



Ч. мархай

теория
плаванія
под
парусами



ЧЕСЛАВ МАРХАЙ

ТЕОРИЯ ПЛАВАНИЯ ПОД ПАРУСАМИ

*(2-е издание,
переработанное и дополненное)*

Перевод с польского
М. ЛИПСКОГО



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФИЗКУЛЬТУРА И СПОРТ»
Москва 1970

7A5.5
M29

Czesław Marchai

TEORIA ZEGLOWANIA

Warszawa, 1966

6—9—2

Тем. план
1969 г. № 113

Предисловие

Первое издание книги Ч. Мархая «Теория плавания под парусами» в русском переводе было выпущено в 1963 г. За время, прошедшее с момента выхода книги, научно-исследовательскими организациями и отдельными учеными многих стран проведены значительные теоретические и экспериментальные работы по теории движения яхт. За эти годы автор книги Ч. Мархай под руководством профессоров Е. Ричардса и Т. Таннера занимался исследованиями в области аэродинамики и гидродинамики парусных яхт.

При подготовке второго издания книги автор использовал помимо своих работ результаты исследований профессоров Х. М. Баркла, С. Е. Боудена и многих других крупнейших специалистов в области теории и практики парусного спорта. Книга подверглась полной переработке.

Структура книги, расположение материала сохранены, как в первом издании, но в отличие от него во втором издании терминология и условные обозначения заменены принятыми в советской научно-технической и специальной литературе. Замена терминологии и условных обозначений, а также примечания выполнены при участии преподавателя кафедры судостроения Севастопольского приборостроительного института П. С. Якшарова, работавшего над рукописью в качестве спецредактора. Список условных обозначений приведен в приложении.

Необходимо отметить, что в литературе по парусному спорту еще нет установившейся общепризнанной терминологии. Надо полагать, что в результате широкого общения между специалистами в этой области она будет установлена в недалеком будущем.

В настоящем издании нет первого раздела книги «Яхты и формулы обмера», поскольку содержащийся в нем материал достаточно освещен в отечественной литературе. В качестве «Введения» использована глава первого раздела книги «Общие основы движения яхты». Кроме того, не воспроизведены фотографии, имеющиеся в польском издании, и в связи с этим сделана корректировка текста.

Книга несомненно будет полезна для рулевых, конструкторов и строителей яхт.

*М. Липский,
кандидат технических наук,
председатель технической комиссии Федерации
парусного спорта СССР.*

Введение

Общие принципы движения яхты

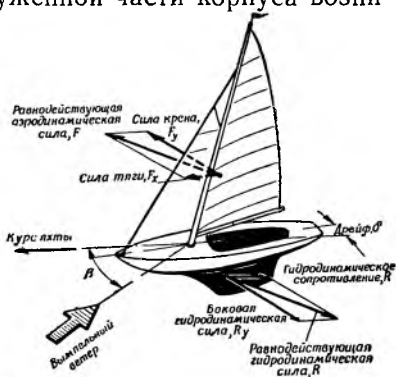
Упрощенно парусную яхту можно рассматривать как комбинацию паруса, работающего в воздушном потоке, и частично погруженного в воду корпуса (с плавником, дейдвудом, швертом и т. д.), действующего наподобие подводного крыла. Парус преобразует энергию ветра, и на нем возникают аэродинамические силы, в том числе и сила тяги, движущая яхту вперед. Аналогично на подводной части корпуса образуются гидродинамические силы, взаимодействующие с аэродинамическими силами паруса.

Кроме того, корпус служит для размещения команды и всех других грузов, находящихся на яхте, и несет службу обеспечения безопасности, обладая остойчивостью, противодействующей крену.

Движение яхты можно рассматривать как движение, происходящее одновременно в двух средах — воздухе и воде — по разделяющей их граничной плоскости. Вода в 820 раз плотнее воздуха, который можно рассматривать как очень разреженную жидкость. Очевидно, что во время движения яхты на погруженной части корпуса возникают силы сопротивления движению, на преодоление которых будет расходоваться часть преобразованной парусом энергии ветра.

Остановимся более подробно на системе сил, действующих на яхту во время лавировки.

Аэродинамическая сила F может быть разложена на две слагаемые:



силу тяги F_x , от которой зависит скорость хода, и поперечную силу F_y , вызывающую крен Θ и дрейф яхты δ (см. рис. на стр. 5).

Заметим, что на лавировке полезная сила тяги F_x является только незначительной частью вредной, но неизбежной силы дрейфа F_y .

На погруженной части корпуса, находящегося на ходу под углом дрейфа δ к направлению движения яхты, образуется гидродинамическая сила R .

Аналогично тому, как мы поступали с аэродинамической силой, гидродинамическую силу можно разложить на две составляющие: боковую силу R_y и силу сопротивления воды R_x , противодействующую движению яхты вперед. Если яхта движется равномерно и прямолинейно, с постоянным курсовым углом β , то сила тяги F_x должна уравновесить силу сопротивления R_x , а сила дрейфа F_y будет уравновешиваться силой бокового сопротивления R_y .

Так как равнодействующие аэродинамическая сила F и гидродинамическая сила R действуют на разных по высоте уровнях, неизбежно возникает некоторый кренящий момент, стремящийся вывести яхту из равновесия. Поперечному наклонению противодействует остойчивость — важнейшее свойство каждой парусной яхты. Именно от остойчивости зависит величина силы тяги F_x , связанная с площадью парусности, которую яхта в состоянии нести при ветре определенной силы. Чем яхта остойчивее, тем большую силу тяги можно получить с одной и той же площади парусности. Остойчивость достигается различными способами. Особенно большими возможностями обладают многокорпусные яхты.

Успехи в области проектирования яхт и в управлении ими можно оценить, взяв за мерилу величину курсового угла относительно истинного ветра γ , под которым яхта может лавировать. Корабль адмирала Нельсона «Виктория» лавировал под углом около 73° . Через сто лет трехмачтовые чайные клипера лавировали под углом 65° . Лоцманские суда XIX столетия ходили под углом 55° к истинному ветру. По существу, эти суда стали прототипами современных парусных яхт. Крейсерские яхты начала нашего века лавировали под углом около 50° . Современные гоночные яхты типа «R-12 M» лавируют под углом менее 40° .

На лавировке каждый градус круче к ветру дает выигрыш около 24 м на милю расстояния. Если яхта идет острее своего конкурента на 5° , то на дистанции, равной одной миле, она выиграет примерно 120 м. В стомильных гонках это даст преимущество около 6,5 мили, или около 1,5 часа, для средних по скорости яхт вроде яхт II группы RORC, при удовлетворительных метеорологических условиях.

Способность яхты идти круто к ветру характеризует ее гоночные достоинства и зависит от:

1) эффективности работы парусного вооружения, критерием чего может быть большая сила тяги F_x при возможно меньшей силе дрейфа F_y ;

2) гидродинамической эффективности корпуса, критерием чего может стать минимальное сопротивление движению яхты вперед R_x при одновременно большом отношении силы бокового сопротивления R_y к сопротивлению R_x . В общем, увеличение боковой силы зависит от увеличения угла дрейфа δ , что, в свою очередь, связано с большим или меньшим ростом сопротивления R_x .

Удачный, с точки зрения гидродинамики, корпус дает возможность в значительных пределах изменять величину боковой силы R_y при незначительном росте сопротивления R_x и угла дрейфа δ ;

3) большой остойчивости, поскольку, когда крен становится более $25-30^\circ$, резко снижается эффективность работы парусов и корпуса (аэро- и гидродинамические качества), а также способность яхты лавировать с более острыми курсовыми углами.

Если одновременно рассматривать качественное и количественное влияние различных факторов на ход яхты, то это не только очень трудное занятие, но, пожалуй, и безнадежное. Поэтому лучше упростить задачу и проанализировать действие различных факторов раздельно, разобраться, каким образом возникают аэродинамические и гидродинамические силы, рассмотреть эффект их действия и т. п. Отсюда представляется целесообразным разделить содержание этой книги на такие разделы:

Часть I, «Аэродинамика парусного вооружения». В этой части рассматриваются факторы, от которых зависят величина и направление действия аэродинамических сил на парусе, и другие, связанные с этим вопросы.

Часть II, «Гидромеханика парусной яхты», посвящена остойчивости яхты, действию гидродинамических сил и возможности предсказания ходовых качеств яхты по результатам модельных испытаний.

В части III, «Ветер и вода», рассказывается о влиянии различных метеорологических факторов на поведение яхты и ее гоночные качества.

Может показаться, что при таком механическом подходе к парусному спорту искусство рулевого и команды ничего не значит, но это не так. Следует помнить, что яхта в первую очередь движется, подчиняясь законам физики, а уже потом желаниям рулевого и экипажа. Главная задача рулевого и команды,— основываясь на знании законов физики, добиться такого управления рулем и парусами, чтобы в максимальной степени использовать возможности яхты, заложенные еще во время разработки проекта.

АЭРОДИНАМИКА ПАРУСНОГО ВООРУЖЕНИЯ

1. Понятие аэродинамической силы

Передвижение воздушных масс, происходящее преимущественно в горизонтальном направлении, мы воспринимаем как ветер. Воздух, как и всякий газ, имеет определенную массу, которую можно определить взвешиванием. Например 1 м³ воздуха при температуре 15° С и нормальном давлении, равном 760 мм ртутного столба, весит 1,225 кг. Следовательно, удельный вес воздуха равен 1,225 кг/м³, а плотность воздуха:

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

где g — ускорение силы тяжести.

В соответствии с основными физическими законами ветер, т. е. поток воздуха, обладающий массой и скоростью, должен иметь некоторое количество кинетической энергии E_k , которую можно определить с помощью известного уравнения:

$$E_k = \frac{m \cdot V^2}{2},$$

где m — масса, а V — скорость движения.

Кинетическую энергию, отнесенную к единице объема воздушного потока, в аэродинамике принято называть скоростным напором или динамическим давлением, которое наблюдатель, находящийся в воздушном потоке, ощущает тем сильнее, чем больше скорость ветра.

Динамическое давление ветра q может быть вычислено по следующей формуле:

$$q = \frac{mV^2}{2} = \frac{\rho V^2}{2} = \frac{0,125 V^2}{2} = 0,0625 V^2 \text{ кг/м}^2,$$

где V — скорость ветра в м/сек.

При рассмотрении явлений обтекания воздухом любых тел и возникающих при этом сил в аэродинамике принято воздух рассматривать как некую жидкость. При этом, если скорость ветра меньше скорости звука, т. е. меньше 300 м/сек, воздух ведет себя как несжимаемая жидкость, например вода. Следовательно, плотность и удельный вес его остаются неизменными.

Образно говоря, можно принять, что яхта плавает на границе двух жидкостей — воды и воздуха, одновременно будучи частично погруженной в ту и другую. Можно сказать, что мы живем на дне воздушного океана.

Как установлено гидродинамикой и аэродинамикой, явления, наблюдаемые в потоке воды или воздуха, обладают большим качественным сходством. Отличия же, которые могут быть отмечены или замерены, объясняются различной плотностью воды и воздуха. Удельный вес воды $\gamma_w = 1000 \text{ кг/м}^3$, тогда как удельный вес воздуха $\gamma_a = 1,225 \text{ кг/м}^3$. Следовательно, вода приблизительно в 820 раз плотнее воздуха.

При одинаковой скорости потоков можно предположить, что гидродинамические силы будут во столько же раз больше аэродинамических.

Большая относительная плотность воды является причиной разрушений, имеющих место, например, при стихийных бедствиях. Установлено, что различия, наблюдаемые между явлениями, происходящими в воздушном и водном потоках, относятся к количественной, а не качественной стороне явлений.

Кинетическая энергия ветра оказывает различное воздействие в зависимости от условий ее проявления. Во многих случаях можно предугадать результат действия ветра, руководствуясь здравым смыслом. Но нередко наши чутье, здравый смысл и интуиция приводят к ошибочным выводам.

Посмотрим на рис. 1, а. На две крыши разной формы дует ветер со скоростью 20 м/сек. Какая из крыш будет быстрее сорвана ветром? Здравый смысл нам подсказывает, что высокая, крутая крыша менее прочна и будет сорвана ветром раньше. На самом деле менее прочна низкая крыша. Или другой пример, см. рис. 1, б. На два паруса одинаковой формы и площади действует ветер с одной и той же скоростью. Один парус поставлен к ветру под углом 15° , другой — под углом 90° . На каком из

парусов возникнут большие аэродинамические силы? Кажалось бы, что на втором парусе; на самом же деле — на первом.

А теперь разберем случай, относящийся к обтеканию предметов не воздушным, а водным потоком. На рис. 1, в показаны две стоящие на буях лодки А и Б на реке с сильным течением.

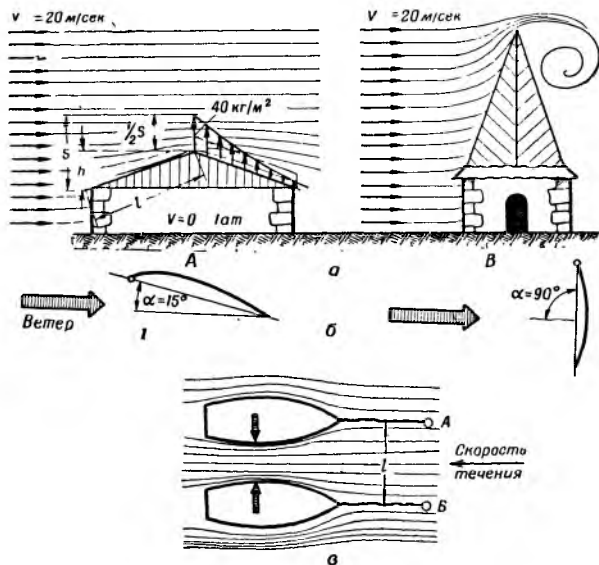


Рис. 1

Спрашивается, как будут вести себя лодки, если их сближать, как показано на рисунке стрелками? Многие ответят, что этому помешает вода, которая станет отталкивать лодки друг от друга, и чем лодки окажутся ближе, тем отталкивание будет сильнее.

Однако морская практика показывает, что лодки будут притягиваться друг к другу тем сильнее, чем меньше они удалены друг от друга. Когда это непонятное на первый взгляд явление не учитывается на практике, случаются тяжелые аварии с кораблями, идущими с большой скоростью на небольшом расстоянии друг от друга. Поэтому правилами мореходства установлены минимальные расстояния, которые допустимы между кораблями,

идущими параллельными курсами с большой скоростью. Ясно одно, что одних рассуждений, основанных на «здравом смысле» при объяснении явлений, относящихся к области аэро- или гидродинамики, недостаточно.

Чтобы правильно разбираться в происходящих явлениях, надо рассматривать действие ветра или поток воды с точки зрения законов физики, которым они подчиняются.

Аэродинамическая сила на парусе зависит, в общем, от давлений, возникающих на подветренной и наветрен-

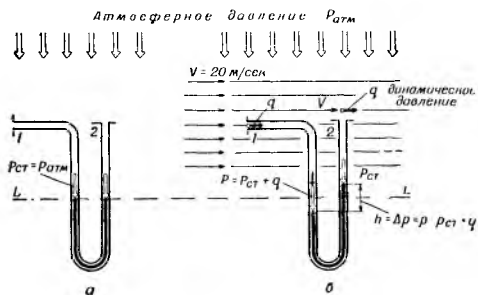


Рис. 2

ной сторонах паруса, точнее сказать, от изменений статического и динамического давлений при обтекании паруса воздушным потоком. Это явление станет понятнее, если рассмотреть способ, посредством которого эти давления измеряются.

Представим себе, что простейший U -образный стеклянный манометр, наполненный водой до уровня L , установлен в воздушном потоке (рис. 2, a и b). Отверстие 1 расположено перпендикулярно, а отверстие 2 параллельно воздушному потоку. Нетрудно убедиться, что увеличение скорости воздуха будет сопровождаться увеличением разности в уровнях воды в обеих трубках.

Разберемся в показаниях нашего простейшего манометра. Пока нет ветра, уровень воды в обеих трубках одинаков, поскольку на оба открытых конца U -образной трубки действует одно и то же статическое давление $p_{ст}$, равное атмосферному давлению $p_{атм}$. На уровне моря атмосферное давление в среднем равно $1 \text{ кг/см}^2 = 10\,000 \text{ кг/м}^2$, для обычного барометра — 760 мм ртут-

ного столба. При замене ртути водой высота барометра будет равна 10 000 мм, что исключает практическое использование водных барометров. Запомним, что разница в один миллиметр уровня водяного барометра соответствует давлению, равному 1 кг/м^2 .

Рассмотрим манометр, установленный в ветровом потоке (см. рис. 2, б). Статическое давление $p_{ст}$ на оба открытых конца трубки действует одинаково, так же как и в безветрие, и будет равно атмосферному давлению $p_{атм}$.

Поскольку отверстие трубки 1 расположено перпендикулярно к направлению ветра в ней кроме статического давления будет действовать дополнительно динамическое давление (скоростной напор) q , преобразовавшееся в данном случае в эквивалентное статическое давление, так как движение частиц воздуха на площади отверстия трубки 1 прекращено.

Это обычный случай превращения одного вида энергии в другой в соответствии с законом сохранения энергии: кинетическая энергия ветра в данном случае преобразовалась в потенциальную энергию, что подтверждается повышением статического давления в трубке 1.

Отверстие трубки 2, поставленное параллельно ветру, не испытывает никакого динамического воздействия ветрового потока.

Приведем пример: если скорость ветра V равна 20 м/сек, то динамическое давление будет:

$$q = 0,0625 V^2 = 0,0625 \cdot 20^2 = 25 \text{ кг/м}^2.$$

Полученная величина даст на манометре разницу в уровнях воды в трубках $h = 25$ мм.

Следовательно, высота столбика воды показывает величину динамического давления ветра:

$$h = q = \Delta p = p - p_{ст}.$$

Сумма статического $p_{ст}$ и динамического q давлений будет равна общему давлению. Итак, трубка 1 находится под общим давлением $p = p_{ст} + q$, в то время как трубка 2 только под воздействием статического давления $p_{ст}$.

Обратимся теперь к другому эксперименту. Вокруг двух пластинок и между ними проходит ветровой поток (рис. 3). По краям пластинки ограничены таким образом, что ветер проходит через сечения S_1 , S_2 , S_3 и S_4 , в

которых подключены U -образные манометры, наполненные водой до одного и того же уровня $L—L$. Выходы четырех манометрических трубок тщательно подогнаны к поверхности нижней выгнутой пластинки.

Пока нет движения воздуха, вода во всех четырех манометрах находится на одном уровне. Как только подует ветер, уровень воды в манометрах $б$ и $в$ начинает изменяться, что свидетельствует об изменении давлений в се-

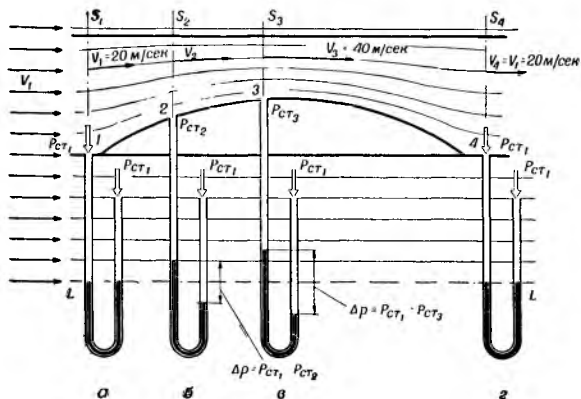


Рис. 3

чениях S_2 и S_3 , с которыми соединены отверстия трубок 2 и 3. Манометр $в$, соединенный с самым узким сечением S_3 , покажет наибольшее изменение давления.

Теперь попробуем ответить на такой вопрос: чем вызвана разница в показаниях манометров и почему давление в сечениях S_2 и S_3 уменьшается по сравнению с атмосферным давлением $p_{атм}$?

Не без основания можно предположить, что давление снижается в результате изменения скорости потока воздуха в сечениях 2 и 3. Заметим, что в манометрах $а$ и $г$ изменения давления не наблюдается, поскольку в этих сечениях скорость потока воздуха одна и та же. Верхняя и нижняя пластинки установлены строго параллельно, и поэтому скорость потока в сечениях S_1 и S_4 остается постоянной, равной первоначальной: $V = 20 \text{ м/сек}$.

Как было установлено ранее, при таких скоростях движения воздух можно рассматривать как несжимаемую среду, и поэтому скорость потока воздуха в сечениях

S_2 и S_3 будет больше, чем в сечениях S_1 и S_4 , т. е. обратно пропорциональна их площадям.

Количество воздуха, проходящего через любое сечение в единицу времени, должно быть одинаковым. Это количество можно вычислить зная площадь сечения и скорость потока воздуха по следующей формуле:

$$S_1 \cdot V_1 = S_3 \cdot V_3 \text{ или } \frac{S_1}{S_3} = \frac{V_3}{V_1}.$$

Если в сечении S_1 скорость потока воздуха $V=20$ м/сек, то в сечении S_3 , имеющем площадь в два раза меньше, эта скорость будет: $V_3=40$ м/сек. Соответственно динамические давления в сечениях S_1 и S_3 составят:

$$q_1 = 0,0625 \cdot V_1^2 = 0,0625 \cdot 20^2 = 25 \text{ кг/м}^2,$$

$$q_3 = 0,0625 \cdot V_3^2 = 0,0625 \cdot 40^2 = 100 \text{ кг/м}^2.$$

Таким образом, кинетическая энергия ветра возросла в четыре раза вследствие уменьшения площади поперечного сечения S_3 . Мы знаем, что никакая энергия не может возникнуть из ничего. Она только переходит из одной формы в другую, как было показано на рис. 2, б, где кинетическая энергия ветра, или, иначе, динамический напор, проявились в форме статического давления. В примере, приведенном на рис. 3, происходит обратное: увеличение скорости ветра, т. е. увеличение его кинетической энергии, сопровождается снижением давления.

В 1738 г. Даниил Бернулли установил, что статическое и динамическое давления одного и того же потока воды или воздуха находятся между собой в определенных отношениях, а именно: сумма этих двух давлений в определенной точке потока всегда остается постоянной. Это положение может быть выражено в форме уравнения:

$$p_{ст} + q = p_{ст1} + q_1 = \text{общему давлению (величина постоянная)}.$$

Это уравнение выражает в данной форме закон сохранения энергии и называется уравнением Бернулли.

Отсюда напрашивается следующий практический вывод: в каждой точке потока приращение скорости сопровождается определенным снижением давления, экви-

валентным увеличению скорости. При уменьшении скорости ветра соответственно увеличивается статическое давление.

Теперь мы в состоянии вычислить статическое давление, существующее в разных сечениях (см. рис. 3), приняв давление $p_{ст1}$ равным атмосферному давлению.

$p_{атм} = 760$ мм ртутного столба, или $= 10\,000$ мм столба воды, или $= 10\,000$ кг/м².

Суммарное общее давление будет:

$$\sum p = p_{ст1} + q_1 = 10\,000 \text{ кг/м}^2 + 25 \text{ кг/м}^2 = 10\,025 \text{ кг/м}^2.$$

В сечении S_3 общее давление по закону Бернулли должно быть таким же. Однако мы знаем, что динамическое давление в этом сечении равно 100 кг/м² и, следовательно:

$$10\,025 = 100 + p_{ст3}, \text{ откуда } p_{ст3} = 10\,025 - 100 = 9025 \text{ кг/м}^2.$$

В сечении S_3 разница между статическим и атмосферным давлениями составит:

$$\Delta p = p_{ст1} - p_{ст3} = 10\,000 - 9025 = 75 \text{ кг/м}^2.$$

Подъем воды в манометре b на 75 мм показывает, что в сечении S_3 наблюдается пониженное по сравнению с атмосферным давление, которое принято называть разрежением. Столбик воды в манометре b будет ниже, чем в манометре a , так как скорость в этом сечении меньше, чем в сечении S_3 . Следовательно, разрежение и подсос воды будут соответственно меньше.

Обратим внимание на то, что начальная скорость воздуха (20 м/сек) будет увеличиваться в более узком сечении над выгнутой нижней пластинкой. В результате в разных точках этой пластинки $1, 2, 3$ появятся силы разрежения, пытающиеся поднять пластинку, поскольку статическое давление под пластинкой будет больше, чем над ней.

Рассмотренные нами физические явления представляют собой основу, без которой были бы невозможны не только плавание под парусами, но и полеты планеров, самолетов, птиц.

А теперь вернемся снова к парусам и посмотрим, что происходит, когда парус находится в потоке воздуха, т. е. когда на него действует ветер (рис. 4). Перед мачтой по-

ток воздуха делится на две части: подветренную $S_{\text{п}}$ и наветренную $S_{\text{н}}$. На подветренной стороне сечение ветрового потока $S_{\text{п}}$ будет меньше сечения начального потока S , а скорость $V_{\text{п}}$ соответственно будет больше, чем действительная скорость ветра V , которую можно заметить на таком расстоянии от паруса, где действие его уже не проявляется.

Учитывая закон Бернулли, можно сказать, что атмосферное давление на подветренной стороне паруса будет меньше атмосферного давления, замеренного на некотором расстоянии от паруса. Больше всего скорость увеличится в районе мачты и передней части паруса, где будет находиться область наименьшего давления, или, иначе говоря, наибольшего разрежения.

Аналогичным рассуждением нетрудно установить, что на наветренной стороне паруса в районе мачты скорость ветра несколько снизится, а статическое давление соответственно повысится и станет выше атмосферного, т. е. появится некоторое дополнительное давление сверх существующего атмосферного. Таким образом, полезная работа паруса будет вызвана тем, что на нем начнут образовываться давления, отличающиеся по величине от атмосферного. Повышенное давление, возникающее на парусе $P_{\text{н}}$, точно так же, как и пониженное давление на парусе $P_{\text{п}}$, можно изобразить графически (см. рис. 4, б). Действие их направлено перпендикулярно к ткани паруса, а величина изменяется в зависимости от изменения скорости потока воздуха в данной точке.

Суммарный результат изменения давлений на подветренной и наветренной поверхностях паруса можно представить в виде одной равнодействующей аэродинамиче-

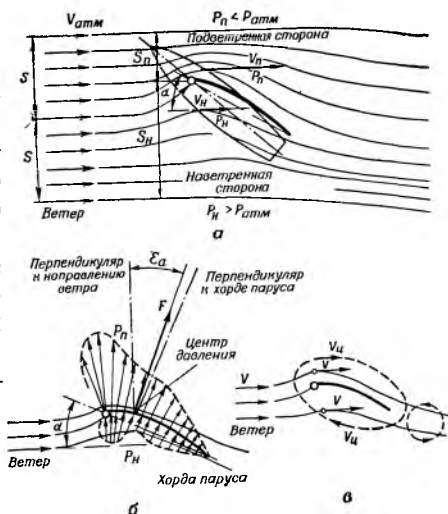


Рис. 4

ской силы \vec{F} , направленной под некоторым углом ε_a к линии, перпендикулярной к направлению ветра. Равнодействующая сила F может быть направлена не только перпендикулярно к хорде профиля паруса, как считают многие яхтсмены. Точка приложения аэродинамической силы находится несколько ближе к мачте, в так называемом «центре давления».

Среди яхтсменов распространено мнение, что на наветренной стороне паруса воздух сжимается, а на подветренной, наоборот, становится менее плотным. Такое мнение ошибочно.

Изменение плотности воздуха при его движении возможно только при скоростях, близких или превосходящих скорость звука, т. е. 300 м/сек. Единственной причиной возникновения аэродинамической силы является переход кинетической энергии ветра в другие формы энергии, который происходит на парусе без изменения плотности воздуха.

Появление такого рода аэродинамической силы можно объяснить по-другому, не противореча уравнению Бернулли. Это объяснение основано на теоретическом предположении, что парус находится под действием двух потоков воздуха: первый прямо обтекает парус, а второй поток (круговой) движется вокруг паруса в направлении часовой стрелки со скоростью $V_{\text{ц}}$ (см. рис. 4, в).

Суммируя эти два движения по правилам механики, получим ту же картину распределения давлений и разрежений, которая была рассмотрена в предыдущем примере. Интересно отметить, что теоретическое предположение о существовании циркуляционного (кругового) движения воздуха вокруг паруса, сомнительное с точки зрения здравого смысла, не трудно подтвердить простейшим экспериментом.

Возьмем кусок волнистого картона, уравновесим его и укрепим булавкой или шпилькой на тупом конце карандаша, как показано на рис. 5, а. Если под этим кусочком волнистого картона близко от него двигать второй лист картона в направлении V , то в результате циркуляции воздуха волнистый картон начнет отклоняться в противоположном направлении $V_{\text{ц}}$. Если бы циркуляции воздуха не было, волнистый картон или оставался бы на месте или под влиянием трения воздуха поворачивался бы в сторону движения нижнего листа картона.

Подтверждением теории циркуляции могут быть также опыты, проделанные физиком Магнусом (1852 г.). Рядом опытов он установил, что под действием ветра на валу, вращающемся с окружной скоростью ω , возникает аэродинамическая сила F , направленная перпендикулярно к оси вала и направлению ветра (см. рис. 5, б).

Открытие, сделанное Магнусом, получило в физике название эффекта Магнуса. Для использования эффекта Магнуса в практических целях инженер Флетнер построил роторное судно. При боковом ветре оно могло плыть вперед. Однако роторные суда оказались нерентабельными. Эффект Магнуса используется и теннисистами в так называемых крученых и укороченных ударах.

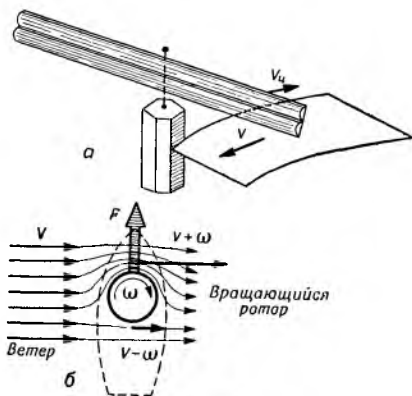


Рис. 5

Вернемся к нашему примеру с двумя кровлями (см. рис. 1, а). Низкая крыша будет действовать так же, как нижняя пластинка (см. рис. 3). Над кровлей будет образовываться пониженное атмосферное давление, в то время как внутри дома будет нормальное атмосферное давление. Следовательно, возникнет сила, стремящаяся оторвать кровлю. Если сужение сечения ветрового потока над крышей будет равно $\frac{1}{2} S$, то на каждый квадратный метр поверхности крыши будет действовать в среднем давление около 20 кг/м^2 . При размерах крыши 80 м^2 она должна выдержать срывающую силу ветра, приблизительно равную 1600 кг .

При крутой, высокой крыше поток воздуха за ее коньком будет завихренным, бурным, а возникающие при этом силы значительно меньшими, чем в первом случае. На крышу будет действовать динамический напор ветра, силу которого можно вычислить по формуле скоростного напора:

$$q = 0,0625 \cdot V^2 = 0,0625 \cdot 20^2 = 25 \text{ кг/м}^2.$$

На высокую крышу ветер действует только с одной стороны, т. е. на площади 40 м^2 , с силой 25 кг/м^2 , т. е. с суммарной силой, равной 1000 кг , что значительно меньше, чем на плоской крыше. В горных районах скорость ветра часто превышает 20 м/сек , а так как сила ветра прямо пропорциональна квадрату скорости, такие ветры могут быть весьма опасными.

