках путей увеличения скорости яхты. Конструкторы и строители стали отдавать себе отчет в том, что яхта движется в двух средах — воде и воздухе, и, следовательно, прежде всего необходимо учитывать законы той и другой среды в равной степени.

Стремясь создавать более быстроходные яхты, конструкторы обратили внимание, естественно, на площадь парусности. Яхта может нести тем больше парусов, чем больше ее поперечная остойчивость. Проблему поперечной остойчивости оригинально решил Н. Герешофф, построивший в 1891 г. яхту «Глориана». Он добился высокой остойчивости, впервые применив низко опущенный свинцовый фальшкиль и более полные образования надводной части корпуса. Благодаря этому создалась возможность сильно увеличить площадь парусов, что повлекло за собой увеличение скорости хода. Появление яхты Герешоффа можно считать завершением длительных исканий совершенной конструкции корпуса. Так возникла классическая конструкция килевой яхты, основные положения которой действительны и по сей день (рис. 30). В конце концов конструкторы пришли к выводу, что при проектировании корпуса яхты необходимо добиваться некоторого оптимального компромисса в соблюдении трех основных предпосылок: 1) минимального сопротивления формы корпуса, 2) минимального сопротивления трения, 3) максимальной остойчивости.

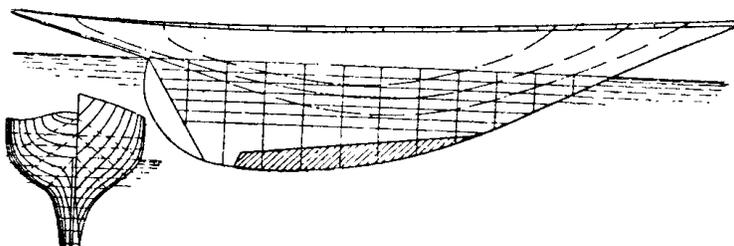


Рис. 30: Яхта «Глориана»

стр. 43

Эти требования взаимно противоречивы. Узкая, длинная яхта имеет малое сопротивление формы, однако, как малоостойчивая, не может нести достаточно большой парусности. Повышение остойчивости путем увеличения веса балласта сопровождается одновременным увеличением осадки и, следовательно, увеличением сопротивления трения. Увеличение остойчивости путем увеличения ширины корпуса вызывает увеличение сопротивления формы корпуса. Задача конструктора состоит в отыскании «золотой середины», в примирении трех противоречивых условий конструирования. В форме корпуса «Глорианы» проявилось исключительное конструкторское чутье Герешоффа, его большое искусство, и поэтому современные конструкторы мало что могут добавить к его классическому творению.

стр. 44

Небольшой прогресс, достигнутый впоследствии, относился главным образом к области парусного вооружения.

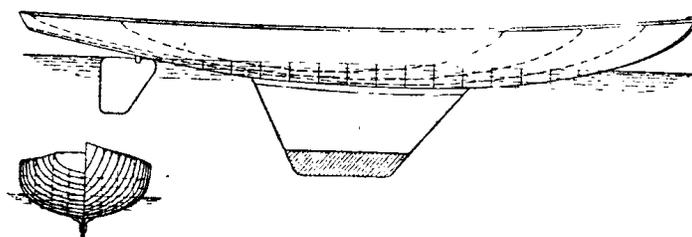


Рис. 31: Яхта «Венона»

Успех «Глорианы» был причиной возникновения еще одного нового, хотя и недолговечного, класса яхт, получившего иронически-шутливое название «скользящая посуда» («skimming dishes»). Типичным представителем этого класса была яхта Герешоффа «Венона» (рис. 31), появившаяся в 1892 г. В ее конструкции были объединены черты швертбота и килевой яхты, в результате чего получилась легкая и остойчивая яхта. Яхты швертботно-килевые, или, как их потом называли, яхты с *бульбкилем*, были вне конкуренции по скорости хода и крутизне к ветру. Они легко побеждали в гонках на короткие дистанции, но не годились для продолжительных плаваний, так как не имели даже минимальных удобств для команды.

Секрет успеха этих яхт заключался в удачном использовании возможностей, заключенных в обмерной формуле, классифицировавшей в то время гоночные яхты. Тогда еще не было монотипов, позволяющих объективно оценивать мастерство рулевого и команды: яхты были разные. Поэтому, естественно, возникала мысль о предоставлении всем участникам гонок по возможности равных шансов на успех. Сперва стали делить яхты на гоночные классы по длине ватерлинии и площади парусов, так как скорость яхты, безусловно, сильно зависит от этих характеристик. Чем длиннее яхта, чем больше у нее парусность и меньше вес, тем лучше ход. Очевидно, две яхты одинаковой длины, но разного веса для достижения одинаковых ходовых качеств надо снабдить парусами пропорционально их весу. Следовательно, надо было строить по возможности наиболее легкие яхты. Но для конструкторов до 1890 г. уменьшение веса яхты означало одновременно и снижение ее остойчивости, определяемой в тот период в основном весом корпуса.

стр. 45

С появлением бульбкилей остойчивость достигалась с помощью сравнительно

легкого профилированного куска свинца, прикрепляемого к корпусу яхты посредством стального плавника, позволяющего опустить балласт как угодно глубоко. Сам корпус, очевидно, мог быть каким угодно легким. Идя этим путем, в погоне за результатами начали добиваться снижения веса отказом от надстроек, понижением надводного борта, за счет более тонкой обшивки и т. д.

В результате пришли к яхтам, действительно хорошим ходокам, но совершенно открытым, легким, в шутку прозванным «скользящими посудинами», — яхтам, не обеспечивающим безопасности команды.

Такое нездоровое направление в конструировании яхт вызвало протесты даже самих спортсменов-гонщиков. В 1896 г. в решение задачи включился Р. Фруд. Он считал, что яхта должна быть достаточно удобной и безопасной и вместе с тем достаточно быстроходной. На конференции «Ассоциации гонщиков-яхтсменов» была принята формула для определения гоночного класса яхт. Этой формулой поощрялось строительство удобных и безопасных яхт, имевших корпуса с полными обводами. Формула имела следующий вид:

$$\text{Гоночный балл} = \frac{L + B + \frac{3}{4}G + \frac{1}{2}\sqrt{S}}{2},$$

где:  $L$  — длина по ватерлинии,  $B$  — наибольшая ширина,  $G$  — наружный охват в плоскости миделя,  $S$  — площадь парусности.

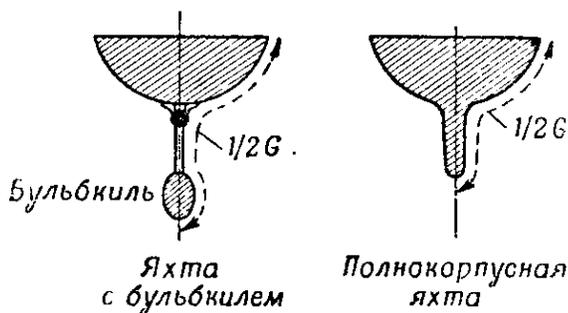


Рис. 32

Рис. 32: Яхта с бульбклем и полнокорпусная яхта

Определяемый формулой гоночный балл выражался в определенных единицах (метрах или футах), в зависимости от исчисления исходных данных.

Считалось, что яхты, одинаковые или близкие по гоночному баллу, подсчитанному по данной формуле, будут иметь одинаковые шансы в гонках. Оказалось, однако, что формула несовершенна и не достигает цели. Предполагали, что обмер обводов корпуса по миделю всегда больше у плоскодонных яхт с бульбклем, что и приостановит строительство этих яхт, а конструкторов заставит проектировать корпуса с полными обводами. Слагаемое в числителе  $G$  заметно увеличивало гоночный балл для яхт с бульбклем, переводя эти яхты в более высокий гоночный

класс, в класс яхт, имевших большую длину ватерлинии, т. е. обладающих лучшим ходом (рис. 32).

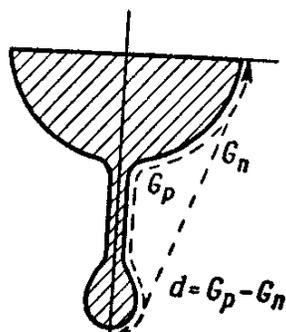


Рис. 33: Измерение обводов по обшивке ( $G_p$ ) и по натянутой тесьме ( $G_n$ )

Однако составители формулы недооценили гибкости и искусства конструкторов, сумевших и этот фактор обернуть в пользу плоскодонных яхт. Применяв шпангоуты с очень малой кривизной, понизив борт, конструкторы свели на нет ущерб, который по обмеру имели плоскодонные яхты с бульбкилем, сохранив за ними их преимущества. Поэтому в 1901 г. с целью вытеснения с гонок небезопасных плоскодонных яхт и поощрения строительства полноценных килевых яхт была введена улучшенная формула, имевшая такой вид:

$$\text{Гоночный балл} = \frac{L + B + \frac{3}{4}G + 4d + \frac{1}{2}\sqrt{S}}{2,1}.$$

От прежней эта формула отличается введением особого «налога»  $d$  на плоскодонные яхты. Что же такое  $d$ ? Это разница в величине обводов яхты, измеренных двумя разными способами: один раз обводы измеряют по периметру обшивки, а другой — длиной натянутой тесьмы, как указано на рис. 33. Измерение ведут в плоскости ватерлинии на расстоянии 0,6 длины корпуса яхты, считая от форштевня.

стр. 47

Легко заметить, что у полнокорпусных яхт величина  $d$  была меньше, чем у плоскодонных. Увеличенная в 4 раза, она давала им выгодное уменьшение гоночного балла по сравнению с плоскодонными яхтами, имевшими ту же длину ватерлинии.

Карьера плоскодонных яхт с бульбкилем прервалась в 1906 г. с вводом новой международной формулы обмера, принятой всеми европейскими странами. Цель ее введения осталась та же, что и раньше, — добиться постройки гоночных яхт, удобных и безопасных. От формулы 1901 г. она отличалась несколько скорректированными коэффициентами и вводом в числитель новой величины  $F$  — высоты надводного борта. Яхты, построенные по новой формуле, должны были обеспечить команде безопасность и удобство плавания во время больших крейсерских гонок.

$$\text{Гоночный балл} = \frac{L + B + \frac{1}{2}G + 3d + \frac{1}{3}\sqrt{S} - F}{2}.$$

На основании этой формулы все яхты были разделены на одиннадцать гоночных классов.

## 2.3 Формулы классных обмеров

В результате введения математических формул для вычисления гоночного балла яхт спортсмены-гонщики стали больше влиять на конструкторов, ставя перед ними определенные задачи. Первая международная формула была через двенадцать лет несколько изменена в соответствии с требованиями жизни. Смысл и цель корректирования заключались в том, чтобы поощрять строительство сравнительно небольших, дешевых, быстрых и одновременно удобных для команды яхт, не требующих многочисленного экипажа.

стр. 48

В настоящее время действует обязательная формула Международного парусно-гоночного союза, по которой вычисляется гоночная ценность, или иначе, гоночный балл, яхт в классе « $R - 6$ », « $R - 8$ », « $R - 10$ », « $R - 12$ » и « $R - 14$ »:

$$R \text{ (гоночный балл)} = \frac{L + \sqrt{S} + 2d - F}{2,37}.$$

Получающий все большее распространение класс « $R - 5,5$ » обмеряется и конструируется на основании такой формулы:

$$\text{«}R - 5,5\text{» (18,04 фута)} = 0,9 \left( \frac{L\sqrt{S}}{12\sqrt[3]{D}} + \frac{L + \sqrt{S}}{4} \right),$$

где:  $D - 1/64$  водоизмещения, выраженного в английских фунтах<sup>6</sup>,  $L$  — длина яхты, измеренная по специальной обмерной формуле в английских футах,  $S$  — площадь парусности в квадратных единицах (футах).

Класс « $R - 5,5$ », как и другие международные  $R$ -классы, называется ограниченным. Он оставляет конструктору лишь некоторую свободу в выборе основных характеристик: например, площади парусности, длины и водоизмещения яхты. Приблизительные размеры яхты класса « $R - 5,5$ » следующие: площадь парусности — около 29 м<sup>2</sup>, водоизмещение — около 1800 кг, длина — около 7,6 м.

Яхты международных классов  $R$  уже в 1900 г. были включены в программу II Олимпийских игр. На основании табл. 1 не трудно заметить стремление к постепенному снижению величины гоночных яхт. Так, самая маленькая яхта класса « $R - 6$ » на Олимпийских играх 1900 г. оказалась самой крупной на Олимпийских играх 1952 г. На Олимпийских играх 1956 г. яхты класса « $R - 6$ » были заменены более дешевыми — класса « $R - 5,5$ ». Это ощутимый результат демократизации парусного спорта, результат широкого движения за удешевление стоимости постройки и содержания яхт. В 1928 г. гоночная яхта класса « $R - 12$ » стоила около 25 000 английских фунтов, а класса « $R - 6$ » — только 1100. Значит, на те же деньги можно было построить 23 яхты вместо одной.

стр. 49

*Примечание.* В таблицу внесены исправления неточностей, имевшихся в оригинале, и добавлены сведения о двух последних олимпиадах (*Прим. перев.*).

Для вычисления гоночного балла чисто морских гоночных яхт в европейских водах иногда применяется формула Английского Королевского клуба океанских гонок (*RORC*):

<sup>6</sup> Английский фунт — 0,453 кг (*Прим. перев.*).

Год	R-12	R-10	R-8	R-7	R-6	R-5,5	Звездный	Дракон	Firefly	Шверт-бот (2 чел)	Шверт-бот (1 чел)
1900			+								
1908	+		+	+	+						
1912	+	+	+		+						
1920	+	+	+	+	+						+
1924			+		+						+
1928			+		+						+
1932			+		+		+				+
1936			+		+		+				+
1948					+		+	+	+		+
1952					+	+	+	+			+
1956						+	+	+		+	+
1960						+	+	+		+	+
1964						+	+	+		+	+

Таблица 1: Классы яхт на Олимпийских играх

$$MR \text{ (гоночный балл)} = 0,15 \frac{L \cdot \sqrt{S}}{\sqrt{B \cdot D}} + 0,2(L + \sqrt{S}),$$

где:  $L$  — длина, измеренная специальным способом,  $B$  — наибольшая ширина, измеренная на уровне половины высоты надводного борта,  $D$  — так называемая исправленная осадка яхты.

Величина  $S$  подставляется в формулу, будучи умноженной на коэффициент, зависящий от рода парусного вооружения, а именно:

Бермудский иол ..	0,98
Бермудская шхуна	0,96
Бермудский кэч ..	0,94
Иол гафельный ...	0,94
Шхуна гафельная	0,92
Кэч гафельный ...	0,90

На основании полученных данных все яхты затем группируются на три класса, принятых в этом клубе: 1-й — от 38 до 64 футов (от 11,6 до 19,4 м), 2-й — от 27,5 до 38 футов (от 8,4 до 11,6 м), 3-й — от 19 до 27,5 футов (от 5,8 до 8,4 м).

Известная английская яхта типа «Маус оф Мальхам» (3-го класса *RORC*) при величине гоночного балла 19,32 фута имеет следующие размеры: полная длина — 9,75 м, длина по ватерлинии — 7,32 м, наибольшая ширина — 2,44 м, водоизмещение — 2,4 т, площадь парусности — 29 (см. рис. 49).

Кроме приведенных выше международных формул обмера и определения класса яхт, существуют в разных странах свои, национальные, формулы, составленные с учетом местных условий акватория, национальных традиций и т. п. В Америке, например, существует формула Американского крейсерского клуба (*CCA*), которая по сравнению с формулой *RORC* поощряет постройку более широких яхт, с высоким надводным бортом и меньшим отношением веса постоянного балласта к водоизмещению.

В европейских странах применяется еще и так называемая формула  $KR$ , хорошо известная в СССР, Польше, ГДР. После корректирования в 1948 г. она имеет следующий вид:

$$KR = \frac{L + \sqrt{S} - (\sqrt[3]{D} + B + F)}{1,4} + 0,7 \left( \frac{\sqrt{S}}{\sqrt[3]{D}} - 4,1 \right) - M_0.$$

При постройке яхт по формуле  $KR$ , как и по формуле  $RORC$ , конструктору приходится считаться с ограничениями, предусмотренными ими. Ограничения вводятся с тем, чтобы противодействовать ухищрениям конструкторов, желающих получить выигрыш в скорости яхты за счет удобства и безопасности экипажа. В остальном формула  $KR$  оставляет конструкторам широкую свободу в совершенствовании яхт туристско-гоночного назначения.

стр. 51

Рис. 34 поясняет способ обмера корпуса по формуле  $KR$ .

Длина  $L$  измеряется на уровне, приподнятом над ватерлинией на величину, равную 4% длины ватерлинии. Этот размер надо определять в безветренную погоду и на спокойной воде. Замер производится, когда яхта находится в полной гоночной или походной готовности: на борту должно быть все предписанное снаряжение и оборудование; экипажа быть не должно.

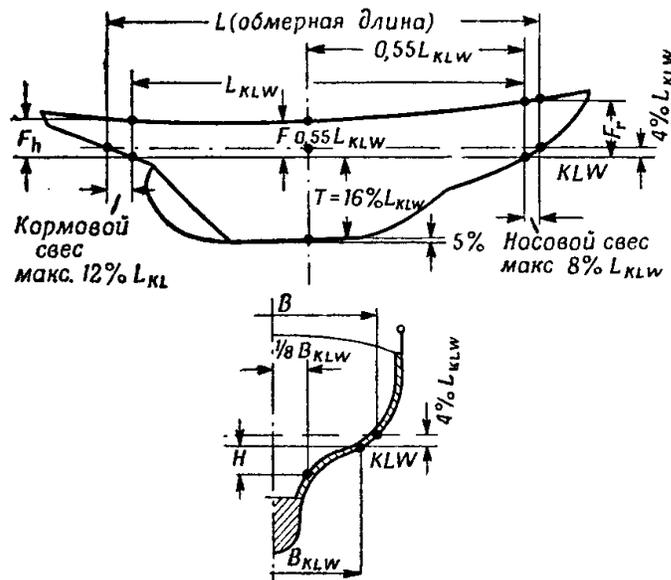


Рис. 34: Способ обмера корпуса по формуле  $KR$

Площадь парусности  $S$  входит в формулу  $KR$ , будучи умноженной на коэффициент, зависящий от типа вооружений; этот коэффициент составляет для: тендера или шлюпа — 1, иола — 0,98, шхуны — 0,96, кэча — 0,94.

Высота парусного вооружения  $H_t$  (рис. 35) измеряется от палубы до верхней контрольной марки на мачте по задней стороне мачты. Эта высота ограничивается и, например, для яхт типа тендер или шлюп составит  $1,7\sqrt{S} + 1,5$  м, а для яхт типа иол или =  $1,7\sqrt{S}$  — площадь бизани + 1,5 м.

Если измеренная высота  $H_t$  отличается от величины, получаемой по вышеприведенной формуле, расхождение учитывается следующим образом: если допуска-

емая величина  $H_t$  меньше измеренной, разница между ними, умноженная на 3, прибавляется к измеренной высоте грота  $H$ ; если измеренная  $H_t$  меньше допускаемой, то разницу делят на 2 и вычитают из измеренной высоты грота  $H$ . Площадь парусов измеряется в соответствии с инструкцией по обмеру: например, площадь гафельного паруса вычисляется по формуле:

$$\text{Площадь} = \frac{B \cdot H + G \cdot D}{2}.$$

Площадь треугольного паруса соответственно:

$$\text{Площадь} = \frac{B \cdot H}{2}.$$

Площадь передних парусов вычисляется по формуле:

$$\text{Площадь} = 0,85 \frac{I \cdot J}{2},$$

причем горизонтальная шкаторина (нижняя) наибольшего переднего паруса не должна быть длиннее  $1,5 J$ . Длина спинакер-рея не должна быть больше  $J$  (основания переднего треугольника).

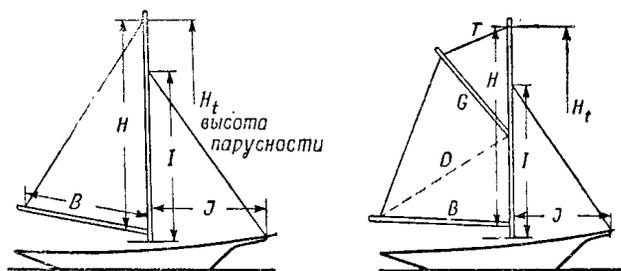


Рис. 35

Рис. 35: Обмер парусности по формуле  $KR$

Число лат для паруса площадью до  $75 \text{ м}^2$  — не более 4, и для паруса сверх  $75 \text{ м}^2$  — не более 5. Длина крайних, верхней и нижней лат — не больше  $0,12 \sqrt{S}$ , длина средних лат может быть равна  $0,17 \sqrt{S}$ .

**Водоизмещение  $D$**  для яхт старой постройки определяется по формуле:

$$D = \frac{L_{KLW} \cdot B_{KLW} \cdot H}{2,2}$$

(способ измерения и обозначений указан на рис. 34). Для яхт новой постройки величина водоизмещения определяется по конструктивным данным.

**Ширина  $B$**  измеряется по наружной поверхности обшивки на расстоянии  $0,55 L_{KLW}$  от форштевня, на уровне измерения длины яхты  $L$ .

**Высота надводного борта  $F$**  вычисляется по формуле:

$$F = \frac{F_v + F(0,55 L_{KLW}) + F_h}{3}$$

(способ измерения и обозначений указан на рис. 34).

**Мотор**  $M_0$  (если на яхте имеется стационарный мотор). От гоночного балла, вычисленного по формуле  $KR$ , вычитается «фора» — величина  $M_0$ , определяемая соответственно: для моторов с винтом постоянного шага  $M_0$  берется равным 3% величины  $KR$ , и для моторов с регулируемым шагом винта — 1,5% величины  $KR$ .

На основании вычисленного по формуле гоночного балла яхты группируются в следующие классы, внутри которых яхты соревнуются без учета (табл. 2).

Таблица 2: Классы яхт по формуле  $KR$

Значение $KR$	Группа
До 4	4
4,1–4,5	4,5
4,6–5	5
5,1–5,5	5,5
5,6–6	6
6,1–7	7
7,1–8	8
8,1–9	9
9,1–10	10
10,1–12	12
12,1–14	14
14,1–16	16

*Примечание.* Такая разбивка по группам применяется к яхтам новой постройки.

Если в гонках участвуют яхты, отличающиеся гоночной силой, то яхты с более высоким гоночным баллом дают «фору» меньшим (так называемые гандикапные гонки). Здесь окончательные результаты определяются не по фактическому времени и порядку яхт на финише, а по учтенному времени, вычисленному из фактического времени прохождения дистанции, помноженному на определенный коэффициент (табл. 3).

На следующем примере поясним, каким образом вычисляется учтенное время. Возьмем участвовавшие в гонках яхты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $E$ , очередность и время финиша этих яхт (гоночный балл и коэффициент берем по табл. 3).

Умножая фактическое время прохождения дистанции на коэффициент, получаем учтенное время, в соответствии с которым и распределяются призовые места:

- $A - 9932 \cdot 0,761 = 2 \text{ час. } 05 \text{ мин. } 58 \text{ сек.} = \text{— II место}$
- $B - 9768 \cdot 0,772 = 2 \text{ час. } 05 \text{ мин. } 41 \text{ сек.} = \text{— I место}$
- $C - 9699 \cdot 0,783 = 2 \text{ час. } 06 \text{ мин. } 34 \text{ сек.} = \text{— III место}$
- $D - 9820 \cdot 0,793 = 2 \text{ час. } 09 \text{ мин. } 47 \text{ сек.} = \text{— V место}$
- $E - 9691 \cdot 0,802 = 2 \text{ час. } 09 \text{ мин. } 32 \text{ сек.} = \text{— IV место}$

Таким образом, первый приз в гандикапе выиграла не яхта  $E$ , а яхта  $B$ , хотя она финишировала лишь третьей. Математические коэффициенты учета времени и сама формула определения гоночной силы дают конструкторам широкое поле

Таблица 3: Коэффициент учета времени для яхт класса *KR*

<i>KR</i>	Коэфф.	<i>KR</i>	Коэфф.	<i>KR</i>	Коэфф.	<i>KR</i>	Коэфф.
4,0	0,651	5,0	0,700	6,0	0,742	7,0	0,779
4,1	0,656	5,1	0,704	6,1	0,746	7,1	0,783
4,2	0,661	5,2	0,708	6,2	0,750	7,2	0,786
4,3	0,666	5,3	0,713	6,3	0,754	7,3	0,789
4,4	0,671	5,4	0,717	6,4	0,758	7,4	0,793
4,5	0,676	5,5	0,721	6,5	0,761	7,5	0,796
4,6	0,681	5,6	0,726	6,6	0,765	7,6	0,799
4,7	0,686	5,7	0,730	6,7	0,768	7,7	0,802
4,8	0,690	5,8	0,734	6,8	0,772	7,8	0,806
4,9	0,695	5,9	0,738	6,9	0,776	7,9	0,809
8,0	0,812	9,0	0,840	10,0	0,865	11,0	0,887
8,1	0,815	9,1	0,843	10,1	0,867	11,1	0,889
8,2	0,818	9,2	0,845	10,2	0,870	11,2	0,891
8,3	0,821	9,3	0,848	10,3	0,872	11,3	0,894
8,4	0,823	9,4	0,851	10,4	0,874	11,4	0,896
8,5	0,826	9,5	0,853	10,5	0,876	11,5	0,898
8,6	0,829	9,6	0,856	10,6	0,879	11,6	0,900
8,7	0,832	9,7	0,858	10,7	0,881	11,7	0,901
8,8	0,835	9,8	0,861	10,8	0,883	11,8	0,903
8,9	0,837	9,9	0,863	10,9	0,885	11,9	0,905
12,0	0,907	13,0	0,924	14,0	0,938	15,0	0,950
12,1	0,909	13,1	0,926	14,1	0,940	15,1	0,951
12,2	0,911	13,2	0,927	14,2	0,941	15,2	0,952
12,3	0,913	13,3	0,929	14,3	0,942	15,3	0,953
12,4	0,915	13,4	0,930	14,4	0,943	15,4	0,954
12,5	0,916	13,5	0,932	14,5	0,944	15,5	0,955
12,6	0,918	13,6	0,933	14,6	0,946	15,6	0,956
12,7	0,920	13,7	0,934	14,7	0,947	15,7	0,957
12,8	0,921	13,8	0,936	14,8	0,948	15,8	0,958
12,9	0,923	13,9	0,937	14,9	0,949	15,9	0,959
16,0	0,960	17,0	0,968	18,0	0,975	19,0	0,9810
16,1	0,961	17,1	0,969	18,1	0,976	19,1	0,9815
16,2	0,962	17,2	0,970	18,2	0,976	19,2	0,9820
16,3	0,963	17,3	0,971	18,3	0,977	19,3	0,9825
16,4	0,964	17,4	0,971	18,4	0,978	19,4	0,9830
16,5	0,964	17,5	0,972	18,5	0,978	19,5	0,9835
16,6	0,965	17,6	0,972	18,6	0,979	19,6	0,9840
16,7	0,966	17,7	0,973	18,7	0,979	19,7	0,9845
16,8	0,967	17,8	0,974	18,8	0,980	19,8	0,9850
16,9	0,967	17,9	0,974	18,9	0,980	19,9	0,9855

деятельности для достижения наибольшей скорости хода. Подготовленность, искусство рулевого и команды в таких гонках как бы отходят на второй план. Уже со старта яхты различной гоночной силы расходятся далеко друг от друга, и возможности возникновения тактической борьбы между участниками тем самым почти полностью устраняются. В выявлении искусства рулевого и команды гандикашные

Таблица 4: Пример вычисления учтенного времени

Яхты <i>KR</i>	Коэфф. времени	Время финиша и место
<i>A</i> 6,5	0,761	V 2 час. 45 мин. 32 сек. — 9932 сек.
<i>B</i> 6,8	0,772	III 2 час. 42 мин. 48 сек. — 9768 сек.
<i>C</i> 7,1	0,783	II 2 час. 41 мин. 39 сек. — 9699 сек.
<i>D</i> 7,4	0,793	IV 2 час. 43 мин. 40 сек. — 9820 сек.
<i>E</i> 7,7	0,802	I 2 час. 41 мин. 31 сек. — 9691 сек.