Опыт многих поколений позволил жителям Татр прийти к таким же выводам и строить дома с высокими, крутыми крышами. Жители Альп возводят дома и с плоскими кровлями, но в этом случае они защищают их от действия сильных ветров большими камнями, которые укладывают на крыше.

2. Расположение давлений на парусе

Величину давлений на подветренной и наветренной сторонах паруса можно измерить с помощью простейших манометров. Такие измерения проводились в лабораториях на моделях и в естественных условиях на плавающей яхте. На рис. 6 показано положение трех рядов от-

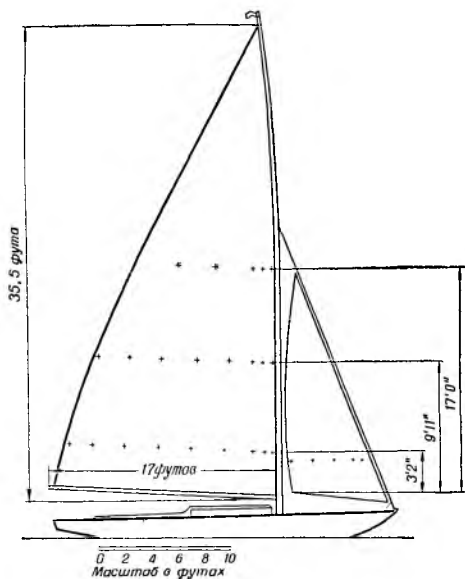


Рис. 6

верстий на гроте и одного ряда на стакселе американской яхты «Paroose», через которое делались замеры давлений во время движения яхты в лавировку, при легких ветрах.

Отверстия с очень малым диаметром соединялись резиновыми трубками с батареей манометров, установленной на палубе. Показания манометров фиксировались одновременно с помощью фотокамеры. Принцип проведения измерений показан на рис. 7 для одной точки, чтобы не усложнять рисунка.

Вначале давление измерялось на одной стороне паруса, а после перемены галса с другой стороны паруса, иначе говоря, работала всегда одна и та же сторона паруса, положение которой относительно ветра каждый раз

менялось после поворота. Манометры показывали разницу между атмосферным давлением на палубе в месте их установки и давлениями в точках замера на парусе.

Во время проведения замеров скорость ветра может измениться в любую сторону, что сразу же отразится на величине показаний манометров.

Чтобы устранить такое нежелательное влияние, результаты замеров пересчитывались в безразмерную форму путем деления показания, снятого с манометра, на величину динамического давления ветра, вычисленного в момент снятия показаний.

Полученные таким образом относительные величины давлений в каждом ряду отверстий на парусе использовались при построении графика (рис. 8). На горизонтальной оси нанесена в масштабе форма паруса с сохранением истинного соотношения между стрелкой прогиба и хордой паруса. На вертикальной оси отложены значения отношений $\frac{\Delta p}{q}$, причем положительные значения этих отношений (при увеличении давления выше атмосферного) отложены ниже оси, а отрицательные — выше.

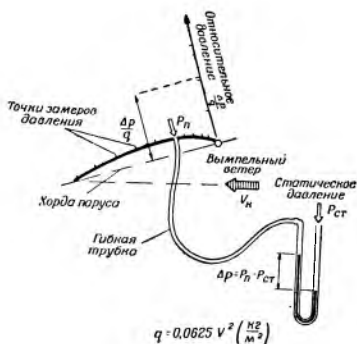


Рис. 7

Построенный график позволяет определить давление в отдельных точках паруса: например, при скорости ветра 10 м/сек динамическое давление будет $q = 0,0625 \cdot 10^2 = 6,25 \text{ кг/м}^2$. Тогда на парусе в точке, где величина

$$\frac{\Delta p}{q} = -2,$$

должно быть давление

$$p = -2 \cdot 6,25 = -12,5 \text{ кг/м}^2.$$

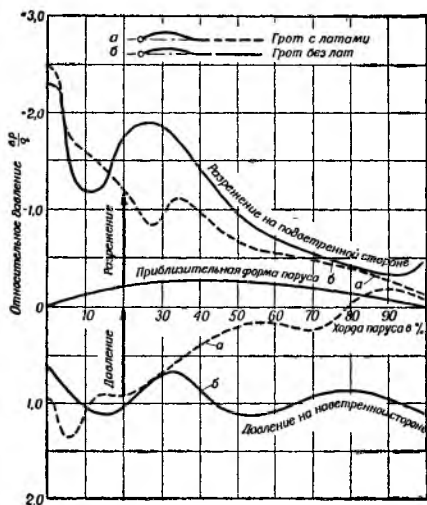


Рис. 8

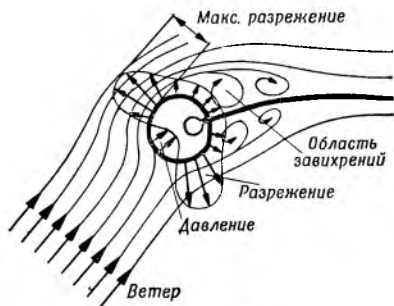


Рис. 9

Заметно довольно резкое падение давлений на подветренной стороне паруса около мачты. Это можно объяснить влиянием тела мачты на характер обтекания паруса ветром. Наглядно ветровой поток показан на рис. 9.

Максимальное разрежение образуется в местах, где скорость ветра становится максимальной, а именно: на сторонах мачты, касательных к направлению ветра. Это обычно происходит в самом широком сечении мачты,

за которым возникают завихрения, поглощающие часть полезной энергии ветра. Уменьшение кинетической энергии потока в районе за мачтой подтверждается резким изломом и падением кривых.

Приведенный пример отрицательного влияния мачты на характер обтекания паруса ветром убедительно указы-

вают на тесную зависимость, существующую между давлениями, возникающими на парусе, и характером воздушного потока. Любое препятствие на пути ветра будет уменьшать его кинетическую энергию, уменьшать разрежение на подветренной стороне паруса и тем самым уменьшать аэродинамическую силу паруса.

Не только мачта, но и любые неровности на парусе, например складки, изгиб ткани на концах лат и т. п., будут причиной бесполезной затраты кинетической энергии ветра.

Следует обратить внимание на то, что наибольшие величины давлений на обеих сторонах паруса расположены в основном в его передней части. Постепенно уменьшаясь к

задней шкаторине, давление приближается к нулю. Такое распределение давлений играет большую роль на практике, особенно на лавировке.

Посмотрим на рис. 10. В любой точке паруса действие разрежения на подветренной стороне паруса можно сложить с действием давления на его наветренной стороне и представить одним вектором силы, направленной перпендикулярно к поверхности паруса. Такие векторы (см. рис. 10) P_1 , P_2 и P_3 показаны для трех точек. Каждый из них можно разложить на две силы, действующие по курсу яхты и перпендикулярно к нему. Первая из них P_T дает представление о силе тяги паруса. Заметим, что наибольшее значение в образовании силы тяги паруса имеют силы, образующиеся на передней части паруса, которые как по величине, так и по направлению выгоднее сил, возникающих на задней части паруса.

Силы же, образующиеся на задней части паруса, могут быть совсем бесполезны, а при слишком сильном выборе шкотов или в случае заворачивания задней части паруса на ветер будут оказывать отрицательное (тормозящее) действие.

В любой точке паруса можно провести касательную к его поверхности и другую линию параллельно курсу ях-

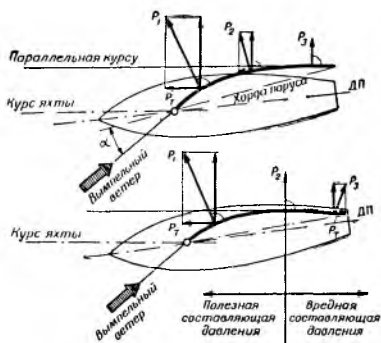


Рис. 10

ты. Если вектор аэродинамической силы в этой точке направлен вперед по ходу яхты, значит в этой точке парус действует полезно. Если вектор направлен назад (см. рис. 10), то сила тяги не только не увеличивается, а, наоборот, уменьшается. При этом сила крена и дрейфа возрастает.

Анализ рис. 10 позволяет сделать следующий вывод: парус, находящийся в ветровом потоке, может развивать аэродинамическую силу тяги, которая зависит главным образом от двух факторов:

а) от профиля паруса, в чем решающее значение имеет раскрой, сорт ткани, изготовление паруса;

б) от установки паруса по отношению к вымпельному ветру, т. е. от угла атаки α , что полностью зависит от воли рулевого.

Для получения наибольшей силы тяги и снижения силы крена следует увеличивать давление на передней части паруса и уменьшать его на задней части.

Рассмотрим это положение более внимательно. Вернемся к рис. 8, на котором показаны давления для паруса с латами и без лат. Отсутствие лат способствовало в какой-то степени заворачиванию задней части паруса на ветер, что наблюдается также в случае несоответствия жесткости лат и силы ветра.

Особенно заметно это бывает на дакроновых парусах с жестким швом на задней шкаторине при сильном ветре.

Тогда пузо паруса несколько передвигается назад, тяга падает, а крен увеличивается. Теоретическое объяснение этому явлению можно найти при сравнении расположения давлений по наветренной стороне обоих парусов, показанных на рис. 8. В отличие от паруса с плоской, усиленной задней шкаториной парус без лат или с чрезмерно мягкими латами получает в районе задней шкаторины значительное поле давлений, влияющих на него неблагоприятно, подобно случаю, показанному на нижней части рис. 10. Плоская задняя часть паруса может считаться хорошим показателем для оценки его лавировочных качеств.

Другой характерной особенностью распределения давлений на парусе является большая разница между величиной разрежения и величиной повышенного давления. Установлено, что на подветренной стороне паруса возни-

кает от 60 до 70% всей аэродинамической силы паруса. Этот вывод касается в основном паруса с латами.

Однако использовать свойства подветренной стороны паруса практически не легко, так как именно там сильнее всего проявляются различные вредные влияния, деформирующие поток воздуха и плавность обтекания им поверхности паруса. Отчетливо это можно видеть на рис. 11, на котором показаны кривые давлений на подветренной и наветренной сторонах грота и стакселя, работавших отдельно друг от друга. Сравнение величин давлений на обоих парусах показывает, что стаксель, у которого ветер «не портится», поскольку он не имеет мачты, работает примерно в два раза эффективнее, чем грот.

На рис. 11 обращают на себя внимание нежелательно большие давления на стакселе вблизи задней шкаторины. Это вызвано заворотом задней шкаторины на ветер, что встречается довольно часто. Такой дефект можно исправить, использовав латы, если это разрешено правилами, или перешив паруса. Положительный эффект, который можно ожидать после исправления такой шкаторины, показан на рисунке штрих-пунктиром.

При одновременной работе грота и стакселя последний оказывает положительное влияние на грот и улучшает качество парусного вооружения яхты в целом.

Сравнивая кривые, изображенные на рис. 8 и 11, можно отметить, что у грота, работающего вместе со стакселем (см. рис. 8), разрежение значительно сильнее, нежели у грота без стакселя (см. рис. 11).

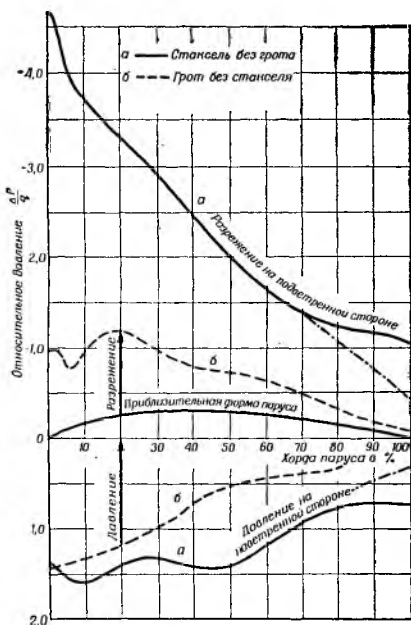


Рис. 11

Несмотря на использование оттяжки гика, нижняя часть грота стоит к ветру под бóльшим, чем верхняя часть паруса, углом, т. е. грот как бы скручивается.

На подветренной стороне струи воздуха стремятся оторваться от поверхности паруса. Применение стакселя положительно влияет на обтекание подветренной стороны грота, устраняет или снижает отрывы струй воздуха, и поэтому применение стакселя выгодно. Для получения полной картины распределения давлений на парусе надо произвести замеры во многих его сечениях.

На рис. 12 показаны результаты таких замеров для бермудского грота, снятых при постоянной скорости ветра. На рис. 12, *а* помещена схема давлений, расположенных вдоль сечения А—Б, когда парус был установлен к ветру под углом $\alpha = 20^\circ$. В верхней части рисунка приводится схема распределения разрежений на подветренной стороне паруса, построенная по результатам замеров вдоль сечений 1, 2, 3, 4... Проведенные на поверхности паруса линии соединяют точки с одинаковым давлением.

Обратим внимание на плавность линий в средней части паруса и на изломы линий, находящихся вверху паруса и около гика. Характер этих линий показывает, что нижняя и верхняя части паруса находятся под действием нарушенного ветра, тогда как средняя часть паруса обдувается более упорядоченным потоком воздуха.

На рис. 12, *б* показано расположение давлений по сечению В—Г при угле установки паруса к ветру $\alpha = 90^\circ$, т. е. на курсе фордевинд. Над рисунком помещена схема расположения разрежений на подветренной стороне, построенная с учетом проведенных замеров, аналогично предыдущему примеру.

Не трудно заметить разницу между распределением давлений на парусах *а* и *б*. Она объясняется различным характером обтекания парусов ветром. Обтекание паруса *б* явно беспокойное, завихренное. Струи воздуха, обтекая парус по его периметру, затем отрываются от паруса, и на подветренной стороне образуется обширная зона завихрений, поглощающих часть кинетической энергии ветра. Это отрицательно сказывается на величине разрежения. Обтекание паруса *а* спокойное: струи воздуха следуют за профилем паруса, не встречая на своем пути преград, вследствие чего возникают полезные для образования силы тяги разрежения.

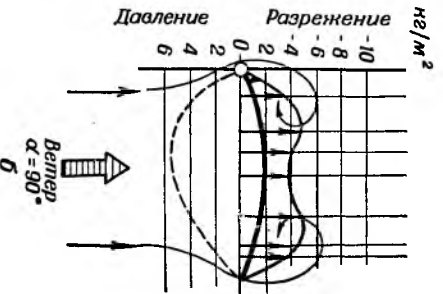
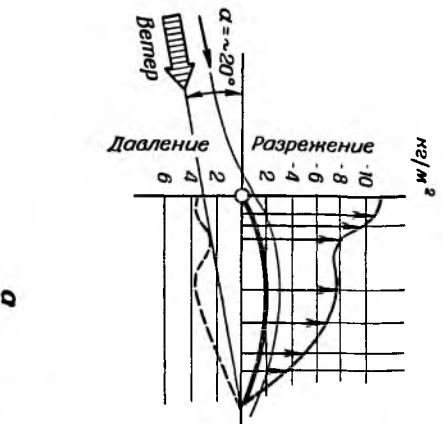
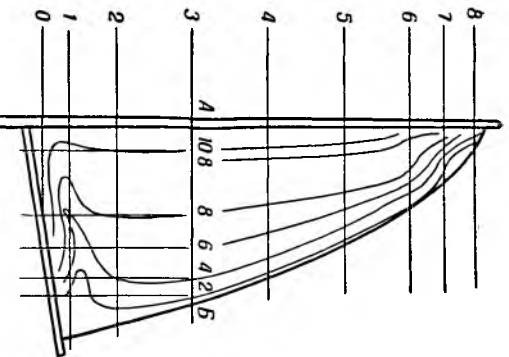
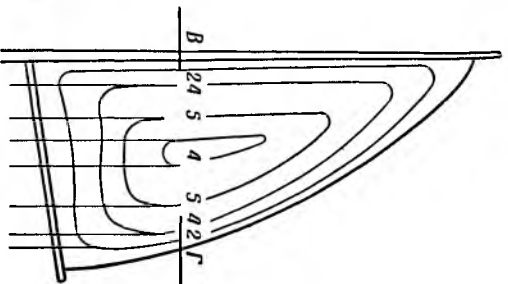


Рис. 12



Подветренная сторона



Подветренная сторона

Сравнивая поле давлений на обеих сторонах парусов a и b , можно убедиться, что полезная аэродинамическая сила на парусе a будет больше, чем на парусе b . Оговоримся, что это возможно при соблюдении двух условий:

- 1) правильно выбранного пуза и профиля паруса a ;
- 2) угол установки паруса к ветру должен быть таким, чтобы обтекание подветренной стороны паруса проходило с максимальными скоростями, но без отрыва струй воздуха от поверхности паруса.

3. Результаты действия аэродинамической силы

Равнодействующая аэродинамическая сила F может быть разложена на две основные силы, как показано на рис. 13, a , b и $в$, а именно:

1. На силу тяги F_x , действующую вдоль курса яхты.
2. На силу крена F_{yz} , действующую перпендикулярно к курсу яхты и мачте.

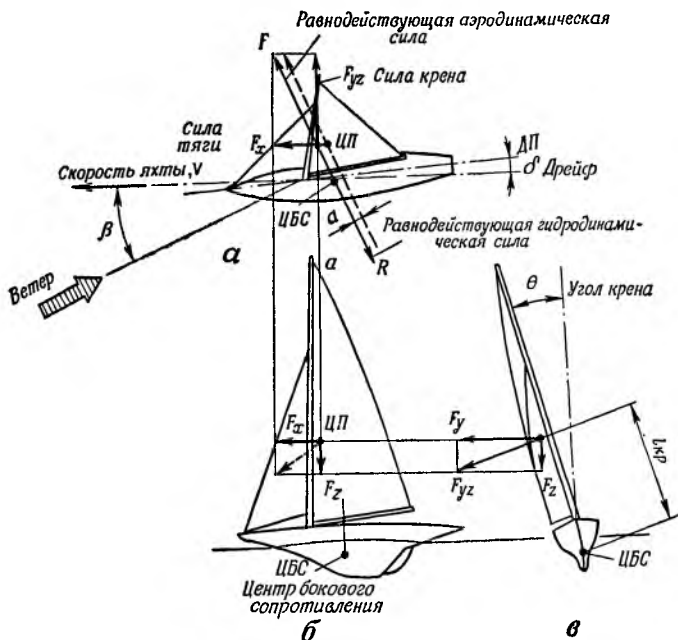


Рис. 13

В свою очередь, сила F_{yz} может быть также разложена на две силы, величина которых будет зависеть от угла крена Θ . Это следующие силы:

горизонтальная составляющая сила $F_y = F_{yz} \cdot \cos \Theta$ и вертикальная составляющая $F_z = F_{yz} \cdot \sin \Theta$. Когда угол крена Θ равен нулю, то сила $F_{yz} = F_y$.

Рассмотрим влияние этих сил на поведение яхты.

1. Яхта будет двигаться по курсу со скоростью V , зависящей от величины силы тяги F_x . С увеличением силы тяги F_x увеличивается и скорость яхты.

2. Сила дрейфа F_y вызывает дрейф яхты, который будет расти с увеличением этой силы. Дрейф можно измерить, определив угол δ между курсом яхты и ее диаметральной плоскостью.

3. Крен яхты, измеряемый углом Θ , зависит от величины кренящего момента $M = F_{yz} \cdot l_{кр}$, где $l_{кр}$ — расстояние между фактическим центром парусности — ц. п. (через который проходит аэродинамическая сила F) и центром бокового сопротивления ц. б. с. (через который проходит равнодействующая гидродинамических сил R). Крен яхты растет с увеличением силы F_{yz} или плеча $l_{кр}$.

4. Уравновешенность на курсе может быть определена углом отклонения руля от диаметральной плоскости, который необходим для удержания яхты на курсе.

Яхта уравновешена, когда равнодействующие аэродинамических и гидродинамических сил расположены и действуют по одной прямой линии (см. рис. 13, *a*). Когда эти силы не находятся на одной прямой, яхта приводится или уваливается, так как образуется некоторый момент с плечом a , равным расстоянию между горизонтальными проекциями этих сил.

На рис. 13, *a* аэродинамическая сила F показана пунктирной линией, расположенной ближе к корме по сравнению с гидродинамической силой R . В данном случае яхта будет приводиться. Очевидно, что с ростом силы F или ее составляющей F_{yz} неуравновешенность увеличится. Чтобы держать яхту на курсе, потребуется увеличить угол отклонения руля.

5. Слагаемая сила F_z будет вызывать дополнительное углубление корпуса яхты, которое будет тем больше, чем больше крен. Вместе с силой тяги F_x , сила F_z в большей или меньшей степени станет вызывать изменение дифферента.

Влияния аэродинамических сил, перечисленных в пунктах 2, 3, 4 и 5, неблагоприятны для гоночных качеств яхты, так как при этом увеличивается гидродинамическое сопротивление и снижаются лавировочные качества яхты.

Главная задача гонщика и конструктора заключается в получении от парусного вооружения максимальной силы тяги F_x , при минимальных значениях вредной силы F_{yz} или ее составляющих F_y и F_z .

Чтобы определить результаты действия силы F , надо знать ее три основные характеристики, а именно: а) величину, б) направление действия, в) точку приложения, т. е. точку на парусе, через которую проходит линия ее действия. Эта точка называется центром парусности — ц. п. (фактическим в отличие от геометрического ц. п.). Все эти характеристики могут быть получены путем измерений.

4. Измерение аэродинамических сил

На основе многочисленных экспериментов, проведенных как в лабораторных, так и в естественных условиях, а также из общей теории аэродинамики известно, что вышеупомянутые характеристики аэродинамической силы зависят от следующих факторов:

а) динамического давления вымпельного (кажущегося) ветра — V_K м/сек:

$$q = 0,0625 \cdot 0,0625 \cdot V_K^2;$$

б) площади паруса S м²;

в) угла установки паруса относительно направления вымпельного ветра;

г) формы паруса, его профиля, полноты пуза и т. п.;

д) свойств парусной ткани, т. е. ее гладкости, жесткости, тягучести, плотности и т. п.;

е) угла наклона парусного вооружения Θ .

Говоря о форме паруса, обратим внимание на его удлинение, которое можно выразить отношением высоты паруса H к длине средней хорды его профиля l (рис. 14).

Для прямоугольных парусов оно равно отношению $\frac{H}{l}$. Для парусов треугольных, гафельных, гуари и т. п., у которых

ширина паруса H изменяется с высотой, удлинение определяется делением высоты паруса H на его среднюю ширину. Среднюю ширину можно вычислить делением площади паруса S на его высоту H , т. е.

$$\text{удлинение} = \frac{H}{\frac{S}{H}} = \frac{H^2}{S}.$$

Полнота паруса, т. е. пузо паруса, определяется отношением величины стрелки прогиба к длине хорды профиля паруса l , т. е.

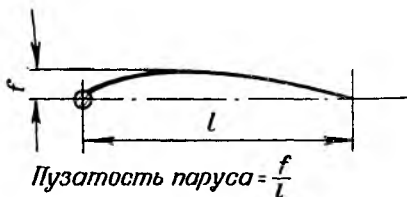
$$\text{полнота} = \frac{f}{l}.$$

Влияние всех перечисленных факторов можно учесть, с некоторыми оговорками, при определении аэродинамической силы с помощью определенных формул. Установлено, что два совершенно одинаковых (по форме, покрою, ткани и т. п.) паруса, отличающиеся только площадью и работающие с одним углом атаки, при любых ветрах образуют аэродинамические силы, по

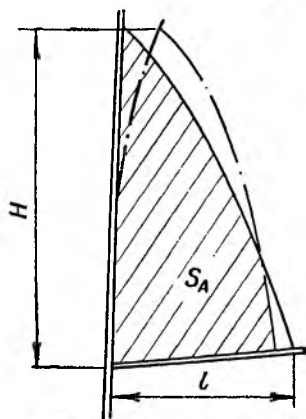
величине пропорциональные динамическому давлению ветра и площади паруса. Если влияние факторов, указанных в пунктах в, г, д и е, выразить через коэффициент C , то аэродинамическая сила, возникающая на парусе, может быть вычислена по следующей формуле:

$$F = q \cdot S \cdot C = 0,0625 V_k^2 \cdot S \cdot C,$$

где: F — аэродинамическая сила в кг, V_k — скорость вымпельного ветра в м/сек, S — площадь парусности в m^2 , C — коэффициент аэродинамической силы.



Пузатость паруса = $\frac{f}{l}$



Удлинение паруса = $\frac{H}{l} \approx \frac{H^2}{S}$

Рис. 14

Если известна скорость ветра V_k и размеры парусов, то площадь парусов и динамическое давление ветра вычисляются легко.

Найти значение коэффициента C довольно сложно. Его определяют экспериментальным путем в аэродинамических трубах или путем тщательных замеров на яхте в естественных условиях.

Экспериментальные работы гораздо удобнее проводить в аэродинамических трубах, где можно очень точно поддерживать заданную скорость ветра. Кроме того, используя широкие возможности оснащения опыта регистрирующими приборами, не трудно установить отдельно влияние таких геометрических факторов, как пузатость паруса, его удлинение, угол установки паруса к ветру (угол атаки) и др. Но при всех достоинствах модельных испытаний в аэродинамических трубах полученные результаты нельзя полностью переносить в практику, так как невозможно создать полное подобие всех условий, в которых проходит плавание яхты.

Вопросы аэродинамики яхты следует решать как с помощью натуральных испытаний яхт, так и испытаний на моделях в аэродинамических трубах. Эти испытания взаимно дополняют друг друга и помогают корректировать результаты.

Значение испытаний в аэродинамических трубах станет яснее, если мы рассмотрим методику измерений возникающих на парусе сил и способ их графического изображения.

На рис. 15 показаны система действующих на парус сил и размещение модели в трубе. Паруса, по размерам

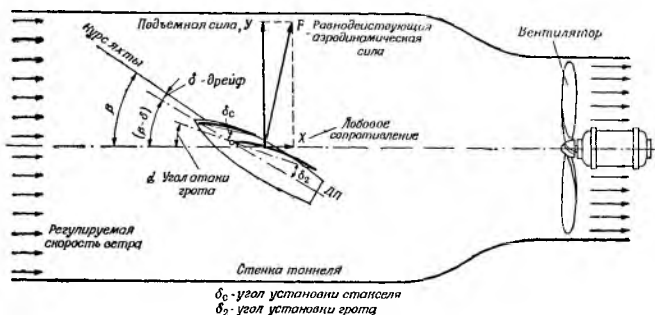


Рис. 15

возможно ближе к натуральным, прикреплены к специальному устройству, с помощью которого измеряются силы, возникающие на парусе при продувке. Вся установка размещена в трубе, оборудованной для регулирования и точного поддержания заданной скорости ветра. Из практических соображений измерительное устройство сконструировано для замеров двух сил: поперечной силы Y , перпендикулярной к направлению ветра (подъемная сила), и силы лобового сопротивления X , действующей вдоль направления ветра.

Непосредственное измерение равнодействующей силы F настолько усложняет конструкцию измерительного устройства, что от этой мысли пришлось отказаться.

Величина равнодействующей силы F для любых углов α атаки паруса вычисляется по правилу параллелограмма, построенного на основании замеров сил Y и X .

Преыдушие исследования показали, что для получения результатов, необходимых для оценки аэродинамических качеств паруса, надо проводить эксперименты на моделях, которые по своим размерам приближаются к натурным парусам, а также использовать обычную парусную ткань. Однако, кроме опытов Ричарда Фэйри в Англии, проводившихся с целью повышения ходовых качеств яхты класса J , остальные продувки парусов, как правило, велись в трубах с малыми размерами, оборудованных обычными силовыми устройствами, употребляемыми в авиационных экспериментах. Поневоле приходилось продувать модели малых размеров, причем паруса делались не из ткани, а из тонкой жести. Результаты, полученные с жесткими парусами, очевидно, не будут соответствовать результатам, полученным в экспериментах с мягким парусом, так как материал, из которого сделан парус, различный. При решении некоторых частных задач, например для выяснения влияния отдельных факторов при элиминировании прочих, а также при определении общей качественной тенденции, могут быть использованы и опыты с жесткими парусами.

По мнению ведущих английских парусных мастеров, правильную модель паруса, соответствующую натуре, можно сделать только, если высота модели будет около 2,5 м. При меньших размерах возникают большие трудности в сохранении подобия в покрое паруса, эластичности ткани, технологии выработки и т. п.

Для приближения условий испытаний в трубах к естественным условиям необходимо также: а) создать подобие водной поверхности (предположительно) с погруженной в воду частью корпуса яхты; б) избежать влияния веса ткани на форму паруса. Для этого испытуемый парус должен ставиться вертикально или с наклоном, соответствующим крену (при проведении некоторых экспериментов из-за неподходящей конструкции измерительного устройства парус ставился в горизонтальном положении); в) модель наклонять относительно постоянной поверхности воды; г) регулировать натяжение и направление шкотов, меняя точки их крепления, и т. п.

Обратимся к рис. 16, на котором показано измерительное устройство аэродинамической трубы. Модель паруса яхты класса «Финн» посредством мачты и гика связана с понтоном, плавающим в водном бассейне, устроенном чуть ниже уровня пола трубы. Запас плавучести понтона достаточно велик, чтобы препятствовать большому крену, а без ветра понтон сохраняет горизонтальное положение.

Движения понтона воспринимаются тремя пружинами из специальной стали, посредством которых замеряются силы Y_1 , Y_2 и X . Отклонение в пружинах порядка 0—0,05 мм с помощью электрических датчиков с индукционными усилителями передается на электронный указатель, показывающий величину сил Y_1 , Y_2 и X в фунтах.

Основание, на котором установлена модель паруса или модель полной яхты, имеет дистанционное управление, которое позволяет (по желанию) изменять положение моделей относительно направления ветра. Специальные крепления, размещенные на вращающемся основании, позволяют регулировать натяжение шкотов, а также менять вертикальное и горизонтальное положение гика. Это позволило испытывать не только влияние натяжения шкотов, но и влияние расстояния между гиком и палубой или поверхностью воды, что оказалось в значительной степени существенным для коэффициента полезного действия вооружения. Одновременно можно было фотографировать форму профиля паруса, его полноту и скрученность. Для этого на парусе на равном расстоянии друг от друга были проведены черные полосы.

После беглого знакомства с измерительным устройством обратимся к самому способу измерения аэродина-

мических сил и познакомимся со способом графического изображения результатов замеров.

Для примера возьмем наиболее простое вооружение — модель паруса яхты класса «Финн» (масштаб 2 : 5) с площадью $S = 1,68 \text{ м}^2$.

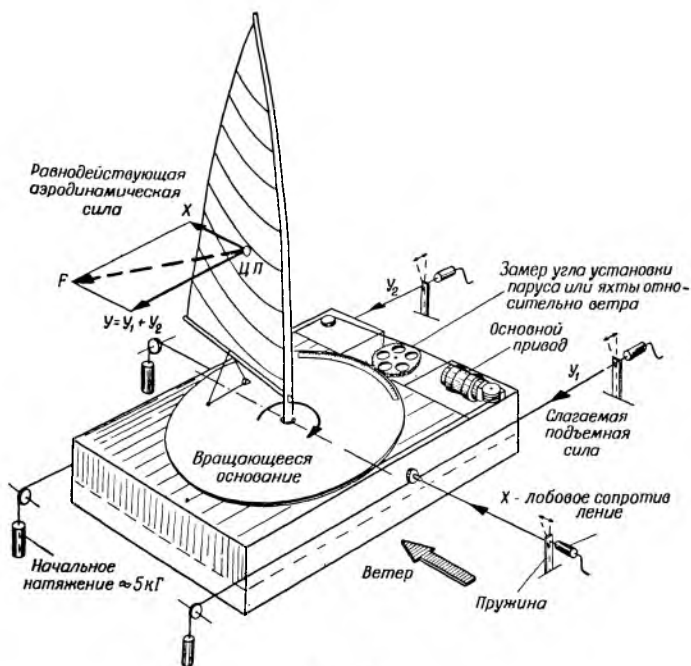


Рис. 16

Свободно изменяя углы атаки паруса α от левентика до 90° , измерим величины сил Y_1 , Y_2 и X через каждые $2,5$ градуса, причем $Y_1 + Y_2 = Y$ (см. рис. 16).