гонки уступают классным гонкам на яхтах того же класса, особенно на монотипах.

стр. 56

## 2.4 Международные классы гоночных яхт

В начальный период развития современного парусного спорта плавали и соревновались на очень крупных яхтах. Длина ватерлинии доходила до 30 м. Огромная парусность (до 1000 кв. м), тяжелые паруса требовали большой сноровки от экипажа, насчитывавшего на некоторых яхтах до 70 человек. Чем больше по размерам яхта, тем больше ее скорость, отсюда погоня за постройкой крупных, длинных и дорогих яхт. Лишь спустя много лет, с накоплением необходимых знаний, было введено деление яхт по гоночным классам в зависимости от их основных размеров. Таким образом, были созданы благоприятные условия для развития не только крупных, но и небольших яхт.

Эти тенденции ярко проявились в быстром развитии небольших яхт для внутренних водоемов. Особенно заметно это стало после 1920 г., когда впервые в программу парусных соревнований на Олимпийских играх были включены швертботы-одиночки (что являлось принципиальной победой сторонников демократизации парусного спорта. Развитие парусного спорта на реках и озерах вызвало к жизни огромный флот швертботов. — *Прим. перев.*), прототипом для которых послужили изжившие себя яхты с выдвигаемым килем («skimming dishes»), так успешно конкурировавшие в конце XIX в. с килевыми яхтами.

В настоящее время существует огромное число типов и классов яхт для плавания как во внутренних водоемах, так и в открытом море. Кроме классов, принятых во многих странах, в каждой стране имеются свои национальные, более полно отвечающие местным условиям.

стр. 57

С точки зрения конструкции, все многообразие гоночных яхт можно разделить на три основных класса: 1) свободный, 2) ограниченный и 3) монотипы. Различаются они между собой степенью ограниченности инициативы конструкторов, строителей и владельцев, в зависимости от правил постройки и обмера. Наиболее жестки эти ограничения в классе монотипов, вследствие чего яхты этого класса позволяют наиболее объективно по результатам гонок оценивать мастерство рулевого и команды.

В двух остальных классах конструкторы не так ограничены, и гоночные результаты таких яхт в одинаковой мере зависят как от мастерства экипажа, так и от искусства конструктора и строителя. Поэтому свободный и ограниченный классы играют важную роль в техническом прогрессе спортивного судостроения, что подтверждается всей историей парусного спорта.

Наиболее удачные классы признаны Международным парусным союзом в каче-

стве международных. Существуют международные союзы по отдельным классам яхт, которые заботятся о популяризации данного класса, наблюдают за выполнением правил класса при постройке и обмере, за организацией международных соревнований и т. п.

Теперь отвлечемся от конструктивных соображений и посмотрим на яхты с точки зрения условий их эксплуатации. По этому признаку все яхты можно разделить на три группы: 1) швертботы, т. е. яхты с выдвижным килем, 2) килевые яхты для морского прибрежного плавания и во внутренних водах, 3) килевые яхты для плавания в открытом море.

Познакомимся более подробно с некоторыми яхтами, представляющими указанные группы, главным образом с такими, которые сейчас стали наиболее популярными, включены в программы олимпийских парусных гонок, первенств мира и континентов.

### 2.4.1 Швертботы

**Монотип олимпийский 1936 г.** (О — июл, «0-36», «Олимпик») спроектирован к Олимпийским играм 1936 г. как швертбот для одного человека. Затем он был включен в семью международных классов и быстро завоевал популярность, в основном в европейских странах. Удачные обводы корпуса обеспечили ему успех в гонках с подобными швертботами, особенно при слабых ветрах. При сильных ветрах «Олимпик» не так легко начинает глиссировать, как новейшие швертботы, из-за сравнительно тяжелого и низко погруженного корпуса (главным образом в кормовой части). Это легко установить, сравнив форму подводной части «Олимпика» с формой новейшего «Летучего голландца» (теоретические чертежи корпуса «Олимпика» см. на рис. 24).

стр. 58

Характерная особенность «Олимпиков» — возможность менять настройку корпуса в зависимости от условий. Мачту можно передвигать на некоторое расстояние вперед или назад и, кроме того, придавать ей наклон назад.

Основные размеры «Олимпика»:

Максимальная длина .....	5 м
Максимальная ширина .....	1,66 м
Осадка, включая шверт .....	1,06 м
Вес корпуса без оснастки (минимум)	150 кг
Площадь парусности .....	11 м <sup>2</sup>

В классе «Олимпик» проводятся соревнования на первенство Европы и первенства внутри стран. (С появлением яхт класса «Финн» и других, более современных, швертботов «Олимпика» стали терять свои позиции и постепенно сходят со сцены. Сейчас они уже не участвуют в первенствах Европы. — *Прим. перев.*)

**Олимпийский монотип «Финн»** спроектирован шведом Рихардом Сарби в 1950 г. и включен Финским парусным союзом в качестве швертбота-одиночки в программу Олимпийских игр 1952 г. в Хельсинки. Благодаря высоким спортивным качествам «Финн» затем включался в программы Олимпийских игр 1956 г. в Мельбурне, 1960 г. в Неаполе (он будет также включен в программу парусных соревнований на Олимпийских играх в Токио в 1964 г. — *Прим. перев.*).

Удлиненная носовая часть корпуса не вызывает образования вредных носовых волн, но зато сравнительно узкая корма затрудняет глиссирование. Интересно

и оригинально спроектировано вооружение. Свободно стоящая мачта может вращаться в стакане в зависимости от положения гика, укрепленного в гнезде мачты. Заклиненный в гнезде мачты гик не позволяет парусу скручиваться на полных курсах. Сильно изгибающаяся на курсах бейдевинд мачта выгодно делает парус более плоским. Такое вооружение удачно не только своей простотой, но и сравнительно высоким аэродинамическим коэффициентом полезного действия (рис. 36).

стр. 59

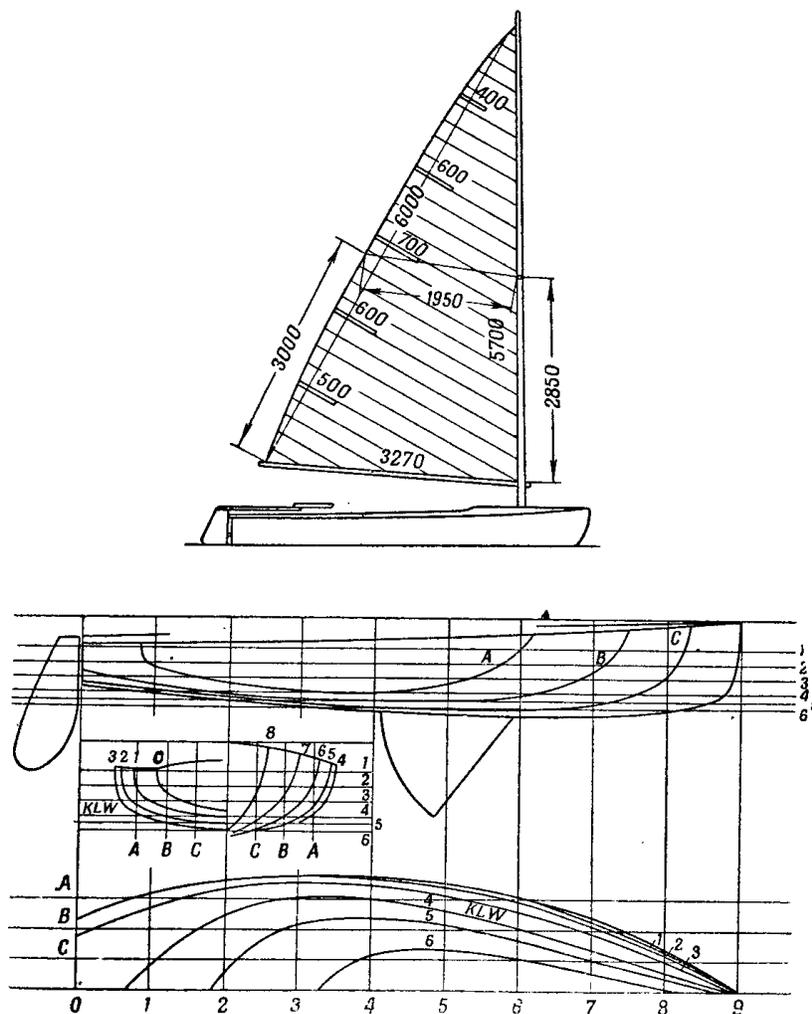


Рис. 36

Рис. 36: Швертбот «Финн»

Поскольку «Финн» — монотип, главную роль в гонках всегда будет играть мастерство рулевого, особенно его искусство правильно сбалансировать яхту. Чемпион мира Пауль Элфстром ввел в практику несколько новых приемов, облегчающих откренивание, которые он с успехом применил уже в 1952 г. в Хельсинки на XV Олимпийских играх. Это специальное крепление для ног, позволяющее рулевому свешиваться далеко за борт и сравнительно легко менять положение туловища в зависимости от условий крена. Теперь эти приемы применяются всеми рулевыми, выступающими в классе «Финн»:

стр. 60

Основные размеры «Финна»:

Максимальная длина .....	4,5 м
Максимальная ширина .....	1,51 м
Осадка, включая шверт .....	0,85 м
Вес корпуса без оснастки (минимум) ..	105 кг
Вес корпуса с вооружением (минимум)	150 кг
Площадь парусности .....	10 м <sup>2</sup>

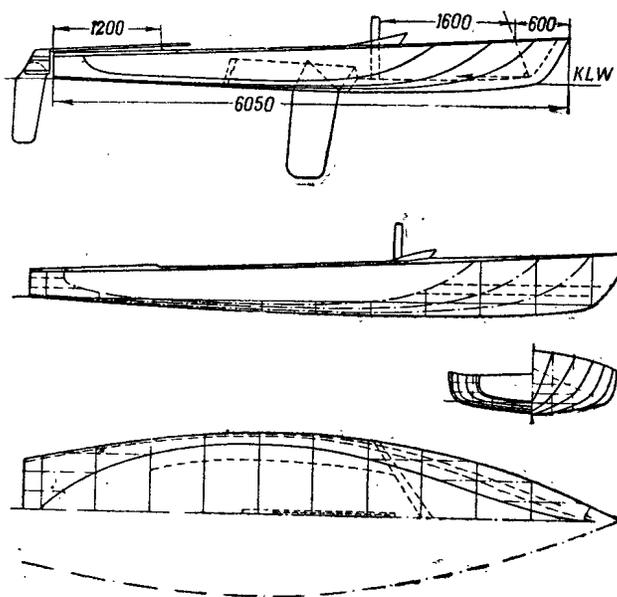


Рис. 37: Теоретический чертеж «Финна»

В классе «Финн» разыгрываются первенства отдельных стран, Европы и мира.

«Летучий голландец» — международное обозначение «FD» (Флайнг Датчмен) — швертбот для двух человек, спроектирован Парусным союзом Голландии (конструктор ван Эссен) и признан ИЯРУ в качестве международного класса. Корпус яхты может быть изготовлен из многослойной фанеры, склейки или пластмассы. Сравнительно широкая плоская корма без свеса и узкий высокий нос облегчают входение яхты в режим глиссирования. Этому способствуют небольшой вес корпуса и большая парусность (рис. 37). Управление «Летучим голландцем» требует отличной квалификации и сработанности экипажа, особенно при сильном ветре. Откренивая, шкотовый матрос полностью свешивается за борт, удерживаясь от падения в воду посредством оттяжки, прикрепленной к мачте так называемой «трапеции».

Основные размеры «Летучего голландца»:

Максимальная длина .....	6,05 м
Максимальная ширина .....	1,7 м
Осадка, включая шверт .....	1,1 м
Вес корпуса без оснастки (минимум) ..	125 кг
Вес корпуса с вооружением (минимум)	160 кг
Площадь парусности .....	17 м <sup>2</sup>

в том числе:

грот .....	11 м <sup>2</sup>
стаксель .....	6 м <sup>2</sup>
Площадь спинакера .....	17 м <sup>2</sup>
Обмерная площадь парусности	15 м <sup>2</sup>

В этом классе разыгрываются чемпионаты Европы и мира.

**Класс яхт «5-0-5».** Первая яхта этого класса была спроектирована Джоном Вестеллом, английским конструктором, в 1950 г. Это один из самых новых международных швертботов на два человека. Он превосходит по скорости «Летучие голландцы»: при ветре 10 м/сек швертбот развивал на глиссировании скорость 14 узлов. Главная черта «5-0-5» — исключительно малый вес корпуса, всего 100 кг, при площади парусности 16,5 м<sup>2</sup>. Характерные формы корпуса с широкой плоской кормой без свеса, специальные отвороты бортов в носовой части облегчают начало глиссирования и предохраняют от захлестывания воды в яхту. Водонепроницаемые ящики по обоим бортам делают яхту практически непотопляемой, а их форма облегчает балансирование и откренивание. В корме устроены специальные диафрагмы для самоудаления из корпуса воды на ходу яхты.

стр. 63

Тщательно продуманное вооружение делает «5-0-5» очень интересной гоночной яхтой. Недаром яхты этого класса получили среди спортсменов название «гоночных машин». Только экипаж, обладающий высоким мастерством, сможет выжать из этой несколько перегруженной парусами яхты наивысшие результаты. Корпус «5-0-5» может быть изготовлен из любых материалов. Никаких ограничений нет в устройстве мачты, шверта, руля, формы гика и т. п. Правилами класса строго устанавливаются только форма и вес корпуса и площадь парусов. Допускается применение «трапеции», как и в классе «Летучий голландец» (рис. 38).

стр. 62

Основные размеры «5-0-5»:

Максимальная длина .....	5,05 м
Длина по ватерлинии .....	4,57 м
Максимальная ширина .....	1,88 м
Осадка, включая шверт .....	1,14 м
Вес корпуса .....	100 кг (220 фунтов)
Обмерная площадь парусности ...	14 м <sup>2</sup>
Фактическая площадь парусности	16,5 м <sup>2</sup>
Водоизмещение .....	0,317 т

**Первая яхта класса «Снайп»** (*Бекас*) спроектирована в 1931 г. Вильямом Кросби. Корпус можно строить из любых материалов (дерево, фанера, пластмасса), форма обводов угловатая (шарпи). Вес корпуса с вооружением не может быть меньше 204 кг, что является главным пороком «Снайпа». Вместе с тем, большой вес яхты плюс вес команды из двух человек при маленькой площади парусов делают этот швертбот безопасным (рис. 39). Только очень неопытный рулевой может опрокинуться на «Снайпе». Безопасность — главная причина быстрого распространения «Снайпа» по всему земному шару. Через 22 года после рождения «Снайпов» количество их в мире дошло уже до 10 000. Это международный класс, в котором разыгрываются чемпионаты Европы и мира.

стр. 64

Основные размеры «Снайпа»:

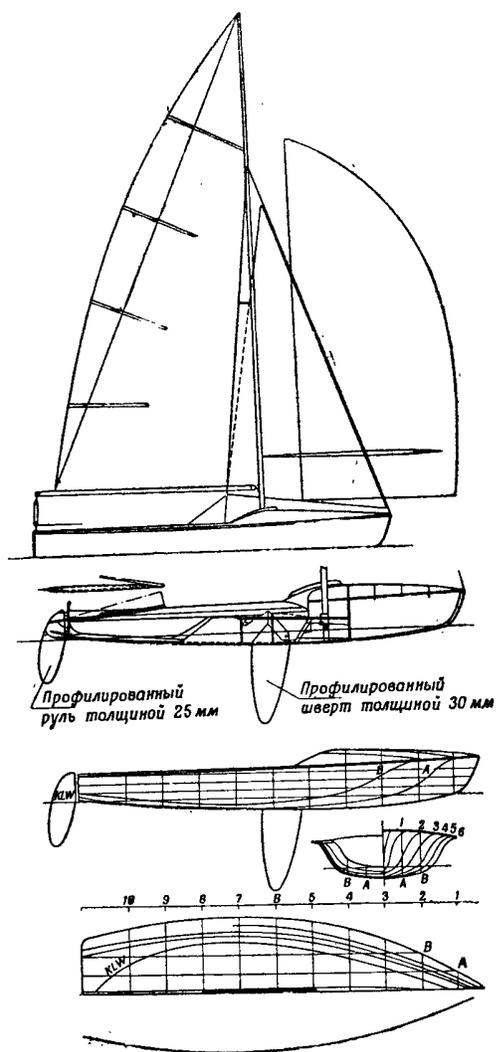


Рис. 38

Рис. 38: Швертбот «5-0-5»

Максимальная длина .....	4,63 м
Максимальная ширина .....	1,53 м
Площадь парусности .....	10 м <sup>2</sup>
Вес корпуса с вооружением (минимум)	204,3 кг

**Яхта класса «Пират»** спроектирована Каролом Мартенсом. Этот национальный немецкий класс сильно распространен в странах средней Европы. Теперь для «Пиратов» часто устраиваются различные международные гонки. Корпус яхты деревянный, настолько простой формы, что без труда может быть построен самим любителем. Положение и изгиб мачты можно регулировать так же, как у яхт класса «0-36». С 1956 г. разрешено несение спинакера площадью 10 м<sup>2</sup> (рис. 40).

Основные размеры «Пирата»:

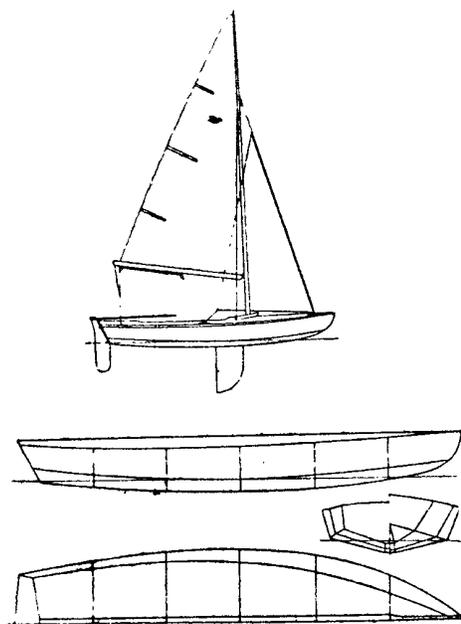


Рис. 39: Швертбот «Снайп»

Максимальная длина ..	5 м
Максимальная ширина	1,61 м
Осадка, включая шверт	1,05 м
Вес корпуса (минимум)	180 кг
Площадь парусности ...	10 м <sup>2</sup>

в том числе:

грот .....	7,28 м <sup>2</sup>
стаксель .....	2,72 м <sup>2</sup>
площадь спинакера	10 м <sup>2</sup>

стр. 66

**Швертбот «Кадет»** спроектирован английским конструктором Джеком Холтом в 1947 г. Это яхта для детей и подростков с командой два человека. В короткий срок «Кадет» снискал широкую популярность. Сейчас в разных странах плавают более 2000 этих швертботов (для них устраиваются международные соревнования как в Европе, так и в других странах. Международный парусный союз ввел его в семью международных яхт. — *Прим. перев.*).

«Кадет» был задуман как яхта туристского и гоночного назначения, простая и легкая в постройке, для развития парусного спорта среди детей и подростков. Вес корпуса «Каде́та» — всего 54 кг, его легко переносят трое-четверо ребят. Строится яхта из фанеры толщиной 6 мм, шверт деревянный, профилированный, толщиной 12 мм (рис. 41). По правилам класса швертбот должен строиться только самими любителями. Стоимость постройки невелика.

Основные размеры «Каде́та»:

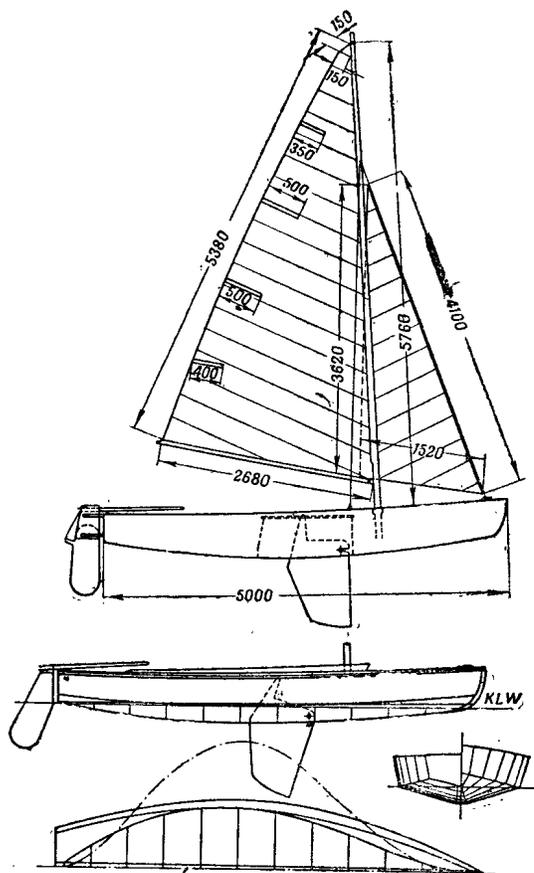


Рис. 40

Рис. 40: Швертбот «Пират»

Максимальная длина	.....	3,20 м
Максимальная ширина	....	1,25 м
Вес корпуса с вооружением		68 кг
Осадка, включая шверт	...	0,76 м

Площадь парусности:

грот	....	4,5 м <sup>2</sup>
стаксель		1,45 м <sup>2</sup>

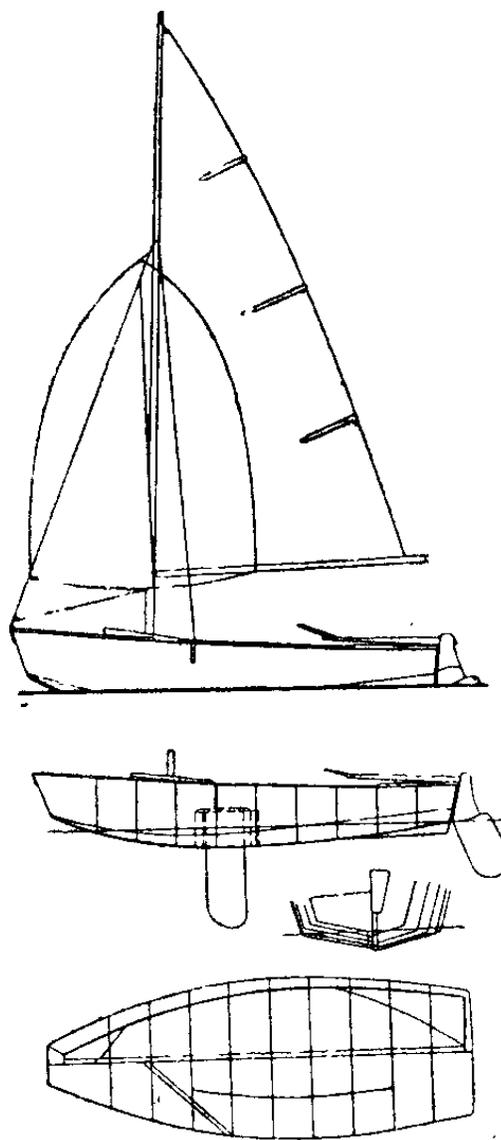
Интересно привести некоторые параграфы из устава класса «Кадет», показывающие, какое спортивно-воспитательное значение придается занятиям парусным спортом в этом классе:

*Пункт 2.* В гонках яхт класса «Кадет» могут участвовать:

- а) мальчики или девочки, умеющие проплыть 50 м в спортивном костюме (майке, свитере, тренировочных брюках или трусах) и спортивной обуви;
- б) мальчики и девочки, умеющие проплыть под водой в течение 20 сек. в таком же костюме.

Умение плавать проверяется в школах плавания.

*Пункт 3.* В классе «Кадет» в соревнованиях выступают юноши и девушки не



**Рис. 41**

Рис. 41: Швертбот «Кадет»

старше 18 лет. Право участия теряется в год, когда яхтсмену исполнится 19 лет.