Результаты замеров можно представить или в виде таблицы (см. далее) или в виде графиков (рис. 17). Последний способ гораздо нагляднее позволяет проследить, как меняются силы Y и X — слагаемые аэродинамической силы F — в зависимости от угла атаки паруса α . Замеры сил Y и X на приборах были записаны в английских фунтах, но на правой стороне рисунка дана шкала в килограммах (см. рис. 17). К сказанному добавим, что заме-

ры проводились при постоянной скорости ветра $V=8,94$ м/сек. За угол атаки паруса к ветру принимался угол между гиком и направлением ветра.

Форма сечений паруса, пузатость и скручивание верхней части паруса по отношению к гикю, снятые на фото

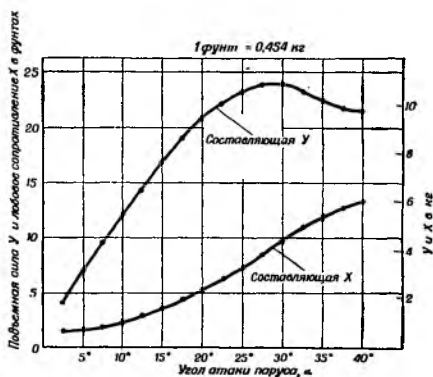


Рис. 17

по шести сечениям (I—VI), показаны на рис. 18. Там же указано расстояние галсового угла паруса от низа аэродинамической трубы, т. е. от поверхности воды.

Зная величины составляющих сил Y и X , не трудно определить равнодействующую аэродинамическую силу F графическим способом (рис. 19), а именно:

на вертикальной оси откладываем в масштабе величины подъемной силы Y в тех единицах, в которых они были измерены (в фунтах);

на горизонтальной оси аналогично отложим значения лобового сопротивления X .

Величины сил Y и X поочередно наносим на график для одинаковых углов атаки $\alpha=5,7, 10,12$ и т. д. до 40° . Полученный ряд точек соединим плавной кривой (см. рис. 19).

Рассмотрим пример, когда парус установлен к ветру под углом $\alpha=27,5^\circ$: замеренная величина силы $Y=24,10$ фунта (сравните с вышеприведенной таблицей), а сопротивление $X=8,40$ фунта.

α°	2,5°	5°	7,5°	10°	12,5°	15°
Y_1	0,60*	1,35	2,30	3,0	3,7	4,7
Y_2	4,10	5,80	7,25	9,00	10,70	12,40
X	1,60	1,80	2,00	2,40	2,85	3,60
Y	4,70	7,15	9,55	12,00	14,40	17,10

α°	17,5°	20°	22,5°	25°	27,5°	30°
Y_1	5,50	6,05	6,70	7,00	7,20	7,00
Y_2	13,80	14,90	15,70	16,30	16,90	17,10
X	4,35	5,15	6,10	7,15	8,40	9,60
Y	19,30	20,95	22,40	23,30	24,10	24,10

* В фунтах.

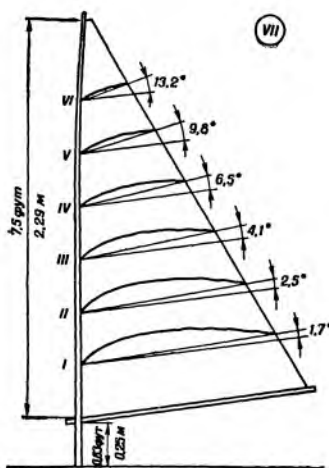


Рис. 18

Из параллелограмма сил не трудно определить равнодействующую силу F . Вычерченная по точкам кривая называется полярной паруса.

Построение такого графика весьма ценно, так как он позволяет определить величину и направление действия аэродинамической силы F для любого угла атаки.

Величина и направление аэродинамической силы F будет выражаться вектором, один конец которого на-

ходится в нулевой точке — начале координат (он же центр парусности), а другой — скользит по кривой.

График, показанный на рис. 19, очень ценен только для паруса, на котором велись опыты с определенной площадью парусины S и для определенной скорости ветра. Этот график дает наглядную картину сил, действующих на парус, но при всех своих достоинствах обладает серьезным недостатком. Он не дает

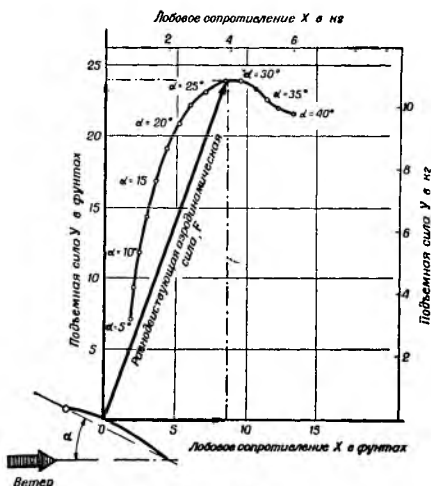


Рис. 19

возможности сравнить аэродинамические качества этого паруса с другими парусами, отличающимися по площади.

Чтобы можно было воспользоваться результатами экспериментов над моделями для оценки разных парусов и даже комбинации парусов грот — стаксель, непосредственно замеренные величины сил выражают через их коэффициенты C , о которых уже упоминалось в предыдущем изложении.

Коэффициенты вычисляются посредством деления величины замеренной силы на динамическое давление ветра q , а также на площадь парусности S . Следовательно, соответственно будут получены коэффициенты:

$$C_x, C_y \text{ или } C = \frac{X, Y \text{ или } F}{qS}.$$

Теперь для нахождения фактической, действующей на парус силы, у которого форма такая же, как форма модели, надо умножить соответствующий коэффициент C на динамическое давление ветра q , необходимое в данном случае, и на фактическую площадь парусности S . Равнодействующая аэродинамическая сила F будет определяться по следующей формуле:

$$F_n = CqS_n = C \cdot 0,0625 V^2 S_n,$$

где индекс «н» обозначает натуральный (полноразмерный) парус. При этом если у паруса натуральных размеров сохранено полное геометрическое подобие с моделью, то коэффициенты C_x , C_y и C будут одинаковыми как для паруса, так и для модели.

Такое допущение хотя и не абсолютно правильно, но для практических целей вполне приемлемо. В дальнейших рассуждениях, когда будем учитывать сопротивление трения материала паруса, придется вносить некоторые коррективы.

На рис. 20 приведен полярный график коэффициентов аэродинамических сил паруса яхты класса «Финн», построенный на основе только что рассмотренных положений.

Не трудно заметить, что форма этого графика есть точная копия графика, изображенного на рис. 19, на котором были показаны аэродинамические силы для модели паруса. Заметим, что указанный на графике (рис. 20) коэффициент равнодействующей силы C пропорционален силе F (см. рис. 19) для угла атаки $\alpha = 27,5^\circ$.

Кроме того, и направление действия силы F точно совпадает с направлением коэффициента этой силы на графике коэффициентов (см. рис. 20). На рис. 20 (слева) по-

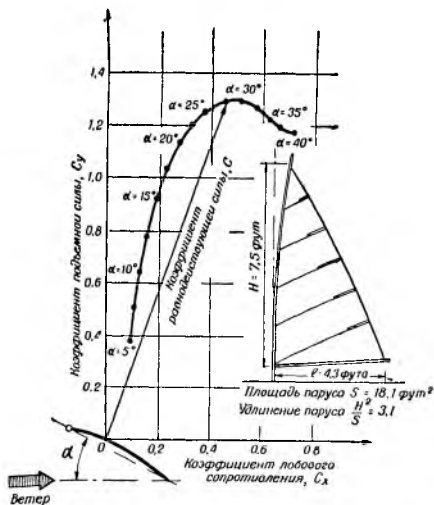


Рис. 20

казаны основные размеры модели паруса. В дальнейшем изложении вопросов, касающихся аэродинамики парусов, чаще будут использоваться понятия коэффициентов, чем непосредственно измеряемых сил.

Теперь сравним аэродинамические свойства паруса яхты класса «Финн» с такими же свойствами парусов, сделанных из жести и испытанных без мачты в Гёттингенском институте (рис. 21). Кривая I относится к парусу с

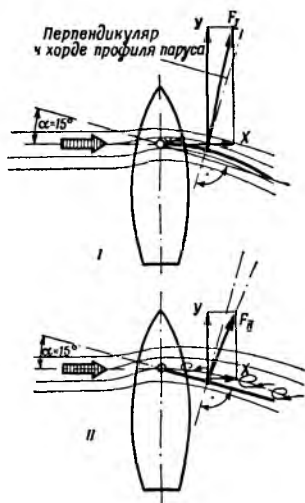
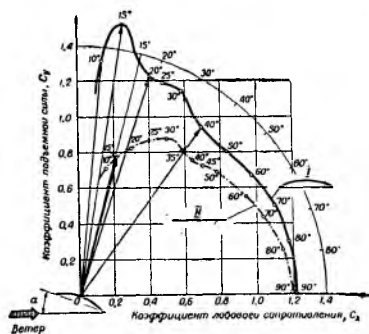


Рис. 21

пузом = 1/10, а кривая II — к совсем плоскому парусу. Площадь обоих парусов одинакова, а удлинение равно 5.

Даже беглое знакомство с графиком позволяет видеть, насколько велико влияние пузатости паруса на увеличение аэродинамических сил, особенно в районе сравнительно небольших углов атаки — $\alpha = 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 40^\circ$. Аэродинамические коэффициенты отличаются не только по величине, но и по направлению. Например, если угол атаки α равен 15° , то равнодействующая сила F_I , возникающая на пузатом парусе, оказывается примерно в два раза больше силы F_{II} , возникающей на плоском парусе (рис. 21).

Следует обратить внимание, что линия действия силы F_I для первого паруса (см. рис. 21, I) расположена

с левой стороны от перпендикуляра к хорде паруса, т. е. направлена вперед — в сторону носа яхты, тогда как для второго паруса (рис. 21, II) сила F_{II} расположена справа от перпендикуляра к хорде и направлена невыгодно. Для облегчения пользования графиком направление перпендикуляров к хорде паруса для разных углов атаки показано короткими отрезками, расположенными внутри по дуге четверти окружности (см. рис. 21).

Сравним аэродинамические характеристики дакронового паруса (см. рис. 20) с жестким парусом (см. рис. 21, кривую I).

Обратим внимание на то, что наибольшая равнодействующая сила на дакроновом парусе образуется при угле атаки $\alpha = 30^\circ$, а на жестком парусе — при $\alpha = 15^\circ$. Кроме того, достижимый максимум коэффициента силы F для мягкого паруса меньше, чем для жесткого. Такая разница может быть в результате:

- влияния мачты (так как одна модель без мачты);
- неодинакового удлинения моделей парусов;
- неодинакового скручивания верхних частей паруса, так как жесткий парус вообще не подвергался скручиванию.

Более подробно об этом будет сказано дальше. Большая разница в графике для I и II парусов (см. рис. 21) может быть объяснена при рассмотрении характера обтекания воздушным потоком подветренной стороны этих парусов. При обтекании плоского паруса струи воздуха начинают отрываться на его подветренной стороне, образуя завихрения, на что затрачивается заметная часть кинетической энергии ветра, а условия для образования на подветренной стороне паруса области пониженного давления сильно ухудшаются.

При пузатом парусе, обращенном выпуклостью на подветренную сторону (см. схему I на рис. 21), обтекание протекает более спокойно, почти без отрыва струй воздуха от большей части подветренной стороны паруса. Вместо отрыва струй воздуха, происходящего при плоском парусе, здесь они приобретают большую скорость, сопровождающуюся понижением давления. Такое сравнительно спокойное обтекание пузатого паруса происходит при сравнительно небольших углах атаки.

С увеличением угла атаки на пузатом парусе тоже начинают появляться завихрения, и постепенно обтекание

обоих парусов воздушным потоком становится одинаковым. На курсе фордевинд при угле атаки $\alpha = 90^\circ$ разница между плоским и пузатым парусом настолько мала, что практически ее можно не принимать во внимание.

При больших углах атаки величина аэродинамической силы паруса гораздо меньше зависит от области пониженных давлений на подветренной стороне паруса, так что решающее влияние будет оказывать величина общей площади парусности. Рассмотренные примеры обтекания парусов в какой-то мере уже объясняют причину пониженной работоспособности плоских парусов. Слишком пузатые паруса в некоторых условиях плавания также будут работать неудовлетворительно.

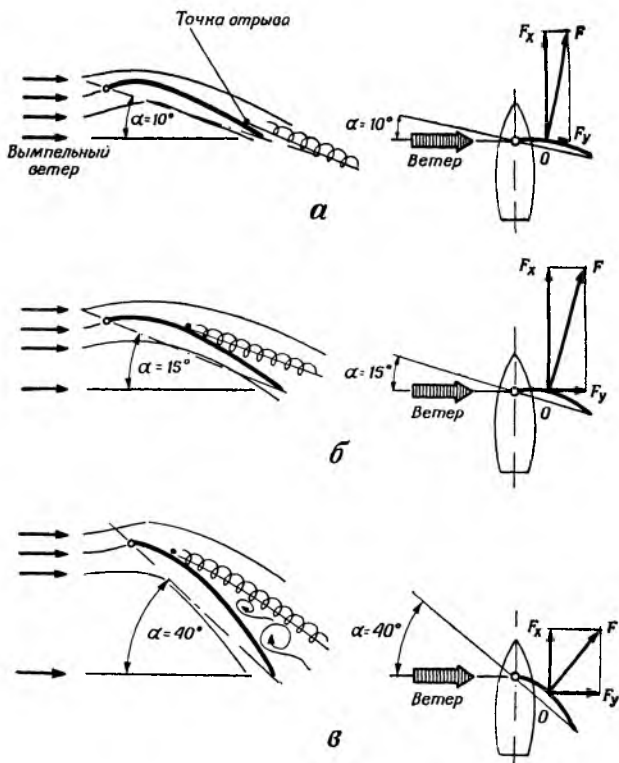


Рис. 22

Показанные на рис. 22 схемы позволяют оценить влияние угла атаки паруса на величину силы тяги F_x , двигающей яхту вперед. Во всех трех приведенных примерах яхта идет галфвиндом, т. е. вымпельный ветер дует перпендикулярно к направлению движения яхты. В этих случаях сила тяги F_x действует перпендикулярно к направлению ветра и может считаться идентичной подъемной силе Y или пропорциональной коэффициенту этой силы C_y . Аналогично кренящая сила F_{yz} будет равна лобовому сопротивлению X . На рис. 22, а, б, в схематично показано обтекание паруса ветром при углах атаки $\alpha = 10^\circ, 15^\circ$ и 40° .

Необходимые данные для построения схем взяты из рис. 21. Если шкоты паруса выбраны слишком сильно, то угол атаки становится чрезмерным, а величина силы тяги F_x значительно уменьшается. При этом скорость яхты снижается. Аналогичную зависимость аэродинамической силы от угла установки паруса можно наблюдать на поляре для паруса яхты класса «Финн», показанной на рис. 20.

а) Медленное изменение угла атаки паруса

В образовании аэродинамической силы паруса участвуют обе его стороны — наветренная и подветренная. Однако значение подветренной стороны значительно сильнее. Рассмотрим более обстоятельно обтекание ветром подветренной стороны паруса с учетом связи между характером обтекания и величинами аэродинамических сил.

При медленном увеличении угла атаки паруса проследим за обтеканием подветренной его стороны (см. рис. 22), регистрируя величину силы тяги F_x в виде графика (рис. 23, а). При этом изменение силы F_x будет идти по прямой линии, пока не дойдет до некоторого угла атаки α .

В этом диапазоне углов атаки ветер обтекает подветренную сторону паруса без завихрений. Ламинарный поток воздуха нарушается только в районе задней шкаторины паруса, где начинают появляться завихрения. При дальнейшем увеличении угла атаки α изменится характер обтекания. Оно будет становиться все более завихренным, а место отрыва струй ветра от поверхности паруса будет все больше перемещаться от задней шкато-

рины вперед по направлению к мачте. Завихренный поток, образующийся после прохождения мест отрыва струй ветра, отделит находящуюся за ним поверхность паруса от действительного ветра, в котором работает парус (см. рис. 22, б).

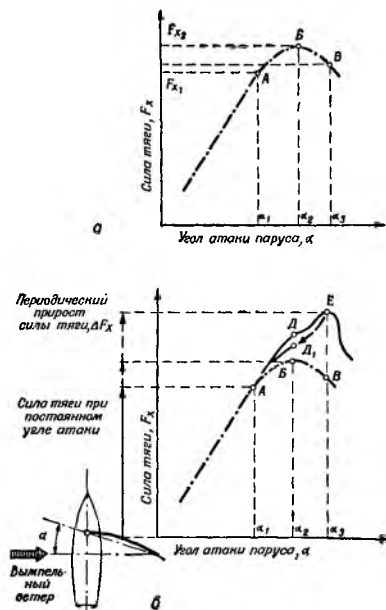


Рис. 23

В результате сила тяги F_x будет расти медленнее по сравнению с диапазоном углов атаки, меньших α_1 , а прямая линия графика превратится в кривую AB.

При увеличении угла атаки до величины α_2 получим максимальную величину силы тяги F_x . Увеличение угла атаки больше угла α_2 вызовет появление вихревого обтекания по всей подветренной стороне паруса. Пройдя точку B, сила тяги F_x постепенно будет уменьшаться, достигнув при угле атаки α_3 величины, указанной на рис. 22, в и 23.

б) Быстрые и повторные изменения угла атаки (пампинг)

В последние годы в некоторых гоночных классах яхт, как, например, «Летучий голландец», «Финн» и «5—0—5», стали применять новую технику управления парусами на курсах, близких к галфвинду. Такая техника получила название пампинга, или «подсасывания»; она заключается в быстром подбирании шкотов с последующим медленным потравливанием. Установлено, что скорость яхты при этом увеличивается. Особенно этот прием работы со шкотами выгоден в условиях глиссирования. Применяя пампинг, можно раньше войти в режим глиссирования и поддерживать его при изменении силы ветра.

Со стороны может создаться впечатление, что во время применения пампинга рулевой усилиями своего тела,

т. е. его массой, сообщает яхте дополнительное ускорение. Такое впечатление возникает в результате затруднений в объяснении явления пампинга. Некоторые парусники считают, что применение пампинга является нарушением правил соревнований, касающихся разрешенных средств движений: «Средством движения может быть только естественное воздействие ветра на парус...».

Во время Олимпийских игр 1960 г. судейское жюри Международного парусного союза признало пампинг легальным способом работы с парусами, приняв следующее решение: «Международное жюри признает, что пампинг может способствовать увеличению скорости лодки, что происходит в силу аэродинамических причин, недостаточно выясненных. Поэтому пампинг допустим в условиях, когда парус находится в ветровом потоке. Однако пампинг не может применяться в штиль или при очень слабом ветре, когда усилия и движения самого рулевого или команды могут влиять на ход лодки».

Попробуем разобраться, почему пампинг выгоден. В предыдущем примере мы рассматривали случаи медленного, постепенного изменения угла атаки α . Но опыты в аэродинамической трубе показали, что при быстром, резком изменении угла атаки характер обтекания паруса с подветренной стороны меняется иначе, чем при медленном и постепенном его изменении (рис. 23).

При резком, быстром выборе шкотов, соответственно углу атаки α_2 , отрыва струи ветра от подветренной стороны паруса не происходит, как это можно наблюдать при медленном выборе шкотов. Сила тяги F_x увеличивается за очень короткое время (почти мгновенно) на 40—45% ее величины, соответствующей углу атаки α_1 . Это видно из рис. 23, б. Штрихпунктиром отмечена кривая величин силы тяги F_x при медленной работе со шкотами, а сплошной линией — кривая величин силы тяги F_x при резком и быстром выборе шкотов, т. е. при резком изменении угла атаки α . Показан прирост силы тяги F_x , мгновенно возникающий при больших углах атаки. Если парус задержать в этом положении, то на его подветренной стороне быстро образуются вихри и обтекание станет нормально-вихревым для этого угла атаки. На рис. 23, б верхняя часть кривой AE дает результат единичного однократного подтягивания паруса с угла атаки α_1 до угла α_3 .

Если парус в этом положении задержать, то сила тяги F_x уменьшится до величины, соответствующей точке B , что, очевидно, невыгодно. Если же свободно потравить шкоты, то величина силы F_x будет уменьшаться по кривой ED_1A . Затем можно повторить весь цикл работы со шкотами сначала. Таким приемом удастся принципиально увеличивать величину силы тяги F_x , которая соответствует точке B , если угол атаки будет постоянным.

Чтобы с наибольшей выгодой применить пампинг, рулевой должен вначале разобраться в характере воздушного потока, который возникает на подветренной стороне паруса, а затем сообразовать частоту и амплитуду пампинга со скоростью ветра и другими условиями плавания. Выбирать шкоты в момент, когда подветренную сторону паруса обтекает незавихренный поток воздуха (см. рис. 22, *a*), а потравить шкоты до того, как будет образован завихренный поток (см. рис. 22, *в*).

Пампинг может быть особенно выгодным, когда верхняя часть паруса несколько закручивается относительно гика (желательно, чтобы по всей высоте парус работал при одинаковом угле атаки).

Таким образом рулевой, применяющий пампинг, может, «используя естественное воздействие ветра на парус», как гласят правила соревнований, получить заметное увеличение силы тяги, а следовательно, и скорости яхты. Итак, с точки зрения аэродинамики пампинг не является нарушением правил соревнований, поскольку сила рулевого или команды в данном случае не используется для увеличения скорости движения яхты.

5. Аэродинамическое сопротивление парусного вооружения

На лавировке необходимо по возможности иметь вооружение, которое одновременно давало бы наибольшую силу тяги F_x при наименьшей силе крена F_{yz} . При соблюдении этого условия скорость яхты будет наибольшей, а крен и дрейф — наименьшими. Решив простые тригонометрические выражения (рис. 24, *a*), убедимся, что силы F_x и F_{yz} зависят от угла β — курса яхты относительно вымпельного ветра — и от величин подъемной силы Y и лобового сопротивления X , которые можно измерить в аэродинамической трубе:

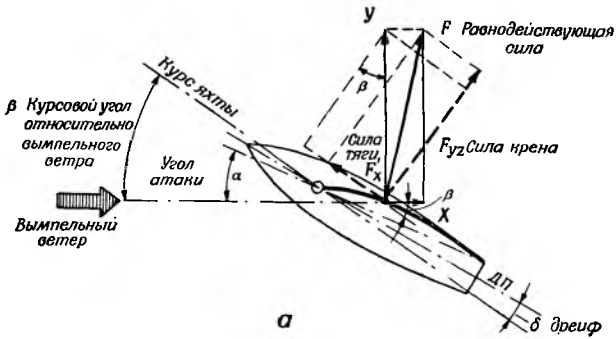
$$F_x = Y \cdot \sin \beta - X \cdot \cos \beta^*,$$

$$F_{yz} = Y \cos \beta + X \cdot \sin \beta,$$

или в виде коэффициентов:

$$k_x = C_y \cdot \sin \beta - C_x \cdot \cos \beta,$$

$$k_{yz} = C_y \cdot \cos \beta + C_x \cdot \sin \beta.$$



$F_x = Y \sin \beta - X \cos \beta$	$F_{yz} = Y \cos \beta + X \sin \beta$
$K_x = C_y \sin \beta - C_x \cos \beta$	$K_{yz} = C_y \cos \beta + C_x \sin \beta$

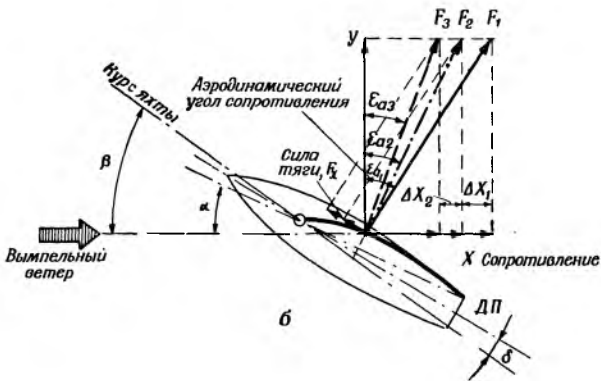


Рис. 24

* Формулы и углы E_a и E_r здесь и дальше верны не для полных сил U и F_{yz} , а для их горизонтальных проекций (прим. ред.).

Из формул, приведенных на рис. 24, а, видно, что лобовое сопротивление X понижает величину силы тяги F_x и, наоборот, увеличивает величину силы крена. Влияние лобового сопротивления X особенно вредно проявляется во время лавировки (см. рис. 24, б). Постепенно приводясь к ветру, можно достичь такого положения, при котором яхта полностью потеряет ход и будет только дрейфовать. Это положение наступит тогда, когда равнодействующая аэродинамическая сила F будет направлена перпендикулярно к курсу яхты или когда проекция слагающей силы F_x на направление хода яхты станет равной нулю, что одно и то же. Такое состояние в системе сил является границей возможности яхты идти на ветер.

Из рис. 24, б можно сделать вывод, что любое уменьшение лобового сопротивления на величину ΔX благоприятно отражается на изменении направления равнодействующей силы F_2 , которое становится выгоднее, так как ведет к увеличению силы F_x .

Дальнейшее снижение лобового сопротивления на величину ΔX_2 , очевидно, сопровождалось бы дополнительным приростом силы тяги F_x и соответственно увеличением скорости яхты. Теперь можно сказать, что угол β между курсом яхты и направлением вымпельного ветра зависит от характерного соотношения подъемной силы к лобовому сопротивлению $\frac{Y}{X}^*$. Отношение $\frac{Y}{X}$ определяется направлением действия равнодействующей силы F , которое можно выразить через так называемый аэродинамический угол сопротивления ϵ_a : при этом $\text{ctg } \epsilon_a = \frac{Y}{X}$.

Следовательно, прежде всего надо стремиться возможно эффективнее уменьшить аэродинамический угол сопротивления ϵ_a , чтобы яхта хорошо лавировала. Поскольку лобовое сопротивление X сильно влияет на гоночные качества яхты, следует проанализировать причины, от которых зависят величина лобового сопротивления X и его снижение.

Известно, что лобовое сопротивление X складывается из трех компонентов: а) индуктивного сопротивления, б) сопротивления трения и в) сопротивления формы.

* Соотношение подъемной силы к лобовому сопротивлению в аэродинамике принято называть качеством.

Роль каждого из этих сопротивлений зависит от удлинения, формы поверхности и площади паруса, а также от скорости вымпельного ветра.

а) Индуктивное сопротивление

Индуктивное сопротивление паруса X_i является такой частью суммарного аэродинамического сопротивления X , которое непосредственно связано с возникновением аэродинамической силы F и появляется одновременно

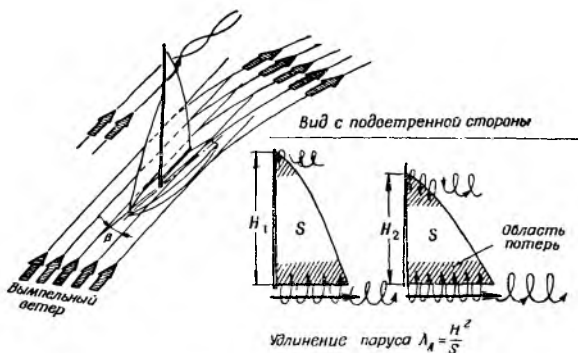


Рис. 25

с ней. Известно, что аэродинамическая сила F возникает в результате разницы давлений, существующих одновременно по обеим сторонам паруса.

Именно эта разница давлений неизбежно вызывает движение воздуха по краям паруса: поток воздуха стремится перейти из зоны более высокого давления в зону пониженного давления, т. е. с наветренной стороны на подветренную.

Такой переход воздуха происходит в основном в верхней части паруса и внизу вокруг гика (рис. 25). В этих местах возникает спиральное движение воздуха, дающее начало завихрениям, тянущимся за парусом. Эти явления сопровождаются бесполезной затратой энергии ветра, которую можно сравнить с потерями, возникающими в двигателе с неплотным прилеганием поршня к стенкам цилиндра.

Индуктивное сопротивление зависит от поперечной аэродинамической силы U и удлинения паруса λ_a . Чем

больше разница давлений на обеих сторонах паруса, тем больше сила U и тем больше индуктивное сопротивление X_i . Установлено также, что чем больше удлинение паруса, тем меньше величина индуктивного сопротивления. Наглядно это показано на рис. 25. Индуктивное сопротивление низкого и широкого парусов будет больше, потому что длинный гик и широкая верхняя часть паруса образуют большую область вихревых потоков воздуха по сравнению с высоким и узким парусом. Величину индуктивного сопротивления X_i можно приблизительно вычислить с помощью следующей формулы:

$$X_i = K \frac{Y^2}{\lambda_a},$$

где K — коэффициент, зависящий от формы паруса и от расстояния основания паруса от палубы.

Возможности уменьшения потерь, вызываемых индуктивным сопротивлением, посредством использования парусов с большим удлинением появились сравнительно недавно. Прежде всего с появлением новых синтетических клеев стали делать легкие пустотелые мачты из дерева, а потом и из легких сплавов. Однако удлинять парус беспредельно невозможно. В настоящее время применяются паруса с удлинением $4 \div 4,5$. Дальнейшее удлинение паруса ограничивается соображениями остойчивости яхты. Кроме того, толщина более высокой мачты плохо влияет на обтекание паруса ветром.

Коэффициент полезного действия паруса на лавировке зависит не только от его удлинения, но и от его внешней формы. На основании исследований, выполненных в Гёттингенском аэродинамическом институте, можно сделать вывод, что из двух парусов с одинаковым удлинением $\lambda_a = \frac{H^2}{S}$ (см. рис. 14) лучшим с точки зрения аэродинамики будет парус типа гуари, обозначенный пунктирной линией, а не бермудский. Оказывается, что индуктивное сопротивление наименьшее у паруса, внешняя форма которого приближается к фигуре полуэллипса. Это позволяет объяснить преимущества яхт, вооруженных мачтой с выгнутой верхней частью, у которых парус напоминает по форме парус гуари.

Такая аэродинамически оправданная форма широко распространена в природе: например, крылья многих

птиц напоминают собственно вытянутую фигуру эллипса.

Некоторые конструкторы, желая снизить величину индуктивного сопротивления, применяли очень широкие гики в горизонтальной плоскости. Этим они пытались препятствовать перетеканию воздуха вокруг гика с наветренной на подветренную сторону паруса. Примером может служить гик яхты «Энтерпрайз», участвовавшей в XIV гонках на Кубок Америки. Дополнительными выгодами такого широкого гика была возможность придавать желаемый профиль в нижней части паруса, так как нижняя шкаторина скользила по специальным ползунам по всей ширине гика и могла по желанию регулироваться.