*Пункт 5.* К гонкам допускаются только яхты, снабженные водонепроницаемыми емкостями, обеспечивающими непотопляемость яхты, нагруженной балластом весом 150 кг.

*Пункт 8.* Во время гонки команда обязана надевать спасательные жилеты.

Таким же, как «Кадет», любительским классом является **класс яхт «Моль»**, допускающий оригинальные решения в постройке и вооружении (рис. 42 и 43). Он возник в результате стремления многих любителей иметь швертбот, созданный собственными руками, для нужд своей семьи. Он должен был быть пригодным для гонок и прогулок, быть простым и дешевым в постройке и, конечно, достаточно

«свободным» для проявления творческой инициативы владельца.

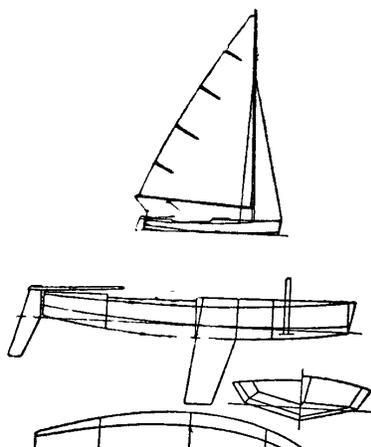


Рис. 42: Швертбот «Моль» (вариант 1)

стр. 68

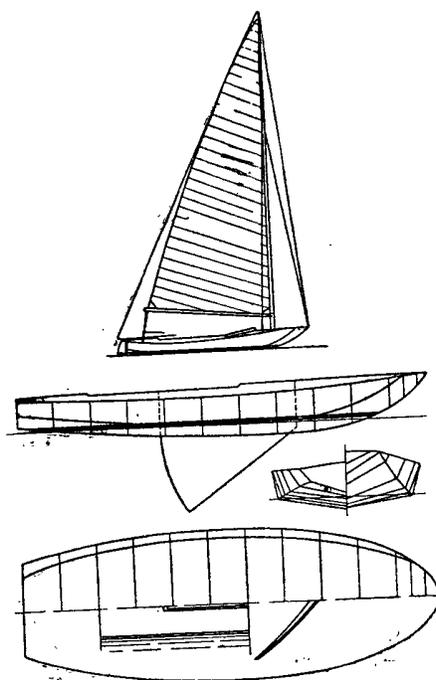


Рис. 43

Рис. 43: Швертбот «Моль» (вариант 2)

Основные ограничения в классе «Моль»:

- 1) максимальная длина корпуса не более 3,35 м при одном руле и одном шверте;
- 2) никаких ограничений в способе постройки и форме корпуса и вооружения;
- 3) рангоут целый; мачта одна, максимальная высота ее — 5,03 м; гик один, с максимальной длиной 2,89 м; никаких ограничений в весе рангоута и такелажа;

стр. 69

4) парус один, поднимаемый не выше чем на 4,57 м по мачте и не шире чем 2,75 м по гика. Стрелка задней шкаторины не более 0,15 м измеряется на половине длины шкаторины. Парус крепится к гика любым способом, но так, чтобы нижняя шкаторина его нигде не отходила от гика больше чем на 7,6 см.

Парус не может быть поднят над палубой выше чем до уровня 4,88 м. Допускается не свыше четырех лат общей длиной не более 2,39 м. Фаловая дощечка грота должна быть не шире 10,1 см при измерении под прямым углом к мачте. Парус может быть сшит из любого числа полотнищ, а количество парусов на яхте не ограничивается.

#### 2.4.2 Килевые яхты для прибрежных морских районов и внутренних водоемов

В 1911 г. в США появилась яхта «Звезда». Она была спроектирована Френсисом Свейсгатом как небольшой килевой монотип для проведения соревнований в водах Лонг Айленда<sup>7</sup> (рис. 44). Последующие усовершенствования и замена гафельного вооружения бермудским сделали этот класс, названный «Звездным», или «Звездником», популярным во всем мире. С 1932 г. «Звездники» постоянно участвуют в олимпийских гонках. Ежегодно проводятся крупные международные соревнования, вплоть до первенств стран, континентов и мира. В настоящее время насчитывается свыше 4000 яхт этого класса.

стр. 70

«Звездник» — классическая гоночная яхта на два человека. Управление ею требует от команды высокого мастерства, отличной физической подготовки и знания технических особенностей своей яхты. Возможность регулирования такелажа в широких пределах, гибкость рангоута, перемена положения мачты — все это позволяет добиваться высоких аэродинамических коэффициентов паруса при различных условиях плавания. Плавание, гонки на «Звездниках» дают большое удовлетворение, что и служит главной причиной их популярности среди опытных яхтсменов.

стр. 71

Основные размеры «Звездника»:

Максимальная длина .	6,9 м
Длина по ватерлинии .	4,8 м
Максимальная ширина	1,7 м
Осадка . . . . .	1,05 м
Вес фальшкиля . . . . .	около 400 кг
Площадь парусности . .	26 м <sup>2</sup>

Употребление спинакера запрещено.

стр. 72

**Класс яхт «Дракон»** появился в 1929 г. Яхта была спроектирована и построена норвежским конструктором Йоганом Анкером. По замыслу это должна была быть дешевая килевая яхта для туристских целей. Постепенно она превратилась в довольно дорогую гоночную яхту, имеющую сравнительно хороший ход.

«Дракон» — ограниченный класс, допускает некоторую свободу конструкции и регулирования вооружения (рис. 45).

При обмере контролируются размеры и форма корпуса, площадь и форма парусов, величина мачты и гика.

<sup>7</sup>Сведения неправильные. Яхта «Звездного» класса была спроектирована американцем Вильямом Гардиером (*Прим. перев.*).

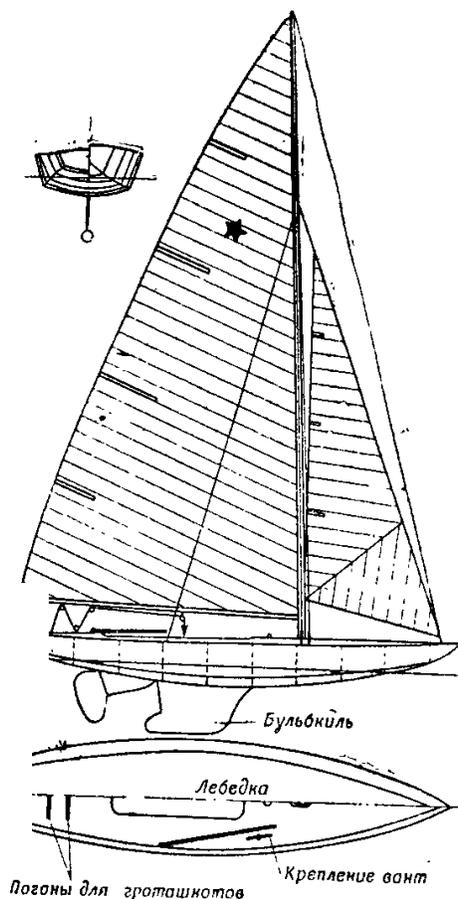


Рис. 44

Рис. 44: Килевая яхта «Звезда»

Вместо рубки на современных «Драконах» остались только козырьки, предохраняющие от попадания в яхту воды.

Класс не ограничивает применения различных приспособлений, облегчающих управление парусами, регулирование рангоута и др. (рис. 46).

Как и в «Звездном» классе, на «Драконе» нужна хорошо подготовленная команда, но из трех человек. И «Драконы» и «Звездники» не имеют самоотливных кокпитов.

Основные размеры «Дракона»:

Максимальная длина .	8,9 м
Длина по ватерлинии .	5,7 м
Максимальная ширина	1,9 м
Осадка . . . . .	1,2 м
Вес фальшкиля . . . . .	около 1000 кг
Водоизмещение . . . . .	около 2 т
Площадь парусности . .	22 м <sup>2</sup>

**Класс яхт «R-5,5»** (рис. 47) относится к так называемым «конструктивным классам». Основные размеры яхт ограничиваются математической формулой, приведенной на рис. 47. Яхты этого класса могут различаться между собой длиной

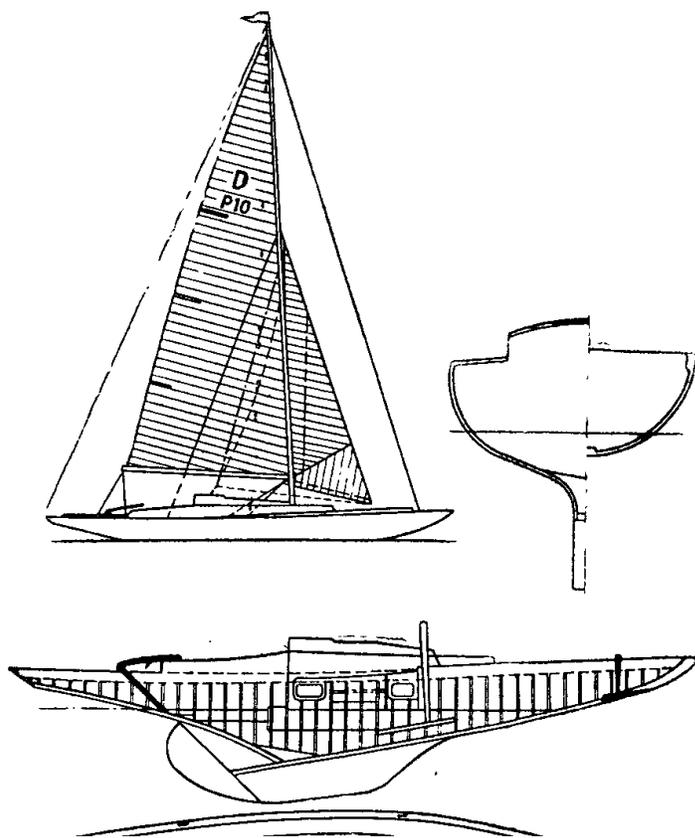


Рис. 45: Теоретический чертеж яхты «Дракон»

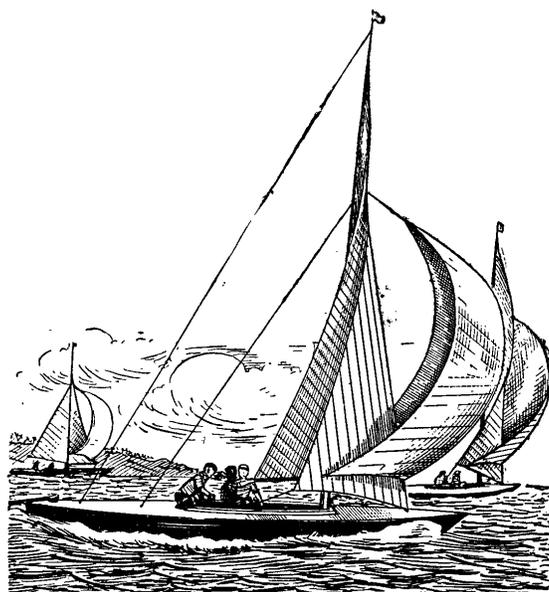


Рис. 46: Яхта класса «Дракон» под полными парусами

корпуса, водоизмещением и площадью парусности, что открывает широкое поле деятельности для конструкторов. Ограничения действуют таким образом: если

конструктор желает увеличить длину корпуса, а водоизмещение оставить прежним, он должен соответственно уменьшить площадь парусности, и наоборот.

Пожалуй, ни один класс яхт не привлекал столько конструкторских сил и не испытывался с такой тщательностью, как этот. Корпуса и паруса испытывались в аэро- и гидродинамических трубах, проводились серии испытаний в натуре и т. д. В результате

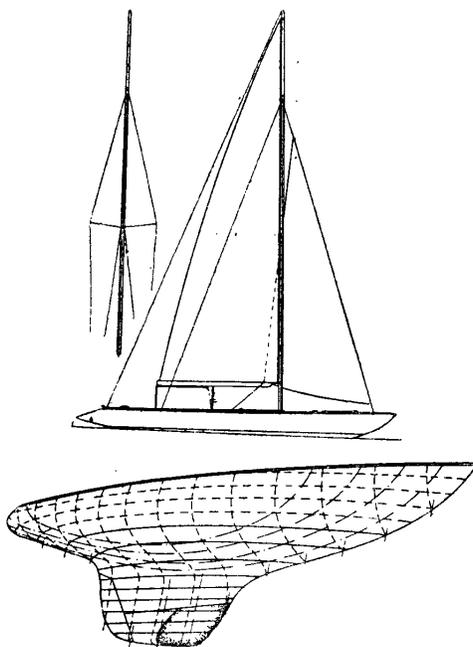


Рис. 47: Яхта класса «R-5,5»

за короткий срок яхты класса «R-5,5» достигли значительного совершенства. В настоящее время в этом классе проводятся ежегодно крупные международные соревнования (в программе олимпийских парусных соревнований класс «R-5,5» участвует с 1952 г. и уже включен в программу олимпийских гонок в Токио в 1964 г. — *Прим. перев.*)

Основные размеры яхт класса «R-5,5» приведены в табл. 5 в сравнении с размерами «Дракона» и «Звездника».

### 2.4.3 Килевые яхты открытого моря

В развитии конструкций современных яхт для плавания в условиях открытого моря характерно стремление строить так называемые «яхты малого водоизмещения». Вопрос заключается в том, за счет чего обеспечивается поперечная остойчивость: за счет низко подвешенного свинцового фальшкиля при сравнительно узком и длинном корпусе (балластная остойчивость) или за счет увеличения ширины корпуса с менее глубокой осадкой и более легким фальшкилем (стойчивость формы). В последнем случае под палубой образуется обширное помещение, что особо важно для небольших яхт.

Таблица 5: Сравнение размеров яхт классов «R-5,5», «Звездник» и «Дракон»

	«R-5,5»	«Звездник»	«Дракон»
Площадь парусности, м <sup>2</sup>	26,5–29	26	22
Максимальная длина, м	—	6,9	8,9
Длина ватерлинии, м	6,5–7	4,8	5,7
Осадка, м	1,35	1,05	1,2
Максимальная ширина, м	1,9	1,7	1,9
Водоизмещение, т	1,7–2,0	0,9	2,0
Вес балластного киля, кг	—	395–408	990–1000
Максимальная высота парусности, м	11,1	9,7	10
Количество лат на гроте (максимум)	4	4	4
Число членов экипажа	3	2	3

Современные конструкции развиваются в направлении строительства более широких, с плоскими обводами, поместительных яхт, лучше обеспечивающих удобства команды в длительных плаваниях.

Яхты малого водоизмещения значительно дешевле обычных килевых яхт такой же длины: более легкая конструкция требует меньшего расхода материалов. Расходы на паруса тоже меньше, так как более легкая яхта требует меньше парусов для достижения одинаковой скорости с более тяжелой яхтой.

стр. 75

Чтобы получить достаточную площадь бокового сопротивления, вернулись к конструкции типа яхты «Волонтер» — опускному, но уже профилированному шверту. Примером яхты такого типа может служить

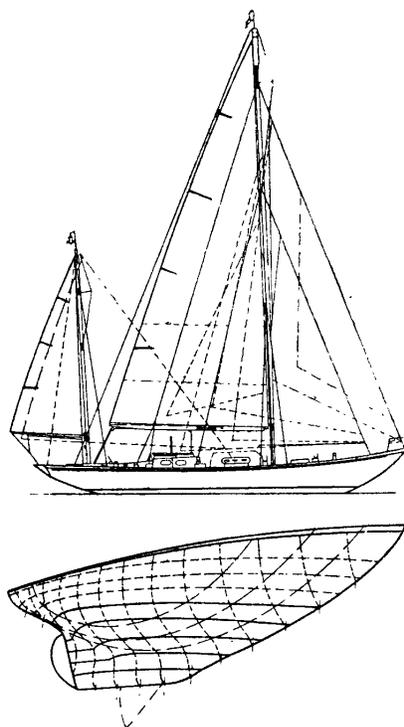


Рис. 48: Яхта «Карина»

«Карина», выигравшая гонку через Атлантический океан в 1955 г. (рис. 48). Эта яхта-компромисс (имеет неподвижный постоянный и подвижный балластный киль) спроектирована конструктором П. Л. Родсом.

Основные размеры «Карины»:

Максимальная длина . . . . .	16,3 м
Длина по ватерлинии . . . . .	11,05 м
Ширина . . . . .	3,96 м
Осадка корпуса (без шверта) . . . . .	1,83 м
Площадь парусности . . . . .	110,9 м <sup>2</sup>

По роду вооружения «Карина» — иол, а по гоночной силе относится к первому классу Британского королевского океанского клуба.

После выигрыша Атлантической гонки «Карина» была победительницей многих других международных гонок.

Примером яхт малого водоизмещения может также служить «Маус оф Мальхама», по размерам значительно уступающий «Карине». Это гоночно-крейсерский иол, построенный в 1954–1955 гг. Он принадлежит уже к третьему классу.

Основные размеры «Маус оф Мальхама»:

Максимальная длина . . . . .	9,75 м
Длина по ватерлинии . . . . .	7,3 м
Водоизмещение . . . . .	2,4 т
Балласт . . . . .	0,94 т
Осадка . . . . .	1,75 м
Площадь парусности . . . . .	29 м <sup>2</sup>

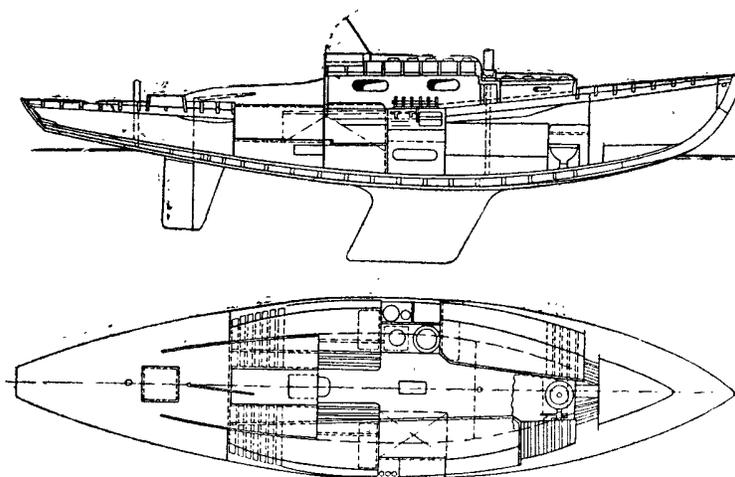


Рис. 49

Рис. 49: Конструктивный чертеж яхты «Маус оф Мальхама»

В конструкции этой яхты интересно решена задача получения достаточной площади бокового сопротивления путем крепления к килю профилированного, литого металлического плавника (шверта). Уравновешенный руль расположен далеко позади плавника (рис. 49). Все внутреннее оборудование и отделка выбирались

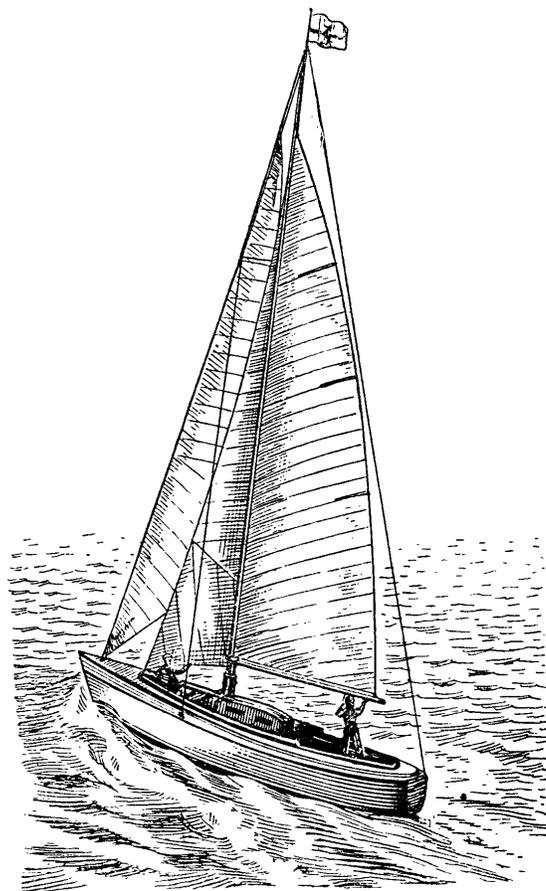


Рис. 50. Яхта «Миф оф Мальхама»

Рис. 50: Яхта «Миф оф Мальхама»

такими, чтобы максимально уменьшить вес яхты, применялись, например, легкие синтетические пенопласты для коек и т. п.

На рис. 50 показана яхта типа тендер — «Миф оф Мальхама». Стоит обратить внимание на принятое на этой яхте распределение всей площади парусности между отдельными парусами, приведенное в табл. 6.

Ясно, что не все указанные паруса нужны в каждой гонке, однако большой выбор позволяет всегда найти такие паруса, которые лучше всего подходят к условиям данной гонки.

В 1950 г. в Англии образовалось общество «Юниор Оффшор Груп» (Младшая морская команда) с целью содействия и поощрения строительства морских яхт, имеющих меньшие размеры, чем это установлено третьим классом Океанского клуба. Яхты, построенные по правилам этого общества, должны быть полностью безопасными (как и морские яхты других классов). Длина ватерлинии должна быть в пределах 5–6 м. В настоящее время имеется два класса этих яхт (четвертый и пятый), являющихся как бы продолжением классов Британского океанского клуба.

Знаменателен факт перехода через Атлантический океан яхты «Сопранино» за 28 с половиной дней: эта яхта по своим размерам относится уже к новым классам

Таблица 6: Паруса яхты «Миф оф Мальхама»

№ п/п	Название паруса	Площадь паруса, м <sup>2</sup>	Вес ткани, г/м <sup>2</sup>
0	Грот	28,3	510
1	Широкая генуя	59,0	240
2	Легкая генуя (нейлон)	48,0	50
3	Большой кливер (нейлон)	28,0	200
4	Второй кливер	17,2	460
5	Третий кливер	9,3	460
6	Генуэзский стаксель на переднем штаге	23,2	270
7	Первый стаксель	20,0	400
8	Второй штормовой стаксель	13,1	460
9	Малый стаксель (нейлон)	6,6	50
10	Большой спинакер (нейлон)	81,0	60
11	Малый спинакер	56,0	85
12	Малый кливер	23,2	360
13	Второй легкий стаксель	13,3	240
14	Штормовой триссель (лен)	11,2	420

«Юниор Оффшор Груп».

Основные размеры «Сопранино»:

Максимальная длина 6 м

Длина по ватерлинии 4,95 м

Ширина . . . . . 1,67 м

Водоизмещение . . . . . 700 кг

Площадь парусности 14,9 м<sup>2</sup>

Не трудно предвидеть большие перспективы развития этих новых классов. Дешевизна постройки и вооружения делает их доступными широкому кругу любителей парусного спорта. Владельцы таких яхт могут или участвовать в морских гонках, или уходить в далекие плавания, чтобы испытать всю прелесть морской жизни. Отличные мореходные качества этих яхт уже проверены первоклассными яхтсменами как в гонках, так и в походах.

## 3 Аэродинамика паруса

### 3.1 Основы аэродинамики паруса

стр. 80

Ветер — поэтический синоним непостоянства. «Вольный», «буйный», «шаловливый», «капризный» — эти и многие другие эпитеты присвоены ему. И в то же время именно этот неподдающийся точному учету фактор играет первостепенную роль в расчетах парусника. Постепенно было раскрыто много секретов ветра как метеорологического явления. Выяснилось также многое в области использования ветра как движущей силы, в том числе и на яхтах. Наконец удалось даже получить фотографии ветрового потока, снятые в практически интересных условиях.

Теперь, зная ряд законов, которым подчиняется ветер, казалось бы, остается заставить его работать на человека, построив для этого самое совершенное оборудование. Однако использовать полностью энергию ветра не удастся: приходится уступать его «капризам».

Следовательно, нельзя не считаться с прихотями ветра, надо стараться их предвидеть и к ним принаравливаться. Яхтмены используют ветер как движущую силу яхты, но выгоды от этого целиком зависят от неумолимых законов погоды.

Изучением действия ветра на тело (предметы, строения и т. п.) занимается наука *аэродинамика*; ветер как элемент погоды изучает *метеорология*. В дальнейшем аэродинамическими мы будем называть силы, которые действуют на тело, находящееся в воздушном потоке.

Ветер — горизонтальное движение воздушных масс. Воздух — газ, имеющий массу и вес: при температуре  $15^\circ$  и давлении 760 мм 1 м<sup>3</sup> воздуха весит 1,225 кг.

стр. 81

Это значит, что удельный вес воздуха  $\gamma = 1,225$  кГ/м<sup>3</sup>, а удельная масса воздуха

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1,225}{9,81} = 0,125 \text{ кГ/сек}^2/\text{м}^4,$$

где  $g = 9,81$  м/сек<sup>2</sup> (ускорение силы земного притяжения).

Кинетическую энергию воздушного потока можно выразить формулой:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \frac{\gamma \cdot v^2}{2g},$$

где:  $m$  — масса тела,  $v$  — скорость движения.

Действие ветра — это проявление воздействия кинетической энергии движущегося воздушного потока. Часто, руководствуясь здравым смыслом, можно предвидеть результат действия ветра в том или ином случае. Но нередко наши рассуждения и здравый смысл приводят к ошибочным выводам.

Посмотрим на рис. 51,1. На две крыши разной формы действует ветер, дующий со скоростью  $v_w = 20$  м/сек. Какая же крыша будет быстрее сорвана ветром? Казалось бы, высокая крыша должна быть сорвана раньше. На самом деле менее прочна низкая крыша.

Другой пример. На два паруса одинаковой формы и площади действует ветер со скоростью  $v_w$  (рис. 51,2). Один парус стоит к ветру под углом  $15^\circ$ , другой — под углом  $90^\circ$ . Спрашивается, на котором из них возникнут большие аэродинамические силы? По «здравому смыслу», на втором парусе, а на самом деле — наоборот.