На рис. 26 показаны результаты испытаний, проведенных в аэродинамической трубе Юнкера с моделями бер-

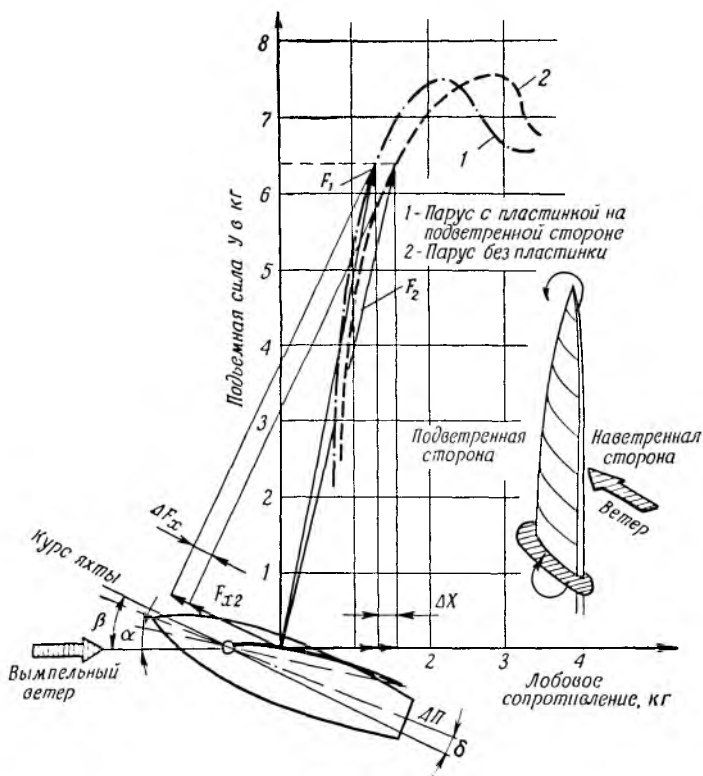


Рис. 26

мудского паруса, имевшего вместо гика пластину, подобно гыку на яхте «Энтерпрайз». Видно, что парус с пластиной, ограничивающей перетекание воздуха вокруг гика, выгоднее, поскольку аэродинамическая сила F_1 будет лучше направлена, чем аэродинамическая сила F_2 . Это происходит благодаря уменьшению индуктивного сопротивления на величину ΔX , указанную на графике. В результате сила тяги паруса 1 увеличилась на $\Delta F_x = 15\text{--}20\%$ по сравнению с силой F_{x2} паруса 2.

б) Сопротивление трения

Как уже было ранее установлено, аэродинамические силы возникают на парусе в результате образования на нем повышенного и пониженного давлений.

Если бы воздух можно было считать идеальной жидкостью, т. е. жидкостью, лишенной вязкости, величина аэродинамических сил зависела бы только от разницы давлений на обеих сторонах паруса. В действительности воздух обладает вязкостью, хотя и значительно меньшей, чем, например, вода, но тем не менее создающей трение, которым нельзя пренебрегать.

При обдувании паруса ветром частицы воздуха, непосредственно соприкасающиеся с поверхностью паруса

вследствие адгезии, задерживаются и не двигаются вместе с остальной частью воздушного потока. Вследствие вязкости или воздействия сил внутреннего трения происходит притормаживание скорости движения соседних частиц воздуха, которые, в свою очередь, оказывают тормозящее действие на последующие слои потока воздуха. Только на некотором расстоянии от паруса прекращается тормозящее действие его поверхности, и частицы воздуха начинают двигаться с полной скоростью,

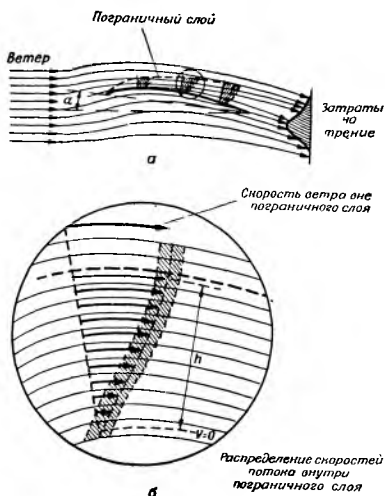


Рис. 27

Посмотрим на рис. 27. Струи воздуха, внутри которых происходит снижение скорости свободного потока до нуля, называются пограничным слоем. Существование такого пограничного слоя убедительно подтверждается слоем пыли, оседающей на кузове автомобиля даже на большой скорости. Это может происходить только тогда, когда скорость частиц пыли на поверхности кузова автомобиля, как и скорость частиц воздуха на поверхности паруса, равна нулю.

Поскольку движение частиц воздуха в пограничном слое приторможено, они теряют некоторую часть кинетической энергии. Потеря эта проявляется в форме сил трения, действующих касательно к поверхности паруса, против движения яхты. Отсюда действие сил трения получило название «сопротивление трения». Это — второе слабое в суммарном аэродинамическом сопротивлении.

Потеря энергии в пределах пограничного слоя показана на рис. 27, а, б в виде заштрихованных участков. Площадь участков отвечает величине потерь энергии и одновременно соответствует величине сопротивления трения, противодействующего движению яхты. Для наглядности толщина пограничного слоя на рисунке намеренно сильно увеличена, в действительности это очень тонкий слой.

Исследованиями О. Рейнольдса и других ученых была установлена связь между характером движения частиц в пограничном слое и связанным с этим сопротивлением трения и некоей численной величиной, получившей название числа Рейнольдса:

$$R_e = \frac{V \cdot l}{\nu}$$

Величина числа Рейнольдса может быть выражена посредством трех величин, характеризующих любой поток, а именно: V — скорость потока в м/сек, l — длина тела, погруженного в данный поток, в м и ν — коэффициент, определяющий физические свойства среды, т. е. коэффициент кинематической вязкости:

$$\nu_{\text{воздуха}} = \frac{1,5}{100\,000} = \frac{1,5}{10^5} \text{ м}^2/\text{сек.}$$

При малых значениях числа Рейнольдса, или, другими словами, при малой скорости потока и небольших размерах обтекаемого тела, частицы движутся внутри по-

граничного слоя спокойно, по траекториям, параллельным друг другу. Такой поток называется ламинарным (см. рис. 27, б и 28). Толщина пограничного слоя в ламинарном потоке очень невелика и достигает максимумом 0,5% длины погруженного в поток тела. Соответственно и коэффициент сопротивления трения будет также малым.

Когда число Рейнольдса превысит некоторую величину, названную критической, характер движения частиц

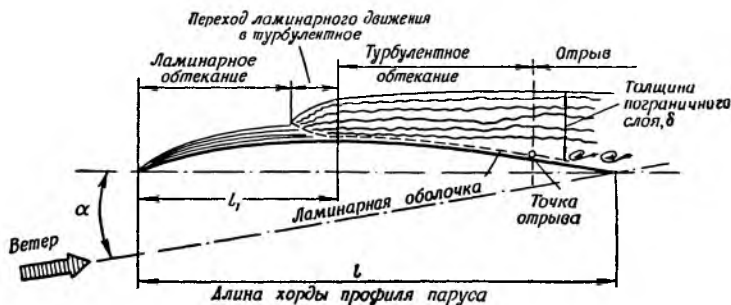


Рис. 28

в пограничном слое кардинально меняется. Движение из спокойного, ламинарного, превращается в вихревое, турбулентное. Переход от ламинарного движения к турбулентному сопровождается утолщением пограничного слоя, размер которого δ (рис. 28) может дойти до 2% длины обтекаемого тела.

Очевидно, что переход спокойного обтекания к турбулентному связан с вредным ростом коэффициента сопротивления трения. На рис. 28 для наглядности толщина пограничного слоя несколько преувеличена. Следует обратить внимание, что там, где обтекание стало турбулентным, на поверхности паруса сохранился как бы след первоначального ламинарного потока в виде тончайшей пленки, удерживаемой силами адгезии. Такая пленка играет очень полезную роль, как бы сглаживая мельчайшие неровности поверхности паруса.

Попытаемся вычислить числа Рейнольдса для некоторых парусов при средней силе ветра, а потом оценить коэффициенты трения, от которых в прямой зависимости находятся величины сопротивления трения.

Скорость вымпельного ветра на лавировке примем $V_k = 6,1$ м/сек, или 4 баллам, по шкале Бофорта. Обычная ширина паруса на уровне середины мачты для яхт классов «Финн» и «Летучий голландец» равна $l_1 = 1,83$ м, для яхты «R=12 M» — $l_2 = 5,18$ м.

Отсюда соответственно число Рейнольдса для яхт класса «Финн» и «Летучий голландец» будет:

$$R_l = \frac{V \cdot l_1}{\nu} = \frac{6,1 \cdot 1,83 \cdot 10^5}{1,5} = 750\,000,$$

а для яхты «R=12 M»:

$$R_l = \frac{V \cdot l_2}{\nu} = \frac{6,1 \cdot 5,18 \cdot 10^5}{1,5} = 2\,100\,000.$$

Допустим, что паруса на яхтах класса «Финн» и «Летучий голландец» очень гладкие (не определяя это понятие более четко) и движение воздуха в пограничном слое происходит в основном спокойно, т. е. наблюдается ламинарное обтекание. На рис. 29 найдем соответствующий

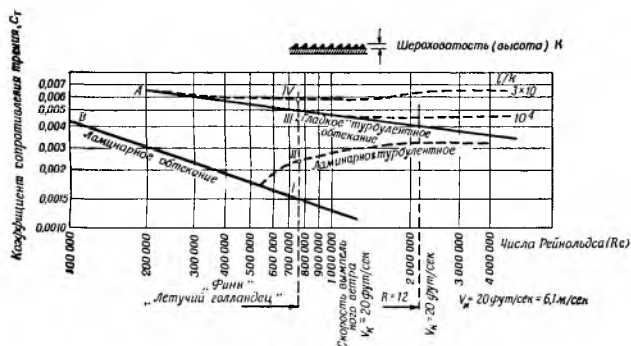


Рис. 29

этим условиям коэффициент трения C_t , равный примерно 0,0015. Он находится на линии B в точке I (график построен по логарифмической шкале).

Если парусная ткань недостаточно гладкая, могут создаваться условия, при которых передняя часть паруса будет обтекаться ламинарным потоком, а на остальной части паруса обтекание превратится в турбулентное (см. рис. 28). Это в практике встречается довольно часто.

В таком случае сопротивление трения увеличивается и соответствующий коэффициент трения $C_T=0,0025$ мы найдем в точке *II* (см .рис. 29). Этот коэффициент на 67% будет больше, чем в точке *I*. На линии *A* находится точка *III*, в которой коэффициент трения $C_T=0,005$. Эта точка характеризует условия турбулентного движения в пограничном слое по всей длине профиля паруса, когда парусная ткань недостаточно гладкая.

Отсюда можно сделать вывод, что сопротивление трения зависит не только от числа Рейнольдса, но и от качества поверхности и от формы обтекаемого тела.

Линия *A* на рис. 29 дает величины коэффициентов трения в зависимости от числа Рейнольдса Re при условии, что шероховатость поверхности паруса меньше толщины пограничного слоя, еще сохраняющего ламинарный характер (рис. 28). При общем турбулентном характере обтекания неровностей поверхности паруса только тогда не увеличивают коэффициент трения, если они полностью погружены в пограничном ламинарном слое. Когда неровности достигают таких размеров, что выступают из ламинарного слоя, коэффициент трения, например, возрастает до величины, указанной в точке *IV*. Это произойдет тогда, когда отношение длины l обтекаемого профиля к величине неровностей поверхности K подойдет примерно к числу 300.

Допустимую шероховатость поверхности K в миллиметрах можно вычислить по следующей формуле:

$$K_{\text{доп}} = \frac{1,5}{V} ,$$

где V — скорость потока в м/сек.

Воспользуясь этой формулой, определим, что при скорости ветра $V_K=6,1$ м/сек шероховатость парусной ткани должна быть не более:

$$K_{\text{доп}} = \frac{1,5}{V} = \frac{1,5}{6,1} = 0,25 \text{ мм.}$$

Неровности поверхности хлопчатобумажного паруса с учетом швов превышают 0,25 м. Поэтому нельзя рассчитывать на получение в турбулентном потоке коэффициентов трения меньше указанных на линии *A*. Остается только стремиться к тому, чтобы неровности поверхности

паруса по возможности не намного превышали допустимые $K_{\text{доп}}$.

Шероховатость парусной ткани влияет на величину аэродинамической силы Y возможно даже в большей степени, чем на сопротивление X . Замеры, проведенные на авиационных профилях с разной шероховатостью подветренной стороны, показали, что степень неровности, так же как и положение неровностей по отношению к ребру атаки, оказывает большое влияние на величину возникающей подъемной силы Y .

При проведении экспериментов влияние индуктивного сопротивления устранялось с помощью пластин, прикрепленных к концам испытуемого профиля, как показано на рис. 30, а. Шероховатость профиля с подветренной стороны измерялась путем нанесения на свежелакирован-

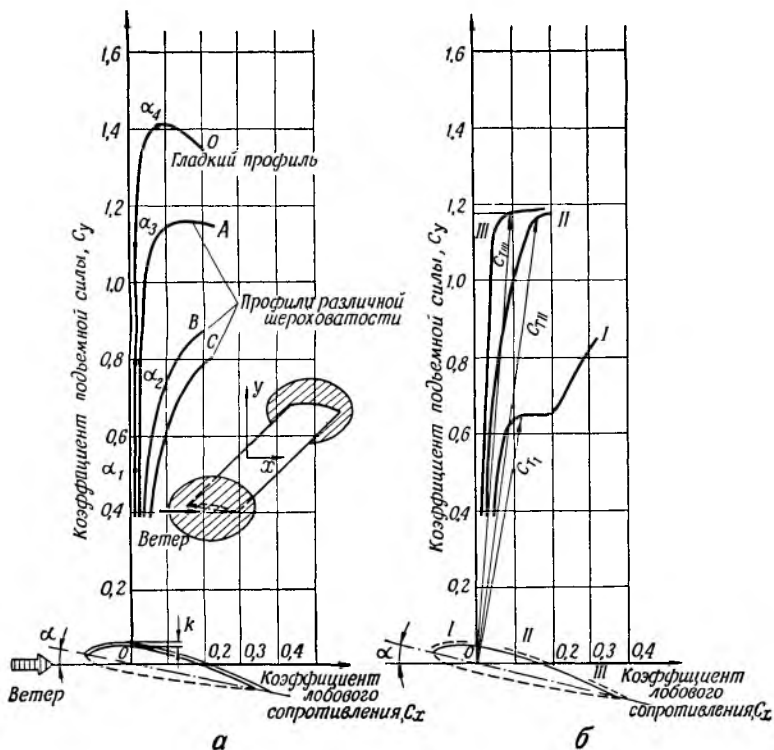


Рис. 30

ную поверхность паруса калиброванных зерен песка. После просушки замерялись силы Y и X , причем аэродинамическое сопротивление X образовывалось в основном за счет сопротивления трения, поскольку индуктивное сопротивление было устранено.

Например, поляры (см. рис. 30, а) показывают, насколько существенно может быть влияние различных неровностей поверхности на величину силы Y или ее коэффициент C_y . Кривая O относится к совершенно гладкой поверхности, а кривая C — к наиболее шероховатой.

Графики, изображенные на рис. 30, б, получены при замерах сил на профиле в основном с гладкой поверхностью, но с разным положением неровностей, как показано на схемах I, II и III.

Сравнив эти кривые, не трудно сделать вывод, что на величину и направление силы Y (или ее коэффициент C_y) особенно неблагоприятно действуют неровности, расположенные в передней части профиля. Чем дальше от переднего края профиля находится шероховатость, тем она менее вредна.

Попробуем теперь ответить на вопрос, почему дакроновые паруса по своим аэродинамическим свойствам лучше хлопчатобумажных, даже когда последние лучше стоят на рангоуте. Преимущества дакроновых парусов легко проявляются на малых гоночных яхтах, а на больших килевых яхтах эти преимущества не так заметны.

Сравнивая в течение многих лет результаты, показанные в гонках на малых яхтах, оснащенных как дакроновыми, так и хлопчатобумажными парусами, можно сделать вывод, что дакроновые паруса дают преимущество порядка 7% времени, затраченного на прохождение дистанции.

Несомненно, исключительную роль здесь играет гладкость дакрона, благодаря которой в большей части пограничного слоя сохраняется ламинарный характер обтекания. Это снижает сопротивление трения и одновременно увеличивает подъемную силу Y .

На парусах малых размеров благоприятное действие описанного явления проявляется сильнее, чем на больших парусах. Этот факт не трудно обосновать, проанализировав график на рис. 29.

Для яхт класса «Летучий голландец» и «Фини» (когда число Рейнольдса равно 750 000) соответственно коэф-

коэффициенты трения C_T могут изменяться в довольно широких пределах — от 0,005 до 0,0015. Естественно, нельзя рассчитывать на ламинарное обтекание всей поверхности паруса, хотя бы из-за неблагоприятного воздействия мачты, но тем не менее на какой-то части паруса с гладкой поверхностью обтекание может быть ламинарным. На дакроновых передних парусах, работающих без штаг-пирсов, легче всего добиться ламинарного обтекания. Кроме снижения сопротивления трения одновременно увеличивается сила Y (коэффициент C_y).

Возможности изменения величины коэффициентов C_T и C_y на парусах большой яхты « $R=12 M$ » при ветре такой же силы гораздо меньше по сравнению с «Летучим голландцем».

При больших значениях числа Рейнольдса — порядка 2 100 000 (см. предел для яхты « $R=12 M$ », указанный на рис. 29) — величина коэффициента сопротивления трения C_T может изменяться в относительно узких границах — 0,004—0,003, которые еще более уменьшаются при усилении ветра. Это значит, что на большом парусе ламинарный поток можно получить только на небольшой части профиля, и поэтому преимущества дакроновых парусов по сравнению с хлопчатобумажными не могут полностью проявиться.

Этот теоретический вывод согласуется с практикой. Многие владельцы крупных яхт недоумевали, почему, сменив хлопчатобумажные паруса на дакроновые, они не получили преимуществ, на которые рассчитывали на основании опыта использования дакрона на малых яхтах.

Аналогично рассуждая, можно внести ясность в один, казалось бы загадочный, вопрос, а именно: почему по мере износа хлопчатобумажные паруса как будто бы лучше тянут?

Яхтсменам известно о существовании таких парусов, которые не раз ремонтировались, но продолжают верно служить до полного износа. Нередко на яхтах с такими парусами яхтсмены выигрывали звания чемпионов.

Дело в том, что поверхность нового паруса покрыта бесчисленным количеством ворсинок и с аэродинамической точки зрения совсем не гладкая. Со временем ворсинки стираются, поверхность паруса становится более гладкой, приближаясь к дакрону.

На основе измерений, проведенных в Гёттингенском

институте, получены следующие сравнительные коэффициенты сопротивления трения для хлопчатобумажной парусины:

ткань обычной гладкости — 83; та же ткань с опаленным ворсом — 50;

та же ткань после трехкратного каландрования — 47.

в) Сопротивление формы

Источником сопротивления формы являются завихрения воздуха, в большей или меньшей степени возникающие при обтекании потоком воздуха любых стоящих на его пути тел. Речь идет о завихрениях в гораздо больших масштабах, чем завихрения, встречающиеся в пограничном слое потока.

Но турбулентность пограничного слоя может оказать решающее воздействие на возникновение завихренности потока в больших масштабах.

Термин «сопротивление формы» вошел в употребление потому, что решающее влияние на величину этого

рода сопротивления оказывает форма самого тела. Ежедневно можно видеть облака пыли, образующиеся за быстро идущими автомобилями. Большие машины, автобусы поднимают целые тучи пыли, а легковые автомобили с современным обтекаемым кузовом оставляют за собой сравнительно небольшие завихрения. Дело в том, что у машин с обтекаемым кузовом значительно меньше сопротивление формы.

Косвенная причина возникновения сопротивления формы — это вязкость воздуха. Объясним это на примере обтекания потоком воздуха мачты

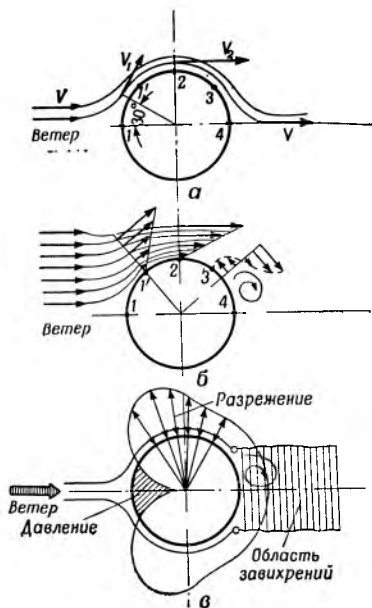


Рис. 31

(рис. 31, а). Если бы воздух не обладал свойством вязкости, обтекание мачты происходило бы в полном соответствии с уравнением Бернулли, а именно: скорость воздушных частиц, начиная от точки 1, увеличивалась бы и достигла максимума в точке 2. Это сопровождалось бы возрастанием кинетической энергии частиц за счет снижения статического давления. В точке 2 давление было бы наименьшим, а скорость — наибольшей, так как здесь самое узкое сечение для прохождения потока воздуха.

Двигаясь дальше, частицы воздуха должны были бы обогнуть мачту и пройти через точки 3 и 4, используя приобретенную перед этим кинетическую энергию. Иначе говоря, частицы воздуха за мачтой проходили бы точно такие же пути, как и перед мачтой. Тогда картина воздушного потока за мачтой была бы зеркальным изображением этого же потока перед мачтой.

Но так как воздух обладает некоторой вязкостью, то из-за сопротивления трения о поверхность мачты скорость частиц от точки 1 до точки 2 будет расти медленнее, чем в теоретическом случае при идеальном, лишенном вязкости, потоке.

Некоторое количество кинетической энергии пойдет на преодоление сопротивления поверхностного трения, встретившегося на пути потока. В положении 2 частицы воздуха уже не будут иметь достаточной кинетической энергии, чтобы при возрастающем статическом давлении передвинуться в точку 4. В какой-то момент, например в точке 3, частицы воздуха, движущиеся по поверхности мачты, полностью израсходуют свою энергию движения, оторвутся и унесутся вихревым движением в общий поток. На рис. 31, б изображены поля скоростей потока вблизи точек 1, 2 и 3.

В точке 3 показан момент отрыва пограничного слоя, соответствующий началу вихревого движения, захватывающего затем почти всю подветренную сторону мачты. Затраты энергии, связанные с вихревым движением, показаны в форме схемы изменения давлений на подветренной стороне мачты (см. рис. 31, в).

На переднем краю мачты образуется область повышенного давления, за мачтой — область пониженных давлений, суммарный эффект которых обнаружится в виде силы сопротивления.

О потерях энергии, связанных с сопротивлением фор-

мы, можно судить по величине и протяженности области завихренного потока, расположенного за рассматриваемым сечением обтекаемого тела, например мачты.

Характер обтекания и траектории движения частиц воздуха вокруг находящихся в потоке тел можно наблюдать в лабораторных условиях с помощью подкрашивания потока или с помощью тонких дымовых струек.

Используя эти средства, можно увидеть невооруженным глазом или сфотографировать характер вихревого движения, его ускорение или замедление, начало отрыва струй и т. п.

На основании многочисленных опытов с телами различных профилей установлено, что решающее влияние на величину сопротивления формы оказывают поперечные размеры и очертания тела.

Отрыв пограничного слоя, возникновение вихревого движения наступают тем легче, чем более резко и неожиданно меняются очертания тела, особенно на длине его задней (считая по потоку) половины. Наоборот, сопротивление формы будет тем меньше, чем более плавными, «обтекаемыми» окажутся очертания тела.

На рис. 32 даны коэффициенты сопротивления мачт, имеющих различное сечение. Сопротивление мачты каплевидного, обтекаемого, профиля значительно меньше

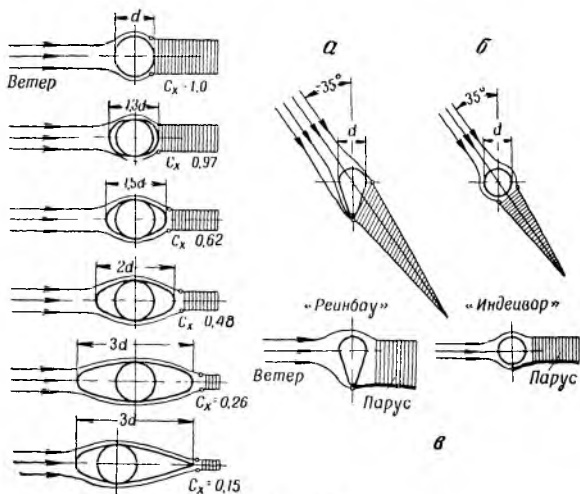


Рис. 32

сопротивления круглой мачты, однако не для любых условий. На лавировке яхта идет относительно вымпельного ветра под углом не меньше 25° , а в большинстве случаев этот угол равен $30-40^\circ$.

Из рис. 32, а, б не трудно убедиться, что круглая мачта лучше каплевидной, если только последняя не вращается, и потому постоянно сохраняется широкая ветровая тень.

Во время XV гонок на Кубок Америки на яхте «Рейнбоу» была установлена профилированная мачта. На лавировке мачта оказывала вредное влияние на работу паруса, увеличив сопротивление примерно на 50% по сравнению с круглой мачтой конкурирующей яхты «Индейвер». Недостаток мачты на яхте «Рейнбоу» был особенно заметен на курсах, близких к галфвинду, поскольку обширная область завихрений, образующихся за мачтой, распространялась на большую часть поверхности паруса, ухудшая полезное действие области пониженных давлений на его подветренной стороне.

Сопротивление формы стоячего и бегучего такелажа также заметно влияет на гоночные результаты. Чем острее курс яхты, тем оно вреднее. На курсе галфвинд это влияние вредно лишь тем, что завихрения воздушного потока, вызываемые такелажем, неблагоприятны для работы паруса. Насколько может быть велико сопротивление такелажа и рангоута, доказывают случаи опрокидывания швертботов без парусов.

Сопротивление формы самого паруса при острых углах атаки относительно невелико. В этом случае основную роль играют индуктивное сопротивление и сопротивление трения.

На рис. 22 видно, что частицы воздуха в пограничном слое при достижении наивысшего положения еще в состоянии спокойно стечь с поверхности паруса у задней шкаторины. Пограничный слой прилегает к подветренной стороне паруса, и точка отрыва находится почти на границе стока.

По мере увеличения угла атаки частицам воздуха уже не хватает кинетической энергии, чтобы преодолеть расстояние от наивысшей точки потока до задней кромки паруса.

Точка, в которой начинается отрыв пограничного слоя от поверхности паруса, постепенно перемещается ближе

к переднему краю паруса, за этой точкой образуется вихревое обтекание. Чем больше угол атаки, тем ближе к переднему краю паруса начинаются отрыв потока и вихревое обтекание. Это сопровождается сильным увеличением сопротивления формы, которое теперь становится главным слагаемым в общем сопротивлении. Одновременно уменьшается равнодействующая сила F , так как обтекание почти всей подветренной стороны паруса стало завихренным, отчего сильно страдает работа подветренной стороны паруса.

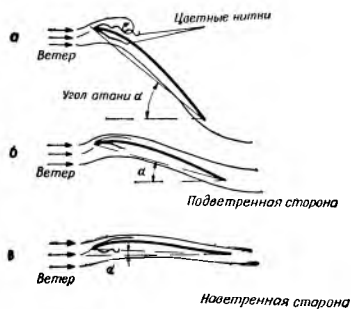


Рис. 33

рис. 33). Если на лавировке на подветренной стороне паруса нитки выются, значит, угол атаки слишком большой (рис. 33, а). Такое поведение ниток указывает на возникновение вихревого потока уже на передней шкаторине паруса. Причиной этого может быть значительное уваливание от курса, чрезмерное выбиравание шкотов или плохое положение кипов на палубе, слишком сдвинутых в сторону диаметральной плоскости яхты.

Если угол атаки правилен (рис. 33, б), по обеим сторонам паруса нитки спокойно развеваются по направлению потока воздуха. На наветренной стороне паруса нитки будут закручиваться и дергаться при слишком малых (недостаточных) углах атаки (рис. 33, в). Это указывает на начинающийся отрыв струй вследствие чрезмерно острого курса.

Как уже было установлено, сопротивление формы возникает в результате отрыва пограничного слоя от поверхности паруса из-за потери части кинетической энергии. Отсюда напрашивается вывод, что для борьбы с ростом сопротивления и снижением аэродинамического коэффи-

Для яхтсмена очень важно своевременно поймать момент возникновения вихревого обтекания паруса, снижающего величину эффективной аэродинамической силы и тем самым скорость яхты. Некоторый контроль над характером обтекания паруса можно вести, наблюдая за цветными нитками, прикрепленными к передней кромке стакселя (см.

циента полезной тяги паруса надо увеличить скорость обтекания в тот критический момент, когда кинетической энергии частиц воздуха становится недостаточно для преодоления сопротивления трения о поверхность паруса.

Практически это достигается с помощью стакселя. Его действие основано на дополнительном уменьшении сечения воздушного потока на подветренной стороне грота и придании потоку лучшего направления (рис. 34).

Благодаря увеличению скорости потока в сечении $B-B$ по сравнению с сечением $A-A$, а также перемене направления на пути $A-B$, будет получена двойная польза:

1) увеличатся разрежения в районе, перекрытом стакселем;

2) уменьшится вероятность отрыва струй в районе мачты и вероятность образования нежелательного вихревого обтекания.

Следует обратить внимание на то, что полную отдачу можно получить от стакселя, только когда его форма (пузатость) и проводка шкотов выбраны правильно, поскольку эти два фактора влияют решающим образом на форму щели между стакселем и гротом.

К сожалению, большинство яхтсменов не задумывается над вопросом об основном назначении переднего паруса. Недооценка или непонимание этого часто приводит к тому, что стаксель не только не улучшает условия работы грота, но даже частично ухудшает. О работе стакселя будет сказано в последующем изложении.

Коэффициент полезного действия парусного вооружения можно повысить, если устранить вредное влияние мачты на характер потока, обтекающего парус, особенно на его подветренной стороне. При этом яхта будет двигаться быстрее и круче к ветру. Однако мачта на яхте — неустранимое зло, а потому, естественно, возникает проблема по возможности уменьшить вредное влияние ее на работу паруса.

Вспомним, что скорость хода яхты и крутизна курса на лавировке зависят от величины и направления дейст-

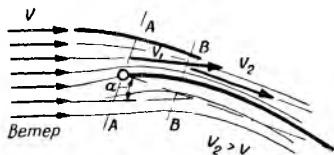


Рис. 34

вия равнодействующей аэродинамической силы F , что наглядно видно из графика коэффициента C (рис. 35).

Рассмотрим теперь комбинацию мачта — парус с точки зрения возможностей достижения аэродинамических сил максимальной величины и выгодных по направлению. На графиках, показанных на рис. 35, даны в виде векторов коэффициенты силы F ,

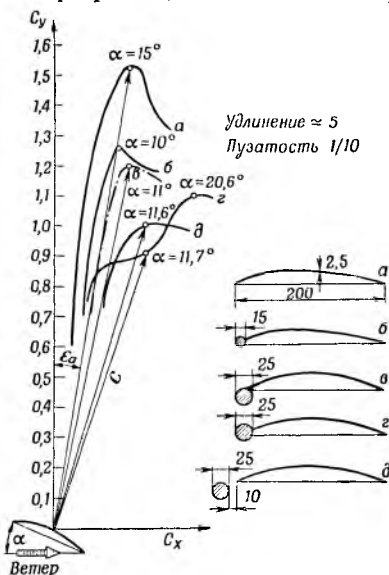


Рис. 35

полученные на опытах с разными моделями. Полнота (пузо) парусов всех моделей была одинаковой — $1/10$, а удлинение равно ≈ 5 .