На рис. 51,3 показаны лодки, стоящие на буйках  $A$  и  $B$ . Река течет со скоростью  $v_n$ . Спрашивается, как будут вести себя лодки, если их приближать друг к другу, как показано стрелками? Многие ответят, что вода между лодками будет отталкивать их друг от друга, и чем лодки ближе, тем сильнее. Однако практика показывает обратное: лодки притягиваются друг к другу, и тем сильнее, чем меньше между ними расстояние. Незнание этого явления (притяжение двух кораблей) приводило к катастрофам. Поэтому морскими законами теперь установлены обеспечивающие безопасность минимальные расстояния между кораблями, идущими встречными курсами с большой скоростью.

стр. 82

Почему так происходит, будет ясно из последующего изложения. Сейчас заметим только, что в объяснениях явлений аэродинамики, как и гидродинамики, нельзя полагаться только на «здравый смысл». Чтобы правильно разобраться в происходящем, надо рассмотреть действие ветра или потока воды с точки зрения законов физики.

### 3.2 Уравнение Бернулли

Основной закон аэродинамики выражен уравнением Бернулли<sup>8</sup>. Применяя это уравнение, можно уяснить себе не только работу паруса, но и полет птиц, самолетов, возникновение волн около плывущего корабля, увеличение осадки корпуса при движении корабля и т. п. Уравнение Бернулли выведено для идеальной жидкости, т. е. абсолютно несжимаемой и не имеющей вязкости. Упругие явления (явление сжатия воздушного потока) наступают только при скоростях, превышающих скорость звука — 300 м/сек. Практически скорость ветра во много раз меньше скорости звука, и потому воздушный ветровой поток можно рассматривать как идеальную жидкость.

стр. 83

Однако и ветер и вода имеют определенную вязкость, которой нет у идеальной, условной, жидкости. Поэтому уравнение Бернулли не позволяет создать точную картину фактического обтекания воздухом паруса или водой корпуса яхты. Тем не менее расхождение теории с практикой в данном случае не столь велико и уравнение Бернулли вполне применимо.

Рассматривая движение идеальной жидкости, удобно пользоваться ограниченным участком — струей данной жидкости. Струю можно представить как участок жидкости, ограниченный линиями тока (линиями, представляющими траектории) частиц жидкости, движущихся с определенной скоростью (рис. 52). Представим себе, что через трубу переменного сечения протекает струя жидкости, имеющая на входе сечение  $S_1$ , скорость  $v_1$  и давление  $p_1$  (рис. 53). В единицу времени через сечение  $S_1$  протечет масса жидкости, равная  $Q$ , которую можно определить по формуле:

$$Q = S_1 \cdot v_1 \cdot \rho.$$

В сечении  $S_2$  за то же время  $t$  должно протечь то же количество жидкости:

$$Q = S_2 \cdot v_2 \cdot \rho.$$

стр. 84

<sup>8</sup>Даниил Бернулли (1700–1782) — русский ученый, прославившийся своими исследованиями в области гидродинамики, механики и акустики (*Прим. перев.*).

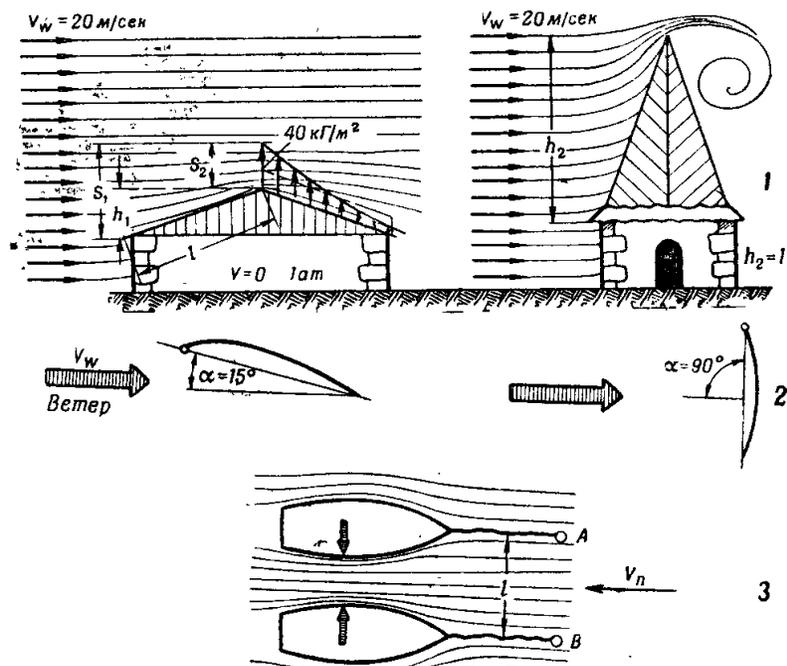


Рис. 51: Примеры действия воздушного и водного потоков: 1 — две крыши; 2 — два паруса; 3 — две лодки на буюх



Рис. 52: Струя жидкости: частичка струи, линия течения,  $V$  — скорость частицы струи

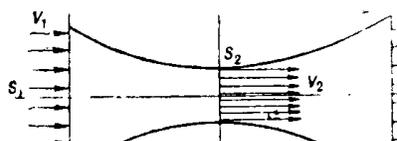


Рис. 53: Труба переменного сечения

Поскольку количество протекшей жидкости в обоих сечениях одинаково, получаем:

$$S_1 \cdot v_1 \cdot l = S_2 \cdot v_2 \cdot \rho.$$

Так как удельный вес массы жидкости  $\rho$  за это время не изменился, исключаем его из обеих частей равенства и получаем:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2.$$

Это уравнение называется *уравнением неразрывности потока*. Оно показывает, что скорость потока изменяется обратно пропорционально его сечению: если сечение  $S_2$  в два раза меньше  $S_1$ , то скорость в нем в два раза больше. Очевидно, в сечении  $S_3$ , равном  $S_1$ , скорости потока одинаковые  $v_1 = v_3$ . При возрастании скорости растет и кинетическая энергия; следовательно, кинетическая энергия потока в различных сечениях будет разной.

Но энергия не возникает из ничего, один ее вид может перейти в другой. Рост кинетической энергии потока мог произойти только в результате работы, произведенной давлением  $p_1$  на участке трубы  $S_1$  и  $S_2$ .

Уравнение Бернулли определяет характер и величину изменений энергии, происходящих в потоке идеальной жидкости. Наглядно это можно представить следующим образом (рис. 54).

Через трубку переменного сечения течет жидкость под статическим давлением  $p_1$ . Допустим, что в сечении  $S_1$  скорость потока равна  $v_1$ . В сечении  $S_2$  скорость  $v_2$  больше, так как  $S_2$  меньше  $S_1$ .

Частица жидкости одинакового объема, например  $1 \text{ см}^3$  в точке 1 сечения  $S_1$ , во-первых, обладает энергией положения по отношению к уровню 0–0; энергия эта будет тем больше, чем выше точка 1 или чем больше  $h_1$ . Энергию положения можно выразить как  $\gamma \cdot h_1$  (см. рис. 54). Во-вторых, частица находится под статическим давлением  $p_1$ , под действием которого она движется. В-третьих, частица обладает некоторой кинетической энергией, так как она движется со скоростью  $v_1$ ; кинетическую энергию можно выразить формулой, определяющей скоростной напор:

$$q = \frac{\gamma \cdot v_1^2}{2g}.$$

В положении 2 скоростной напор частицы возрастает за счет уменьшения энергии положения или статического напора. Бернулли удалось выразить математически зависимость скоростного напора, потенциальной энергии и давления в идеальной среде следующим уравнением:

$$\frac{\gamma \cdot v_1^2}{2g} + \gamma \cdot h_1 + p_1 = \frac{\gamma \cdot v_2^2}{2g} + \gamma \cdot h_2 + p_2.$$

Теорему Бернулли можно сформулировать так: при установившемся движении идеальной жидкости сумма энергий кинетической, потенциальной и давления есть величина постоянная. Следовательно:

$$\frac{\gamma \cdot v^2}{2g} + \gamma \cdot h + p = \text{const.}$$

Другими словами, энергия потока, выражающаяся в трех видах, кинетической, потенциальной и давлений, может изменяться в пределах этих видов, переходя из одного в другой или обратно, но суммарно оставаясь одной и той же. Необходимо подчеркнуть, что эта зависимость установлена для случая спокойного, незавихренного течения жидкости, называемого *ламинарным*.

### 3.3 Возникновение аэродинамической силы на парусе

Когда движение происходит на одном и том же постоянном уровне, уравнение Бернулли упрощается:

$$\frac{\gamma \cdot v^2}{2g} + p = \text{const},$$

откуда следует, что сумма кинетической энергии и давления будет постоянной. Именно эта формула применима для парусника, так как ветровой поток воздуха, действующий на парус, в общем, следует считать параллельным поверхности воды.

Применим уравнение Бернулли для вычисления статического и динамического давлений воздушного потока в сопле (рис. 55). Примем скорость воздуха в сечении  $S_1$  равной 20 м/сек, а статическое давление — 760 мм ртутного столба (нормальное атмосферное давление). Сечение  $S_2$  по площади в два раза меньше  $S_1$ . В соответствии с положением о непрерывности потока скорость  $v_2$  должна быть 40 м/сек, потому что:

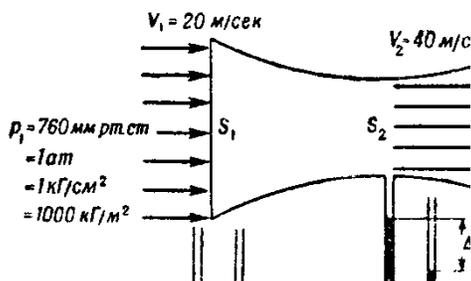


Рис. 55: Давления в сопле

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2.$$

Но  $S_2 = \frac{1}{2}S_1$ , значит  $S_1 \cdot v_1 = \frac{1}{2}S_1 \cdot v_2$ ,  
или  $v_2 = 2v_1$ .

Подставляя соответствующие значения в уравнение Бернулли для сечений  $S_1$  и  $S_2$ , получим:

$$p_1 + \frac{\gamma \cdot v_1^2}{2g} = p_2 + \frac{\gamma \cdot v_2^2}{2g}, \quad \text{или} \quad 10\,000 + \frac{1,225 \cdot 20^2}{2 \cdot 9,81} = p_2 + \frac{1,225 \cdot 40^2}{2 \cdot 9,81}.$$

Теперь можно легко вычислить величину статического давления в сечении  $S_2$ . Произведя вычисления, получим:

$$p_2 = 9925 \text{ кг/м}^2.$$

Понижение статического давления в сечении  $S_2$  будет:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 10\,000 - 9925 = 75 \text{ кг/м}^2.$$

Разницу ( $75 \text{ кГ/м}^2$ ) давления в сечении  $S_2$  и атмосферного можно установить с помощью манометра, одним концом присоединенного к соплу в плоскости  $S_2$ , а другим сообщающегося с атмосферой. Теперь следует сделать практический вывод: каждому увеличению скорости ветра (в определенном потоке) должен соответствовать одновременный спад статического давления, что вызывает явление так называемого *подсоса*, или *засасывания*.

Вернемся к примеру с двумя крышами, подвергающимися действию сильного ветра (см. рис. 51,1). На коньке плоской крыши будут возникать в результате сужения струи ветра явления, аналогичные рассмотренным нами в сопле. Из-за увеличения скорости ветра там образуется область пониженного давления, т. е. появляется сила, стремящаяся оторвать крышу. Внутри здания сохранится атмосферное давление, так как скорость ветра  $v = 0$ . Для примерного расчета возьмем уменьшение сечения (площади) потока ветра крышей, равное  $1/2 S_1$ , тогда на каждый метр крыши может действовать среднее давление, срывающее крышу, — около  $20 \text{ кГ/м}^2$ . При размерах крыши  $80 \text{ м}^2$  сила, срывающая ее, была бы равна  $80 \times 20 = 1600 \text{ кГ}$ .

Обратимся ко второму случаю с высокой крышей. Здесь наблюдаются другие явления: вместо последовательного, спокойного уменьшения площади воздушного потока при плоской крыше, — резкое изменение площади, вызывающее образование вихревого, турбулентного движения масс воздуха. На крышу действует динамический напор ветра, определяемый формулой:

$$q = \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} = \frac{1,225 \cdot 20^2}{2 \cdot 9,81} = \frac{400}{16} = 25 \text{ кГ/м}^2.$$

Если обе крыши имеют одинаковую площадь, то высокая испытывает давление ветра только одной стороной — на площади  $40 \text{ м}^2$ . Отсюда сила, стремящаяся сорвать крышу, равна  $40 \cdot 25 = 1000 \text{ кГ}$ , т. е. значительно меньше, чем в случае с плоской крышей. К этим выводам давно пришли на основании наблюдений и опыта, жители Татр: они строят дома с крутыми крышами.

Паруса, поставленные под разными углами к ветру, подчиняются тем же законам (см. рис. 51, 2). Находящийся в воздушном потоке парус вызывает изменение скорости и направления этого потока. В соответствии с уравнением Бернулли изменение скорости будет сопровождаться изменением статического давления (рис. 56, 1). В точке  $O$  воздушный поток  $S-S$  делится на два: подветренный  $S_z$  и наветренный  $S_n$ . Поскольку площадь сечения для подветренного потока уменьшается и будет меньше, чем у наветренного, скорость ветра там  $v_z$  больше, чем начальная скорость  $v$ . Соответственно статическое давление на подветренной стороне  $p_z$  меньше атмосферного  $p$ . Наоборот, на наветренной стороне

скорость ветра  $v_n$  меньше начальной скорости  $v$ , а статическое давление  $p_n$  соответственно больше атмосферного  $p$ . На подветренной стороне будет возникать разрежение, или «подсасывание», а на наветренной, наоборот, — повышенное давление, превышающее атмосферное. В результате разницы в давлении на обеих сторонах паруса образуется некоторая результирующая сила  $p$ , представляющая собой сумму единичных составляющих давлений  $p_n$  и  $p_z$ , показанных на рис. 56, 2.

Основываясь на уравнении Бернулли, возникновение на парусе аэродинамических сил можно объяснить следующим образом. При движении ветра вдоль паруса вокруг него возникает как бы вращение воздуха с некоторой скоростью  $v_c$

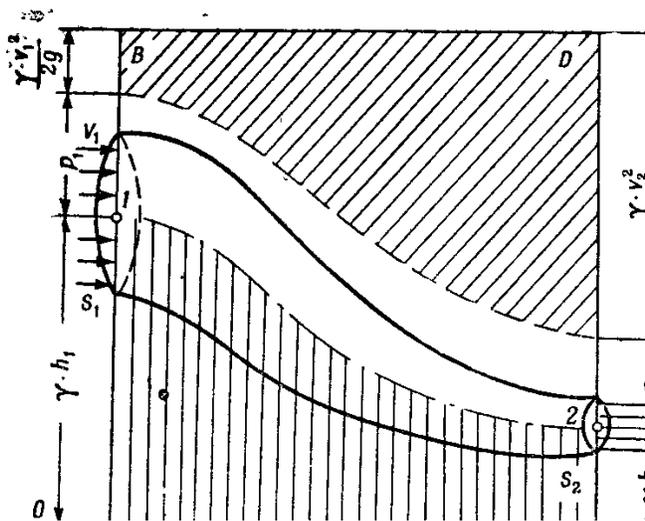


Рис. 54: Графическая иллюстрация уравнения Бернулли

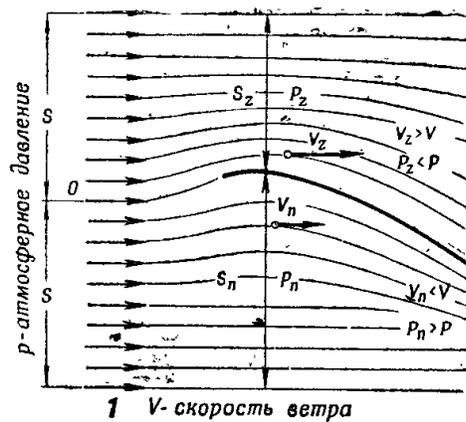


Рис. 56: Давления на парусе: 1 — распределение скоростей и давлений; 2 — результирующая сила; 3 — циркуляционное движение воздуха

(рис. 56,3). Складываемая скорость равномерного движения воздуха  $v$  (скорость ветра, считая ее постоянной) со скоростью циркуляционного движения  $v_c$ , получаем полную картину скоростей и давлений на поверхность паруса, которая может объяснить возникновение аэродинамических сил.

Любопытно, что теоретическое представление о существовании циркуляционного движения воздуха вокруг паруса, казалось бы противоречащее здравому смыслу, подтверждается специальными опытами.

Простой опыт позволит убедиться в этом. Укрепите кусочек волнистого картона шпилькой на тупом конце карандаша (рис. 57, 1). Если под этим кусочком двигать лист картона в направлении  $V$ , как показано на рисунке, то волнистый картон в результате возникшей циркуляции воздуха обнаружит тенденцию к отклонению в противоположном направлении  $V_c$ . При отсутствии циркуляции кусочек волнистого картона под влиянием трения воздуха должен был бы поворачиваться в одном и том же направлении с нижним листом картона.

Положения теории циркуляции наглядно иллюстрируются экспериментом, впервые проделанным физиком Магнусом (1852 г.). Он установил, что на валу, вращающемся со скоростью  $\omega$  под действием ветра, дующего со скоростью  $v$ , возникает сила  $P$ , направленная перпендикулярно оси вала и направлению ветра (рис. 57, 2).

Это явление названо «эффектом Магнуса». На основании «эффекта Магнуса» инженер Флетнер построил роторное судно, не нашедшее, однако, практического применения из-за нерентабельности. Открытие Магнуса широко было использовано русским ученым Н. Е. Жуковским при разработке вопросов аэродинамики.

Среди парусников распространено мнение, что на наветренной стороне паруса воздух испытывает сжатие. Это мнение ошибочное: сжатие воздуха под влиянием движения происходит только при скорости, превышающей скорость звука — 300 м/сек. Единственная причина возникновения аэродинамической силы — изменение форм энергии ветра, вызванное парусом, причем плотность ветра не меняется.

### 3.4 Разложение давлений на парусе

Величину давлений на наветренной и подветренной сторонах паруса можно измерить с помощью простейших манометров. Такие измерения проводились и в лабораториях на моделях, и в естественных условиях непосредственно на плавающей яхте. На американской яхте «Paroose» такие измерения были выполнены при помощи спиртовых манометров, соединенных резиновыми трубками с местами замера (рядом отверстий) на поверхности паруса. При определенном угле установки паруса к направлению ветра сперва замеряли давление на наветренной стороне, а потом, переменяв галс, — на подветренной. Величина давлений указывается ма-

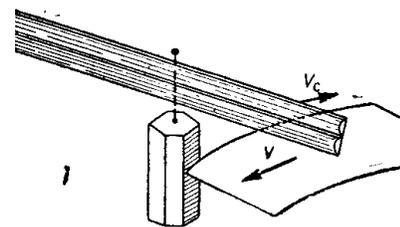


Рис. 57: 1 — опыт с волнистым картоном; 2 — эффект Магнуса

нометрами в миллиметрах воды или спирта. Замеры дают разницу между давлением, образующимся на подветренной стороне паруса, и атмосферным давлением. 1 мм водяного столба соответствует давлению  $1 \text{ кГ/м}^2$ .

стр. 91

Полученные таким путем значения положительных и отрицательных давлений (отрицательным будем называть давление меньше атмосферного) можем изобразить в виде графика в каком-либо произвольном масштабе. Соединив концы отрезков — векторов измеренных давлений плавной кривой, получим график распределения давлений

на обеих сторонах паруса. График измеренных давлений можно изобразить так, как это сделано на рис. 56, 2.

Описанный экспериментальный путь определения давлений на парусе позволяет установить не только их величину, но и распределение по поверхности паруса. Увеличив количество замеров, распределенных по всей площади паруса, можно получить подробную картину работы полной поверхности всего паруса.

стр. 92

На рис. 58 наглядно дано распределение давлений на наветренной и подветренной сторонах бермудского паруса при скорости ветра  $v_w = 10 \text{ м/сек}$ .

На рис. 58, I показано распределение давлений в сечении  $AB$  при угле атаки  $\alpha = 15^\circ$  на обеих сторонах паруса.

На рис. 58, II дана такая же картина для подветренной стороны паруса, построенная на основании замеров, произведенных по сечениям на различных уровнях (1, 2, 3, 4, 5).

На рис. 58, III дано распределение давлений вдоль сечения  $CD$  при угле атаки  $\alpha = 90^\circ$ , т. е. для курса фордевинд.

Рис. 58, IV показывает распределение давлений по наветренной стороне этого паруса (метод производства замеров аналогичен описанному выше).

График на рис. 58, I построен на основании измерений, сделанных в натуральных условиях, и отличается от графика на рис. 56, 2, построенного по результатам замеров, сделанных на парусе без мачты. Излом кривой в области пониженного давления на рис. 58, I объясняется воздействием мачты, которое она оказывает на форму воздушного потока.

На рис. 59 показано обтекание воздушным потоком мачты и распределение возникающих при этом давлений. На рисунке видно, что места максимального разрежения расположены на сторонах мачты, обтекаемой ветром с наибольшей скоростью. Позади этого пространства образуются завихрения, поглощающие часть энергии ветра. Эти завихрения, а также связанная с ними потеря энергии и служат причиной излома линий давлений на рис. 58, I и II.

стр. 93

Вернемся к рис. 58. Не трудно видеть, что суммарная аэродинамическая сила, возникающая на парусе, тем больше, чем больше площади давлений на наветренной и подветренной сторонах паруса. При острых углах атаки и незавихренном (ламинарном) потоке аэродинамическая сила складывается на  $1/3$  из напора на наветренной и на  $2/3$  из разрежения на подветренной сторонах паруса. Наибольшая аэродинамическая сила образуется именно при незавихренном потоке. Для хорошей постановки и управления парусами на острых курсах рулевой должен знать сущность физических явлений, происходящих на парусе. Такие знания всегда помогут ему получить максимальную силу тяги, а следовательно, и большую скорость яхты.

Пример влияния мачты на образование силы тяги показывает, что величина

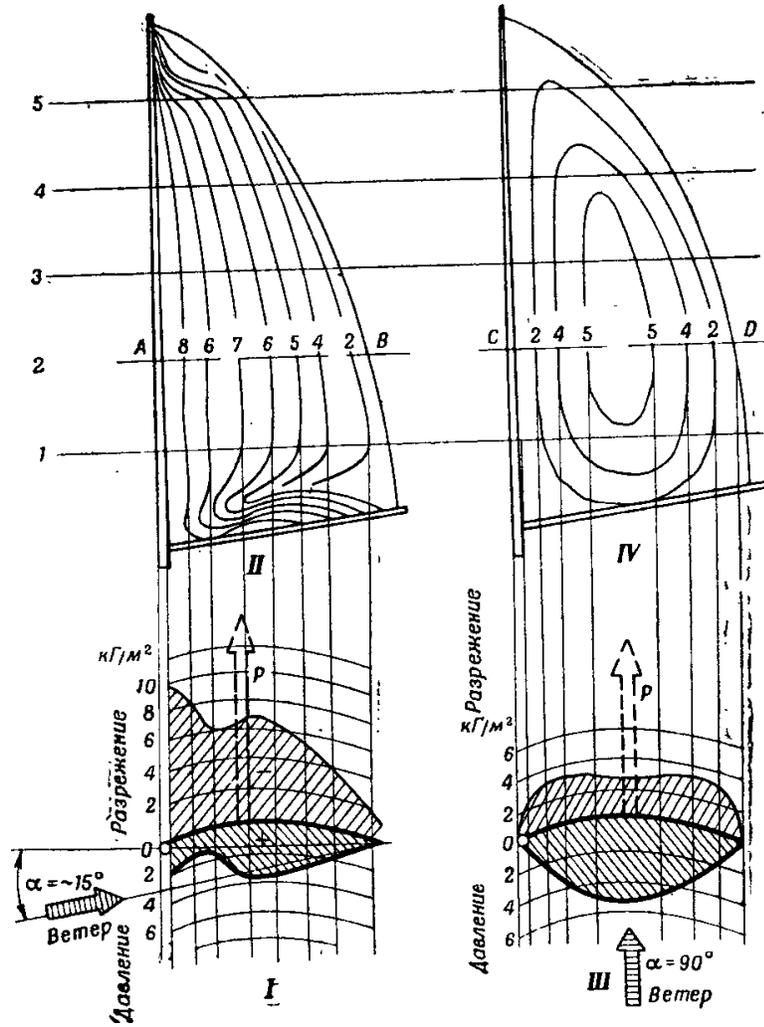


Рис. 58: Распределение давлений на бермудском парусе: *I* — давления в сечении *AB* при  $\alpha = 15^\circ$ ; *II* — давления на подветренной стороне; *III* — давления в сечении *CD* при  $\alpha = 90^\circ$ ; *IV* — давления на наветренной стороне при  $\alpha = 90^\circ$

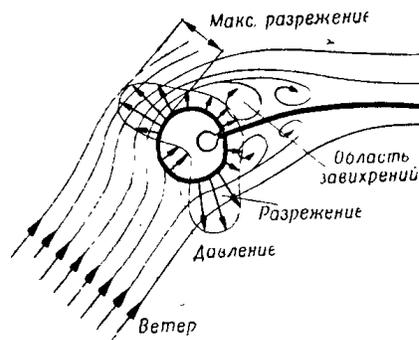


Рис. 59: Обтекание мачты воздушным потоком

давлений на обеих сторонах паруса в значительной степени зависит от характера воздушного потока. Завихрение потока бесполезно поглощает часть динамической энергии и заметно уменьшает величину как напора, так и разрежения, что, в свою очередь, вызывает уменьшение аэродинамической силы. Бесполезные потери энергии на завихрения возникают не только от мачты. Они могут появиться в результате плохой, негладкой установки лат, морщин и других неровностей на парусе и т. п.