Опытами были установлены максимальные значения величины коэффициентов C и угол сопротивления ϵ_a , соответствующий этому максимуму.

Взяв за основу для сравнения модель а, без мачты, не трудно убедиться, что появление на краю паруса мачты диаметром в среднем $= 7,5\%$ ширины паруса (модель б) вызывает снижение аэродинамической силы F примерно на 17% .

Увеличение диаметра мачты до $12,5\%$ ширины паруса (модель 2) приводит к дальнейшему снижению величины аэродинамической силы. При угле атаки $\alpha = 11^\circ$ сила F снижается примерно на 38% . Кроме того, направление действия силы F становится менее выгодным (увеличивается угол ϵ_a), и, следовательно, яхта будет двигаться менее круто к ветру.

На рис. 36 даны два случая движения яхты — в лавировку и курсом бакштаг. Сравнивая рисунки, мы увидим, что направление аэродинамической силы определяется углом ϵ_a , имеющим большое значение на курсе бейдевинд. Чем полнее курс яхты, тем заметнее уменьшается влияние угла сопротивления ϵ_a на коэффициент полезного действия паруса, так как на первое место выходит ве-

личина силы F или ее коэффициента C , а не направление (рис. 37).

Существенно влияет на работу паруса его положение относительно мачты (см. рис. 35). Одна и та же круглая мачта на моделях b и z из-за различного положения относительно паруса дает разные результаты. Коэффициент C для модели z при угле атаки $\alpha = 11,7^\circ$ равен примерно 0,95, а для модели b при угле атаки $\alpha = 11^\circ — 1,2$.

Это дает прирост силы F примерно на 28%. Вместе с тем направление силы на модели b более благоприятно, так как увеличилась слагаемая сила тяги. Работа паруса с расположением мачты, как на модели b , улучшилась за счет расположения мачты заподлицо с подветренной стороны паруса, что сильно улучшает обтекание подветренной стороны, препятствуя образованию вихревого движения.

Особенно ухудшает работу паруса свободная щель между мачтой и передней шкаториной, через которую перетекает воздух и выравнивает давление на наветренной и подветренной сторонах паруса. Приведем пример, подтверждающий наши рассуждения.

На XVII гонках на Кубок Америки английская яхта «Скептр» проиграла американской «Колумбии» примерно 4,2% времени прохождения дистанции, главным образом на лавировке. Учитывая, что мастерство команд было одинаковым, проигрыш англичан можно объяснить

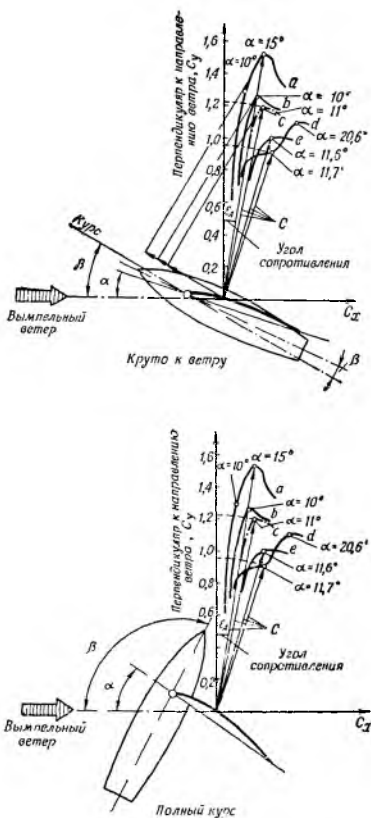


Рис. 36

только разницей в вооружении. Известно, что грот «Колумбии» передней шкаториной входил в ликпаз мачты, в то время как грот английской яхты крепился к мачте ползунками с рельсом. Между передней шкаториной и мачтой оставалась щель величиной около 5 см.

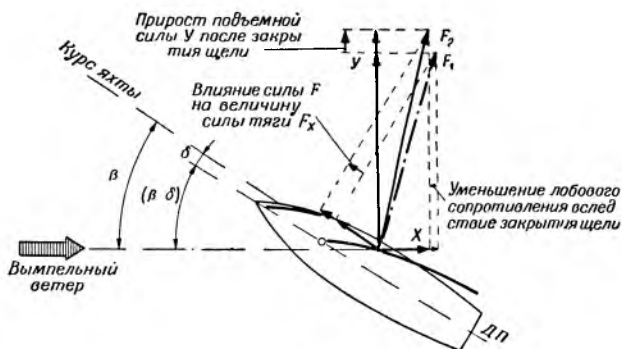


Рис. 37

Эксперименты, проведенные автором в аэродинамической трубе с моделями парусов, показали, что устранение щели между мачтой и парусом увеличивает подъемную силу Y и одновременно уменьшает лобовое сопротивление X (см. рис. 37). В самом деле воздух, проходя через щель на подветренную сторону паруса, ухудшает условия обтекания его в передней части, где помехи особенно вредны. В результате равнодействующая сила F_2 на модели без щели (см. рис. 37) больше и лучше направлена, чем сила F_1 , полученная на модели со щелью между мачтой и парусом.

Изменение в направлении действия равнодействующей силы может быть использовано двояко:

1) для увеличения скорости яхты при неизменной крутизне курса или 2) для плавания более острым курсом при сохранении прежней скорости. Оба способа примерно одинаково эффективны, а выбор одного из них зависит от конкретных условий гонки.

Вредное влияние мачты на работу парусов еще более заметно на многомачтовых яхтах, например двухмачтовых кечах и иолах, по сравнению с тендерами, имеющими

несколько передних парусов, на работу которых мачта не влияет.

Интересное решение проблемы гладкого соединения паруса с мачтой принято в вооружении Люнгстрема (рис. 38), затем усовершенствованного Хаслером (рис. 39). Свободно стоящая поворотная мачта имеет два гика, на которых располагаются два совершенно одинаковых грота. Гроты могут быть накручены на мачту — это особый способ взятия рифов. Кроме того, с помощью

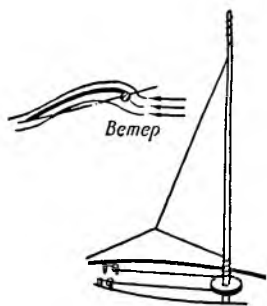


Рис. 38

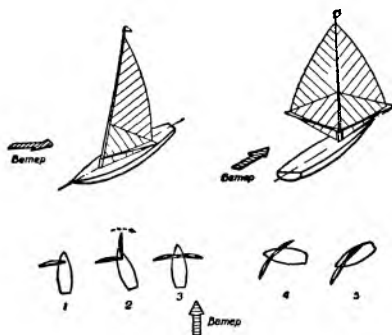


Рис. 39

натяжения паруса по углам можно изменять его пузатость. На лавирове оба грота прилегают друг к другу, образуя фактически один, сдвоенный парус. На фордевинде оба паруса работают отдельно. Мачта независимо от курса всегда находится на наветренной стороне паруса, как на модели (см. рис. 35, в).

По сравнению с классическим, вооружение Хаслера имеет некоторые преимущества, особенно важные для одиночных дальних плаваний:

1. Простота и легкость взятия рифов. Здесь не нужна работа команды на баке яхты, тяжелая и опасная в штормовых условиях и в ночное время.

2. На фордевинде легко увеличить в два раза площадь парусности посредством простого приема, в то время как на яхте с обычным вооружением надо ставить добавочные паруса.

3. На курсе фордевинд, благодаря симметричному расположению парусов, равнодействующая сила прохо-

дит вблизи мачты, яхту почти не приводит, и она легко подчиняется автоматическому управлению на руле.

Это вооружение появилось в результате попыток облегчить труд рулевым в длительных походах, например в Атлантических гонках одиночек, в которых участвовал и сам Хаслер.

Такую же цель преследуют и некоторые иные типы вооружения, например показанные на рис. 40.

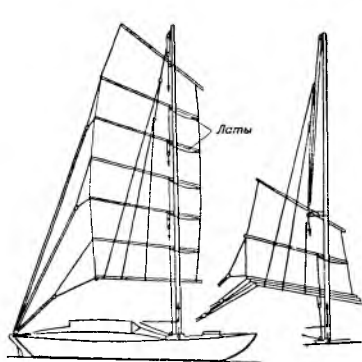


Рис. 40

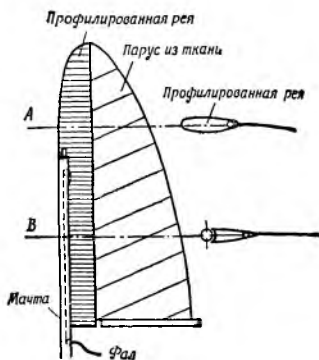


Рис. 41

Эта яхта «Джестер» класса «Фольксбот» участвовала в Атлантических гонках в 1960 г. Вооружение яхты заимствовано у китайских джонок, у которых мачта не оказывает вредного влияния на работу паруса. Кажущаяся на первый взгляд сложной система бегучего такелажа на самом деле очень проста в управлении. Она позволяет, в известных границах, изменять площадь парусов, а также и пузатость. Следовательно, в одиночном плавании такая яхта дает такие же преимущества, как вооружение Хаслера.

Поборники аэродинамики в парусном спорте пытаются устранить вредное влияние мачты с помощью применения полужестких парусов. Типичный пример такого паруса показан на рис. 41. Профилированная рея поддерживается короткой мачтой, спрятанной внутри реи. Фал проходит внутри пустой мачты и позволяет поднять рею и поставить ее на мачту. Сам парус своей шкаториной входит в нормальный ликпаз на кромке реи.

На рис. 42 показаны результаты испытаний модели бермудского паруса в Аэродинамической лаборатории профессора Юнкерса. Сравнивая графики поляр для модели I и II и указанные величины равнодействующих сил F_1 и F_2 , найдем, что модель II — с профилированной мачтой — дает на лавировке силу тяги F_{x2} , примерно на 30% большую, чем сила тяги F_{x1} паруса с обычной круглой мачтой.

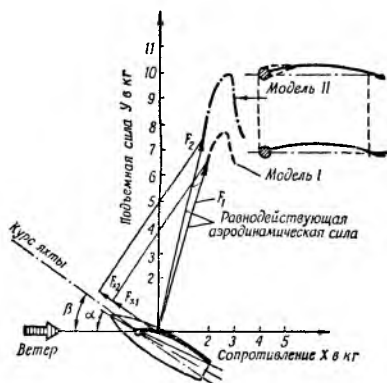


Рис. 42

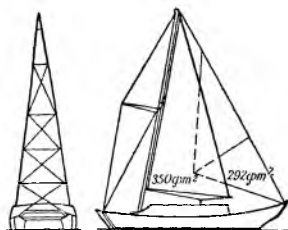


Рис. 43

Другой пример устранения вредного влияния мачты показан на рис. 43. Это — катамаран «Марара», спроектированный С. О. Уокером. Здесь вместо мачты применена ферма, имеющая форму буквы А и поставленная вплотную за задней шкаториной грота. Никакого влияния на работу грота мачта не оказывает, и грот работает, подобно стакселям. Такое вооружение позволяет получить большие силы при меньшей площади парусности.

г) Добавочное аэродинамическое сопротивление яхты

В приведенных ранее примерах рассматривалось влияние аэродинамического сопротивления на работу паруса, причем действие ветра на корпус яхты, такелаж и команду не принималось во внимание. Однако пренебрегать этими факторами при оценке гоночной подготовленности яхты нельзя.

Общая площадь яхты, находящейся под действием ветра, может быть разделена на две основных части:

- 1) действительная полезная площадь парусности S ;
- 2) вредная площадь $S_{\text{в}}$, куда следует отнести площадь надводной части корпуса и вооружения, за исключением парусов.

Аэродинамические силы, образующиеся от воздействия ветра на вредную поверхность $S_{\text{в}}$, действуют в основном по направлению вымпельного ветра, и поэтому их можно причислить к категории сопротивлений. Очевидно, что значение этого добавочного сопротивления в известной мере будет зависеть от соотношения поверхностей $S_{\text{в}}$ к S и от курса яхты по отношению к вымпельному ветру. Когда курс яхты становится острее, дополнительное сопротивление, зависящее от величины вредной площади $S_{\text{в}}$, будет действовать сильнее в направлении, противоположном движению яхты, и, следовательно, скорость будет уменьшаться. Наоборот, на полных курсах добавочное сопротивление действует по направлению движения, способствуя увеличению аэродинамической силы, от которой зависит скорость яхты*.

Польза, которую приносит добавочное сопротивление на полных курсах, не компенсирует вреда на острых курсах, и потому отношение $S_{\text{в}}$ к S желательно иметь возможно меньшим.

Рассмотрим ситуацию, приведенную на рис. 44, когда яхта лавирует. Направление действия равнодействующей аэродинамической силы $F_{\text{п}}$ определяется углом аэродинамического сопротивления $\varepsilon_{\text{ап}}$. Проекция силы $F_{\text{п}}$ на направление движения яхты — сила тяги $F_{\text{х1}}$ — представлена вектором OA .

Заметим, что сила $F_{\text{п}}$ состоит из двух слагаемых, а именно: Y и X . Теперь, чтобы получить аэродинамическую силу, действующую на всю надводную часть яхты, а не только на паруса, надо прибавить к сопротивлению парусности $X_{\text{п}}$ добавочное сопротивление (вредное) $X_{\text{в}}$.

На рис. 44 это сопротивление показано дополнительным вектором CD .

Равнодействующая сила $F_{\text{с}}$, представляющая теперь все действующие на яхту аэродинамические силы, может быть найдена посредством построения параллелограмма

* При острых курсах корпус помимо увеличения лобового сопротивления незначительно увеличивает и подъемную силу (прим. редактора).

сил, одной стороной которого будет сила Y , а другой — суммарное сопротивление

$$X_c = X_{\Pi} + X_B.$$

Найденная сила F_c , как мы видим, направлена более к корме, чем сила F_{Π} , так как угол сопротивления ϵ_{ac} больше угла ϵ_{ap} , вследствие чего проекция на направление

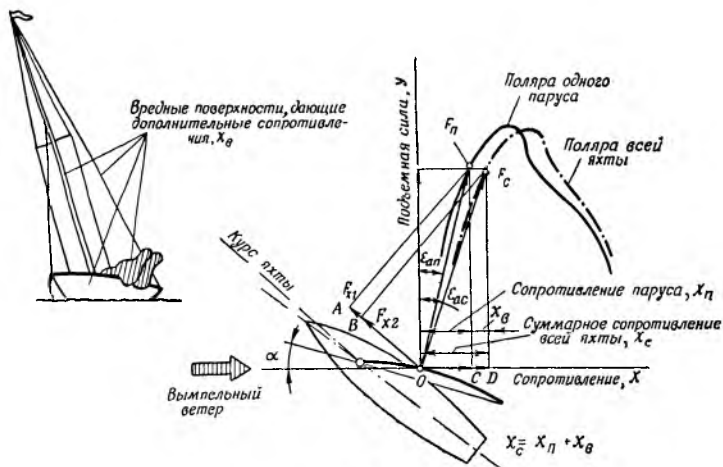


Рис. 44

движения яхты F_{x2} , выраженная вектором OB , меньше силы F_{x1} , выраженной вектором OA .

Несколько упростив вопрос, можно построить полярю для целой яхты (штрих-пунктирная кривая на рис. 44), сместив график поляры парусов вправо на величину добавочного сопротивления X_B .

Полностью устранить вредные сопротивления невозможно. Однако тщательное проектирование как стоячего, так и бегучего такелажа, правильное поведение команды в гонках могут заметно уменьшить вред добавочного сопротивления.

Кроме того, когда на лавировке корпус закрывает свободное пространство между гиком и поверхностью воды, аэродинамическое сопротивление несколько снижается.

Многочисленные опыты, проведенные автором с парусами яхты класса «Дракон» в аэродинамической трубе Саутгемптонского университета, показали, что расстояние от гика до поверхности воды имеет большое значение в работе паруса. Опыты проводились с парусами, установленными на корпусе и без него. Удалось выяснить, что в диапазоне некоторых курсовых углов на бейдевинде, корпус не только не ухудшает работу парусов, но даже на несколько процентов повышает их коэффициент полезного действия. Это получается в результате снижения индуктивного сопротивления парусов из-за перекрытия корпусом свободного расстояния между гиком и поверхностью воды. Оказалось, что потери от дополнительного сопротивления корпуса с избытком компенсируются уменьшением индуктивного сопротивления парусов.

Такое полезное действие корпуса уменьшается с переходом на полные курсы, поскольку корпус уже не препятствует перетеканию воздуха под гиком на подветренную сторону паруса.

По этим же причинам полезно ставить передние паруса так, чтобы нижняя шкаторина была ближе к палубе, а гик грота также держать в самом нижнем положении. На лавировке и в сильный ветер выгодность такой постановки парусов проявляется сильнее.

6. Структура вымпельного ветра

Величина возникающих на парусе аэродинамических сил изменяется пропорционально квадрату скорости вымпельного ветра V_K .

Иными словами, если скорость ветра увеличилась вдвое, аэродинамическая сила возросла в четыре раза.

Действующий на парус вымпельный ветер не имеет постоянной скорости и направления и изменяется в зависимости от следующих факторов:

- 1) угла γ между курсом яхты и направлением истинного ветра $V_{и}$;
- 2) скорости яхты V ;
- 3) изменений скорости истинного ветра на разной высоте над уровнем водной поверхности (вертикальный градиент ветра);
- 4) боковой качки;

5) килевой качки (удары о волны).

Вымпельный ветер есть результат взаимодействия истинного ветра и скорости хода яхты. Рассмотрим, как изменяются скорость и направление вымпельного ветра, если скорость истинного ветра $V_{и} = 10$ узлам, а скорость яхты $V = 5$ узлам.

Для различных курсов яхты относительно направления истинного ветра можно построить соответственно векторные треугольники, как показано на рис. 45. Из рисунка видно, что в диапазоне курсовых углов относительно истинного ветра от γ_1 до γ_2 , т. е. от острого бейде-

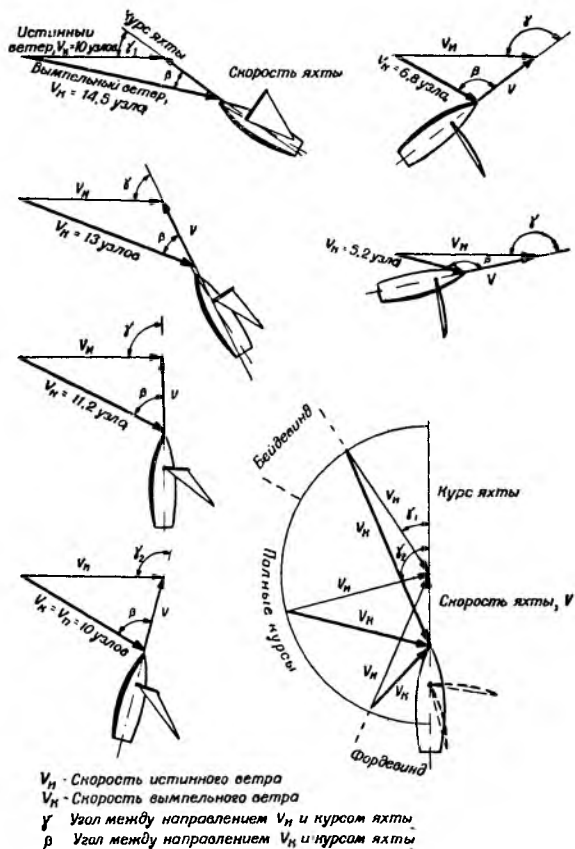


Рис. 45

винда до острого бакштага, скорость вымпельного ветра V_k больше скорости действительного истинного ветра $V_{и}$, и тем больше, чем острее курс яхты. После перехода от острого бакштага к более полным курсам скорость вымпельного ветра начинает уменьшаться по сравнению со скоростью истинного ветра и приходит к своему минимуму на курсе фордевинд.

Как видно из рис. 45, скорость вымпельного ветра изменяется в границах от 14,5 до 5 узлов, т. е. в отношении почти 3 : 1. Это значит, что при одной и той же скорости истинного, фактического, ветра величина аэродинамической силы на парусе в рассматриваемом случае может изменяться девять раз. Изменения скорости вымпельного ветра имеют большое практическое значение, например, при решении вопроса о необходимости взятия рифов, при замене одних парусов другими, особенно стакселей, и т. д. Сколько надо брать рифов или насколько уменьшить площадь передних парусов, можно решить в зависимости от характера гоночной дистанции. Например, в гонках на большие расстояния, преодолеваемые полными курсами, целесообразно нести увеличенную площадь парусности. При том же ветре, но во время лавировки, возможно, придется брать рифы.

Скорость истинного, фактического, ветра непостоянна по вертикали. В результате трения о поверхность земли или воды прилегающие к ним струи воздуха затормаживаются сильнее, чем часть воздушного потока, находящаяся выше над поверхностью земли или воды.

Характер изменения скорости ветра над землей аналогичен изменению скорости в пограничном слое, только в сильно увеличенном масштабе. Метеорологическими наблюдениями установлено, что характер изменения ветра по высоте, или так называемый вертикальный градиент ветра, зависит от условий погоды и состояния моря. На рис. 46 приводится типичная кривая ветрового градиента для средних метеорологических условий над открытыми водными пространствами. Вблизи от берегов или на внутренних водах характер кривой будет иной.

Допустим, что на высоте 100 футов (30,5 м) скорость истинного ветра $V_{и} = 10$ узлов. По графику (см. рис. 46) найдем, что скорость ветра $V_{п}$ на высоте фалового угла яхты «Дракон» будет равна только 80% от скорости ветра вверху, т. е. 8 узлам. На уровне центра парусности

скорость ветра соответственно будет только 6,8 узла, а на уровне гика — еще меньше. Очевидно, что такой перепад скоростей определенно влияет на скорость и направление вымпельного ветра на разных высотах площади паруса. Наглядно это представлено на двух графиках (рис. 47, а

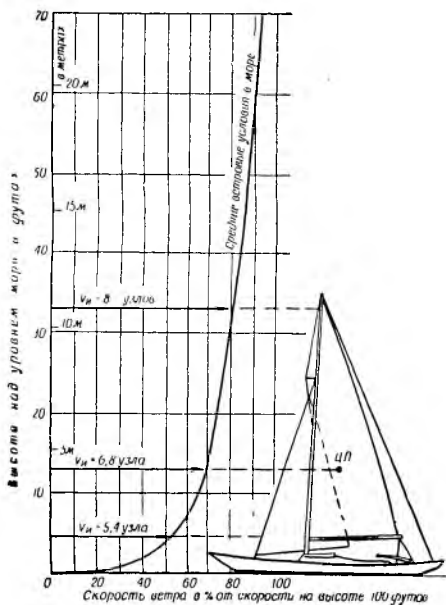


Рис. 46.

и б) в виде треугольников, построенных на векторах скоростей $V_{\text{и}}$, $V_{\text{к}}$ и V для яхты класса «Дракон», идущей со скоростью $V=3$ узлам.

На остром курсе (см. рис. 47, а) скорость вымпельного ветра на высоте фалового угла примерно на 32% больше, чем на уровне гика. Следовательно, вымпельный ветер наверху паруса будет примерно на угол $\Delta\beta=3,5^\circ$ полнее относительно курса яхты, чем на уровне гика.

Такой же анализ векторов скорости $V_{\text{и}}$, $V_{\text{к}}$ и V для курса бакштаг (см. рис. 47) покажет, что скорость вымпельного ветра наверху паруса примерно на 50% больше, чем внизу, а по направлению верхний ветер примерно на $11,5^\circ$ полнее, чем нижний, на уровне гика.

Можно принять за правило, что скорость V_k вымпельного ветра в верхней части паруса больше, а направление полнее, чем в нижней его части. Таким образом, при легких ветрах, когда можно не считаться с соображениями остойчивости, выгодно ставить высокие дополнительные паруса, например спинакер. Такие паруса будут работать при более сильном ветре и при более выгодном его направлении. В этом случае важное значение имеет так-

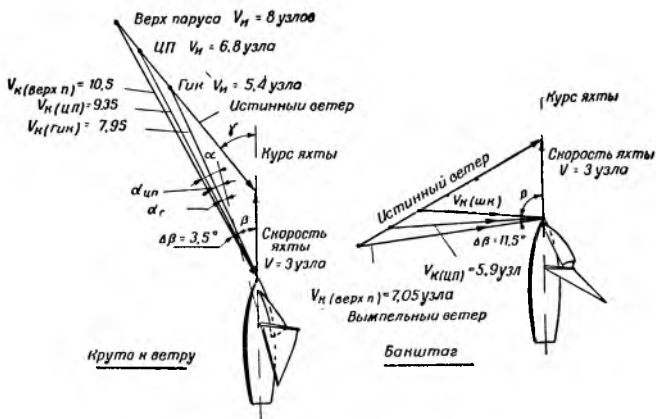


Рис. 47

же форма спинакера. Этот вопрос будет рассмотрен далее.

С вымпельным ветром связан один спорный практический вопрос о допустимом или даже желательном скручивании поверхности паруса от гика к головной дощечке. Существующие среди яхтсменов на этот счет мнения прямо противоположны: одни считают скручивание паруса желательным, другие — нежелательным.

Изгиб поверхности паруса и некоторое скручивание его верхних частей путем постепенного поворота несколько под ветер по сравнению с частью паруса, прилегающей к гику, можно считать допустимым при условии, если по всей высоте парус будет работать под одним и тем же углом атаки. Это может служить критерием при оценке скручивания паруса. Для выполнения этого условия на лавировке, например на яхте «Дракон» (см. рис. 47, а), можно было бы допустить такое скручивание

паруса, чтобы между гиком и парусом у головной дощечки образовался угол не более $3,5^\circ$ (на этот угол отклоняется и ветер). Практически очень трудно, даже с помощью оттяжки гика и тщательной проводки шкотов, уменьшить скручивание грота до такого предела. В большинстве случаев на практике, сознательно или нет, допускаемое скручивание паруса гораздо больше и нередко превышает 30° .

На курсе бакштаг (см. рис. 47, б) выпельный ветер отклоняется на больший угол. Для яхты «Дракон» этот угол равен примерно $11,5^\circ$. Приблизительно в этих же границах можно оправдать и скручивание грота. Устранить вредное скручивание паруса при сильных ветрах почти невозможно. Гик задирается вверх, и верх паруса заполаскивает или почти заполаскивает в то время, когда низ паруса работает под слишком большим углом атаки относительно выпельного ветра. Эксперименты, проведенные в аэродинамической трубе, подтверждают, что аэродинамические свойства парусов со скрученной поверхностью гораздо хуже, чем у парусов, поверхность которых не скручена. При слабых и умеренных ветрах с помощью удачно сделанных оттяжек гика иногда удается снизить угол скручивания грота почти до границ, соответствующих направлению выпельного ветра.

Бортовая и килевая качки, а также удары яхты о волны в бурную погоду, тоже влияют на скорость и направление выпельного ветра. Особенно это касается верхних частей паруса, где движения мачты наибольшие. Рассмотрим для примера бортовую качку (рис. 48, а). Топ мачты раскачивается между положениями 1 и 2 и достигает скорости W_1 , двигаясь на подветренную сторону, и скорости W_2 при движении в обратном направлении, т. е. на наветренную сторону. Влияние такого раскачивания мачты на направление и скорость выпельного ветра показано на правой стороне рисунка. Анализ показывает, что угол атаки верхних частей паруса может изменяться в очень широких границах, и чем стремительнее качка, тем эти границы шире. Повторяющиеся изменения скорости и направления выпельного ветра вызовут периодические изменения величины и направления аэродинамической силы, подобно тому, как это происходит во время пампинга. Особенно ярко это можно наблюдать на полных курсах, близких к галфвинду: в этих условиях

только само раскачивание яхты может вызвать такой же прирост скорости, который получается за счет работы со шкотами способом пампинга.

Проанализировав рис. 48, б, приходим к выводу, что ки-

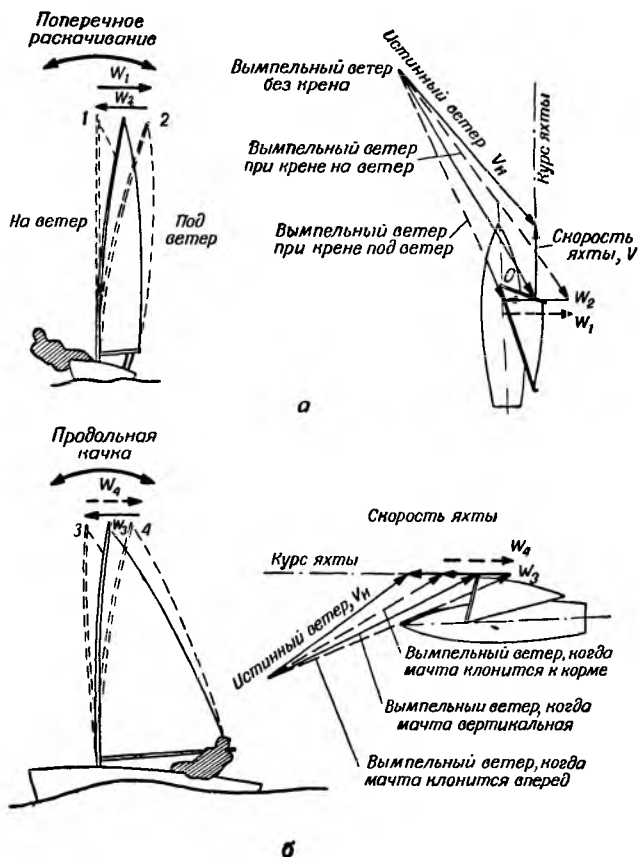


Рис. 48

левая качка тоже влияет на характер вымпельного ветра, а следовательно, и на аэродинамическую силу паруса. Так как яхта одновременно испытывает и бортовую и килевую качки, по-видимому, их влияние на работу паруса следует рассматривать совместно. Эти явления тесно свя-

заны с техникой плавания на волнении, о чем будет сказано дальше.

При слабом ветре, но сильном волнении качка вредно отражается на работе паруса. В этих условиях только периодически парус приобретает хорошую форму, в остальное же время он мертво висит или находится в состоянии полоскания. Гораздо лучше себя ведет парус, сшитый из более тяжелой, жесткой ткани, не так легко поддающийся кратковременным деформациям. Отсюда можно сделать вывод, что широко распространенное применение легких парусов в условиях слабого ветра едва ли верно, так как и в слабый ветер более тяжелые паруса окажутся выгоднее. Естественно, это положение нельзя отнести к спинакерам, которые должны быть из легкой ткани, и тем более легкой, чем слабее ветер.

7. Значение угла атаки

Познакомившись с характером вымпельного ветра, рассмотрим, какое значение имеет угол атаки, т. е. угол установки паруса по отношению к вымпельному ветру. Для примера возьмем наиболее простую яхту типа «Финн» с площадью парусности $S=10 \text{ м}^2$. Примем, что аэродинамическая характеристика паруса будет такой, какой она дана на рис. 20. Яхта идет курсом галфинд относительно вымпельного ветра, имеющего скорость $V_k \approx 10$ узлам, или 5 м/сек, или 3 баллам по Бофорту. Рулевой меняет угол установки паруса — сначала $\alpha=10^\circ$, затем $\alpha=27,5^\circ$ и наконец $\alpha=40^\circ$ (аналогично примеру, приведенному на рис. 22, а, б и в).