В сумме такие, казалось бы незначительные, причины в большей или меньшей степени снижают коэффициент полезного действия паруса и оказывают тем самым заметное влияние на гоночные качества вооружения. Упомянутые недостатки или пороки паруса видны на глаз, но бывают случаи, что видимых пороков нет, а парус работает неудовлетворительно. Тогда надо обратить внимание на плавность формы паруса. Правильно скроенный и сшитый парус должен иметь равномерную умеренную выпуклость — «пузо» — по всей своей поверхности (рис. 60, I). Гонщики говорят о таком парусе: «лежит, как ложка». Только с таким парусом удается добиться незавихренного обтекания на острых углах встречи паруса с ветром. В широких пределах яхтенных курсов, от бейдевинда до бакштага (см. рис. 60, II), парус устанавливается под острым углом к ветру. В пределах этих курсов огромное влияние на работу паруса оказывает состояние его поверхности. Часто можно видеть паруса, поверхность которых выглядит

, как на рис. 60, b–e. На парусах с такой поверхностью образуются вихревые потоки, и аэродинамическая сила уменьшается. Коэффициент полезного действия паруса при малых углах атаки сильно зависит от состояния поверхности паруса, особенно его первой половины на подветренной стороне. Здесь образуются наибольшие разрежения, влияющие на работу остальной части паруса.

Узнать, как распределяется давление воздушного потока на обеих сторонах паруса, можно с помощью простого прибора — аэродинамического лота. Он состоит из тонкой металлической трубки диаметром 1–1,5 мм, один конец которой запаян, а другой посредством резиновой трубки присоединен к спиртовому манометру. На небольшом расстоянии от запаянного конца трубки просверливается отверстие (рис. 61). Для устройства спиртового манометра надо взять стеклянную трубку, согнуть ее и укрепить на доске, покрытой миллиметровой бумагой, как показано на рис. 61, внизу. Во время замеров металлическая трубка на длинной рейке поднимается к месту замера, устанавливается у самой поверхности паруса осью параллельно направлению ветра. Отсчет на манометре покажет разницу между величиной замеренного давления и атмосферным давлением. Конечно, исследования, проведенные с помощью описанного прибора, будут иметь ориентировочный характер, но они могут быть по-

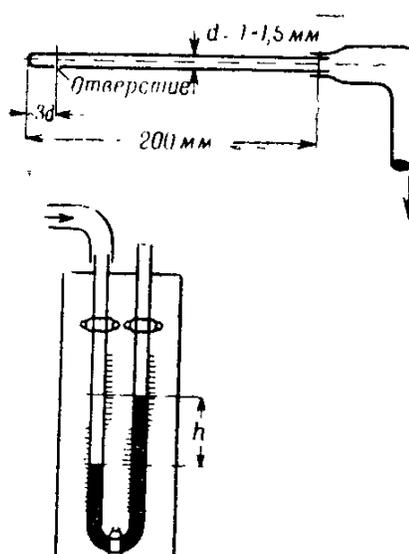


Рис. 61: Аэродинамический лот

лезными для усвоения основ работы паруса, наивыгоднейших условий совместной работы грота и стакселя и т. п. Все это необходимо знать, так как быстрый рост уровня парусного спорта во всем мире требует от гонщиков обязательного усвоения теоретических знаний.

### 3.5 Измерение аэродинамической силы паруса

В предшествующих главах было установлено, что аэродинамическая сила возникает в результате благоприятного распределения давлений на обеих сторонах паруса. Эта качественная сторона вопроса не позволяет, однако, выяснить такие важнейшие количественные характеристики, как скорость хода яхты, способность идти круто к ветру, остойчивость и др. Предвидеть результаты действия аэродинамической силы можно только, если известны следующие данные: а) величина силы, б) направление ее действия и в) точка приложения или линия действия силы.

На основании многочисленных экспериментов, проведенных в естественных и лабораторных условиях, установлено, что вышеупомянутые характеристики аэродинамической силы зависят от:

а) динамического давления ветра (скоростного напора), определяемого по уже известной на формуле:  $q = \frac{\gamma \cdot v^2}{2g}$ ;

б) площади паруса  $S$ , м<sup>2</sup>;

в) угла установки паруса относительно направления ветра, или так называемого угла атаки  $\alpha$ ;

г) формы паруса и его полноты («пузатости»).

Говоря о форме паруса, следует всегда иметь в виду отношение высоты паруса к ширине, так сказать — вытянутость, удлиненность паруса. Для прямоугольного (рейкового) паруса оно определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{L}{l},$$

где  $L$  — высота паруса, м,  $l$  — длина паруса по хорде, м (рис. 62).

Для треугольных парусов, гафельных или гуари, у которых на разной высоте ширина меняется, характеристика их удлиненности, или вытянутости, определяется следующим способом:

$$\lambda = \frac{L}{l} \cdot \frac{L}{L} = \frac{L^2}{S},$$

где:  $S$  — площадь паруса, м<sup>2</sup>.

«Пузатость» паруса  $W$  определяется как отношение высоты образуемого «пузом» свода  $f$  к длине хорды профиля  $l$ .

$$W = \frac{f}{l}.$$

Динамическое давление ветра и площадь паруса легко вычислить, если известны скорость ветра и размеры паруса. Наоборот, очень трудно определить влияние формы паруса и угла атаки на величину аэродинамической силы. Для этого надо

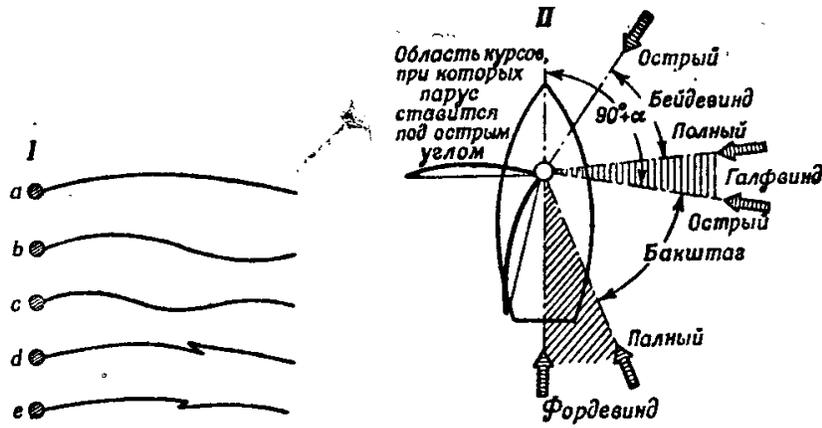


Рис. 60: I — профили паруса: a — правильный, b-e — неправильные; II — область курсов, при которых парус ставится под острым углом

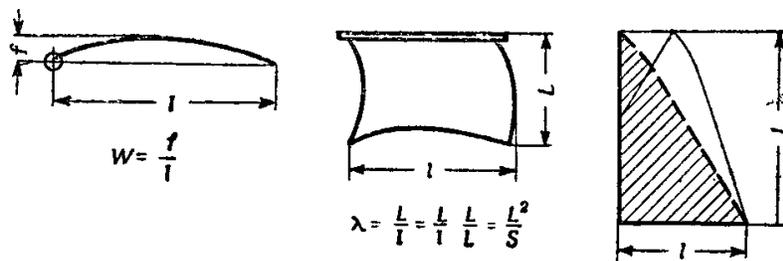


Рис. 62: Удлинение и пузатость паруса:  $W = f/l$ ;  $\lambda = L/l = L^2/S$

знать аэродинамический коэффициент паруса  $C$ , который находится только экспериментальным путем в аэродинамических трубах.

В результате продувок паруса в аэродинамической трубе определяют аэродинамический коэффициент при различных углах атаки; чаще всего выражают эту зависимость графически.

### Способ измерения аэродинамической силы паруса

Эмпирическая формула определения аэродинамической силы паруса имеет следующий вид:

$$P = \frac{\gamma \cdot v^2}{2g} \cdot S \cdot C.$$

Подставляя в выражение  $\frac{\gamma \cdot v^2}{2g}$  известные нам величины

$$\gamma = 1,225 \text{ кГ/м}^3, \quad g = 9,81 \text{ м/сек}^2,$$

которые на уровне моря можно принять за постоянные, получим:

$$\frac{\gamma \cdot v^2}{2g} = \frac{1,225 \cdot v^2}{2 \cdot 9,81} = \frac{v^2}{16}.$$

Теперь общий вид формулы аэродинамической силы будет таким:

$$P = \frac{v^2}{16} \cdot S \cdot C,$$

где:  $v$  — скорость ветра, м/сек,  $S$  — площадь паруса, м<sup>2</sup>,  $C$  — коэффициент аэродинамической силы.

Аэродинамический коэффициент получают на основании продувок в трубах уменьшенных моделей, представляющих в масштабе копию нормального паруса. Измерения в аэродинамической трубе проводятся следующим образом: испытываемую модель помещают в измерительную камеру трубы в ветровой поток. Скорость ветра может регулироваться оборотами вентилятора. С помощью рычажков или тяг модель устанавливается в определенном положении таким образом, что возникающая на парусе сила регистрируется на динамометре. Непосредственное определение аэродинамической силы  $P$  довольно сложно в смысле технического устройства передачи на динамометр. Поэтому измеряют непосредственно две силы:  $P_z$ , перпендикулярную направлению ветра, и  $P_x$ , параллельную направлению ветра. Найдя значение сил  $P_z$  и  $P_x$ , легко определить величину равнодействующей силы  $P$  ( $P = \sqrt{P_z^2 + P_x^2}$ ). На рис. 63, 2 и 3 показана схема устройства для определения сил  $P_z$  и  $P_x$ .

В аэродинамических трубах испытывают не только модели парусов, но и модели яхт, определяют влияние близко идущей другой яхты и т. п. (рис. 64).

Вышеописанный метод позволяет измерять силы  $P_z$  и  $P_x$  при углах атаки в пределах от 0 до 90° через каждые 5°.

Если модель паруса изготовлена из полотна, то определяется угол, при котором парус перестает «полоскаться» и начинает наполняться ветром. Измерения производятся при постоянной скорости ветра.

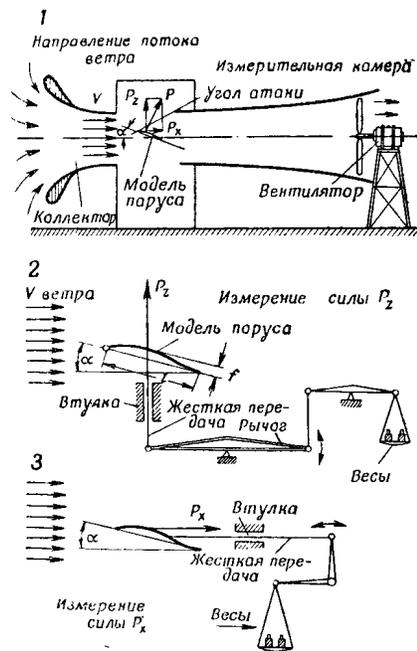


Рис. 63

Рис. 63: Схема измерения аэродинамических сил в аэродинамической трубе: 1 — общая схема; 2 — измерение силы  $P_z$ ; 3 — измерение силы  $P_x$

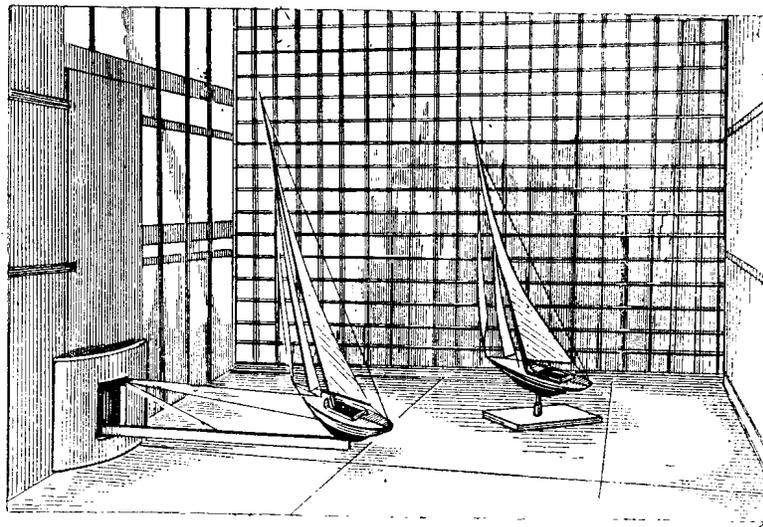


Рис. 64. Измерение аэродинамических сил в положении правильной подветренной позиции

Рис. 64: Измерение аэродинамических сил в положении правильной подветренной позиции

## Полярные кривые парусов

Измерив величины сил  $P_z$  и  $P_x$ , не трудно графически определить величину равнодействующей силы  $P$ . Для этого на оси координат  $y-y$  откладываем значения силы  $P_z$

и на оси  $x-x$  значения силы  $P_x$ . Величины сил  $P_z$  и  $P_x$  отмечаем поочередно для одинаковых углов  $\alpha = 5, 10, 15, 20, 25, 30^\circ$  и т. д. до  $90^\circ$  (рис. 65).

стр. 100

Получаем ряд точек для углов  $5, 10, 15^\circ$  и т. д., которые можно представить в одной какой-то системе координат и затем по этим точкам построить кривую (рис. 66). Полученная таким способом кривая называется полярной аэродинамической силы паруса. С помощью этой кривой определяются величина и направление аэродинамической силы паруса для любого угла атаки.

Величину и направление аэродинамической силы для каждого угла атаки укажут векторы, проведенные из точки  $O$  к соответствующей точке на кривой; так, для угла атаки  $15^\circ$  величина и направление силы  $P$  выражается отрезком  $OA$ , для угла атаки  $25^\circ$  —  $OB$ .

Построенная таким образом кривая (поляра) пригодна только для выяснения аэродинамической силы модели паруса, которая имела определенную площадь  $S$  и испытывалась при определенной скорости ветра  $v$ .

Возникает вопрос, каким путем можно использовать результаты исследования моделей для определения аэродинамической силы обычного паруса натуральной величины при различных скоростях ветра. Это делается посредством применения некоторого отвлеченного множителя, называемого аэродинамическим коэффициентом  $C$ . Зная аэродинамическую силу модели, можно определить аэродинамический коэффициент  $C$  сравнительно простым вычислением по формуле, уже известной из предыдущего материала:

стр. 101

$$P = \frac{v^2}{16} \cdot S \cdot C, \quad \text{откуда} \quad C = \frac{P \cdot 16}{v^2 \cdot S},$$

где:  $P$  — величина в кГ аэродинамической силы модели паруса для определенного угла атаки, взятая по полярной кривой,  $v$  — скорость ветра во время измерения, м/сек,  $S$  — площадь модели паруса, м<sup>2</sup>.

На рис. 66 даны две кривые аэродинамических коэффициентов  $C$ , полученные в результате исследований, выполненных в Геттингенском институте. Исследовались жесткие паруса, изготовленные из жести. Первая кривая построена по результатам исследования совершенно плоского паруса  $I$ , вторая  $II$  паруса, имевшего выпуклость («пузо»), равную  $\frac{1}{10}$ . Площадь обоих парусов была одинаковой, отношение высоты к ширине, т. е. удлиненность обоих парусов, была равна 5. Уже беглое знакомство с кривыми показывает большое влияние «пузатости» паруса на величину коэффициента  $C$ , а значит, и на величину аэродинамической силы паруса. Сравнение коэффициентов для обоих парусов позволяет оценить величину и направление действия аэродинамической силы для парусов, работающих в одинаковых ветровых потоках.

Рассматривая кривую  $II$  для «пузатого» паруса, заметим, что коэффициент аэродинамической силы, значения которого отложены по линии  $C$ , изменяется по величине в зависимости от угла атаки  $\alpha$ . Максимальное значение  $C$  получает при

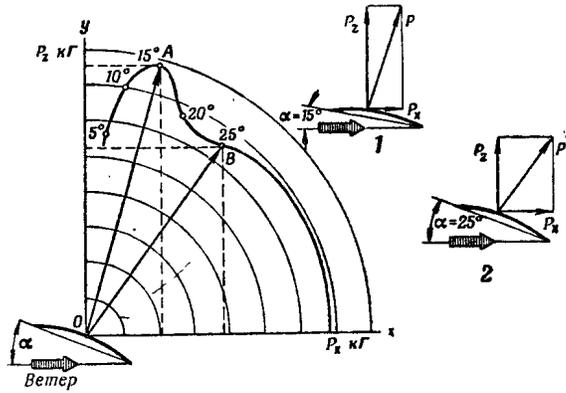


Рис. 65

Рис. 65: Полярная кривая аэродинамической силы: 1 — разложение силы при  $\alpha = 15^\circ$ ; 2 — разложение силы при  $\alpha = 25^\circ$

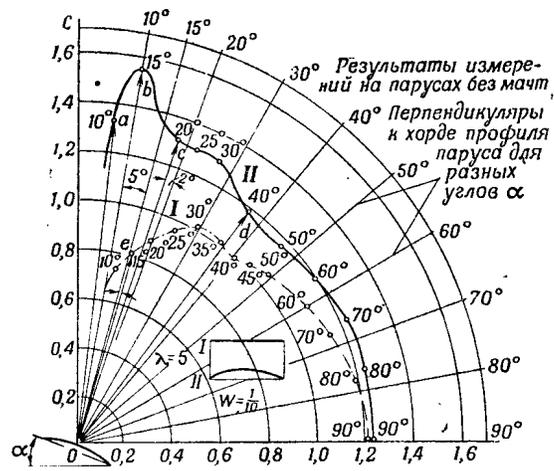


Рис. 66: Полярные кривые аэродинамических коэффициентов: I —  $\lambda = 5$ ,  $W = 1/10$ ; II — результаты измерений на парусах без мачт. Перпендикуляры к хорде профиля паруса для разных углов  $\alpha$

угле атаки  $\alpha \approx 15^\circ$ , а затем с увеличением угла атаки значение  $C$  быстро уменьшается. Взятые последовательно отрезки  $Oa$ ,  $Ob$ ,  $Oc$  и  $Od$  позволяют оценить величину аэродинамических сил при углах атаки  $\alpha$ , равных 10, 15, 20 и  $40^\circ$ . Эти результаты более наглядно показаны на рис. 67. Не трудно видеть, что установка паруса под разными углами атаки оказывает большое влияние на ход яхты.

стр. 102

В зависимости от того, насколько выбраны шкоты, на парусе возникает большая или меньшая сила, а также меняется направление ее действия. Чрезмерно выбранные или потравленные шкоты сильно уменьшают аэродинамическую силу паруса.

### Ламинарный и турбулентный потоки

Опытами установлено, что причиной уменьшения коэффициента  $C$  служит отрыв воздушных струй от обтекаемой поверхности на подветренной стороне паруса. Было найдено, что наибольшую величину коэффициент  $C$  имеет при угле атаки  $15^\circ$ . При углах атаки меньше  $15^\circ$  на подветренной стороне паруса наблюдается устойчивый незавихренный поток воздуха, в котором частицы газа движутся параллельно друг другу (см. рис. 67, 1). Такой поток способствует наиболее выгодному расположению области пониженного давления на подветренной стороне паруса, отчего в решающей степени зависит величина равнодействующей силы  $P$ .

При угле атаки  $15^\circ$  разрежения на подветренной стороне паруса становятся максимальными; следовательно, и коэффициент  $C$  достигает своего максимума. С увеличением угла атаки после  $15^\circ$  начинают появляться завихрения сперва у задней шкаторины (см. рис. 67, 2), и здесь поток начинает становиться завихренным, турбулентным. По мере увеличения угла атаки завихрения распространяются на всю поверхность паруса на подветренной стороне. В результате расходования энергии ветра на образование бесполезного вихревого движения частиц снижается величина разрежений и соответственно уменьшается коэффициент  $C$ . Вихревое движение возникает в результате уменьшения кинетической энергии потока за счет вязкости воздуха.

стр. 103

Сравнивая значение коэффициента  $C$  для плоского и «пузатого» парусов, можно заметить, что наибольшая разница имеется при острых углах атаки, причем возникающие на парусах силы различаются не только по величине, но и по направлению действия (рис. 68).

Например, при угле атаки  $\alpha = 15^\circ$  сила  $P_2$  на плоском парусе почти в два раза меньше силы  $P_1$  на «пузатом» при одном и том же ветре. Кроме того, равнодействующая  $P_1$  наклонена влево от перпендикуляра к хорде «пузатого» паруса, а равнодействующая  $P_2$  наклонена вправо от перпендикуляра к хорде плоского паруса. Это легко установить, сравнив отрезки  $Ob$  и  $Oc$  на чертеже полярных кривых обоих парусов на рис. 66, где положения перпендикуляров к хорде паруса для соответствующих углов атаки указаны на внешней окружности.

Большая разница в значениях коэффициентов  $C$  «пузатого» и плоского парусов получается вследствие влияния кривизны «пуза» паруса на скорость воздушного потока на подветренной стороне паруса. Чем больше кривизна, тем больше суживается поток и увеличивается разрежение (см. рис. 68). На совершенно плоском парусе нельзя получить незавихренный поток, так как отрыв струй происходит уже у самой мачты. При увеличении углов атаки разница между плоским и «пузатым» парусами уменьшается. При угле  $90^\circ$  (т. е. на курсе фордевинд) разница

стр. 104

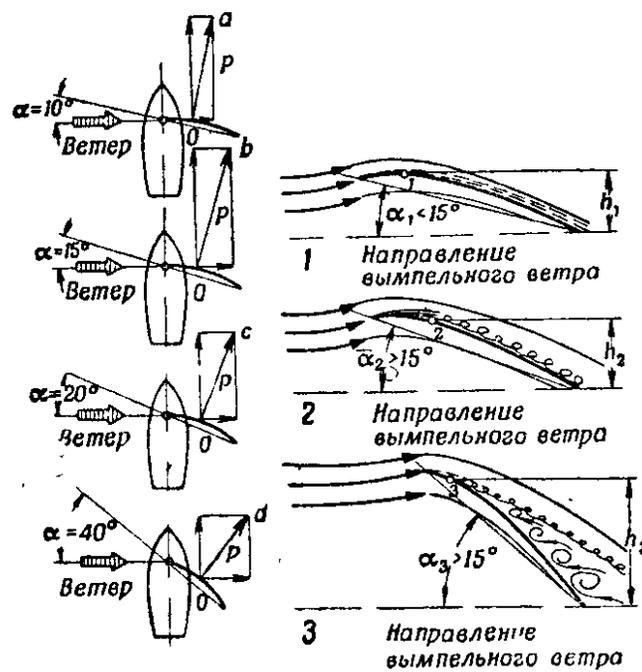


Рис. 67

Рис. 67: Ламинарный и турбулентный потоки на парусе: 1 —  $\alpha < 15^\circ$ , ламинарный поток; 2 —  $\alpha > 15^\circ$ , начало завихрений у задней шкаторины; 3 —  $\alpha = 40^\circ$ , полностью турбулентный поток

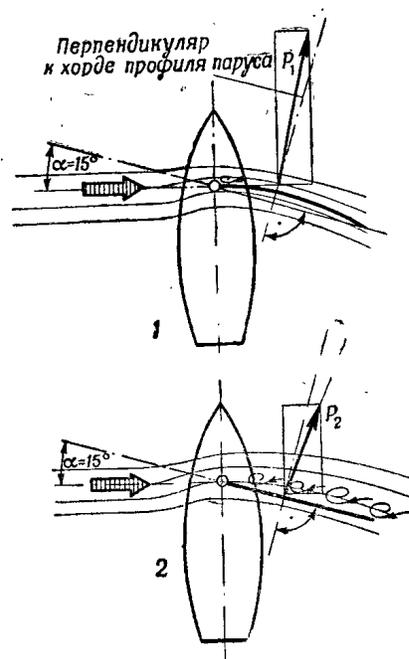


Рис. 68

Рис. 68: Сравнение обтекания «пузатого» и плоского парусов при  $\alpha = 15^\circ$

между плоским и «пузатым» парусами настолько незначительная, что практически не принимается в расчет. Происходит так потому, что на фордевинде у обоих парусов на подветренной стороне образуется почти одинаковый по характеру турбулентный поток ветра, а следовательно, картины распределения давлений и разрежений у обоих парусов очень близки. Необходимо заметить, что при завихренном воздушном потоке в образовании аэродинамической силы  $P$  силы разрежения участвуют значительно меньше, чем силы давления. Именно поэтому «пузатый» парус на курсе фордевинд дает меньшую аэродинамическую силу, чем на острых курсах от бейдевинда до острого бакштага, т. е. тогда, когда парус работает на малых углах атаки. Аэродинамическая сила, которую можно получить при угле атаки  $90^\circ$  (на курсе фордевинд), равна примерно 60% величины аэродинамической силы, которую можно получить на этом парусе при острых углах атаки.

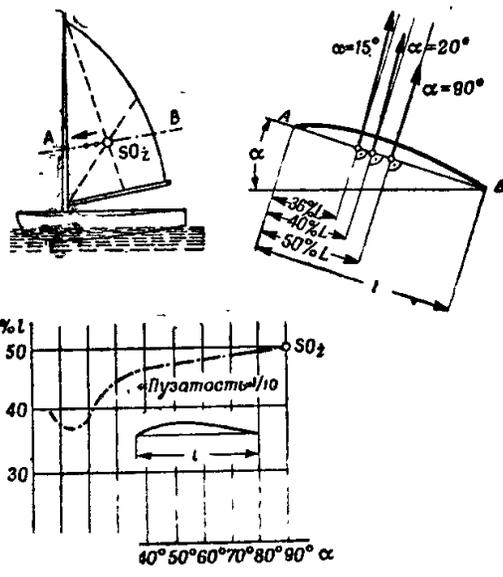
### 3.6 Центр давления аэродинамических сил паруса

Полярная кривая паруса позволяет определить величину и направление действия аэродинамической силы, чего, однако, недостаточно. Надо еще знать точку приложения этой силы, или, иными словами, центр давления аэродинамических сил. До сих пор мы принимали, что линия действия силы проходит через центр профиля паруса, а центр давления лежит в так называемом центре парусности, указываемом на теоретических чертежах яхты. В действительности линия действия равнодействующей  $P$  аэродинамических сил, возникающих на парусе, не проходит через центр парусности, а изменяет свое положение в зависимости от угла атаки (рис. 69, 1). При острых углах атаки равнодействующая аэродинамическая сила  $P$  проходит ближе к мачте, и по мере увеличения угла атаки центр давлений передвигается по направлению к центру парусности, находящемуся на половине хорды профиля паруса в сечении  $AB$ .

Перемена положения центра давлений в зависимости от угла атаки графически показана на рис. 69, 2.

Положение центра давлений определено в процентах от длины хорды профиля паруса  $l$  в сечении  $AB$ , считая от мачты. На оси  $x-x$  расположены величины углов атаки  $\alpha$ , на оси  $y-y$  — положение центра давлений в процентах длины хорды  $l$ . Чертеж относится к парусу с размерами «пуза»  $1/10$  и показывает, что линия действия аэродинамической силы проходит через центр парусности только в одном случае, когда яхта идет курсом фордевинд. На любом другом курсе линия действия силы проходит ближе к мачте. Это имеет большое значение в возникновении склонности яхты приводиться или уваливаться.

Итак, прежде всего сделаем вывод, что центр парусности, указываемый на теоретических чертежах, с точки зрения теории парусного плавания, имеет чисто условное значение. В связи с этим вспомним, как широко распространено среди яхтсменов ошибочное мнение, что равнодействующая аэродинамическая сила якобы постоянно проходит через центр парусности, указанный на теоретическом чертеже.



2  
рис. 60

Рис. 69: Центр давлений аэродинамических сил: 1 — положение центра давлений при различных углах атаки; 2 — перемещение центра давлений в зависимости от угла атаки  $\alpha$  (в процентах длины хорды  $l$ )

### 3.7 Аэродинамическое сопротивление паруса

Выше было показано, как определяется равнодействующая аэродинамическая сила  $P$  модели паруса способом замера двух слагающих ее сил  $P_z$  и  $P_x$  в аэродинамической трубе. Линия действия силы  $P_z$  перпендикулярна направлению ветра, а линия действия силы  $P_x$  параллельна ветру (рис. 70).

Силу  $P_x$  назовем сопротивлением паруса, поскольку она направлена против движения яхты. На чертеже видно, что увеличение силы  $P_x$  на величину  $\Delta P_x$  сопровождается увеличением наклона равнодействующей силы  $P$  в сторону кормы. Одновременно уменьшается на величину  $\Delta P_c$  эффективная, полезная сила тяги паруса  $P_c$ , а вместе с тем и уменьшается скорость движения яхты. Сила сопротивления паруса  $P_x$  имеет большое влияние на гоночные качества яхты, в связи с чем возникает вопрос: от чего зависит величина силы  $P_x$  и каким способом можно уменьшить ее?

стр. 106

#### Индуктивное сопротивление

Согласно теории Прандтля, сопротивление паруса  $P_x$  можно считать составленным из двух слагаемых: так называемого индуктивного сопротивления  $P_{x_i}$  и сопротивления профиля  $P_{x_p}$ .

У паруса с постоянным соотношением высоты к ширине, т. е. с постоянным удлинением, индуктивное сопротивление  $P_{x_i}$  является той частью общего сопротивления, которая неразрывно связана с образованием равнодействующей аэродинамической силы  $P$ .

Нам известно, что равнодействующая аэродинамическая сила возникает в результате разности давлений на обеих сторонах паруса. Эта разность неизбежно вызывает некоторое вертикальное движение воздуха вдоль паруса, которое в какой-то степени выравнивает давления. Струи воздуха пытаются переходить с наветренной стороны паруса, где давление больше, на подветренную с меньшим давлением (рис. 71). Движение воздуха, пытающееся выровнять давления на обеих сторонах паруса, может возникать только вокруг гика и оголовка паруса и сопровождается образованием завихрений, на что тратится энергия. Этот непроизводительный расход энергии ветра покрывается за счет уменьшения перепада давлений на обеих сторонах паруса.

Теперь сравним два паруса с одной и той же площадью, но с разной удлинённостью  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Потери вследствие подсосов по краям паруса будут тем больше, чем длиннее гик, т. е. у низкого и широкого паруса с меньшей удлинённостью. Теория и практика подтверждают, что величина индуктивного сопротивления  $P_{x_i}$  есть функция от величины силы  $P_z$  и коэффициента удлинённости паруса  $\lambda$ :

$$P_{x_i} = f\left(\frac{P_z^2}{\lambda}\right).$$

Из этой формулы следует, что индуктивное сопротивление растёт прямо пропорционально квадрату силы  $P_z$  и обратно пропорционально коэффициенту удлинённости паруса  $\lambda$ , т. е. чем больше удлинённость паруса  $\lambda$ , тем меньше индуктивное сопротивление. Так как формула выражает функцию второго порядка, на графике кривая индуктивного сопротивления будет параболой.

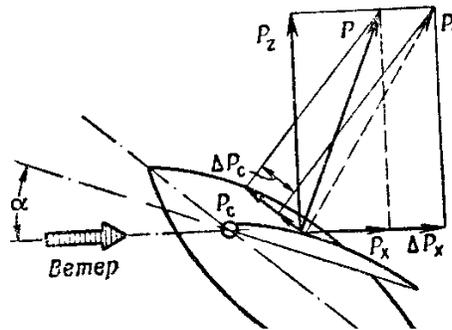


Рис. 70: Разложение аэродинамической силы паруса

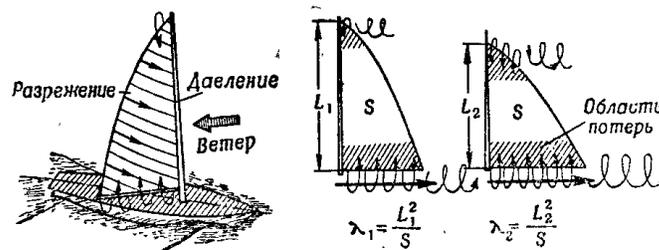


Рис. 71

Рис. 71: Зависимость индуктивного сопротивления от удлинения паруса:  $\lambda_1 = L_1^2/S$ ;  $\lambda_2 = L_2^2/S$

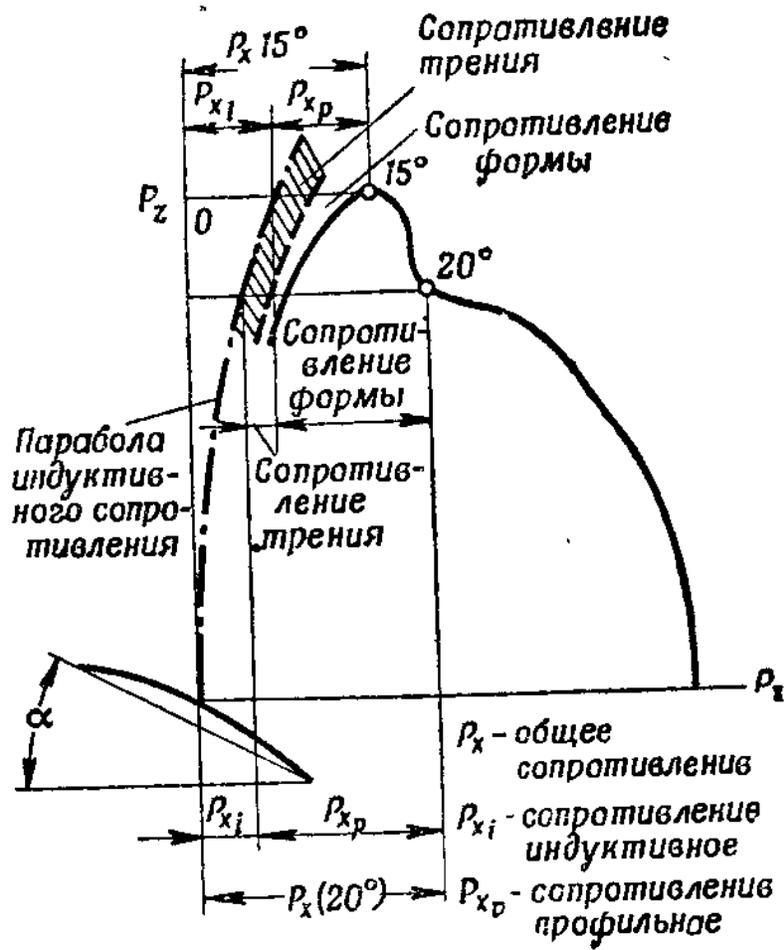


Рис. 72

Рис. 72: Полярная кривая аэродинамической силы паруса с нанесенной штрихопунктирной линией — параболой индуктивного сопротивления:  $P_x$  — общее сопротивление;  $P_{xi}$  — сопротивление индуктивное;  $P_{xp}$  — сопротивление профильное

На рис. 72 изображена полярная кривая аэродинамической силы паруса с нанесенной штрихо-пунктирной линией — параболой индуктивного сопротивления. При угле атаки  $\alpha = 15^\circ$  индуктивное сопротивление выражается отрезком  $P_{x_i}$ . Отрезок  $P_{x_p}$  представляет собой второй член общего сопротивления  $P_x$ , или так называемое сопротивление профиля  $P_{x_p}$ . Таким образом, общее сопротивление паруса будет  $P_x = P_{x_i} + P_{x_p}$ .

На величину сопротивления профиля  $P$  влияют два фактора: гладкость поверхности и форма профиля паруса. При острых углах атаки и ламинарном обтекании наибольшее значение в сопротивлении профиля приобретает трение частиц воздуха о поверхность паруса: сопротивление формы в этом случае не играет большой роли. При турбулентном потоке, когда на подветренной стороне паруса появляются завихрения, наибольшее значение в образовании сопротивления профиля имеет его форма.

На рис. 72 можно видеть, какое соотношение получается между сопротивлением трения и сопротивлением формы при углах атаки  $\alpha = 15$  и  $20^\circ$ .

### Сопротивление трения

Рассматривая возникновение сил на парусе, мы установили их зависимость от распределения давлений и разрежений на обеих сторонах паруса. Если бы воздушный поток имел свойства идеальной жидкости, то мы имели бы дело только с аэродинамическими силами, возникающими в результате разности давлений на обеих сторонах паруса. В действительности воздушный поток обладает известной вязкостью, хотя и значительно меньшей, чем вода или масло, но тем не менее именно благодаря вязкости возникает сопротивление трения, которым нельзя пренебречь. Между соседними движущимися частицами возникают тангенциально направленные силы внутреннего трения, или вязкости.

В потоке воздуха, обтекающем парус, частицы, соприкасающиеся с поверхностью паруса, задерживаются на ней в результате сил сцепления. Они уже не движутся вместе со всем потоком, а остаются в покое относительно самого паруса.

В результате вязкости, или внутреннего трения, что одно и то же, неподвижные воздушные частицы тормозят движение соседних частиц, не соприкасающихся непосредственно с поверхностью паруса; только на некотором расстоянии от парусины воздушный поток не будет тормозиться и скорость воздушных частиц восстановится (рис. 73, 1).

Слой потока, в котором наблюдается понижение скорости движения частиц, называется *пограничным*, или *прилегающим*, *слоем*. Превосходным подтверждением теории пограничного слоя может служить следующий интересный факт: даже при большой скорости движения на кузове автомобиля осаждается пыль, которую ветер не сдувает, потому что на самой поверхности кузова (как и паруса) скорость ветра равна нулю.

Толщина пограничного слоя  $h$  увеличивается в направлении движения ветра и у заднего конца паруса достигает примерно до 2% длины профиля паруса. Силы вязкости проявляются только в пограничном слое, где соседние частицы движутся с неодинаковой скоростью, и пропадают, когда частицы имеют равные скорости. На трение между частицами расходуется некоторая часть кинетической энергии ветра, которую можно представить в виде заштрихованной площади (для наглядности

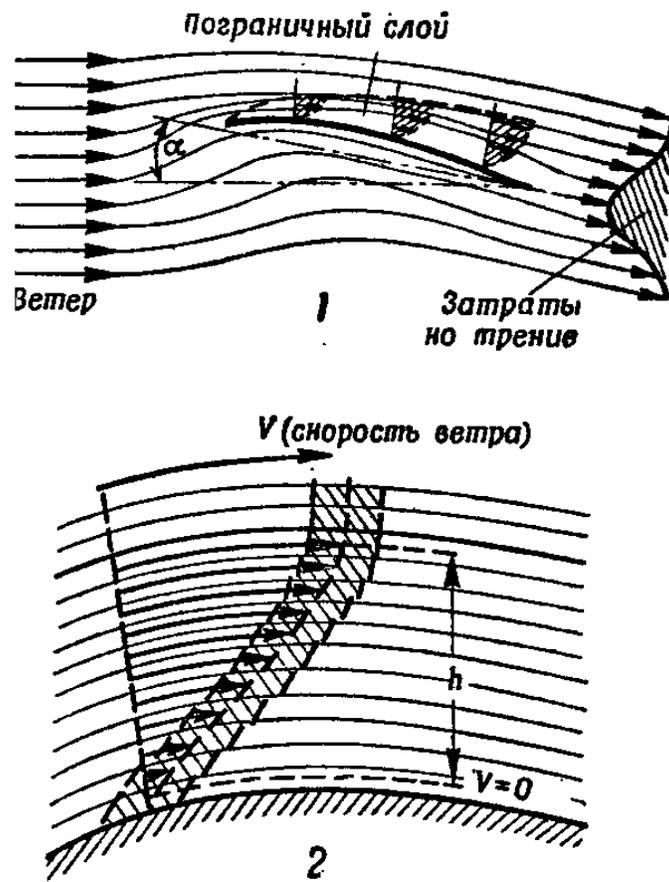


Рис. 73

Рис. 73: Пограничный слой: 1 — затраты на трение; 2 — распределение скоростей в пограничном слое;  $h$  — толщина пограничного слоя;  $V$  — скорость ветра

толщина пограничного слоя на рисунке сильно увеличена, см. рис. 73, 1).

Исследованиями Рейнольдса было установлено, что до определенной скорости частицы в прилегающем слое движутся параллельно друг другу (рис. 73, 2). Такое движение называется *слоистым*, или *ламинарным*. Подобный характер движения сохраняется до тех пор, пока скорость потока не достигнет некоторой определенной величины, называемой критической. Тогда правильное слоистое течение нарушается. Частицы воздуха начинают двигаться не только в долевом, но и в радиальном направлении, и в результате происходит перемешивание частиц в пограничном слое. Такое неупорядоченное, завихренное движение называется *турбулентным*.

стр. 110

Сопротивление трения в турбулентном потоке больше, чем в ламинарном, так как, кроме энергии, расходуемой на преодоление вязкости среды, затрачивается еще энергия на вихревое движение частиц. Опытами установлено, что при ламинарном потоке шершавость поверхности не играет большой роли.

Частицы воздуха, задерживаемые силами сцепления на поверхности паруса, образуют тончайший воздушный слой, в известной мере сглаживающий неровности парусины. Шершавость поверхности более вредна при турбулентном движении; чем больше скорость, тем больше энергии расходуется бесполезно. Однако имеет значение и характер неровности поверхности парусины. При определенных скоростях даже не очень гладкая поверхность может быть признана гладкой. Это объясняется тем, что и при турбулентном движении образуется адгезионный слой, сглаживающий некоторые неровности парусины, а следовательно, снижающий сопротивление трения. По мере возрастания скорости движения адгезионный слой становится все тоньше, и при соответственно больших скоростях воздушного потока даже незначительная шершавость парусины будет играть заметную роль.

На основании исследований, проведенных Никурадзе, можно вычислить величину допустимой шершавости парусины с помощью следующей формулы:

$$k = \frac{100 \cdot \nu}{v},$$

где:  $k$  — шершавость, см,  $\nu$  — кинетический коэффициент вязкости воздуха, равный  $0,15 \text{ см}^2/\text{сек}$ ,  $v$  — скорость движения потока, см/сек.

Так, допустимая шершавость парусины при скорости ветра  $5 \text{ м/сек}$  должна быть не более:

$$k = \frac{100 \cdot 0,15}{500} = \frac{0,15}{5} = 0,03 \text{ см, или } 0,3 \text{ мм.}$$

Промышленность выпускает хлопчатобумажную парусину с поверхностью, значительно более шершавой, чем  $0,3 \text{ мм}$ . Сопротивление трения, возникающее на парусе площадью  $50 \text{ м}^2$ , сшитом из обыкновенной хлопчатобумажной парусины, при остром угле атаки равно сопротивлению площадки  $1 \text{ м}^2$ , поставленной перпендикулярно ветру.

стр. 111

На основании исследований, проведенных в Геттингенском институте, определены коэффициенты сопротивления трения для тканей: хлопчатобумажная парусина обычной гладкости —  $83$ , та же ткань после обжига ворса —  $50$ , она же после трехкратного каландрования —  $47$ .

Сопротивление трения можно значительно уменьшить, устранив по возможности ворсистость ткани. Практически это делается проглаживанием паруса утюгом

или протиркой щеткой вдоль утка материи. Такую обработку полезно делать перед каждой гонкой. Чем сильнее ожидается ветер и чем больше на дистанции лавировки, тем полезнее такая обработка паруса. На полных курсах сопротивление трения не имеет практического значения. Теперь становится понятным, почему старые, потерявшие ворс паруса, имеющие меньшее сопротивление трения, на острых курсах работают лучше новых.

Значительного уменьшения сопротивления трения можно ожидать, если заменить обычную парусину искусственными тканями, например дакроном.

## Сопротивление формы

Источником сопротивления формы служат завихрения воздуха, всегда возникающие при обтекании воздушным потоком любых стоящих на его пути тел. Термин «сопротивление формы» взят потому, что решающее влияние на величину трения имеют прежде всего форма тела, обтекаемого воздушным потоком. С такими явлениями мы сталкиваемся ежедневно: движущийся автомобиль поднимает клубы пыли, и чем более обтекаема форма кузова, тем меньше он поднимает за собой пыли (т. е. сопротивление формы значительно меньше у машины с обтекаемым, аэродинамичным корпусом).

Косвенная причина возникновения сопротивления формы — вязкость воздуха. Объясним это на примере обтекания воздушным потоком мачты (рис. 74, I). Если бы воздух не имел вязкости, то скорость его частиц, огибающих мачту от точки 1 до точки 2, увеличивалась, достигая в точке 2 наибольшей скорости и наибольшей кинетической энергии. Одновременно с изменением скорости менялось бы и давление: в точке 2 было бы минимальное статическое давление, т. е. все происходящее строго соответствовало теореме Бернулли, так как в точке 2 площадь сечения воздушного потока наименьшая. В своем дальнейшем движении частицы воздуха за счет приобретенной кинетической энергии перешли бы в положение 3 и 4. Но так как воздух обладает вязкостью, то из-за сопротивления трения скорость частиц между точками 1 и 2 будет расти медленнее, чем в теоретическом случае идеальной среды. Некоторое количество возникающей на этом участке кинетической энергии будет расходоваться на преодоление сопротивления трения. В положении 2 частицы воздуха уже не будут иметь достаточной энергии, чтобы при возрастающем статическом давлении передвинуться до точки 4. Кроме того, и на участке 2–3–4 часть энергии будет расходоваться на преодоление сил вязкости. Поэтому в каком-то определенном пункте, например в точке 3, частицы, движущиеся в пограничном слое, полностью израсходуют энергию движения, и наступит момент отрыва пограничного слоя.

Расположение поля скоростей в пограничном слое в точке 3 наглядно показано на рис. 74, II. На рисунке показан момент отрыва пограничного слоя, т. е. момент возникновения турбулентного движения, охватывающего впоследствии почти всю подветренную сторону мачты. Завихрение потока вызывает потери энергии, величина которых и служит мерой сопротивления формы. Сопутствующей картиной потерь, связанных с сопротивлением формы, будет область завихренного потока, расположенная непосредственно за рассматриваемым сечением мачты. Аэродинамические явления, о которых идет речь, нельзя наблюдать непосредственно простым глазом; только возникновение столбов пыли

стр. 112

стр. 113

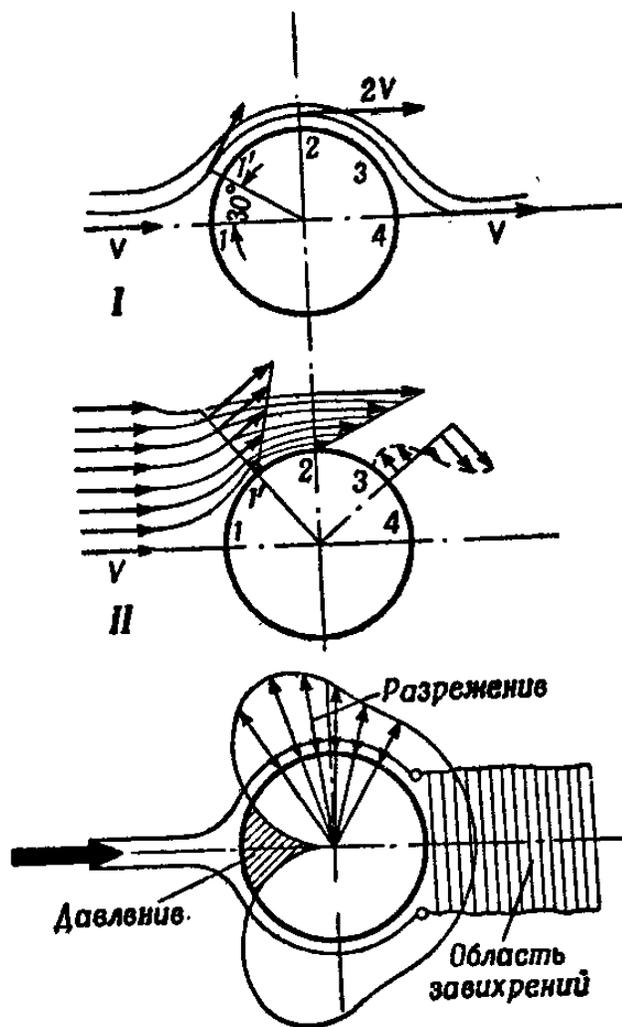


Рис. 74

Рис. 74: Обтекание воздушным потоком мачты: *I* — идеальный поток; *II* — реальный поток с отрывом пограничного слоя; внизу — распределение давлений и область завихрений

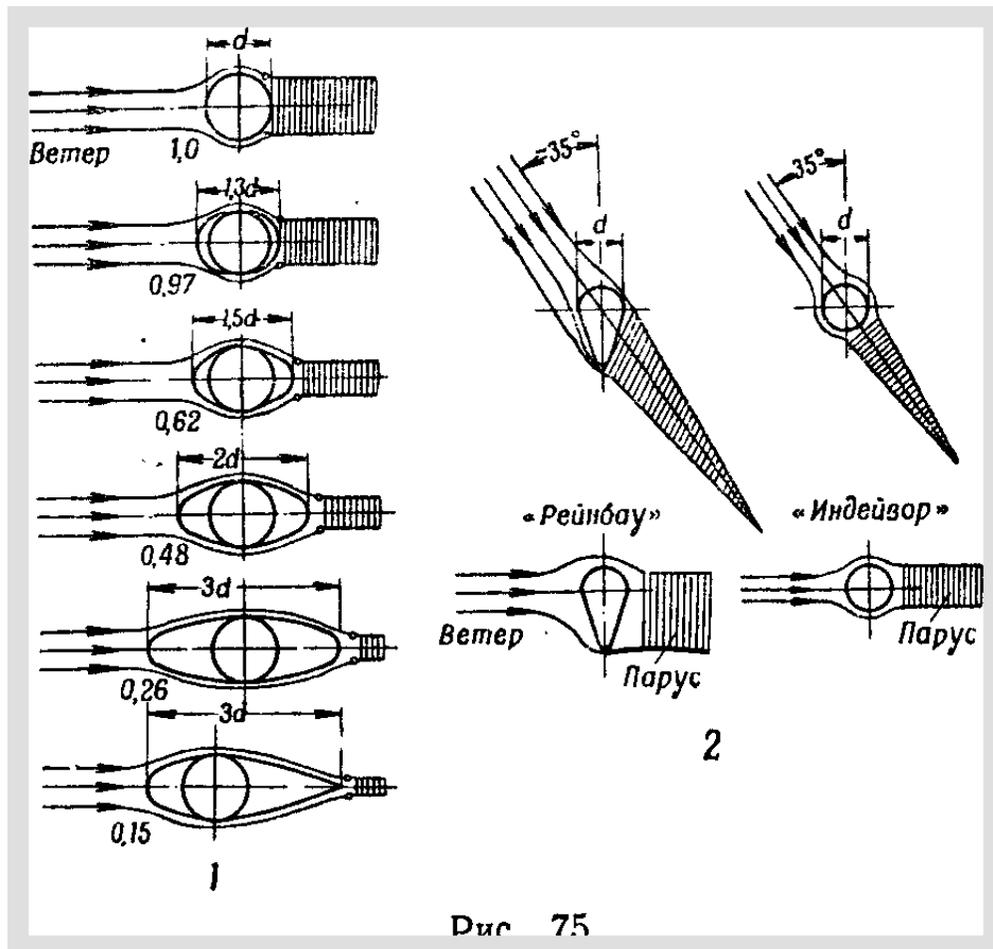


Рис. 75: 1 — сравнение коэффициентов сопротивления мачт разного сечения; 2 — область завихрений за профилированной мачтой яхты «Рейнбау» и круглой мачтой яхты «Индейвор»

за движущимся автомобилем помогает понять механику появления сопротивления формы. Значительно легче эти явления наблюдать в водной среде; с помощью просвечивания подкрашенных струй можно наблюдать завихрения, отрыв струй и т. п.

На основании многочисленных опытов с телами разных профилей установлено, что решающее влияние на величину сопротивления формы имеют очертания тела.

Отрыв пограничного слоя, возникновение турбулентного движения наступает тем легче, чем более резко и неожиданно меняется кривизна профиля тела. Наоборот, сопротивление формы тем меньше, чем более плавны, обтекаемы очертания тела. На рис. 75, 1 наглядно показано сравнение коэффициентов сопротивления мачт разного сечения. Сопротивление мачты каплевидного обтекаемого профиля много меньше сопротивления круглой мачты, однако не при любых условиях. Следует помнить, что, когда яхта плавает в лавировку при углах атаки 30–45°, с точки зрения сопротивления формы, выгоднее круглая мачта.