На этом курсе подъемная сила Y действует в том же направлении, как и сила тяги F_x (в нашем примере ветер дует перпендикулярно к курсу яхты). Следовательно, сила F_x равна силе Y , которую можно вычислить, пользуясь данными графика на рис. 20. Когда рулевой устанавливает парус под углом $\alpha=10^\circ$ (см. рис. 22, а), этому соответствует коэффициент $C_y=0,65$ (см. рис. 20).

Величину аэродинамической силы определим по уже известной формуле:

$$F_x = Y = 0,0625 \cdot V_k^2 \cdot S \cdot C_y = 0,0625 \cdot 5^2 \cdot 10 \cdot 0,65 = 10,15 \text{ кг.}$$

Увеличивая угол установки паруса α до $27,5^\circ$, рулевой увеличивает коэффициент C_y до 1,30 и соответственно увеличивает силу тяги:

$$F_x = Y = 0,0625 \cdot 5^2 \cdot 10 \cdot 1,3 = 20,3 \text{ кг.}$$

Форма поляры (рис. 20) показывает, что в границах углов $27,5—30^\circ$ на парусе возникают максимальные по величине аэродинамические силы.

Если рулевой еще больше подбирает шкоты и доведет угол атаки до 40° (см. рис. 22, *в*), величина коэффициента C_y при этом падает до 1,18. Сила тяги будет равна:

$$F_x = Y = 0,0625 \cdot 5^2 \cdot 10 \cdot 1,18 = 18,45 \text{ кг.}$$

Приведенный пример, который можно довольно часто наблюдать и на практике, убедительно показывает значение правильной установки паруса. Слишком выбранные или, наоборот, излишне потравленные шкоты в какой-то степени снижают силу тяги, а следовательно, и скорость яхты. Постоянное поддержание такого угла атаки, который соответствовал бы постоянно изменяющемуся направлению ветра, имеет первостепенное значение на практике. Рулевые, не учитывающие этих требований, делают ошибки, которые становятся особенно заметными при слабых ветрах, так как даже небольшое изменение силы тяги приводит к заметному изменению скорости яхты.

Из рис. 20 видно, что только при определенных углах атаки — $\alpha = 27,5—30^\circ$ — можно получить на парусе максимальную аэродинамическую силу. Но это касается только паруса яхты «Финн», имеющего установленные геометрические размеры и форму (удлинение, пузатость, скручивание и т. п.). Для парусов с другими геометрическими характеристиками оптимальные углы атаки соответственно будут иными.

Большинство рулевых при полном курсе устанавливают парус под таким углом атаки, чтобы верхняя его часть не заполаскивала. Начало заполаскивания верха паруса служит сигналом для подбора шкотов. Однако руководствоваться этим можно только, когда парус сильно скручивается и у рулевого нет других признаков, чтобы проконтролировать работу верхних частей паруса. При этом рулевой должен учитывать, что парус в этом

случае не может работать одинаково эффективно по всей высоте.

Скручивание паруса приводит к тому, что внизу он работает при слишком больших углах атаки, тогда как верх его находится на грани заполаскивания. На подветренной стороне паруса, в его нижних частях, происходит стрыв струй и завихрения. Только средняя часть паруса будет работать при правильном угле атаки. Работоспособность излишне скрученного паруса меньше той, которая была бы у паруса, работающего по всей высоте с оптимальным углом атаки.

На основании проведенных опытов с моделями установлено, что полезная тяга паруса из-за скручивания может быть значительно снижена. На рис. 49 показана работа скрученного паруса по сравнению с парусом, работающим без скручивания. Сравнение кривых показывает, что

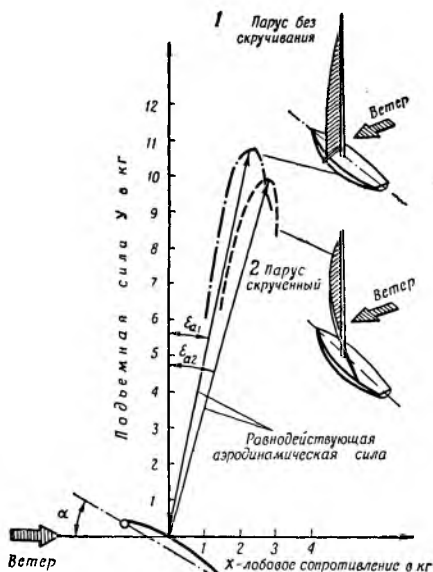


Рис. 49

аэродинамическая сила скрученного паруса не только меньше по сравнению с аэродинамической силой нескрученного паруса, но и невыгодна по направлению. Угол сопротивления ϵ_{a2} больше угла ϵ_{a1} . Это значит, что яхта со скрученным парусом не сможет идти так круто к ветру, как другая яхта.

Скручивание и выдувание верхних частей паруса особенно заметны на полных курсах и при сильном ветре. В этом случае натяжение шкотов не препятствует задиранию гика, как это бывает на лавировке. Работу такого паруса можно улучшить, оттянув гик.

Назначение оттяжки — создать для всех сечений паруса по высоте одинаковые условия работы, т. е. один и

тот же угол атаки. Создать идеальные условия только посредством оттяжки невозможно, так как всегда останется какая-то несогласованность между направлением вымпельного ветра и окончательной формой паруса.

Одновременное запласкивание паруса по всей высоте во время медленного маневра приведения или постепенного потравливания шкотов может служить показателем правильного натяжения оттяжки.

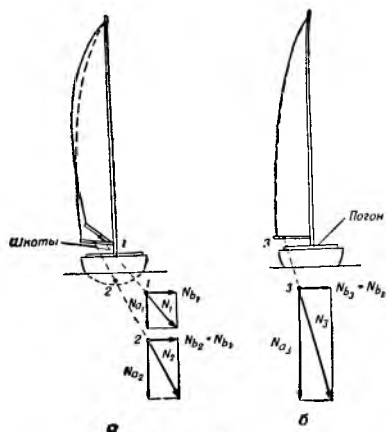


Рис. 50

Если оттяжка выбрана неправильно, то при медленном приведении яхты запласкивать начинает вначале верх или низ паруса. Это говорит о том, что на разной высоте угол установки паруса относительно вымпельного ветра не соответствует его направлению. Но может случиться так, что никакой регулировкой натяжения оттяжки не удастся добиться одновременного запласкивания паруса по всей его высоте. Тогда причину надо искать в самом покрое паруса, возможно в неравномерной, неодинаковой на разных уровнях пузатости. Чтобы исправить это, необходимо перешить парус. Килевые яхты и швертботы, оборудованные исправно работающей оттяжкой гика, будут иметь преимущества перед яхтами, не имеющими оттяжки, особенно при слабых ветрах. Легкие швертботы с оттяжкой легче начинают глиссировать.

На способность яхты идти круто к ветру сильное влияние оказывает размещение кипов и блоков на палубе. Несомненно, нельзя рекомендовать такое их расположение, которое показано на рис. 50, а (положение 1), где нижний блок гика шкота помещен в диаметральной плоскости и высоко над палубой. Если силу натяжения шкотов N_1 разложить на две слагаемых силы N_{a1} и N_{b1} , то увидим, что сила N_{b1} служит для поддержания желательного угла между гиком и диаметральной плоскостью яхты, а сила N_{a1} противодействует вредному

подъему (задиранию) гика. Чем больше сила N_a по сравнению с силой N_b , тем лучше, потому что такое соотношение способствует уменьшению скручивания паруса. Выгодного соотношения этих сил можно добиться, если переместить крепление блока шкотов вниз на кильсон, как показано на рис. 50, а (положение 2). В этом случае, чтобы сохранить величину силы $N_{в2} = N_{в1}$, необходимо увеличить силу натяжения шкотов до N_2 , а это даст полезное увеличение силы N_{a2} .

Наилучший способ борьбы со скручиванием паруса дает применение максимальной длины погона (см. рис. 50, б). На длинном погоне направление шкотов становится почти вертикальным, наблюдается очень быстрый рост силы, тянущей гик вниз, что особенно важно при сильном ветре на курсе полный бейдевинд.

Конструкция оттяжки гика должна быть такой, чтобы на полных курсах она препятствовала задиранию гика и скручиванию паруса так же, как комбинация шкоты-погон на лавировке. Хорошо работающую оттяжку сделать довольно трудно.

При рассмотрении значения угла атаки на примере паруса яхты «Финн» (см. рис. 20) было установлено, что аэродинамическая сила достигает максимума, когда угол атаки α находится в пределах $27,5^\circ - 30^\circ$. В связи с этим, естественно, может возникнуть вопрос: следует ли сохранять этот угол атаки всегда, независимо от курса яхты?

Анализ рис. 51 убеждает нас, что этого делать не следует. В положениях а и б показана яхта, вооруженная кэтом (например «Финн») и идущая в лавировку. Аэро-

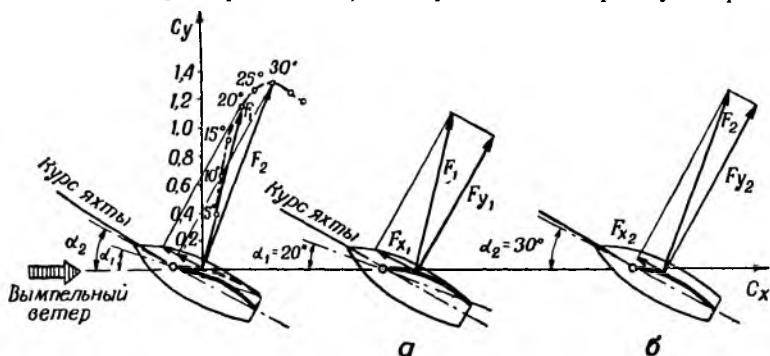


Рис. 51

динамическая характеристика паруса показана на левой стороне рисунка. В положении *a* рулевой держит парус под углом $\alpha=20^\circ$, и на парусе аэродинамическая сила не достигает возможного максимума. В положении *b* рулевой сильнее выбрал шкоты и при угле атаки $\alpha=30^\circ$ добивается на парусе максимальной по величине аэродинамической силы F_2 .

Сравним проекции сил F_1 и F_2 на направление хода яхты, т. е. силы F_{x1} и F_{x2} , и убедимся, что в положении *a*, несмотря на меньшую величину силы F_1 , она направлена более выгодно, и в результате сила F_{x1} больше силы F_{x2} . Следовательно, и скорость яхты в первом положении — *a* будет больше, чем во втором — *b*. Кроме того, сила крена F_{y2} будет заметно больше силы F_{y1} . Следовательно, яхта, находящаяся в положении *b*, не так быстро двигается и сильнее кренится, что потребует от команды больших усилий для откренивания.

Приведенный пример показывает, что для плавания с максимальной скоростью на любом курсе надо так держать паруса, чтобы не только величина, но и направление аэродинамической силы были в сумме наивыгоднейшими.

Более обстоятельно вопросы, связанные с оптимальным углом установки паруса, будут рассмотрены в последующем изложении. Потом мы убедимся, что угол установки парусов, при котором яхта будет успешно гоняться, изменяется в довольно широких пределах и зависит не только от типа вооружения, но также от курса яхты, силы ветра и гидродинамической характеристики корпуса яхты.

8. Зависимость угла атаки от силы ветра и курса относительно ветра

Возвратимся к рис. 13 и вспомним, что при равномерном движении яхты аэродинамические силы парусов уравниваются гидродинамическими силами, образующимися на погруженной в воду части корпуса. На рис. 52, *a* условие равновесия аэродинамических и гидродинамических сил представлено несколько в другом аспекте. На графике поляры аэродинамических сил при определенной скорости вымпельного ветра в качестве

нулевой точки принят центр парусности — ц. п. На нижней части рисунка помещен график равнодействующей гидродинамической силы R_1 , которая при угле атаки α_1 уравнивается с аэродинамической силой F_1 . Такая система сил является обязательным условием равномерного движения яхты, возможна только тогда, когда угол атаки α соответствует углу δ_1 между гиком и диаметр-

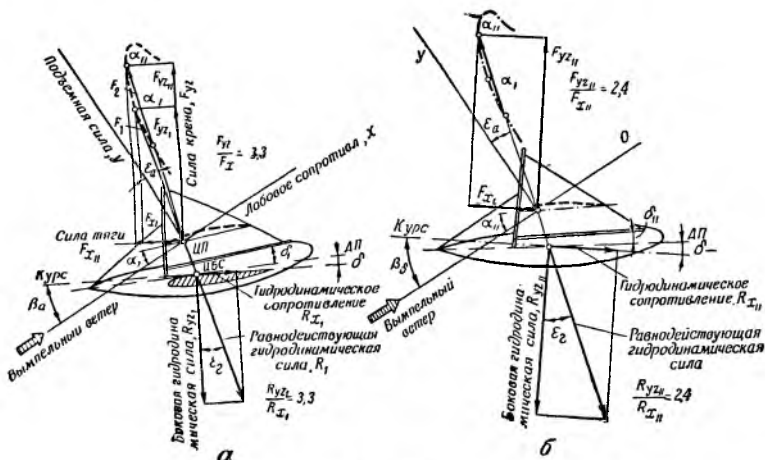


Рис. 52

ральной плоскостью яхты. Только при соблюдении этого условия силы F_1 и R_1 равны по величине и прямо противоположны по направлению. Заметим, что в условиях равновесия сил F_1 и R_1 и равномерного движения яхты отношение кренящей аэродинамической силы F_{y21} к силе тяги F_{x1} $\frac{F_{y21}}{F_{x1}}$ должно быть равным отношению соответствующих гидродинамических сил, т. е. $\frac{R_{y21}}{R_{x1}}$. В нашем примере:

$$\frac{F_{y21}}{F_{x1}} = \frac{R_{y21}}{R_{x1}} = 3,3.$$

Яхта будет двигаться под определенным углом β_a относительно вымпельного ветра, пока скорость ветра и его направление не изменятся или пока не изменят положение шкотов или положение руля.

Если затем рулевой начнет выбирать шкоты, увеличивая угол атаки до α_2 , увеличится и аэродинамическая сила на парусе F_2 . Изменение условий работы паруса действует на корпус, и равномерное движение в новых условиях наступит лишь тогда, когда вновь придут в равновесие аэро- и гидродинамические силы. Равновесие установится уже при ином угле — β . Чтобы и на корпусе могла образоваться увеличенная гидродинамическая сила R , способная уравновесить аэродинамическую силу F_2 , должен увеличиться угол дрейфа δ , или скорость яхты V , или то и другое одновременно.

Теперь, прежде чем продолжить обсуждение зависимости угла атаки от различных факторов, сделаем небольшое отступление и познакомимся в общих чертах с гидродинамикой корпуса яхты.

На рис. 52, *a* показан контур действительной ватерлинии и профиль киля, которые вследствие крена асимметричны. Так как корпус яхты движется с дрейфом, составляющим угол δ , подводная часть яхты обтекается асимметрично. Плавник начинает работать, аналогично гидрокрылу, по тем же законам, что и парус. Здесь возникает боковая гидродинамическая сила R_{yz} и одновременно образуется некоторое гидродинамическое сопротивление R_x . Если угол дрейфа δ (или угол атаки дейдвуда и филькиля, что одно и то же) увеличится, соответственно увеличится сила R_{yz} и сопротивление R_x . Прирост силы R_{yz} и сопротивления R_x зависит также от скорости яхты V , причем сила R_{yz} увеличивается пропорционально квадрату скорости яхты V . Здесь происходит полная аналогия с тем, как растет аэродинамическая сила при увеличении скорости ветра. Однако сопротивление R_x растет быстрее, чем сила R_{yz} .

Результаты испытаний, показанные на рис. 53, — хорошая иллюстрация к нашим рассуждениям. Испытания проводились в экспериментальном бассейне Морского научно-исследовательского института в Турции с моделью корпуса швертбота «Пират». Модель протаскивали под постоянным углом дрейфа $\delta = 6^\circ$ и измеряли величину силы R_{yz} и сопротивление R_x при разных скоростях буксировки V . Заметим, что при малой скорости — $V_1 = 3,3$ узла — отношение боковой силы к сопротивлению $\frac{R_{yz}}{R_x}$ равно 4,5.

Когда скорость V увеличивается, величина этого отношения постепенно падает до 1,8 (при скорости V_4). Другими словами, сопротивление R_x растет значительно быстрее боковой гидродинамической силы R_{yz} . Уместно вспомнить, что отношение силы крена к силе тяги на па-

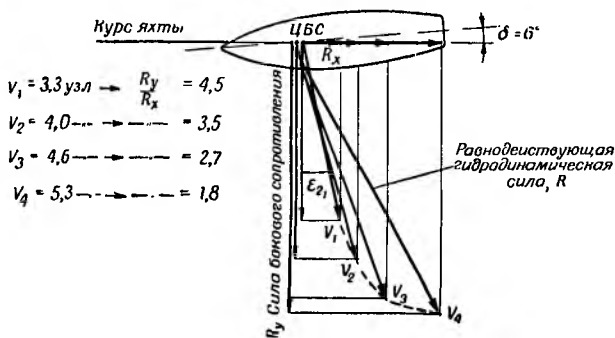
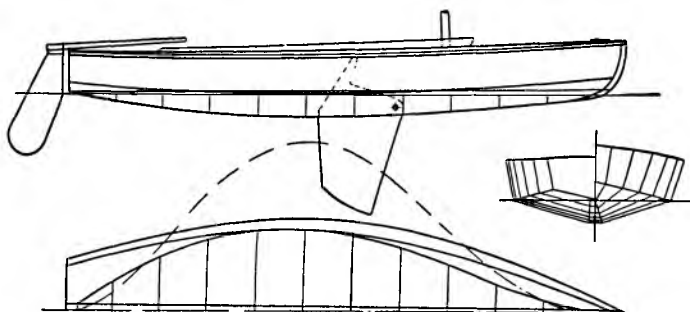


Рис. 53

русе остается постоянным при изменении скорости яхты (если не меняется форма паруса). В этом состоит большое различие между швертом и парусом.

Гидродинамические свойства швертботов и килевых яхт аналогичны, но у яхт отношение $\frac{R_{yz}}{R_x}$ меньше, чем у швертботов, так как коэффициент полезного действия шверта, как правило, выше коэффициента полезного действия плавника. Говоря о коэффициенте полезного

действия, имеется в виду достижение боковой гидродинамической силы R_{yz} при относительно малой величине сопротивления R_x . Отношение $\frac{R_{yz}}{R_x}$ служит критерием для оценки гидродинамических качеств корпуса.

Аналогично парусу работа шверта или кия улучшается с увеличением их удлинения. Например длинный, узкий шверт яхты класса «Каноз» имеет отношение $\frac{R_{yz}}{R_x} = 7,5$, а у более широкого и короткого шверта яхты класса «Пират» это отношение равно 4,5. Можно сказать, что любой скорости хода яхты V соответствуют определенные возможности образования для каждого корпуса своей величины боковой силы R_{yz} и одновременно с ней возникающего вредного сопротивления R_x .

Как видно из рис. 52, а, отношение $\frac{R_{yz1}}{R_{x1}} = 3,3$ определено на яхте класса « $R=6$ М», при скорости хода $V=5,9$ узла и скорости истинного ветра $V_{и}=12$ узлам. Боковая сила R_{yz} равна 211 кг, а сопротивление $R_{x1} = 64$ кг.

Теперь вернемся к прерванному обсуждением вопросу, что же произойдет, если рулевой будет выбирать шкоты, а положение руля сохранит без изменения? Угол атаки паруса будет увеличиваться до α_{II} , одновременно будет расти равнодействующая сила F и изменяться направление ее действия. Характерное соотношение аэродинамических сил $\frac{F_y}{F_x}$ сначала возрастает, и равновесие аэродинамических сил с гидродинамическими нарушится. Яхта перестанет двигаться равномерно, так как возникающая на корпусе гидродинамическая сила R_{yz} увеличится при тех же самых дрейфе и скорости яхты и не сможет противостоять возросшей аэродинамической силе паруса. Яхта будет уваливаться под ветер до угла между курсом и вымпельным ветром $= \beta$, при котором автоматически установится равновесие аэро- и гидродинамических сил, когда яхта наберет скорость V , а угол дрейфа будет равен δ . Эта новая система сил, установившаяся при уваливании яхты с курсового угла β_a до курсового угла β_b , показана на рис. 52, б. Не трудно заметить, что во время этого маневра в результате изменения соотношения углов между силами, действующими на па-

рус и на корпус, отношение сил $\frac{R_{yzII}}{R_{xII}} = \frac{R_{yzII}}{R_{xII}}$ изменилось на 2,4. Одновременно с изменением угла β_a на больший угол β_b увеличилась скорость яхты. Это произошло благодаря увеличению силы тяги F_{xII} , которая стала больше, чем F_{xI} . Заметим, что угол β_a , равный 30° (см. рис. 52, а), увеличился до $\beta_b = 36,5^\circ$ (см. рис. 52, б). В этом упрощенном примере поведения яхты ставилась цель обратить внимание на то, что при рассмотрении гоночных достоинств яхты надо учитывать не только качество парусного вооружения, находящегося у рулевого под постоянным наблюдением, но и работу подводной части яхты. Эта скрытая от взора рулевого часть яхты не менее важна, чем паруса. Аэродинамические силы парусов пытаются заставить погруженную часть корпуса работать в определенных условиях, так же как и гидродинамические силы, возникающие на корпусе, создают условия, в которых парус может быть использован или частично или полностью.

Теперь разберем более подробно зависимость между курсовым углом на лавировке и аэродинамической и гидродинамической характеристикой яхты.

На рис. 54 графически изображены силы, действующие на парус и на корпус. Посмотрим, какая связь существует между курсом β и углами аэродинамического ϵ_a и гидродинамического ϵ_g сопротивлений. Рис. 54 несколько упрощен по сравнению с рис. 52, а (допускается, что яхта идет по прямой и центр бокового сопротивления ц.б.с. совпадает в точке O с центром парусности — ц.п.).

Такое упрощение возможно, так как оно не меняет геометрических соотношений, рассматриваемых в данном случае.

Направление действия аэродинамической силы F определяется углом сопротивления ϵ_a , о котором шла речь в разделе 5 «Аэродинамическое сопротивление парусного вооружения». Этот угол ограничен равнодействующей силой F и осью OC , перпендикулярной к направлению вымпельного ветра.

Величину угла ϵ_a можно вычислить, если известны силы Y и X , которые измеряются экспериментально, т. е.

$$\operatorname{ctg} \epsilon_a = \frac{Y}{X}.$$

Аналогично можно вычислить угол гидродинамического сопротивления ϵ_2 . Зная величины боковой гидродинамической силы R_y и сопротивления R_x , получим:

$$\operatorname{ctg} \epsilon_2 = \frac{R_y}{R_x} .$$

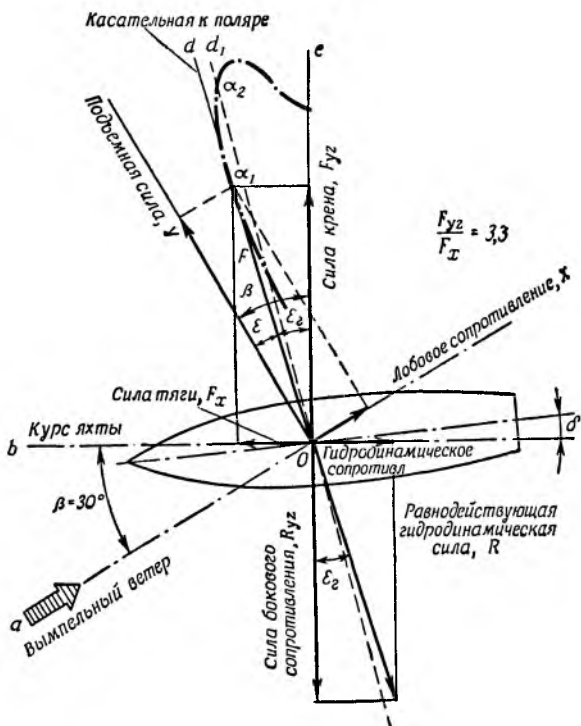


Рис. 54

Из рис. 54 не трудно определить, что:

$$\epsilon_a = \sphericalangle cod, \text{ а } \epsilon_2 = \sphericalangle doe,$$

затем $\epsilon_a + \epsilon_2 = \sphericalangle coe$,

или $\sphericalangle coe = \sphericalangle aob = \beta$,

или $\beta = \epsilon_a + \epsilon_2$.

Итак, по отношению к вымпельному ветру курсовой угол β равен сумме аэродинамического угла сопротивле-

ния ϵ_a и угла гидродинамического сопротивления ϵ_2 . Эта простая геометрическая зависимость имеет главное значение для понимания основ ходовых качеств яхты на лавировке. Отсюда можно извлечь целый ряд практических выводов, особенно важных для яхтсменов-гонщиков.

Допустим, что с помощью руля мы желаем удерживать постоянный угол плавания β , например — 30° (см. рис. 54), и одновременно с помощью шкотов изменяем угол атаки α , влияя тем самым на величину аэродинамического угла сопротивления ϵ_a . Если угол ϵ_a в результате увеличения угла атаки с α_I до α_{II} увеличивается, то в такой же степени должен уменьшиться гидродинамический угол сопротивления ϵ ; линии действия сил F и R поворачиваются вокруг точки o , как это показано на рис. 54 с помощью линий od и od_I .

Помня о зависимости между скоростью вымпельного ветра V_K и скоростью яхты V (если ветер не чрезмерной силы, то скорость яхты V увеличивается с увеличением скорости ветра V_K), попробуем разобраться в рис. 53, учитывая данные рис. 54. Если скорость яхты V увеличивается, гидродинамический угол сопротивления ϵ_2 тоже увеличивается (см. рис. 53):

$V_1 = 3,3$ узла	$\text{ctg } \epsilon_{21} = 4,5$	$\epsilon_{21} = 12,5^\circ$
$V_2 = 4,0$ узла	$\text{ctg } \epsilon_{22} = 3,5$	$\epsilon_{22} = 16^\circ$
$V_3 = 4,6$ узла	$\text{ctg } \epsilon_{23} = 2,7$	$\epsilon_{23} = 20,3^\circ$
$V_4 = 5,3$ узла	$\text{ctg } \epsilon_{24} = 1,8$	$\epsilon_{24} = 29,0^\circ$

Теперь посмотрим, каким должен быть угол атаки паруса, чтобы яхта шла с максимальной скоростью при $\beta = 30^\circ$. На основании зависимости $\beta = \epsilon_a + \epsilon_2$, а также известной величины ϵ_2 в таблице можем найти соответствующую величину:

$$\epsilon_a = \beta - \epsilon_2.$$

Отсюда косвенно оценим угол, под которым надо поставить парус по отношению к вымпельному ветру:

$V_1 = 3,3$ узла	$\epsilon_{a1} = 30^\circ - 12,5^\circ = 17,5^\circ$
$V_2 = 4,0$ узла	$\epsilon_{a2} = 30^\circ - 16,0^\circ = 14,0^\circ$
$V_3 = 4,6$ узла	$\epsilon_{a3} = 30^\circ - 20,3^\circ = 9,7^\circ$
$V_4 = 5,3$ узла	$\epsilon_{a4} = 30^\circ - 29,0^\circ = 1,0^\circ$

Из таблицы следует, что если бы можно было поставить парус так, чтобы угол сопротивления ϵ_a был равен 1° , яхта на курсе $\beta = 30^\circ$ пошла бы со скоростью $V = 5,3$ уз-

ла (при условии, что ветра достаточно). К сожалению, парус так работать не может. Посмотрев на поляру, показанную на рис. 54, увидим, что минимальный аэродинамический угол сопротивления ϵ_a равен примерно $12,5^\circ$. Он определяется касательной прямой Od к полярной кривой в точке a_1 . При этом угле атаки α_1 получает самое выгодное соотношение между силой тяги F_x и кренящей силой F_{yz} , т. е. отношение $\frac{F_x}{F_{yz}}$ становится максимальным, что является первым условием для достижения яхтой наибольшей скорости (очевидно, при достаточном ветре). Это же условие можно выразить иначе: отношение $\frac{F_{yz}}{F_x}$ должно быть минимальным. На яхте с мягкими парусами, будь то один грот или в комбинации со стакселем, можно получить аэродинамический угол сопротивления ϵ_a в пределах $7,0^\circ$ — 14° , что отвечает отношению $\frac{Y}{X}$ в пределах $8,0$ — $4,0$. Если бы можно было иметь аэродинамический угол сопротивления $\epsilon_a = 1^\circ$, отношение сил должно было бы увеличиться примерно до 57.

Однако такое огромное снижение лобового сопротивления невозможно. Если бы удалось с большими усилиями уменьшить все виды сопротивлений: индуктивное, сопротивление такелажа, применить профилированную мачту, добиться наилучшего взаимодействия грота со стакселем и т. п., можно ожидать увеличения отношения $\frac{Y}{X}$ примерно не более чем на 10, а может быть до 12.

Принимая во внимание реальные свойства паруса, как показано на рис. 54, и данные приведенной таблицы, найдем, что максимальная скорость яхты на курсе $\beta = 30^\circ$ может быть порядка 4,3 узла. Разобранный нами несколько упрощенный пример (не принимались во внимание угол дрейфа, изменения в равновесии яхты и т. д.) позволяет сделать важный вывод о весьма существенном значении минимального аэродинамического угла сопротивления ϵ_a , особенно для яхт-монотипов, таких, как, например, «Финн», «Дракон», «Звезда» и др.

Корпуса этих яхт одинаковы в своем классе, и, следовательно, их гидродинамические характеристики очень близки. Отсюда можно сделать вывод, что скорость яхты

V в данном случае будет больше зависеть от вооружения, формы, пузатости паруса, угла атаки, управления парусами и т. п., т. е. от всех тех условий, от которых непосредственно зависит величина аэродинамического угла сопротивления ϵ_a .

Вернемся еще раз к нашему примеру и к рис. 53 и 54. Зададимся вопросом, что должен делать рулевой, чтобы, сохраняя курс $\beta=30^\circ$, плыть с максимально возможной скоростью, если ветер постепенно слабеет? Параллельно снижению скорости ветра уменьшается скорость яхты V и соответственно с данными рис. 53 уменьшается гидродинамический угол сопротивления ϵ_2 . Точно в таком же соотношении должен увеличиться аэродинамический угол сопротивления ϵ_a , чего можно достичь выбором шкотов, т. е. увеличением угла атаки с α_I до α_{III} (см. рис. 54).

Таким образом, можно сделать важный вывод: оптимальный угол установки паруса во время лавировки должен изменяться соответственно изменениям силы ветра. Ветер слабеет — надо подбирать шкоты, ветер крепчает — потравливать шкоты. Прежде всего нельзя найти оснований для оправдания установки паруса на границе заполаскивания, хотя такой рецепт часто можно слышать от яхтсменов. Опытные гонщики знают из собственной практики, что такой рецепт неправилен. Угол установки паруса нельзя рассматривать как какую-то неизменяемую величину. Наоборот, его нужно постоянно поправлять, чтобы он отвечал требованиям создания оптимальных условий для совместной работы системы парус — корпус, которая зависит от силы ветра.

Рассмотрим более подробно зависимость диапазона изменений угла установки паруса к ветру от курса, которым идет яхта (рис. 55). На рисунке вычерчена поляра паруса для двух курсов: бейдевинд (угол $\beta=30^\circ$) и галфвинд (угол $\beta=90^\circ$). Силуэт яхты остается одним и тем же на обоих курсах, но изменяется положение паруса и направление ветра вместе с соответствующими полярами. На вертикальной оси расположены величины кренящих сил F_{yz} , а на оси горизонтальной, совпадающей с курсом яхты, — величины сил тяги F_x для двух различных скоростей вымпельного ветра: $V_k=10$ узлам (5,15 м/сек) и $V_k=20$ узлам (10,3 м/сек). Площадь паруса = 10 м². Эта поляра уже встречалась нам на рис. 52, а затем на рис. 54, на котором ось координат для силы Y

совпадает с линией OC . Эта же линия нанесена и на рис. 55, чтобы читателям было легче ориентироваться, сравнивая рисунки.

Мы уже обращали внимание читателей на то, что в лавировку, например, при курсовом угле $\beta = 30^\circ$ большое

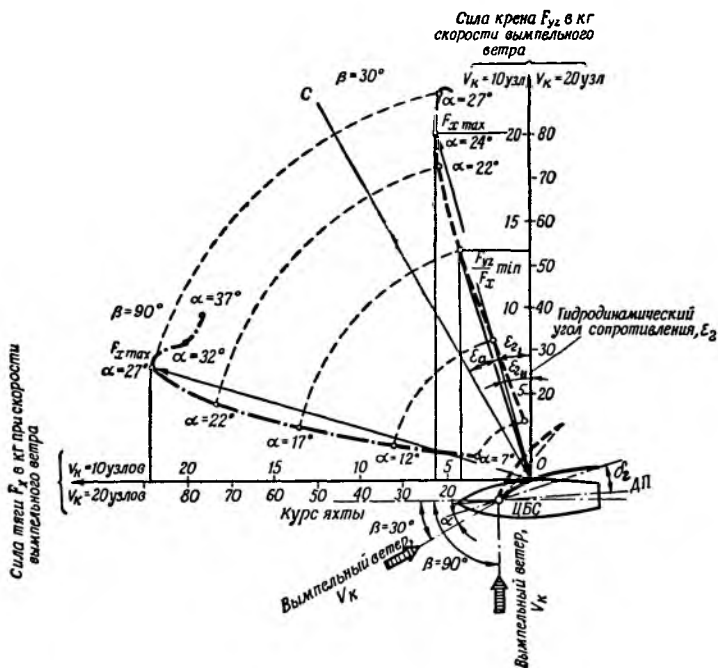


Рис. 55

значение имеет достижение минимума аэродинамического угла сопротивления ϵ_a , в особенности при сильных ветрах. Для паруса, аэродинамическая характеристика которого показана на рис. 55, этот минимум наступает при угле атаки $\alpha_1 = 17^\circ$. При этом угле атаки результат действия равнодействующей силы дает наилучшее отношение силы тяги F_x к силе крена F_{yz} , так как здесь отношение $\frac{F_{yz}}{F_x}$ будет минимальным.

Практически это значит, что команда легче будет откренивать яхту и наиболее выгодно использовать паруса.

Несколько иное положение наступит при плавании с меньшей скоростью и при более слабом ветре. Принимая во внимание геометрические соотношения, выявленные при рассмотрении совместной работы паруса с корпусом, следует теперь увеличить аэродинамический угол сопротивления ϵ_a путем подбирания шкотов и увеличением угла атаки до $\alpha_{II}=24^\circ$. При этом угле на парусе образуется максимальная сила тяги F_x . Устранить крен на слабом ветре дело нетрудное, и поэтому максимальная сила тяги F_x становится верным критерием скорости. По таким же соображениям можно сделать вывод, что при уваливании на более полный курс, например на курс $\beta=90^\circ$, правильным будет увеличить угол атаки паруса до 27° , поскольку именно при этом угле сила тяги F_x станет максимальной.

Представляет интерес сравнение кренящих сил на разных углах атаки и разных скоростях хода яхты. На лавировке, когда угол $\beta=30^\circ$, а скорость вымпельного ветра $V_K=10$ узлам или 3 баллам по Бофорту, рулевой держит паруса под углом атаки $\alpha_{II}=24^\circ$ (при этом величина силы крена равна 24 кг). При ветре $V_K=20$ узлам сила крена увеличится примерно до 80 кг. Если же рулевой уменьшит угол атаки до $\alpha_{II}=17^\circ$, сила крена уменьшится до 53 кг.

Если команда не сможет противостоять действию такой кренящей силы, крен яхты будет увеличиваться до некоторого определенного угла, с которым яхта будет двигаться в этих условиях. Это происходит в силу следующих причин: во-первых, остойчивость корпуса увеличивается с увеличением крена, во-вторых, с увеличением крена уменьшаются величины аэродинамической силы, а отсюда силы тяги и кренящей силы.

На рис. 56 приведены результаты опытов, которые проводились в Саутгемптонском университете с моделями парусов, имевших удлинение $\lambda_a=4,6$ и пузо $=1/25$.

Сравнив две поляры для крена $\Theta=0$ и для $\Theta=30^\circ$, видим, что у второй поляры, находящейся справа, аэродинамическая характеристика (парус накренен) значительно хуже, чем у первой (парус стоит вертикально). Это

справедливо для целого диапазона углов атаки, когда величина ε_a благоприятнее у паруса без крена. Различную эффективность работы парусов без крена и с креном можно объяснить, во-первых, различием в характере обтекания парусов, во-вторых, тем, что с креном эффективный угол атаки α , относительно вымпельного ветра, уменьшается. Подтверждение этого — случаи опрокидывания швертботов. Всегда на грани опрокидывания ка-

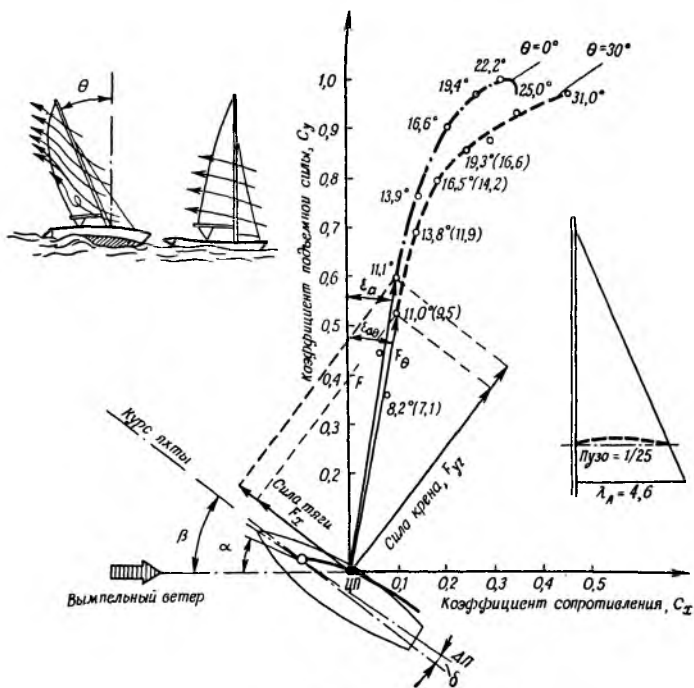


Рис. 56

жется, что ветер задувает с подветренной стороны паруса и смягчает в последний момент удар паруса о воду. На поляре для накрененного паруса в скобках даны значения уменьшенного угла атаки α , которые получаются как следствие геометрической зависимости от крена. Пользуясь рис. 56, читатель может самостоятельно сделать некоторые выводы: например, легкая по весу команда бу-

дет проигрывать более тяжелой, справляющейся с открениванием яхты. У яхты, идущей с креном, не только ухудшается угол сопротивления ϵ_a , но одновременно невыгодно растет гидродинамический угол сопротивления ϵ_r . Поэтому яхта с креном не может идти так круто к ветру, как яхта на ровном киле.

Перейдем к суммированию общих правил для рулевых, желающих добиться от яхты высоких ходовых качеств. Прежде всего отметим, что весьма распространенный рецепт, по которому парус ставится на грани заполаскивания, далеко не всегда правилен.

Одного определенного оптимального угла атаки вообще нет. В действительности существует некоторый диапазон оптимальных углов атаки, определяемый силой ветра и курсом яхты относительно вымпельного ветра.

Границы участка оптимальных углов атаки можно установить таким образом:

1) угол атаки должен быть таким, при котором отношение кренящей силы F_{yz} к силе тяги F_x было бы наименьшим. Или чтобы угол сопротивления ϵ_a был наименьшим. Это справедливо для лавировочных курсов при сильных ветрах. Такой угол атаки соответствует в общих чертах правилу установки паруса относительно ветра близко к границе заполаскивания;

2) угол атаки должен быть таким, чтобы на парусе возникала максимальная сила тяги ($F_{x \text{ макс}}$). Этот критерий относится к лавировочным курсам при слабых ветрах и полным курсам при любой силе ветра.

Принимая во внимание влияние скручивания паруса, рассмотренное в предшествующем изложении, правила установки паруса можно выразить по-другому: при слабых ветрах гик должен быть по возможности подтянут к диаметральной плоскости яхты; при усилении ветра необходимо потравливать шкоты, но не допускать скручивания паруса.

Итак, будем считать установленными два фундаментальных показателя для оценки работы паруса: это минимальное отношение $\frac{F_{yz}}{F_x}$ или максимальная сила тяги F_x . Сравнивая эти отношения у различных парусов, можно оценить их пригодность в меняющихся условиях ветра и дистанции гонок.

9. Значение «пузатости» паруса

В большинстве случаев правила любого класса яхт вполне определенно ограничивают возможности применения парусов как по их общей площади, так и по отношению между передними парусами и гротом. В некоторых классах яхт ограничения касаются не только размеров парусов, но и веса парусной ткани, например правила класса яхт «Дракон». Однако ни в одних правилах нет никаких ограничений относительно пузатости парусов, и команда может выбирать себе такие паруса, которые, по ее мнению, лучше всего подходят к условиям данных гонок.

Взгляды на значение пузатости паруса вообще, как и на оценку оптимальной величины пуза, менялись параллельно с развитием парусного спорта.

До половины прошлого столетия почти всюду паруса делались с большим пузом, что в известной мере зависело от качества парусной ткани, которая вырабатывалась из конопли.

Тогда яхты не могли идти к ветру круче 55—60°. Установившийся традиционный взгляд на выгодность пузатых парусов и недостаток знаний в этой области просуществовали до появления шхуны «Америка», на которой яхтсмены добились блестящих побед в гонках в Англии.

На шхуне «Америка» в противоположность английским яхтам паруса были плоскими, вследствие чего шхуна гораздо круче ходила в лавировку. После гоночных успехов «Америки» добрая слава плоских парусов укрепилась.

Прогресс в аэродинамике и практика яхтсменов-гонщиков вновь возродили интерес к более пузатым парусам. Снова начались споры, какие паруса лучше: пузатые или плоские?

Однако надо считаться с фактом, что и те, и другие паруса имеют свои достоинства и недостатки. Выбор того или иного паруса зависит от условий гонок: скорости ветра и преимущественных курсов на дистанции. Не надо обольщаться надеждой приобрести универсальный парус: таких парусов не существует. Отлично скроенный и сшитый парус может оказаться плохим, если его полнота не будет соответствовать условиям гонки.

а) Выбор полноты паруса

На рис. 57 построены поляры для трех моделей жестких парусов с пузом 1/7, 1/10 и 1/20 и с одинаковым удлинением $\lambda_a = 5$. Несмотря на то, что результаты получены на жестких парусах без мачт, они дают правильную качественную оценку влияния пуза паруса на его аэродинамические качества.

Приведенные кривые позволяют достаточно правильно оценить работу передних парусов, не имеющих мачты.

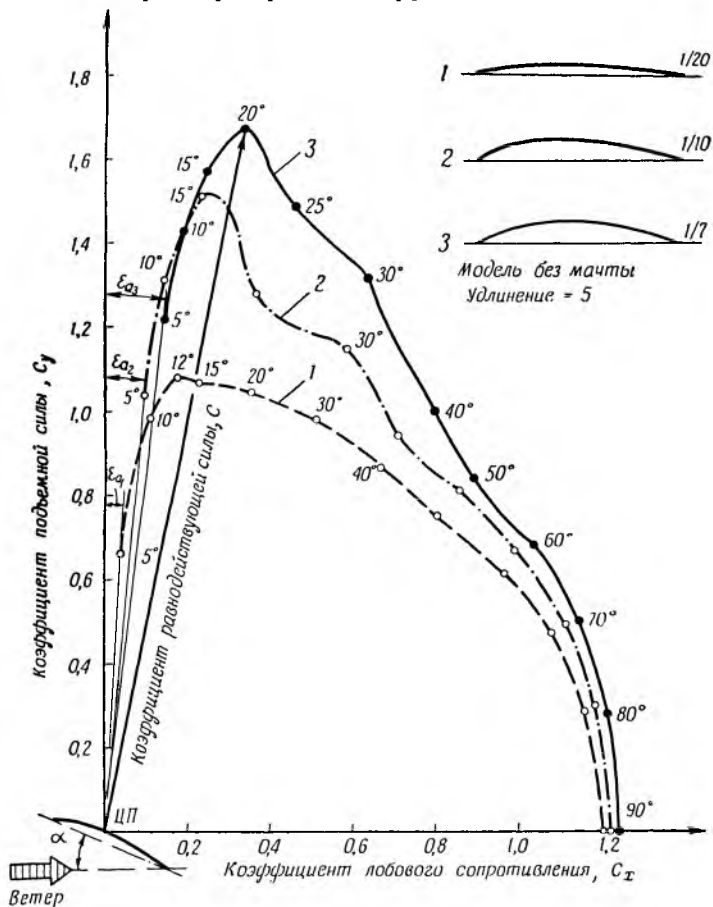


Рис. 57

Форма кривых, особенно в границах углов атаки, при которых величина коэффициента C_y является максимальной, при наличии мачты, очевидно, несколько изменится, как это отмечалось на рис. 35.

Одного взгляда на рис. 57 достаточно, чтобы заметить огромную разницу между этими тремя кривыми, особенно в районе углов, при которых величины коэффициента C равнодействующей аэродинамической силы достигают своих максимумов. Для модели с пузом $1/7$ коэффициент C_{\max} равен 1,7, для модели с пузом $1/10$ — 1,55, для модели с пузом $1/20$ — только 1,1.

Исследуем достоинства и недостатки трех моделей, пользуясь рис. 58, построенным аналогично тому, как строился рис. 55. Как и прежде, будем считать площадь паруса $S=10$ м². Соответственно масштабы для силы крена F_{yz} и силы тяги F_x нанесены на вертикальной и горизонтальной осях для двух скоростей вымпельного ветра — $V_k=10$ узлам и $V_k=20$ узлам.

Рассмотрим упрощенный случай, когда три одинаковых яхты, вооруженные такими парусами, плывут курсом галфвинд, т. е. $\beta=90^\circ$. Сравнивая величину силы тяги на горизонтальной шкале, не трудно заметить, что яхта 3, имеющая парус с наибольшим пузом ($1/7$), идет с наибольшей скоростью.

Приняв скорость вымпельного ветра $V_k=10$ узлам, определим, что максимальная сила тяги для всех трех парусов будет следующей: для паруса 3 около 28 кг, паруса 2 около 25,5 кг, паруса 1 около 18 кг.

Малоправдоподобно, чтобы даже отличный рулевой на яхте с плоским парусом мог выиграть у двух других конкурентов на этом курсе, так как сила тяги у тех яхт соответственно на 56% и на 40% больше. Предполагается, что все рулевые держат паруса на оптимальном угле атаки.

Заметим, что оптимальные углы атаки у каждого рулевого разные и равны 20° , 15° и 12° соответственно для парусов с пузом $1/7$, $1/10$ и $1/20$. Отсюда можно сделать вывод, что чем пузатее парус, тем больше должен быть угол атаки.

Рассмотрим пример: рулевой ставит свой пузатый парус 3 под слишком малым углом атаки — $\alpha=10^\circ$; скорость хода уменьшится по сравнению со скоростью яхты, вооруженной парусом 2. При этом полагаем, что второй

рулевой не делает ошибок и удерживает угол атаки $\alpha = 15^\circ$.

Из этого довольно упрощенного примера можно сделать практический вывод, что на полных курсах оправдано применение пузатых парусов. Достоинства пузатых парусов особенно проявляются при слабых ветрах, когда скорость яхты изменяется в прямой пропорции к величине силы тяги. При сильных ветрах, когда гидродинамические качества устанавливают определенную границу скорости хода (это особенно относится к тяжелым килевым яхтам), выгоды пузатых парусов, возможно, окажутся не столь очевидными.

Теперь рассмотрим недостатки и достоинства парусов 1, 2 и 3 на лавировке при угле $\beta = 30^\circ$. Если сила ветра будет такой, что рулевому или команде не трудно бороться с креном, следует полностью использовать парус для получения максимальной силы тяги F_x , игнорируя силу крена F_{yz} . В этих условиях критерием хорошего паруса будет его способность образовать максимальную силу тяги F_x .

Сравнивая с этой точки зрения (см. рис. 58) три паруса, видим, что самым удачным из них оказался наиболее полный парус с пузом 1/7. При ветре $V_k = 10$ узлам он дает силу тяги около 10 кг. Плоский парус с пузом 1/20 в этих условиях дает силу тяги F_x примерно 7 кг.

Различие между парусами 2 и 3 очень невелико, и при угле атаки ниже точки А (где поляры пересекаются) парус 3 теряет свои преимущества перед парусом 2. При той же самой кренящей силе F_{yz} он дает большую силу тяги F_x . Менее пузатый парус 2 по сравнению с более пузатым парусом 3 будет предпочтительнее при таких условиях, когда ветер настолько усилится, что откренение станет проблемой для команды.

Когда сила ветра возрастет до $V_k = 20$ узлам, а аэродинамическая сила увеличится в четыре раза, положение радикально изменится. Наиболее выгоден будет самый плоский парус.

Учитывая рассмотренные выше положения, мы можем сделать вывод, что критерием пригодности паруса в этих условиях будет возможно малое отношение силы крена к силе тяги, т. е. $\frac{F_{yz}}{F_x}$, или, что равноценно, малый аэродинамический угол сопротивления ε_a . Парус 1 в таких

условиях будет лучше парусов 2 и 3, поскольку его аэродинамический угол сопротивления ϵ_a наименьший. Допустим, что сила крена $F_{yz} = 50$ кг — это предельная величина, которую команда еще в состоянии откренить; угол атаки $\alpha = 5^\circ$ примем за минимальный, при котором

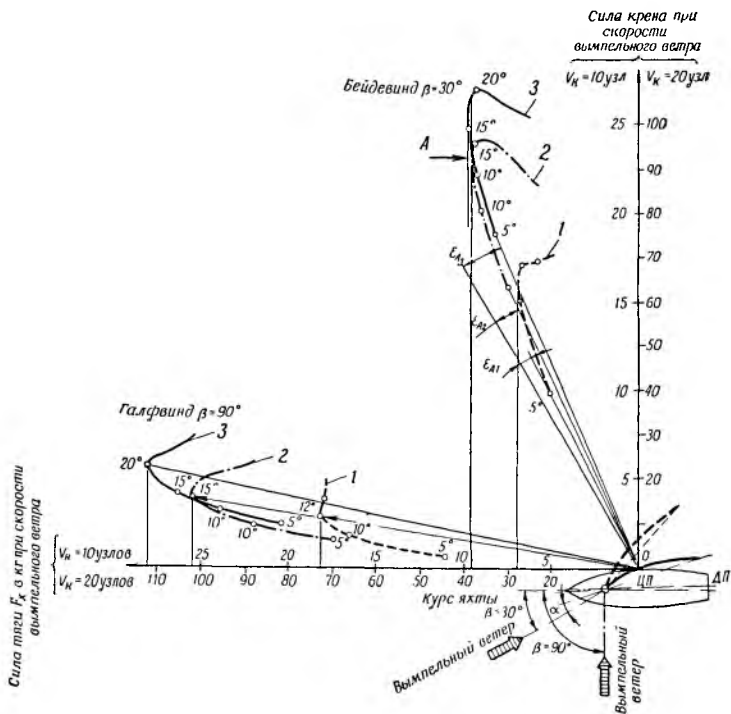


Рис. 58

паруса работают без полоскания. Тогда при угле $\alpha = 5^\circ$: парус 1 образует силу крена около 40 кг, парус 2 — около 63 кг, парус 3 — около 75 кг.

По графикам не трудно определить, что паруса 2 и 3 могли бы дать силу тяги большую, чем парус 1, но команда в состоянии бороться с креном только до тех пор, пока сила крена не превысит величины 50 кг. Следовательно, нет возможности получить от парусов 2 и 3 ту выгоду, которую они могут дать. Нельзя уменьшить

угол атаки на столько, чтобы он был меньше некоторого предельного угла, из-за возможного заполаскивания, ухудшения аэродинамической характеристики, т. е. увеличения сопротивления X с одновременным уменьшением составляющей силы Y .

Полезно вспомнить, что паруса, спитые из эластичной ткани, работают следующим образом: надутые ветром, они создают эффективную силу тяги, но, как только угол атаки уменьшится ниже определенного минимума, эти паруса начинают полоскаться. Пузатые паруса более чувствительны к изменениям угла атаки, чем плоские. Кто не видел рулевых, плавающих при сильном ветре с пузатым парусом, который больше кренил лодку, чем двигал ее вперед! При этом рулевой должен был в первую очередь бороться с собственным парусом. В такой борьбе рулевой часто вынужден травить шкоты, что в конечном счете приводит к полосканию паруса и мертвому дрейфу яхты. Теперь яхта на грани опрокидывания, и рулевому, пожалуй, надо думать прежде всего о безопасности, а не о результатах гонки.

Возвратимся к рис. 58 и отметим, что плоский парус I имеет еще некоторые резервы угла атаки, поскольку допускаемая сила крена 50 кг возникнет только при угле атаки $\alpha = 7,5^\circ$.

Если ветер еще больше усилится, рулевой может уменьшить угол атаки до 5° (при этом парус будет еще продолжать работать эффективно).

Итак, выбор пуза паруса при лавировке зависит в решающей степени от силы ветра. Если при слабых ветрах пузатость паруса должна быть порядка $1/8$ — $1/10$, то по мере усиления ветра пузо постепенно следует уменьшить до практического минимума, порядка $1/25$ — $1/30$. Очевидно, что идеальным решением вопроса было бы применение устройства для регулирования пуза паруса во время гонки, вместо трудоемкой и хлопотной замены одного паруса другим, что часто не удается сделать.

На ограниченной дистанции гонок правильно выбранный парус не должен кренить яхту более чем на 30° при условии, что паруса хорошо работают и не полощут.

На рис. 59 приведены ориентировочные значения коэффициента силы тяги C_x для парусов с разным пузом, а также рекомендации нужной пузатости для ветра разной силы. Из графиков не трудно определить, что при

лавировке на слабом ветре хорошо иметь парус с пузом порядка $1/10$. Уваливаясь на более полный курс, следовало бы увеличить пузо паруса до $1/8$, а может быть, и больше, так как кривые VI и VIII при увеличении пуза имеют тенденцию к увеличению коэффициента силы тяги.

Величину пуза паруса, пределы, в которых команда сможет его регулировать, предусматривают уже при раскрое паруса. Возможность изменения пуза паруса зави-

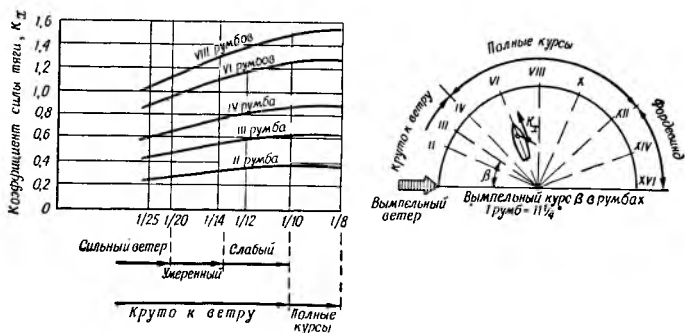


Рис. 59

сит от целого ряда факторов, из которых важнейшими (для грота) будут следующие:

- а) гибкость мачты и гика, б) натяжение шкотов,
- в) натяжение шкаторин паруса.

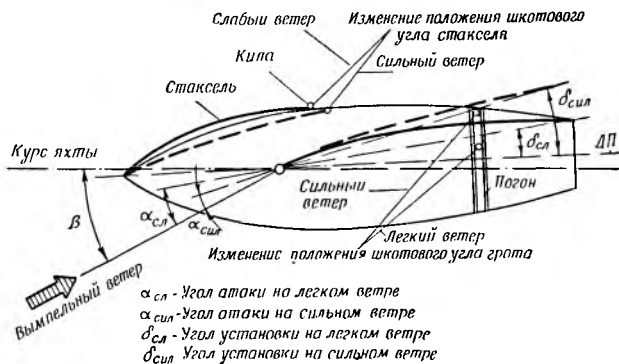


Рис. 60

Для примера возьмем вооружение шлюпа, считая, что его мачта не гнется. При слабом ветре паруса должны работать под большим углом атаки и, следовательно, гик необходимо подтянуть ближе к диаметральной плоскости яхты (рис. 60). Можно также передвинуть ближе к диаметральной плоскости и кипу стаксельшкота, однако это полезно только на достаточно широких яхтах. На яхтах с узкой палубой передние паруса работают чаще всего при слишком большом угле атаки.

С усилением ветра гикашкоты надо потравливать для уменьшения угла атаки, но тогда появляется нежелательное скручивание паруса и увеличивается пузатость. Чтобы избежать этих нежелательных явлений, це-

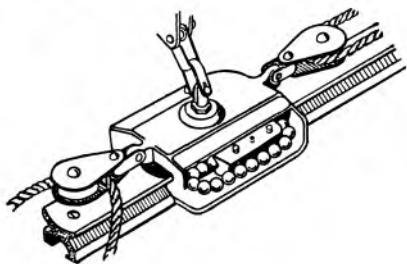
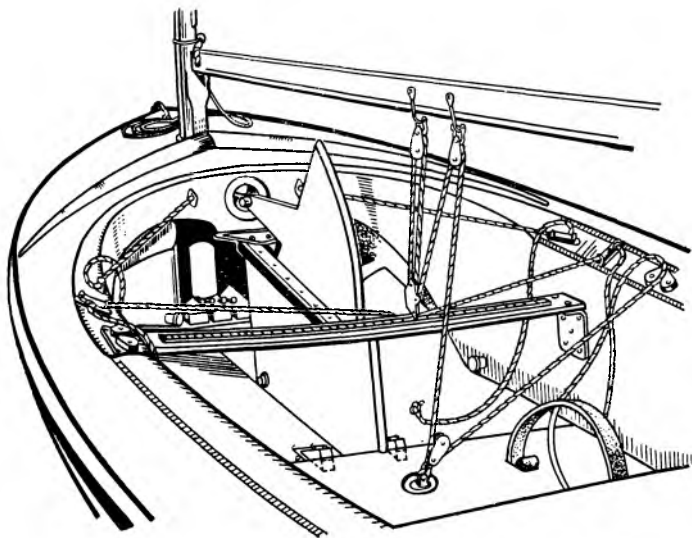


Рис. 61

лесообразно применить длинные погоны для блока гикашкотов, идущих от одного до другого борта. Такое устройство показано на яхте «Фини» (рис. 61). Аналогичное устройство может быть применено на любой яхте.

Особенно полезно такое устройство на курсе полный бейдевинд при сильном ветре. Если нельзя изменить положение нижнего блока гикашкотов на погоне, приходится травить шкоты, что связано с немедленным задираньем гика, скручиванием и увеличением пузатости паруса. Отсюда следует вывод, что курс полный бейдевинд особенно тяжел для легковесной команды. Если же есть возможность изменить угол установки гика $\delta_{сил}$ (см. рис. 60) с помощью переноса нижнего блока на подветренный борт, а также угол атаки паруса — на меньший угол $\alpha_{сил}$, будут предотвращены скручивание паруса и увеличение пузатости. Эффект от сильного натяжения шкотов может быть увеличен при одновременном изгибании мачты.

Одновременно с изменением угла установки грота δ надо менять пузатость передних парусов или проводку их шкотов. При сильном ветре кипы следует устанавливать ближе к борту, сдвинутыми в сторону кормы (см. рис. 60). Речь идет о возможности до предела вытянуть шкоты, чтобы сделать стаксель плоским. Кроме того, такое предельное выбирание шкотов стакселя часто приводит к некоторому отклонению под ветер верхней части паруса, что может оказаться полезным на узкой яхте.

При сильном ветре, если крен слишком большой, можно или зарифить слишком пузатый парус, или держать его частично заполаскивающим. Однако оба этих приема хуже, чем заменить пузатый парус более плоским. Как правило, самое тщательное взятие рифов все-таки деформирует парус, и поэтому полезнее иметь несколько парусов разной полноты. Рулевые, располагающие несколькими гротами, всегда стоят перед вопросом, какой из них выбрать для данной гонки, и обычно ошибаются из-за непредвиденных перемен погоды во время гонки, а заменить парус в короткой гонке на треугольной дистанции без ущерба для результатов просто невозможно. Таких неприятностей почти не испытывают рулевые яхт класса «Фини» и других классов, в которых есть возможность регулировать парус во время гонок в зависимости от силы ветра и курса яхты.

б) Регулирование полноты паруса, взятие рифов

На примере олимпийского моно типа «Финн» рассмотрим, как практически решается проблема регулирования полноты паруса. Как известно, этот моно тип имеет самое простое в мире вооружение: единственный парус поднимается на свободно стоящей, гибкой и поворачивающейся мачте. За последние годы внесены значительные усо-

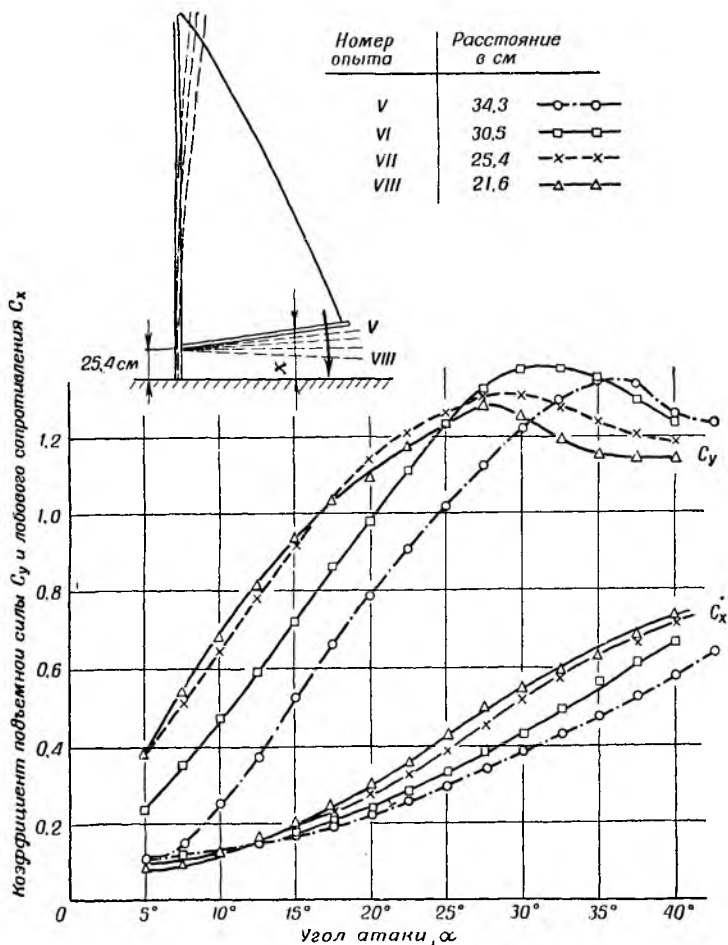


Рис. 62

вершенствования в парусное вооружение яхты класса «Финн».