Практикой установлено, что профилированная мачта знаменитой яхты «Рейнбау» давала на 50% большее сопротивление, чем круглая мачта конкурирующей яхты «Индейвор». Недостаток мачты «Рейнбау» особенно заметен на курсах, близких к галфвинду (рис. 75, 2), поскольку обширная область завихрений за мачтой распространилась на большую часть поверхности паруса, ухудшая благоприятное распределение давлений на подветренной стороне паруса.

Сопротивление стоячего и бегучего такелажа также влияет на гоночные результаты. Оно больше на курсе бейдевинд, а на курсе галфвинд вредно только в той степени, в какой отрицательно отражается на работе паруса. Насколько может быть велико сопротивление такелажа и рангоута, видно из случаев опрокидывания швертботов с убранными парусами. Известны случаи переворачивания швертботов без паруса, несмотря на откренивание командой.

Сопротивление формы паруса при острых углах атаки относительно невелико. В общем сопротивлении паруса основную роль играют индуктивное сопротивление и сопротивление трения. Рассматривая рис. 67, замечаем, что в положении 1 частицы воздуха в пограничном слое, достигнув наивысшей точки 1, в состоянии еще преодолеть высоту  $h$  и спокойно стечь с поверхности паруса у задней шкаторины. Пограничный слой имеет ламинарный характер и всюду прилегает к поверхности паруса.

С увеличением угла атаки до  $\alpha_2$  и увеличением высоты  $h_2$  пограничный слой уже становится завихренным, но еще прилегающим к поверхности паруса. В положении 3 кинетическая энергия частиц воздуха уже недостаточна для преодоления высоты  $h_3$  и наступает отрыв пограничного слоя от поверхности паруса. Турбулентный поток охватывает всю площадь паруса от точки 3 до задней шкаторины, при этом сильно возрастает сопротивление формы и одновременно уменьшается равнодействующая сила  $P$ .

Для гонщика очень важно своевременно поймать момент возникновения турбулентного обтекания паруса, вредно действующего на работу паруса и снижающего, в конечном счете, скорость хода яхты. Контролировать характер обтекания паруса можно, наблюдая за нитками, прикрепленными к задней шкаторине паруса. Если нитки вытянуты и постоянно видны рулевому, значит на подветренной стороне паруса существует слоистый, невозмущенный поток воздуха, и, следовательно, парус работает хорошо. Если нитки опадают и прячутся на подветренной стороне паруса,

значит налицо появление завихренного обтекания.

Величина и направление равнодействующей аэродинамической силы  $P$  в большой степени зависит от того, уменьшается или увеличивается ее значение с увеличением угла атаки. Например, если вследствие сильно перебранных шкотов или захода ветра начался отрыв струй на подветренной стороне паруса — равнодействующая сила уменьшится с  $P_2$  до  $P_1$  (рис. 76, 1). Это изменение происходит по полярной кривой, как показано стрелкой. Желая поставить парус в наивыгоднейшее положение, уменьшаем угол атаки с  $40^\circ$  до  $15^\circ$ , но, оказывается, мы не получим сразу максимальную силу  $P_2$ , отвечающую этому углу атаки (рис. 76, 2), а заметно меньшую силу  $P$ . Воздушный поток проявляет некоторое «упрямство» и, приведенный в турбулентное состояние, «неохотно» возвращается в спокойное состояние (рис. 76, 3). Для этого потребуется какое-то время после того, как парус поставлен правильно.

стр. 116

Чем выше кинетическая энергия частиц воздуха, чем с большей скоростью они движутся вдоль поверхности паруса, тем труднее возникает вихревое движение, которое мешает работе паруса. Следовательно, увеличив скорость обтекания воздушным потоком паруса, можно улучшить его работу. По отношению к гроту такую положительную роль играет стаксель (рис. 77). Благодаря стакселю значительно уменьшается площадь воздушного потока и увеличивается его скорость на подветренной стороне паруса. Из уравнения неразрывности следует, что скорость  $v_1$  в сечении  $S_2$  во столько раз больше скорости  $v$ , во сколько раз сечение  $S_2$  меньше сечения  $S_1$ :

$$v_1 = v \cdot \frac{S_1}{S_2}.$$

Увеличение скорости в сечении  $S_2$  дает двойную выгоду: 1) увеличивается разрежение на подветренной стороне, и, следовательно, увеличивается аэродинамическая сила паруса; 2) уменьшается вероятность возникновения завихрений и вредного турбулентного потока на подветренной стороне паруса.

Максимальный эффект от стакселя можно получить тогда, когда его форма и постановка будут такие, чтобы между гротом и стакселем образовалось пространство, действующее как сопло. К сожалению, во многих случаях яхтсмены обращаются со стакселем настолько неправильно, что он приносит только вред.

### 3.8 Условия подобия потоков

стр. 117

Большинство сделанных до сих пор выводов и положений основывалось на результатах экспериментальных исследований моделей яхт и парусов в аэродинамических трубах. А можно ли результаты, полученные в лабораторных условиях, переносить на настоящие яхты и паруса, плавающие в естественных условиях? Такие вопросы задают и сами яхтсмены, и на них есть только один ответ: да, можно.

Воздушный поток, омывающий модель паруса в аэродинамической трубе, и воздушный поток, действующий на парус в естественных условиях, характеризуются одними и теми же физическими величинами, а именно: 1) размерами паруса; 2) скоростью движения воздушных масс (ветра); 3) физическими характеристиками воздуха, его плотностью и вязкостью.

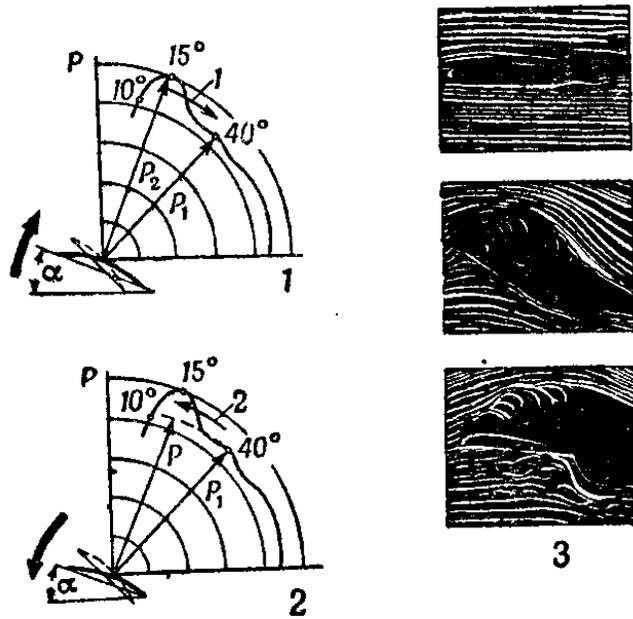


Рис. 76

Рис. 76: 1 — уменьшение аэродинамической силы при отрыве потока; 2 — восстановление силы при уменьшении угла атаки; 3 — турбулентное обтекание паруса

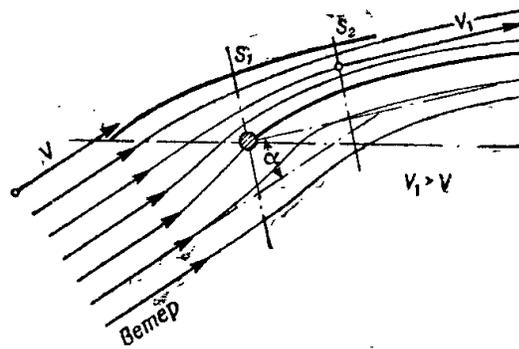


Рис. 77

Рис. 77: Влияние стакселя на обтекание грота: увеличение скорости потока в сечении  $S_2$  между гротом и стакселем

Проблема заключается в создании подобных потоков, т. е. условий, при которых на парусах и их моделях сохранялось бы одно и то же соотношение между возникающими силами. Физик Рейнольдс на основании теоретических положений, подтвержденных экспериментальным путем, установил, что условия подобия будут соблюдены, если для модели и в натуре будут равны некоторые характерные числа, определяющие воздушный поток. Это условие выражается следующим равенством:

$$\frac{v_{1\omega} \cdot l_1}{\nu} = \frac{v_{2\omega} \cdot l_2}{\nu} = R,$$

где:  $R$  — число Рейнольдса,  $v_{1\omega}$  — скорость обтекания в натуральных условиях,  $l_1$  — длина профиля натурального паруса,  $\nu$  — кинетический коэффициент вязкости воздуха,  $v_{2\omega}$  — скорость обтекания модели,  $l_2$  — длина профиля модели паруса.

Вязкость воздуха в обычных условиях можно считать величиной постоянной. Из равенства чисел Рейнольдса следует, что скорость обтекания модели должна быть во столько раз больше, во сколько раз сама модель меньше натурального паруса. Для модели, сделанной в масштабе 1 : 10, скорость потока надо было бы увеличить в десять раз, т. е. при скорости ветра, в натуре равной, например, 10 м/сек, в трубе нужно было бы создать скорость потока, равную 100 м/сек. Получение таких огромных скоростей очень сложно и дорого. В аэродинамических трубах работают со значительно меньшими скоростями, и все же результаты исследований вполне пригодны для практических выводов.

стр. 118

Оказалось, что даже при значительной разнице в числах Рейнольдса результаты испытаний паруса в натуральную величину и его модели очень близки. Этот вывод подтвержден многочисленными опытами. Например, было исследовано соотношение сил  $P_x$  и  $P_z$  на трех моделях одинаковой величины, отличающихся друг от друга только профилями паруса. Измерения были проведены при постоянном угле атаки  $\alpha$  и с разными скоростями воздуха (рис. 78), которые на диаграмме выражены числами Рейнольдса. Оказалось, что профиль 417а сохранял свои аэродинамические качества независимо от числа Рейнольдса. Плоский профиль давал некоторую разницу на участке малых чисел Рейнольдса.

Профиль № 60, обычно применяемый в авиации, оказался совершенно непригодным по сравнению с профилем 417а и плоским. Зато профиль № 60 оказался наилучшим из всех после перехода так называемого критического числа Рейнольдса, равного для него

$$Re = 8 \cdot 10^4 = 80\,000.$$

С какими же числами Рейнольдса мы встречаемся в действительности в спортивной практике? Возьмем парус со средней шириной 2 м и вычислим числа Рейнольдса при скорости ветра 1 и 10 м/сек.

В первом случае при скорости ветра 1 м/сек:

$$Re = \frac{v_{\omega} \cdot l}{\nu} = \frac{1 \cdot 2}{\frac{0,15}{10^4}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^4}{0,15} = 13,4 \cdot 10^4 = 1,34 \cdot 10^5,$$

где коэффициент  $\nu = 0,15 \text{ см}^2/\text{сек} = \frac{0,15}{10^4} \text{ м}^2/\text{сек}$ .

стр. 119

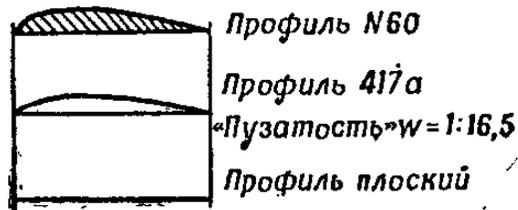
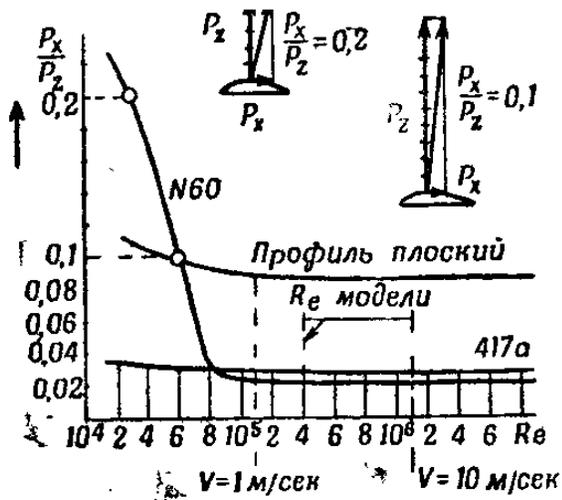


Рис. 78

Рис. 78: Зависимость отношения  $P_x/P_z$  от числа Рейнольдса для трех профилей паруса: № 60, 417a и плоского

В другом случае при скорости ветра 10 м/сек:

$$Re = \frac{10 \cdot 2}{\frac{0,15}{10^4}} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 10^4}{0,15} = 13,4 \cdot 10^5 = 1,3 \cdot 10^6.$$

Теперь, если мы желаем исследовать модель паруса, изготовленную в масштабе 1 : 10 ( $l = 0,2$  м), при скорости ветра в тоннеле  $v = 30$  м/сек, то соответствующее число Рейнольдса для модели должно быть:

$$Re = \frac{0,2 \cdot 30}{\frac{0,15}{10^4}} = \frac{30 \cdot 0,2 \cdot 10^4}{0,15} = 1,34 \cdot 30 \cdot 10^4 = 4 \cdot 10^5.$$

Принимая во внимание кривые чисел Рейнольдса, показанные на рис. 78, мы видим, что при вычисленных значениях числа Рейнольдса аэродинамические характеристики паруса и модели не изменяются. Одинаково при сильном или слабом ветре, на модели и на натуре, отношение сил  $\frac{P_x}{P_z}$  остается постоянным, а следовательно, и характер обтекания и характер расположения давлений на поверхности в обоих случаях одинаковы.

Правда, имеется разница между условиями лабораторных опытов, проводимых для авиационных исследований, и условиями работы паруса гоночной яхты. Она заключается в том, что скорость потока в тоннеле остается постоянной, независимо от высоты точки замера, в то время как скорость ветра в натуре сильно меняется с высотой замера. В верхней части паруса скорость ветра значительно больше, чем внизу. Этот фактор, однако, не трудно учесть путем довольно простых рассуждений, и поэтому он не слишком усложняет вышерассмотренные явления. Собственно парус без мачты не изменяет своих аэродинамических свойств. В широком диапазоне скоростей вымпельного ветра одинаково при слабых и сильных ветрах коэффициент  $C$  остается постоянным для паруса данного профиля. Но коэффициент сопротивления мачты  $C_x$  меняется по величине в зависимости от диаметра мачты и скорости вымпельного ветра, и прежде всего, он зависит от характерной величины — числа Рейнольдса. Это происходит потому, что, когда число Рейнольдса станет больше критического значения, область турбулентного потока за мачтой становится меньше, а следовательно, уменьшается расход энергии на завихрения. Однако коэффициент  $C_x$  начинает уменьшаться только при значительных скоростях вымпельного ветра. Поясним это примером.

Возьмем мачту диаметром 15 см яхты водоизмещением 5 тонн. При скорости вымпельного ветра  $v_w = 20$  м/сек число Рейнольдса будет равно:

$$Re = \frac{v_w \cdot d}{\nu} = \frac{20 \cdot 0,15}{\frac{0,15}{10^4}} = \frac{20 \cdot 0,15 \cdot 10^4}{0,15} = 2 \cdot 10^5.$$

Соответствующий этому числу коэффициент  $C_x$  отыщем, пользуясь графиком (рис. 79). Числу Рейнольдса  $2 \cdot 10^5$  соответствует коэффициент  $C_x = 0,95$ . При ветре такой же силы коэффициент  $C_x$  для мачты диаметром 25 см (у 15-тонной яхты) равен 0,65. Получается, что сопротивление мачты большего диаметра при скорости вымпельного ветра 20 м/сек, соответственно меньше, чем у мачты меньшего

диаметра. Подобно этому проявляется вредное влияние на работу паруса мачт разного диаметра. При скорости ветра меньше 20 м/сек и меньших диаметрах мачт, т. е. в наиболее часто встречающихся в практике случаях, величина коэффициента сопротивления круглых мачт остается постоянной. (В примерах мачты взяты довольно больших диаметров, для яхт значительно более крупных, чем яхты, включенные в программу олимпийских игр. — *Прим. перев.*).

### 3.9 Свойства паруса и его работа

#### Действие аэродинамической силы паруса

В парусных гонках рулевой должен решить, каким образом в данных определенных условиях дистанции и погоды финишировать как можно скорее. Надо уметь вести яхту не только с наибольшей возможной скоростью, но и как можно круче к ветру во время лавировки. Чтобы пройти с наибольшей скоростью любой участок дистанции, надо суметь получить на парусе наивыгоднейшую силу и добиться наименьшего гидродинамического сопротивления корпуса. Запомним, что наивыгоднейшая сила совсем не должна быть наибольшей. Время прохождения дистанции зависит также от умения яхтсмена учесть местные особенности, заходы ветра, течение и т. п.

Наши теоретические положения и выводы представляют какую-то ценность, только если позволяют паруснику правильно решать практические задачи. Рассмотрим в качестве примера несколько практических вопросов, касающихся аэродинамики паруса.

#### Действительный и вымпельный ветер

Аэродинамическая сила паруса определяется по формуле:

$$P = \frac{v^2}{16} \cdot S \cdot C.$$

Итак, равнодействующая аэродинамическая сила, возникающая на парусе, прямо пропорциональна квадрату скорости ветра. Если скорость ветра увеличится в два раза, сила  $P$  увеличивается в четыре раза. В современной парусной практике скорость ветра измеряется анемометром в м/сек. Для перевода полученных результатов в км/час их надо помножить на коэффициент 3,6. Другие способы определения скорости или силы ветра, как, например, ветромер Уайльда или шкала Бофорта, дают сравнительно неточные результаты и субъективные оценки.

Для работы паруса основное значение имеет не истинный ветер, а кажущийся, вымпельный, появляющийся в результате суммарного действия истинного ветра и скорости движения яхты. При одном и том же истинном ветре, дующем со скоростью  $v_r$ , скорость и направление вымпельного ветра зависят от скорости и направления движения яхты  $v_j$ . На рис. 80 приведены различные случаи сочетания истинного ветра и движения яхты. Они показывают, что на курсах от острого бейдевинда до галфвинда скорость вымпельного ветра больше скорости истинного, и чем острее курс, тем больше разница. Начиная с острого бакштага и до фордевинда, постепенно уменьшаясь, скорость вымпельного ветра становится меньше скорости истинного, и на курсе фордевинд она достигает минимума.

Рассмотренные случаи изменения скорости вымпельного ветра имеют большое практическое значение при оценке необходимости брать рифы, правильной работы со шкотами и т. д. Степень зарифления должна зависеть от направления данного участка дистанции; например, в гонках на длинные дистанции могут возникнуть обстоятельства, при которых рифление окажется ненужным, несмотря на сильный ветер, если можно будет идти курсом фордевинд или полным бакштагом. Но при том же ветре рифление может быть необходимо на лавировочных курсах.

стр. 123

Скорость истинного ветра увеличивается по мере его удаления от поверхности земли, что объясняется вязкостью воздуха и характером поверхности. На рис. 81 дан график изменения средних скоростей ветра в зависимости от высоты над уровнем воды для летнего сезона. Так, на высоте 1 м над водой скорость ветра равна 2,9 м/сек, а на высоте 6 м она больше на  $\Delta v = 0,9$  м/сек. Ясно, что такие изменения скорости истинного ветра влекут за собой соответствующие изменения в скорости и направлении вымпельного ветра, дующего на разных уровнях паруса.

Допустим, что швертбот «Финн» плывет со скоростью  $v_j = 1,5$  м/сек, а направление истинного ветра перпендикулярно площади симметрии яхты. Согласно рис. 82, в нижней части паруса скорость вымпельного ветра  $v_1 \approx 3,25$  м/сек, а вымпельный ветер в верхней части паруса  $v_6 \approx 4,1$  м/сек. Следовательно, ветер наверху не только сильнее, но и дует под более полным углом, внизу же слабее и дует под более острым углом к плоскости паруса. Разница между направлением этих двух ветров  $v_1$  и  $v_6$  —  $\Delta\alpha = 6^\circ$ . Значит, нижняя часть паруса, если его поверхность не перекручена, работает на слишком малых углах атаки при условии, что

стр. 124

верхняя работает с правильным нужным углом атаки. В действительности же из-за подъема гика и сильного отдувания верхней части паруса получается противоположное. Если же верхнюю часть паруса поставить под правильным углом к вымпельному ветру, то нижняя часть, как правило, окажется под слишком большим углом. В обратном случае, если низ паруса поставить правильно, то верх будет заполаскивать. Рассмотренные случаи показывают, что в натуре коэффициент полезного действия паруса меньше получаемого в аэродинамических трубах при испытании неперекрученных парусов из-за перекручивания поверхности паруса в натуре.

Во всех своих расчетах хороший парусник никогда не должен упускать из вида действие вымпельного ветра. Своевременный учет силы и направления вымпельного ветра будет иметь решающее значение для результатов в гонке. Для определения направления ветра широко применяются такие приемы, как ввязывание ниточек в ванты и штаги, установка вымпелков на вершинах мачт и т. п.

Возвращаясь к формуле, выражающей величину равнодействующей аэродинамической силы  $P$ , заметим, что скорость ветра отнюдь не зависит от спортсмена. При слишком большой скорости ветра рулевой стремится получить на парусе такую аэродинамическую силу, чтобы вооружение и корпус яхты не испытывали чрезмерных, вредных напряжений и плавание оставалось безопасным.

Для этого надо или уменьшить площадь паруса  $S$ , или уменьшить аэродинамический коэффициент  $C$ , зависящий от: 1) угла постановки паруса к ветру, 2) «пузатости» паруса и 3) его формы. Следовательно, у рулевого имеются средства влиять на величину аэродинамической силы паруса, а значит, и на гоночные качества яхты.

## Результаты действия на парус аэродинамической силы

Возникающая на парусе аэродинамическая сила служит причиной: 1) движения яхты вперед, 2) ее дрейфа, 3) крена, 4) приведения или уваливания, 5) дифферента на носовую часть корпуса.

Результаты действия аэродинамической силы  $P$  становятся понятнее, если ее разложить на две составляющие: силу тяги  $P_c$ , действующую вдоль плоскости симметрии яхты, и силу  $P_d$ , действующую перпендикулярно оси симметрии (рис. 83, 1). Под действием этих двух сил яхта будет двигаться со скоростью  $AB$ , равнодействующей двух скоростей  $v_p$  и  $v_d$ .

Разберемся более подробно в результатах действия аэродинамической силы  $P$  на яхту.

1. **Скорость движения яхты** в направлении оси симметрии тем больше, чем больше проекция силы  $P$  на направление движения, т. е. чем больше сила  $P_c$  — сила тяги.

2. **Дрейф яхты**, определяемый углом  $\delta$ , тем больше, чем больше проекция силы  $P$ , перпендикулярная плоскости симметрии яхты, т. е. чем больше сила  $P_d$ .

3. **Крен яхты**, определяемый углом  $\varphi$  (рис. 83, 2), также зависит от величины силы  $P_d$  (действующей на плечо  $h$ ). С увеличением угла крена как бы уменьшается работающая площадь паруса и эффективная площадь равна  $S_1 = S \cdot \cos \varphi$ . Значит, и величина аэродинамической силы  $P$  зависит от угла крена и уменьшается с возрастанием крена. Теперь формулу для силы  $P$  с учетом угла крена  $\varphi$  надо написать так:

$$P = \frac{v^2}{16} \cdot S \cdot C \cdot \cos \varphi.$$

4. **Яхта будет приводиться или уваливаться** в зависимости от того, где проходит линия действия силы  $P$  относительно центра бокового сопротивления (см. рис. 83, 1). В зависимости от того, где проходит линия действия силы  $P$ , плечо  $r$  будет увеличиваться или уменьшаться, а яхта или приводиться или уваливаться.

5. **Сила тяги  $P_c$  вызывает дифферент** носовой части яхты, вследствие чего меняется ватерлиния. Чем больше сила  $P_c$ , тем больше и дифферент (рис. 83, 3).

Для яхтсмена-гонщика самое главное — отыскать средства для получения максимального значения силы  $P_c$ , двигающей яхту вперед. А наиболее эффективно эта сила проявляется тогда, когда удастся устранить или в максимальной степени снизить вредное влияние остальных четырех только что рассмотренных факторов.

## Правильная установка паруса

Величина и направление действия силы  $P$  на парус определенной площади, формы и «пузатости» зависит прежде всего от угла его установки по отношению к направлению вымпельного ветра. А этот угол выбирает рулевой. График полярной кривой коэффициента  $C$  позволяет оценить силу  $P$  в зависимости от угла атаки  $\alpha$  (см. рис. 65).

Представим себе, что мы проводим эксперименты с двумя яхтами, вооруженными одинаковыми парусами площадью  $S = 10 \text{ м}^2$  и «пузатостью» 1 : 10 (рис. 84). Примем скорость вымпельного ветра равной 5 м/сек ( $3^\circ$  по шкале Бофорта). Обе

яхты плывут курсом галфвинд. Рулевой первой яхты выбрал шкоты так, что угол атаки  $\alpha$  равен  $15^\circ$ , а другой больше подобрал шкоты, и угол атаки на его яхте равен  $30^\circ$ .

Для углов  $\alpha_1 = 15^\circ$  коэффициент  $C_1 = 1,55$ . Для углов  $\alpha_2 = 30^\circ$  коэффициент  $C_2 = 1,3$ .

стр. 127

Теперь вычислим величину силы  $P$ , возникающей на парусах обеих яхт. На первой яхте равнодействующая аэродинамическая сила  $P_1$  будет:

$$P_1 = \frac{v^2}{16} \cdot S \cdot C_1 = \frac{5^2}{16} \cdot 10 \cdot 1,55 = 24,2 \text{ кГ.}$$

На второй яхте:

$$P_2 = \frac{v^2}{16} \cdot S \cdot C_2 = \frac{5^2}{16} \cdot 10 \cdot 1,3 = 20,2 \text{ кГ.}$$

Приняв во внимание направление сил  $P_1$  и  $P_2$  относительно хорды парусов, а также продольной оси корпуса яхт, можем вычислить силу тяги для той и другой яхты:

$$P_{c1} = P_1 \cdot \cos 10^\circ = 24,2 \cdot 0,985 = 23,8 \text{ кГ.}$$

$$P_{c2} = P_2 \cdot \cos 28^\circ = 20,2 \cdot 0,88 = 17,8 \text{ кГ.}$$

Приведенный пример, между прочим нередко встречающийся в парусной практике, ясно показывает большое снижение силы тяги из-за неумеренного выбора шкотов. Потери могут достигать до 25% и даже больше при еще более перебранных шкотах. Скорость яхты и выигрыш гонки в значительной мере зависят от правильной постановки парусов относительно вымпельного ветра, который, кроме того, часто бывает очень изменчивым по направлению.

стр. 128

Нами уже было установлено, что величина коэффициента  $C$  уменьшается, как только начинается отрыв струй воздуха на подветренной стороне паруса. Задача правильного управления парусами на любых курсах — это прежде всего борьба с возникновением вихревых потоков на подветренной стороне паруса, которые неизбежно появляются при перебранных шкотах. Рассматривая рис. 65, можно сделать вывод, что только на узком участке в пределах углов атаки  $\alpha = 12\text{--}16^\circ$  можно получить на парусе максимальную силу тяги и, следовательно, наибольшую скорость.

Эти выводы верны для паруса с величиной «пуза»  $1 : 10$ , удлинённостью  $\lambda = 5$  и с правильной, не скрученной, поверхностью; для парусов с другой характеристикой наиболее выгодные углы атаки могут оказаться другими.

Практическим признаком, которым руководствуется большинство рулевых для нахождения наиболее выгодного угла атаки, служит прекращение полоскания верхнего угла паруса. Этот признак совершенно правилен для паруса, растянутого по свободному гикю, который не предотвращает вредного скручивания паруса. Скручивание паруса приводит к тому, что нижняя часть его работает с таким углом атаки, при котором возникают завихрения, в то время как верх паруса, если не полощет, то работает под очень невыгодным углом. Аэродинамический коэффициент  $C$  скрученного паруса никогда не достигает своей максимальной возможной величины, а держится на некотором среднем уровне. Эта средняя величина намного

меньше возможного максимума, который можно получить на парусе, работающем во всех своих сечениях (т. е. по всей своей высоте) с оптимальным углом атаки, одинаковым наверху и внизу.

Исследования на моделях показали, что уменьшение максимального значения коэффициента  $C$  может быть значительным. Кроме того, невыгодно изменяется и направление действия аэродинамической силы, что, как мы впоследствии выясним, имеет большое значение при лавировке.

Западание верхней части паруса под ветер особенно ярко проявляется на полных курсах, когда задиранию гика не препятствуют сравнительно свободные, не натянутые втугую, шкоты. Работу паруса в этих условиях можно улучшить, применив оттяжку гика, как показано на рис. 85. Назначение оттяжки — обеспечить по возможности одинаковые условия работы низа и верха паруса. Очевидно, не удастся полностью избежать скручивания паруса, да этого и нельзя ожидать, поскольку наверху дует более полный вымпельный ветер, чем внизу.

Регулируя оттяжку гика, можно добиться такой степени скручивания, которая отвечала бы постепенному изменению вымпельного ветра на более полный с высотой паруса. Признак хорошего регулирования — одновременное заполаскивание всего паруса при медленном приведении к ветру или потравливании шкотов. Если оттяжка выбрана неправильно, то при приведении к ветру начнет заполаскивать сперва нижняя часть паруса, а потом верхняя или наоборот. Следовательно, условия работы паруса на разной высоте разные, и их надо выравнять, пробуя еще раз регулировать оттяжку гика. Но может случиться, что, сколько ни регулируй оттяжку гика, добиться одновременного заполаскивания паруса не удастся. Это значит, что парус сшит неудовлетворительно и его надо исправить. Яхта, снабженная хорошо отрегулированной оттяжкой, всегда будет иметь преимущество перед яхтами без этого приспособления, позволяющего использовать парус на 100%.

Оттяжка с успехом может применяться на яхтах классов «Снайп», «Н» и др. Рекордные скорости яхт класса «Финн» в значительной степени объясняются выгодными условиями работы паруса, благодаря неподвижному, жесткому креплению гика в гнезде мачты.

## Курсы бейдевинд

Из рис. 65 можно сделать вывод, что максимальную силу  $P$  можно получить только при постановке паруса под некоторым оптимальным углом атаки  $\alpha$ , равным примерно  $15^\circ$ . Возникает законный вопрос: всегда ли, на любых ли курсах надо ставить парус под этим углом к ветру? Всегда ли он будет оптимальным? Приведенные ниже примеры показывают, что не всегда.

Чтобы предвидеть, какое действие окажет сила на яхту, надо учесть не только величину силы, но и направления ее действия.

На рис. 86, 1 показана яхта, плывущая курсом острый бейдевинд. Парус работает с углом атаки  $\alpha = 15^\circ$ , при котором рулевой получает максимальную аэродинамическую силу  $P_1$ . Проекция этой силы на направление движения, т. е. сила тяги, выражена вектором  $P_{c1}$ .

На рис. 86, 2 показана яхта, парус которой работает с углом атаки несколько меньшим:  $\alpha = 10^\circ$ . Рулевой

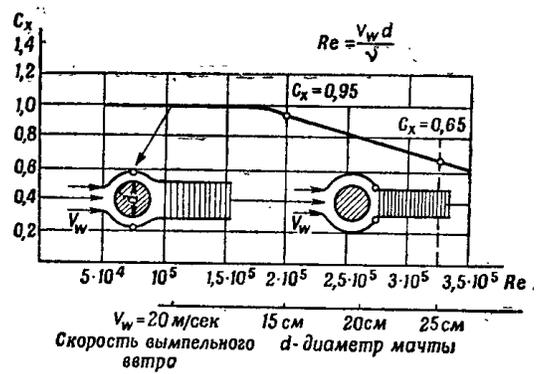


Рис. 79: Зависимость коэффициента сопротивления  $C_x$  круглой мачты от числа Рейнольдса;  $v_w$  — скорость вымпельного ветра;  $d$  — диаметр мачты

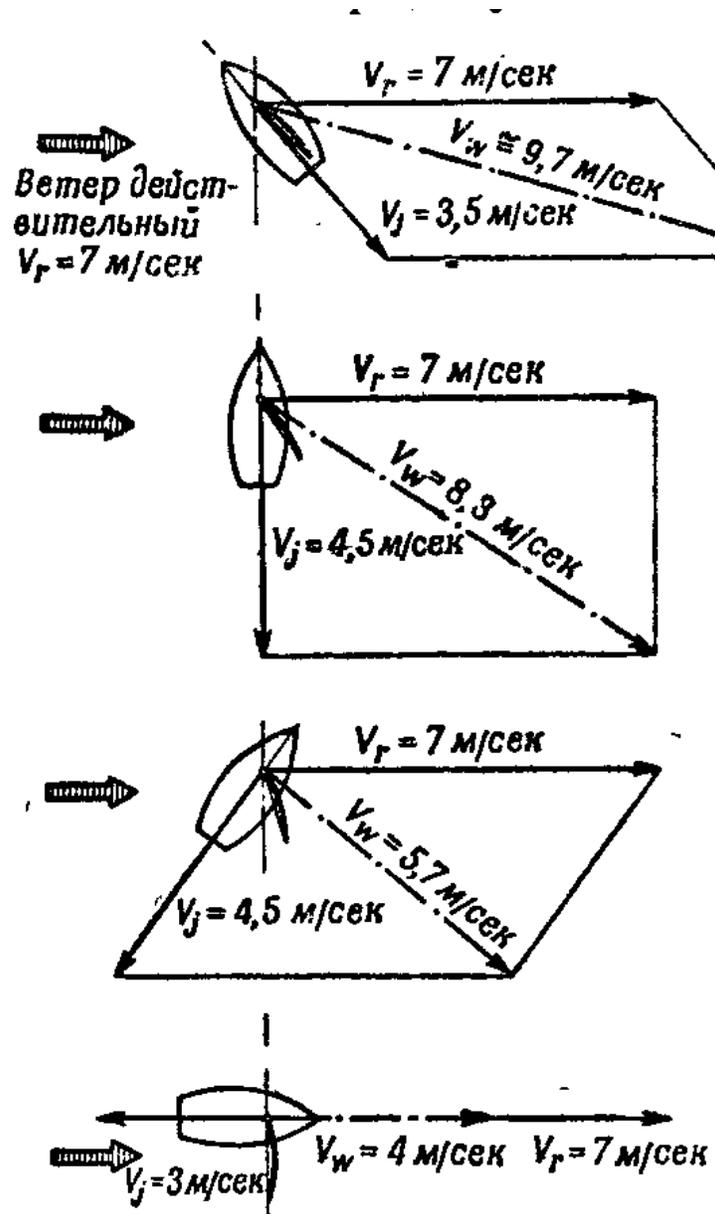


Рис. 80

Рис. 80: Скорость и направление вымпельного ветра при различных курсах яхты;  $v_r$  — скорость истинного ветра;  $v_j$  — скорость яхты;  $v_w$  — скорость вымпельного ветра

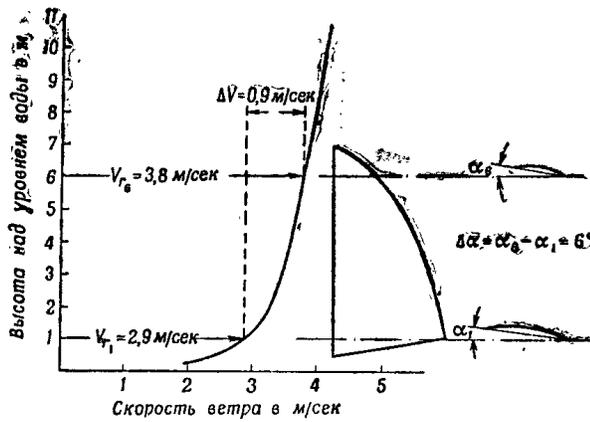


Рис. 81

Рис. 81: Изменение средних скоростей ветра в зависимости от высоты над уровнем воды для летнего сезона

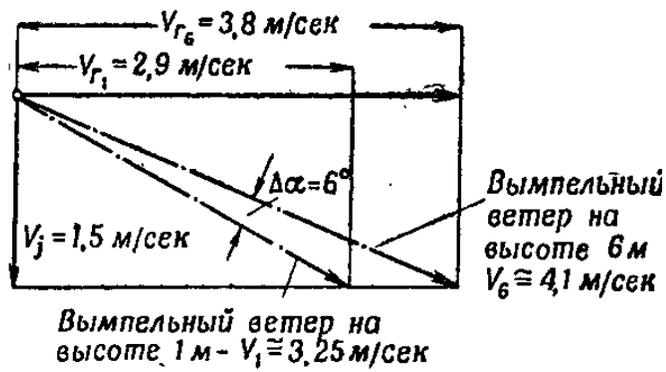


Рис. 82

Рис. 82: Различие в скорости и направлении вымпельного ветра на разных высотах паруса швертбота «Финн»;  $\Delta\alpha = 6^\circ$

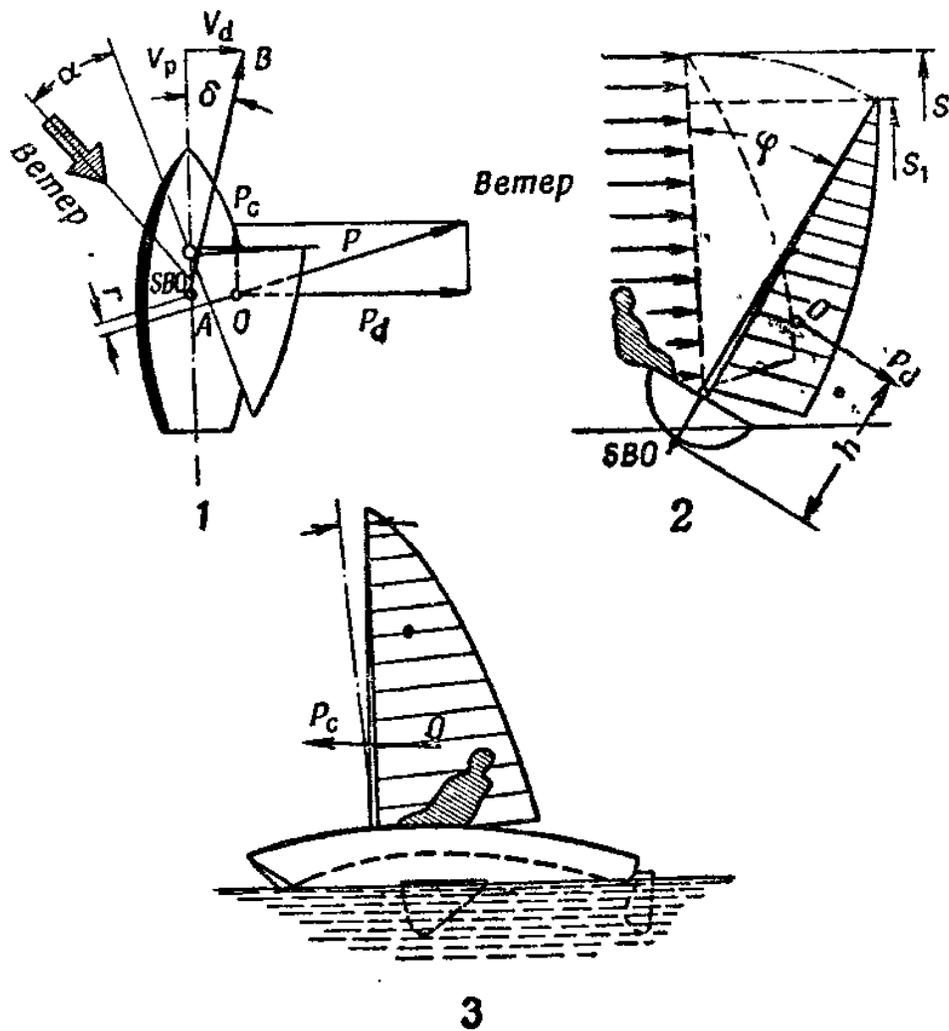


Рис. 83: Результаты действия аэродинамической силы: 1 — сила тяги  $P_c$  и боковая сила  $P_d$ , дрейф  $\delta$ ; 2 — крен  $\varphi$ , уменьшение эффективной площади паруса; 3 — дифферент на нос

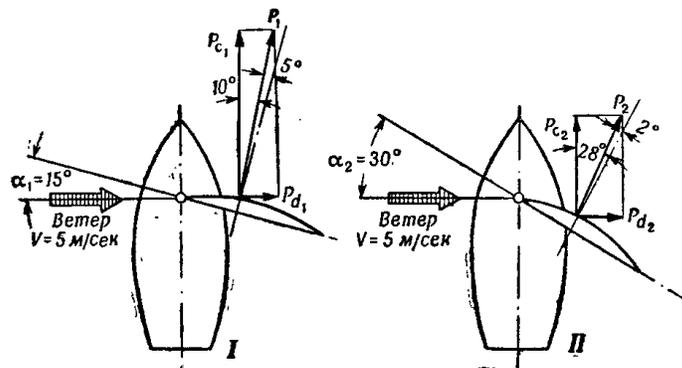


Рис. 84

Рис. 84: Сравнение сил тяги при разных углах атаки: I —  $\alpha_1 = 15^\circ$ ; II —  $\alpha_2 = 30^\circ$

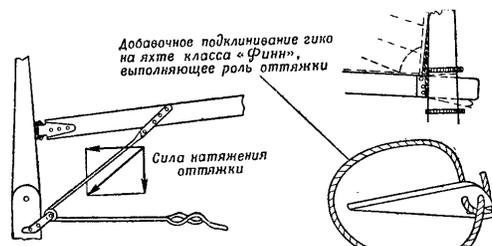


Рис. 85: Оттяжка гика и добавочное подкливание гика на яхте класса «Финн»

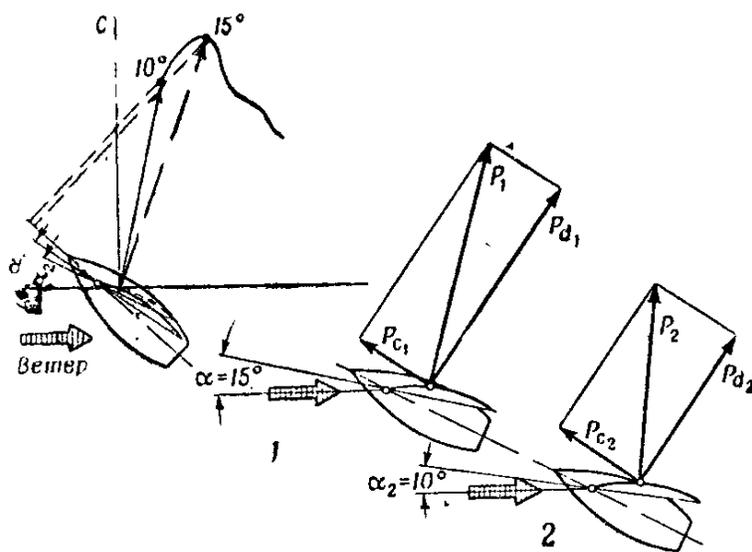


Рис. 86: Курс бейдевинд: 1 — парус при  $\alpha = 15^\circ$ ; 2 — парус при  $\alpha = 10^\circ$

## Словарь терминов

Русский	English	Deutsch	Стр.
Длина по ватерлинии	Length Water Line ( <i>LWL</i> )	Konstruktionswasserlinie ( <i>KWL/OWL</i> )	29
Максимальная длина	Length Overall ( <i>LOA</i> )	Länge über Alles ( <i>LüA</i> )	29
Максимальная ширина	Beam	Beam über Alles ( <i>BüA</i> )	29
Осадка	Draft	Tiefgang	29
Водоизмещение	Displacement	Verdrängung	29

## Список иллюстраций

1	Действие сил на тело . . . . .	4
2	Буксирование яхты . . . . .	5
3	Равномерное движение яхты . . . . .	6
4	Движение двух яхт . . . . .	7
5	Торможение двух яхт . . . . .	8
6	Сложение сил . . . . .	9
7	Разложение сил . . . . .	9
8	Курсы яхт при дрейфе . . . . .	10
9	Яхты у причала . . . . .	11
10	Момент силы . . . . .	12
11	Гидростатическое давление . . . . .	13
12	Строевая по шпангоутам . . . . .	14
13	Плоскости остойчивости яхты . . . . .	16
14	Крен швертбота . . . . .	17
16	Крен яхты . . . . .	17
15	Кривая остойчивости . . . . .	18
17	Влияние высоты борта . . . . .	19
18	Влияние ширины корпуса . . . . .	20
19	Влияние положения центра тяжести . . . . .	21
20	Сравнение остойчивости швертбота и килевой яхты . . . . .	22
21	К «теории паруса» . . . . .	24
22	Три основные плоскости корпуса яхты . . . . .	27
23	Боковая проекция корпуса яхты . . . . .	28
24	Теоретический чертеж яхты: 1 — бок, батоксы; 2 — полуширота, ватерлинии и диагонали; 3 — корпус, теоретические шпангоуты; 4 — план парусности . . . . .	28
25	Основные размеры яхты . . . . .	29
26	Яхты «Америка» и «Юлланар» . . . . .	30
27	Яхта «Thiistle» . . . . .	32
28	Яхта «Минерва» . . . . .	32
29	Яхта «Волонтер» . . . . .	33
30	Яхта «Глориана» . . . . .	33
31	Яхта «Венона» . . . . .	34
32	Яхта с бульбкилем и полнокорпусная яхта . . . . .	35
33	Измерение обводов по обшивке ( $G_p$ ) и по натянутой тесьме ( $G_n$ ) . . . . .	36
34	Способ обмера корпуса по формуле $KR$ . . . . .	39
35	Обмер парусности по формуле $KR$ . . . . .	40
36	Швертбот «Финн» . . . . .	45
37	Теоретический чертеж «Финна» . . . . .	46
38	Швертбот «5-0-5» . . . . .	48
39	Швертбот «Снайп» . . . . .	49
40	Швертбот «Пират» . . . . .	50
41	Швертбот «Кадет» . . . . .	51
42	Швертбот «Моль» (вариант 1) . . . . .	52
43	Швертбот «Моль» (вариант 2) . . . . .	52

44	Килевая яхта «Звезда» . . . . .	54
45	Теоретический чертеж яхты «Дракон» . . . . .	55
46	Яхта класса «Дракон» под полными парусами . . . . .	55
47	Яхта класса «R-5,5» . . . . .	56
48	Яхта «Карина» . . . . .	57
49	Конструктивный чертеж яхты «Маус оф Мальхама» . . . . .	58
50	Яхта «Миф оф Мальхама» . . . . .	59
51	Примеры действия воздушного и водного потоков: 1 — две крыши; 2 — два паруса; 3 — две лодки на буйях . . . . .	63
52	Струя жидкости: частичка струи, линия течения, $V$ — скорость ча- стицы струи . . . . .	63
53	Труба переменного сечения . . . . .	63
55	Давления в сопле . . . . .	65
54	Графическая иллюстрация уравнения Бернулли . . . . .	67
56	Давления на парусе: 1 — распределение скоростей и давлений; 2 — результатирующая сила; 3 — циркуляционное движение воздуха . . . . .	67
57	1 — опыт с волнистым картоном; 2 — эффект Магнуса . . . . .	68
58	Распределение давлений на бермудском парусе: $I$ — давления в сече- нии $AB$ при $\alpha = 15^\circ$ ; $II$ — давления на подветренной стороне; $III$ — давления в сечении $CD$ при $\alpha = 90^\circ$ ; $IV$ — давления на наветренной стороне при $\alpha = 90^\circ$ . . . . .	70
59	Обтекание мачты воздушным потоком . . . . .	70
61	Аэродинамический лот . . . . .	71
60	$I$ — профили паруса: $a$ — правильный, $b-e$ — неправильные; $II$ — область курсов, при которых парус ставится под острым углом . . . . .	73
62	Удлинение и пузатость паруса: $W = f/l$ ; $\lambda = L/l = L^2/S$ . . . . .	73
63	Схема измерения аэродинамических сил в аэродинамической трубе: 1 — общая схема; 2 — измерение силы $P_z$ ; 3 — измерение силы $P_x$ . . . . .	75
64	Измерение аэродинамических сил в положении правильной подвет- ренной позиции . . . . .	75
65	Полярная кривая аэродинамической силы: 1 — разложение силы при $\alpha = 15^\circ$ ; 2 — разложение силы при $\alpha = 25^\circ$ . . . . .	77
66	Полярные кривые аэродинамических коэффициентов: $I$ — $\lambda = 5$ , $W = 1/10$ ; $II$ — результаты измерений на парусах без мачт. Перпен- дикуляры к хорде профиля паруса для разных углов $\alpha$ . . . . .	77
67	Ламинарный и турбулентный потоки на парусе: 1 — $\alpha < 15^\circ$ , лами- нарный поток; 2 — $\alpha > 15^\circ$ , начало завихрений у задней шкаторины; 3 — $\alpha = 40^\circ$ , полностью турбулентный поток . . . . .	79
68	Сравнение обтекания «пузатого» и плоского парусов при $\alpha = 15^\circ$ . . . . .	80
69	Центр давлений аэродинамических сил: 1 — положение центра дав- лений при различных углах атаки; 2 — перемещение центра давлений в зависимости от угла атаки $\alpha$ (в процентах длины хорды $l$ ) . . . . .	82
70	Разложение аэродинамической силы паруса . . . . .	84
71	Зависимость индуктивного сопротивления от удлинения паруса: $\lambda_1 =$ $L_1^2/S$ ; $\lambda_2 = L_2^2/S$ . . . . .	84

72	Полярная кривая аэродинамической силы паруса с нанесенной штрихпунктирной линией — параболой индуктивного сопротивления: $P_x$ — общее сопротивление; $P_{x_i}$ — сопротивление индуктивное; $P_{x_p}$ — сопротивление профильное . . . . .	85
73	Пограничный слой: 1 — затраты на трение; 2 — распределение скоростей в пограничном слое; $h$ — толщина пограничного слоя; $V$ — скорость ветра . . . . .	87
74	Обтекание воздушным потоком мачты: $I$ — идеальный поток; $II$ — реальный поток с отрывом пограничного слоя; внизу — распределение давлений и область завихрений . . . . .	90
75	1 — сравнение коэффициентов сопротивления мачт разного сечения; 2 — область завихрений за профилированной мачтой яхты «Рейнбау» и круглой мачтой яхты «Индейвор» . . . . .	91
76	1 — уменьшение аэродинамической силы при отрыве потока; 2 — восстановление силы при уменьшении угла атаки; 3 — турбулентное обтекание паруса . . . . .	94
77	Влияние стакселя на обтекание грота: увеличение скорости потока в сечении $S_2$ между гротом и стакселем . . . . .	94
78	Зависимость отношения $P_x/P_z$ от числа Рейнольдса для трех профилей паруса: № 60, 417a и плоского . . . . .	96
79	Зависимость коэффициента сопротивления $C_x$ круглой мачты от числа Рейнольдса; $v_w$ — скорость вымпельного ветра; $d$ — диаметр мачты	103
80	Скорость и направление вымпельного ветра при различных курсах яхты; $v_r$ — скорость истинного ветра; $v_j$ — скорость яхты; $v_w$ — скорость вымпельного ветра . . . . .	104
81	Изменение средних скоростей ветра в зависимости от высоты над уровнем воды для летнего сезона . . . . .	105
82	Различие в скорости и направлении вымпельного ветра на разных высотах паруса швертбота «Финн»; $\Delta\alpha = 6^\circ$ . . . . .	105
83	Результаты действия аэродинамической силы: 1 — сила тяги $P_c$ и боковая сила $P_d$ , дрейф $\delta$ ; 2 — крен $\varphi$ , уменьшение эффективной площади паруса; 3 — дифферент на нос . . . . .	106
84	Сравнение сил тяги при разных углах атаки: $I$ — $\alpha_1 = 15^\circ$ ; $II$ — $\alpha_2 = 30^\circ$ . . . . .	106
85	Оттяжка гика и добавочное подклинивание гика на яхте класса «Финн»	107
86	Курс бейдевинд: 1 — парус при $\alpha = 15^\circ$ ; 2 — парус при $\alpha = 10^\circ$ . . .	107