Поиски были направлены на создание такой комбинации мачта — парус, которая позволила бы за счет регулирования пуза паруса во время гонки отказаться от нескольких парусов разной полноты. В результате удалось найти почти идеальную комбинацию паруса с мачтой, позволяющую обойтись только одним парусом. Регулирование полноты пуза и его положения на парусе достигается за счет изгиба мачты с помощью сильного натяжения шкотов и регулировкой натяжения передней и нижней шкаторин паруса. Все эти средства обычно без труда применяются в ходе самой гонки.

Вначале рассмотрим влияние изгиба мачты на аэродинамическую характеристику паруса, используя для этого результаты опытов, проведенных автором в аэро-

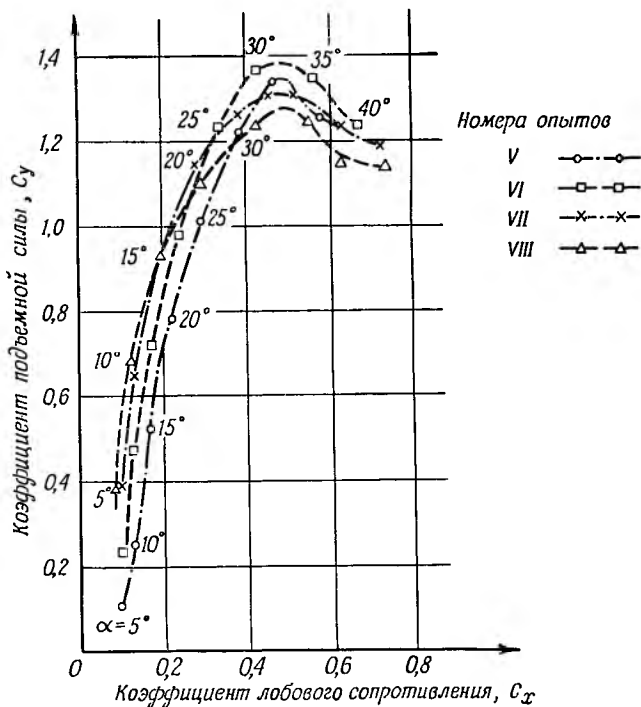
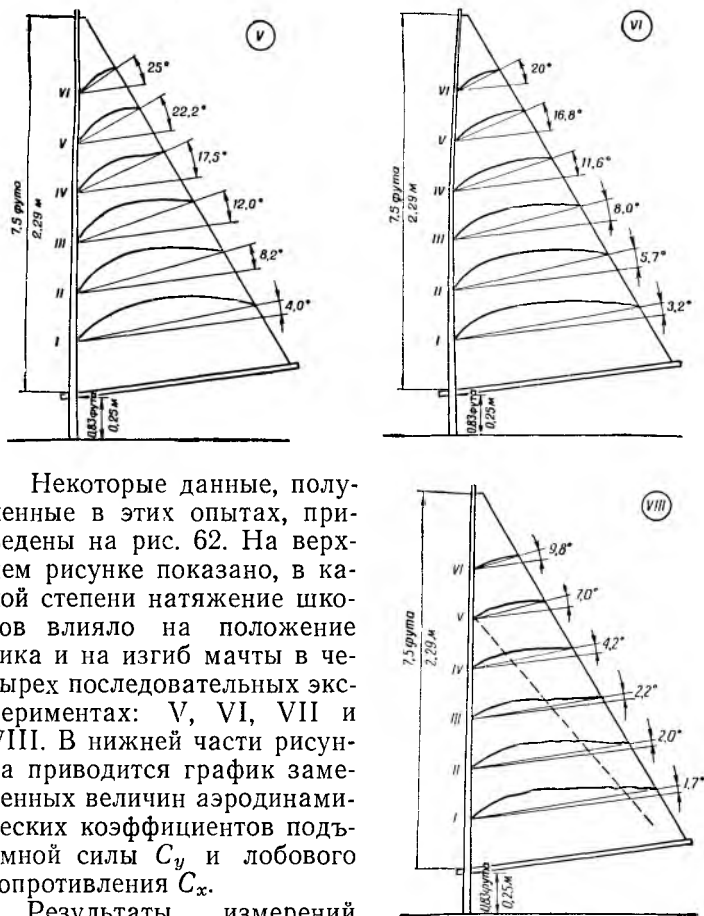


Рис. 63

динамической трубе Саутгемптонского университета. Модель паруса и его размеры приведены на рис. 20.

Опыты проводились с целью установить, как будут изменяться аэродинамические силы Y и X в зависимости от угла атаки паруса при условии, что скорость ветра остается постоянной. Изменялось только натяжение шкотов и зависящее от него изгибание мачты, отчего, естественно, менялась полнота (пузо) паруса и его скручивание, т. е. форма паруса.



Некоторые данные, полученные в этих опытах, приведены на рис. 62. На верхнем рисунке показано, в какой степени натяжение шкотов влияло на положение гика и на изгиб мачты в четырех последовательных экспериментах: V, VI, VII и VIII. В нижней части рисунка приводится график замеренных величин аэродинамических коэффициентов подъемной силы C_y и лобового сопротивления C_x .

Результаты измерений даны в виде полярных кри-

Рис. 64

вых. Одновременно фотографировались формы паруса, определялись пузатость и скручивание его на различных уровнях по высоте (см. рис. 18 и 64, V, VI, VIII). Числовые значения пуза и скручивания даны в таблице: пузо выражено в процентах к хорде паруса на этом уровне, а скручивание — в градусах (см. рис. 64).

Эксперименты Профили	V		VI		VII		VIII	
	пузо	скручивание	пузо	скручивание	пузо	скручивание	пузо	скручивание
I	12,5	4,0	12,3	3,2	10,7	1,7	9,7	1,7
II	15,2	8,2	14,1	5,7	11,6	2,5	9,9	2,0
III	14,0	12,0	13,5	8,0	11,0	4,1	8,2	2,2
IV	12,8	17,3	12,2	11,6	9,2	6,5	6,5	4,2
V	11,7	22,2	11,2	16,8	7,8	9,8	4,7	7,0
VI	10,1	25,0	9,6	20,0	6,7	13,2	3,8	9,8
Средняя величина пуза	12,7		12,7		9,5		7,1	
Среднее скручивание		14,8		10,9		6,3		4,5

Сравнивая данные таблицы с графиками, помещенными на рис. 62 и 63, можно отметить определенную зависимость между натяжением шкотов, формой паруса и его аэродинамической характеристикой. Анализ таблицы и графиков позволит сделать вывод, что, выбирая шкоты и делая парус более плоским, можно уменьшать величину коэффициента аэродинамической силы $C_{x \max}$ (см. опыты VI, VII, VIII) и одновременно улучшать отношение сил $Y : X$, от которого зависит угол сопротивления:

$$\epsilon_a \left(\operatorname{ctg} \epsilon_a = \frac{Y}{X} \right).$$

Вспомним теперь, что при лавировке в сильный ветер выгодно, чтобы это отношение $\frac{Y}{X}$ было наибольшим (так как при этом соответствующий угол сопротивления ϵ_a будет наименьшим), так как чем больше величина $\frac{Y}{X}$, тем острее может идти яхта на ветер. Нам уже известно,

что от величины отношения сил Y и X зависит отношение силы крена F_{yz} к силе тяги $F_x \left(\frac{F_{yz}}{F_x} \right)$, которое при сильном ветре должно быть как можно меньшим.

Попробуем теперь с учетом показателя $\frac{Y}{X}$ или $\frac{C_y}{C_x}$ оценить лавировочные качества паруса. Из рис. 65 видно, что, если выбирать шкоты и уменьшать пузатость и скручивание паруса, можно повысить отношение $\frac{Y}{X}$ с 3,6

(опыт V) до 5,6 (опыт VIII), т. е. на 56%. Это значит, что можно повысить и ходовые качества яхты. Насколько их можно улучшить, об этом будет сказано дальше.

Добиваться, чтобы парус был более плоским путем изгибания мачты, можно только до известного предела, так как при чрезмерном ее изгибе из-за неравномерных напряжений по основе и утку ткани профиль паруса деформируется. Это хорошо видно на рис. 64 (VIII). Появившиеся на парусе фалды портят его поверхность и снижают аэродинамические свойства. На-

до выровнять натяжение ткани, переместив некоторую ее часть ближе к мачте, т. е. устранить фалды и выровнять профиль. Это делается с помощью регулирования натяжения шкаторин паруса вдоль мачты и гика (рис. 66, а, б). Обычный галсовый кренгельс заменен двумя кренгельсами 1 и 2, расположенными на расстоянии 10—15 см от галсового угла.

Кренгельсы соединены тросиками со стопорами, расположенными по левому и правому бортам так, что рулевой во время гонок может подтянуть первый кренгельс вниз, а второй к мачте. На рис. 66 показан тросик от

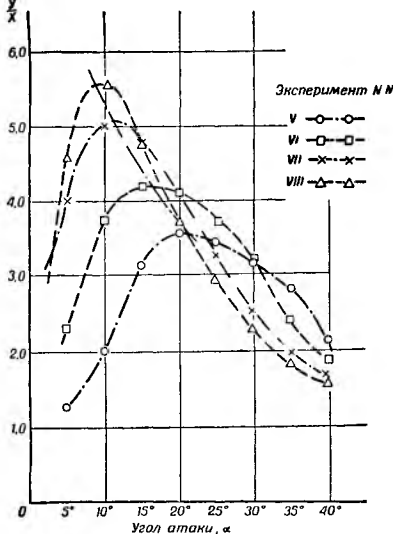


Рис. 65

кренгельса 1, чтобы не усложнять рисунка. Тонкий металлический тросик одним концом укреплен на гике, затем пропущен через кренгельс 1 и проведен вниз через блочек на тали, которые, в свою очередь, тросами связаны со стопорами. Аналогично сделана и проводка от кренгельса 2.

При сильных ветрах парус растягивается вплоть до марок 3 и 4. С помощью клина стараются так укрепить

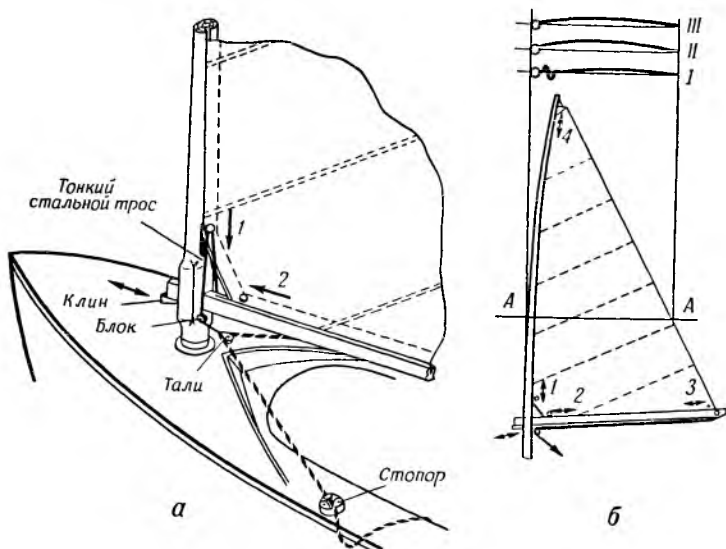


Рис. 66

гик в гнезде, чтобы пузо было по возможности одинаковым на разных уровнях паруса. Затем в зависимости от силы ветра натягивают оттяжки кренгельсов 1 и 2. Вначале профиль паруса выглядит примерно так, как он показан на рис. 66, б (профиль I). Вдоль мачты образовалась крупная фалда, которая пропадает при натяжении шкотов. Парус получает профиль II и III в зависимости от силы, с которой натягиваются шкоты.

Появление фалд служит сигналом, что ткань паруса напряжена неравномерно. С помощью оттяжек кренгельсов 1 и 2 следует попытаться их устранить. Иногда, если кривизна мачты не соответствует покрою паруса, избавиться от морщин или фалд бывает трудно. Возможно,

для этого придется сменить мачту или перешить парус.

Именно сейчас следует предостеречь тех рулевых, которые склонны обстругивать свои мачты, чтобы быстрее поправить их. В руках недостаточно опытного спортсмена рубанком легче всего испортить мачту.

Также осторожно следует подходить и к перешивке паруса.

Проанализировав рис. 67, можно сказать, что при сильном натяжении передней и нижней шкаторин паруса мы хоть и делаем его более плоским, но влияем на отношение Y к X (так же как влияет изгибание мачты). Так, например, дополнительная вытяжка нижней шкаторины на 12 мм в эксперименте X вызвала прирост отношения $\frac{Y}{X}$ с 4,2 до 4,35, или на 3,6% по сравнению с результатами, полученными в опыте VI. Если же одновременно растягивать обе шкаторины на 12 мм (см. опыт XII), отношение $\frac{Y}{X}$ макс.

увеличится с 4,2 до 4,6, т. е. примерно на 10%. Заметим, что растяжение на 12 мм на нижней шкаторине давало едва 1% прироста ее длины, а на передней шкаторине — всего около 0,5%.

Имея возможность непрерывно регулировать положения точек 1, 2, 3 и 4 паруса (см. рис. 66), рулевой влияет не только на величину, но и на положение пуза паруса, что может понадобиться ему при переходе с острых на полные курсы. Например, опуская фаловую дощечку несколько ниже, будем уменьшать изгиб мачты, а максимальное пузо станет перемещаться ближе к середине паруса. Пузо будет перемещаться вперед, если потравить нижнюю шкаторину так, чтобы точка 3 переместилась в сторону мачты одновременно с точкой 2.

После всего сказанного напрашивается вывод, что рулевой яхты класса «Финн» может в довольно широких

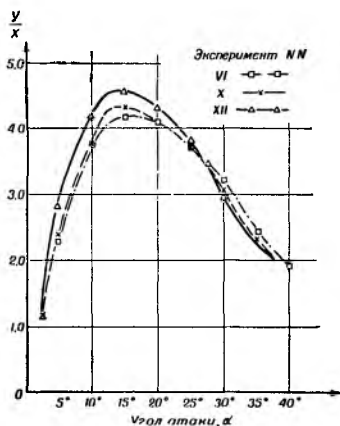


Рис. 67

границах регулировать форму паруса, приспособлявая его к силе ветра и курсу яхты.

Какими же важнейшими признаками должен руководствоваться рулевой при регулировании своего паруса:

а) парус должен быть настолько пузатым, чтобы рулевой был в состоянии откренивать яхту и идти с небольшим креном или вовсе без крена с наполненным парусом без заполаскивания;

б) максимум пуза должен находиться в пределах $1/3$ — $1/2$ хорды профиля паруса, считая от мачты, и быть одинаковым на всех высотах паруса;

в) парус должен быть плоским в районе задней шкаторины (начиная от максимума пуза до нуля на серпе задней шкаторины).

Аналогичные системы регулирования полноты паруса применяются в классах «Звездный», «Летучий голландец» и даже «Дракон». Можно сказать, что регулирование паруса во время гонки вначале использовалось только на небольших яхтах, но теперь к нему прибегают и на больших судах, так как при этом уменьшается риск неудачного выбора парусов.

Однако на яхтах многих классов регулировать паруса во время гонки невозможно. Тогда при сильных ветрах надо применять плоские паруса, например с пузом в $1/25$ — $1/30$, чтобы избежать взятия рифов. Здесь имеется в виду прежде всего лавировка. Команде, которая на бейдевинде несла плоские, но полноразмерные паруса, не потребуется отдавать рифы на полных курсах. Это особенно важно на довольно коротких гоночных дистанциях, где любая потеря времени сильно отражается на результатах.

Если ветер настолько силен, что даже самые плоские паруса вызывают чрезмерный крен, надо брать столько рифов, чтобы потом идти с нормально выбранными шкотами без заполаскивания паруса. Умелое рифление может избавить рулевого от необходимости резкого приведения на порывах: при таком маневре яхта теряет скорость, сильно дрейфует и только получается ложное впечатление, как будто бы курс стал острее.

Предпосылки, которыми следует руководствоваться при выборе плоского или полного паруса, а также в вопросах взятия рифов, будут различными для каждого типа яхты и даже для каждой отдельной команды. Яхта

с хорошей остойчивостью или неперегруженная парусами может идти под полными парусами, тогда как на менее остойчивую или перегруженную парусами яхту нужно ставить плоские паруса или брать рифы. Не следует забывать и о весе команды: более тяжелая по весу команда может использовать более полные паруса.

Также внимательно надо подходить и к вопросам рифления. Следует учитывать физические данные команды и запас парусов. Многие рулевые решают этот вопрос достаточно примитивно: они всегда берут на один риф меньше, чем их конкуренты, полагая, что они перехитрили своего противника. Очевидно, так делать нельзя хотя бы потому, что у противника могут быть совсем иные по своей аэродинамической характеристике паруса.

Надо считаться с тем, что зарифленный парус, вероятно, не будет так же хорошо стоять, как до рифления. Даже без рифов парус хорошо стоит только в небольшом интервале курсов яхты и в определенных границах силы ветра. Под понятием «хорошо стоять» понимается парус, стоящий без скручивания или с минимальным скручиванием, когда пузо на всех уровнях паруса сохраняется одинаковым. Более подробно к этим вопросам вернемся в следующих разделах книги.

в) Влияние положения максимальной полноты (пуза) паруса

Среди яхтсменов прочно установился взгляд, что положение максимального пуза должно быть на расстоянии $1/3$ профиля паруса, считая от мачты. В специальной литературе часто встречается это же правило расположения максимального пуза на парусе. Некоторые полагают, что именно такой профиль паруса дает наилучшие с точки зрения аэродинамики результаты, пытаются обосновать это правило ссылками на форму крыльев птиц, самолетов и т. п.

Исследованиями установлено, что этот традиционный взгляд может быть обоснованным только в некоторых случаях, а вообще нуждается в коррективах.

На рис. 68 даны результаты измерений на трех моделях, имевших одинаковую полноту — $\frac{1}{13,5}$, но с размещением максимума пуза на различном расстоянии от передней шкаторины паруса. У паруса I максимальное

пузо находится на середине профиля паруса, у паруса II — на $1/3$ и у паруса III — на расстоянии $2/3$ ширины профиля от мачты.

Разница между величиной аэродинамической силы, образуемой этими парусами, очень небольшая и для

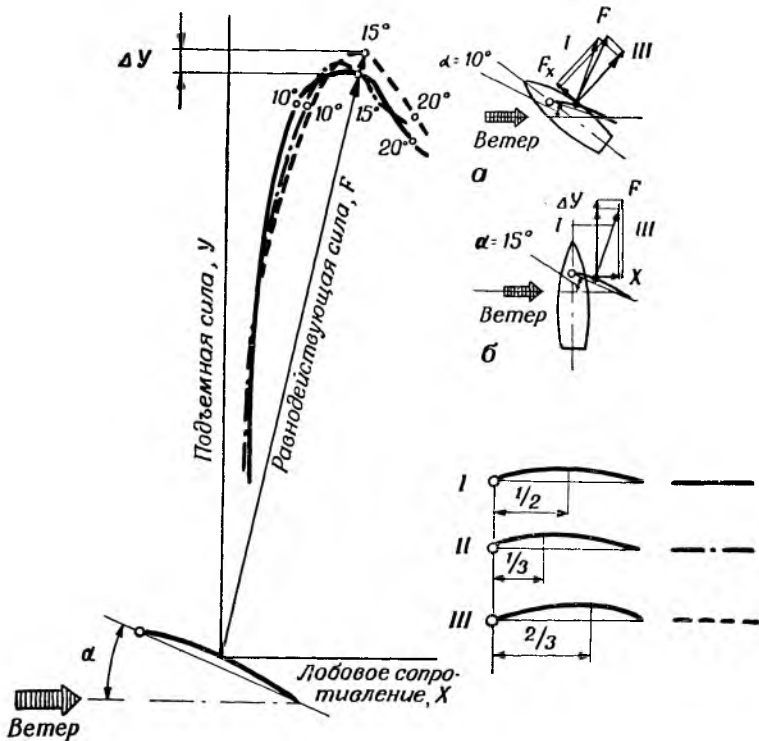


Рис. 68

крайних случаев между парусом II и III не превышает $\Delta Y = 4\%$. Тем не менее эти паруса сильно отличаются друг от друга, и достоинства их будут зависеть от курса яхты.

В лавировку (см. рис. 68, а) самым выгодным будет форма паруса I — с положением максимума пуза в середине ширины паруса. На этом парусе можно держать курс примерно на 2° острее. Сказанное относится к слабым и умеренным ветрам.

Для сильного ветра несколько лучшим может оказаться парус II с расположением максимума пуза на $\frac{1}{3}$ ширины паруса, считая от мачты. Для более полных курсов, например острый бакштаг или галфвинд (рис. 68, б), более пригоден будет парус III, аэродинамическая сила которого примерно на 4% больше, чем у паруса I. Все сказанное подтверждается старой практикой на швертботе «Олимпик-36».

При переходе к полным курсам рулевой подбирал булинь, чтобы несколько переместить пузо паруса назад. При необходимости выбора между этими тремя парусами — I, II и III, — несомненно, лучшим был бы парус с расположением максимума полноты в границах $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ профиля паруса (при этом парус должен становиться плоским, подходя к задней шкаторине).

Необходимо подчеркнуть, что все это касается только паруса, работающего в одиночку, как, например, на яхте класса «Финн», или вообще передних парусов. Когда совместно работают два или больше парусов, например грот и генуэзский стаксель, условия работы грота несколько меняются. Более подробно условия одновременной работы нескольких парусов будут рассмотрены в специальном разделе «Взаимодействие парусов».

Независимо ни от чего полнота профиля — величина пуза паруса имеет большее влияние на ходовые качества яхты, нежели его положение на парусе. Меняя величину пуза, можно добиться увеличения аэродинамической силы паруса на десятки процентов, а изменение местоположения максимального пуза по профилю паруса может изменить величину аэродинамической силы только на несколько процентов. Но и этими несколькими процентами нельзя пренебрегать в соревновании с сильным и ровным составом участников.

Определенное влияние на аэродинамику паруса оказывает гибкость гика. Применяя гибкий, эластичный гик, можно изменять профиль в нижних частях паруса. На прямом жестком гике нижняя шкаторина паруса постепенно теряет кривизну и парус внизу становится плоским, что ухудшает его работу.

Исследования профессора Юнкерса, проводившиеся в Институте аэродинамики, подтвердили, что парус с эластичным гиком, гибкость которого соответствовала кривизне нижней шкаторины, давал силу тяги на 8%

больше паруса, поставленного с прямым жестким гиком. Наибольшая выгода была получена на курсах, близких к полветру, а на более острых, как и на более полных, выгода такого гика уменьшалась.

Эластичность гика должна быть такой, чтобы он гнулся соответственно пузатости паруса. Это требование довольно трудно соблюсти на практике. Характер изгиба гика зависит от способа крепления шкотов. Когда шкоты крепятся ближе к ноку, изгиб гика может скорее всего отвечать характеру пузатости паруса. Переносом точки крепления шкотов в сторону мачты можно уменьшить величину изгиба. В некоторых случаях при сильных ветрах нок гика может даже загигаться под ветер, причем профиль нижней части паруса может напоминать растянутую букву *S*. Парус при этом становится более плоским, что желательно при сильных порывах ветра.

Большие возможности использования всех качеств как гибкого, так и жесткого гика имеет форма гика, получившего название «парк-авеню». Гик такой формы впервые был использован на яхте «Энтерпрайз» в гонках на Кубок Америки. Нижняя шкаторина паруса перемещалась по ползункам поперек очень широкого гика, позволяя тем самым держать желательную полноту паруса. По-другому этот вопрос решен в вооружении Люндстрема (см. рис. 39). Здесь нижняя шкаторина крепится только в галсовом и шкотовом углах и ее натяжение может регулироваться, а следовательно, устанавливаться желательная полнота профиля паруса.

10. Плавание на полных курсах

В районе курсов между бейдевиндом и острым бакштагом рулевой может свободно выбирать угол установки грота относительно ветра. При более полном курсе, чем бакштаг, при котором угол между курсом и вымпельным ветром $\beta = 90^\circ + \alpha_m$ (где α_m — угол атаки, при котором получается наибольшая аэродинамическая сила), гик почти доходит до вант и рулевой не имеет возможности влиять на работу паруса посредством регулирования угла атаки. Тогда первостепенное значение приобретает взаимодействие грота с передними парусами, и в особенности работа спинакера.

До рассмотрения вопросов взаимодействия нескольких парусов проанализируем работу грота на полных курсах. На рис. 69 можно наблюдать, что та большая разница, которая существует в аэродинамике между моделями парусов с полнотой 1/7 и 1/20 на курсах, близких к галфвинду, начинает быстро уменьшаться при переходе на более полные курсы. Эту разницу можно под-

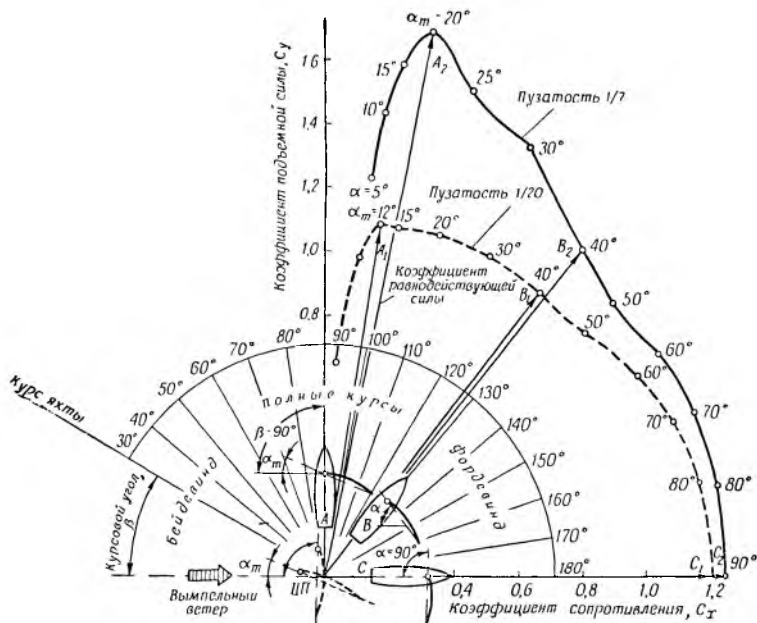


Рис. 69

считать, сравнив коэффициенты равнодействующей силы C на курсах $\beta = 90^\circ, 130^\circ$ и 180° , что на рис. 69 соответствует точкам A_1, A_2, B_1, B_2 и C_1, C_2 . На курсе галфвинд ($\beta = 90^\circ$) эта разница составляет 50% силы тяги, на курсе бакштаг ($\beta = 130^\circ$) — около 17% и на курсе фордевинд — всего только около 3%.

Отсюда можно сделать вывод, что на курсе фордевинд величина площади паруса важнее его формы (полноты профиля или пуза). Незначительное влияние пузатости паруса на курсе фордевинд является причиной редкой смены положений яхт на этом курсе в гонках.

Следовательно, на курсе фордевинд значительно слабее будут проявляться недостатки в покрое и форме паруса.

Сглаживание разницы в аэродинамике разных парусов на фордевинде объясняется тем, что независимо от формы паруса (его пузатости и т. п.) с увеличением угла атаки обтекание становится завихренным на его подветренной стороне.

На курсе фордевинд скорость вымпельного ветра, очевидно, наименьшая. Возникающие на парусе силы на-

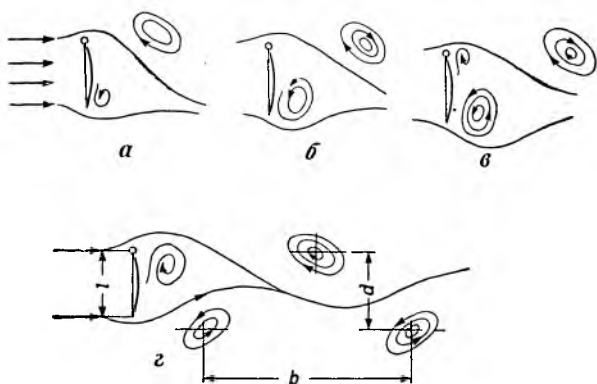


Рис. 70

правлены вдоль оси яхты, т. е. в плоскости ее наибольшей остойчивости. Казалось бы, можно сделать вывод, что управление яхтой на фордевинде не должно быть трудным. В действительности курс фордевинд не является легким, особенно для рулевых маленьких яхт, как, например, «Финн». Неприятности доставляет сильное раскачивание яхты с борта на борт, которое может стать настолько сильным, что вызовет опрокидывание яхты.

Почему происходит такое раскачивание? Посмотрим, в чем тут дело на примере яхты класса «Финн», у которой раскачивание особенно заметно. Причины надо искать в области аэродинамических и гидродинамических явлений, возникающих на парусе и на корпусе. Рассмотрим эти явления по порядку.

Вихревое обтекание паруса, возникающее, когда угол его установки относительно ветра близок к 90° , происходит не хаотично, как на первый взгляд кажется, а по

некому определенному порядку. На подветренной стороне паруса возникают так называемые вихри Кармана, попеременно в районе мачты и в районе задней шкаторины паруса. Экспериментальным путем установлено, что расстояние между центрами соседних вихрей $d = 1,5l$, где l — средняя ширина паруса. Промежуток между вихрями, возникающими на одной и той же стороне паруса, $b = 3,5d$. Образование и расположение вихрей показано графически на рис. 70.

В результате периодического отрыва вихрей Кармана от поверхности паруса изменяется расположение давле-

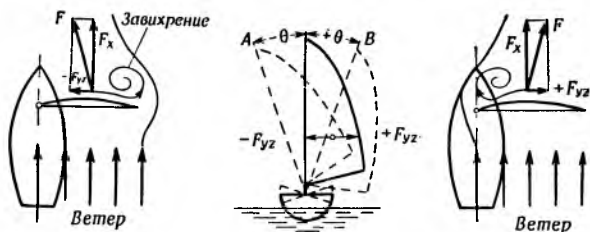


Рис. 71

ний на его подветренной стороне, а также величина и положение аэродинамических сил. Результирующая сила изменяется по величине и направлению согласно ритму возникновения и отрыва вихрей.

Принимая во внимание направление действия результирующей силы F (рис. 71), разложим ее на две составляющих — F_x и F_{yz} . Нетрудно заметить, что направление действия кренящей силы F_{yz} изменяется поочередно то вправо, то влево. В результате начинается поперечная качка яхты, которая может быть усилена одновременно действующими гидродинамическими силами. В случае их совпадения могут наблюдаться явления резонанса, особенно опасные при неумелых действиях рулевого (см. рис. 71).

Описанное явление можно назвать самовозбужденным раскачиванием яхты, а период времени T_0 , в котором оно происходит, — периодом таких раскачиваний.

С этим явлением приходится часто встречаться на практике, когда на курсе фордевинд яхта плывет с ритмичной боковой качкой с размахом мачты в границах

углов крена от $-\Theta$ до $+\Theta$. Плавание безопасно, если угол крена Θ будет меньше критического угла крена, зависящего от остойчивости яхты.

Ритмичные изменения аэродинамических сил можно наблюдать на практике еще в одном случае: когда на яхте поставлен спинакер с потравленными шкотами без спинакер-гика. Тогда спинакер будет периодически переходить с правого на левый борт и обратно, вызывая ритмичное раскачивание яхты.

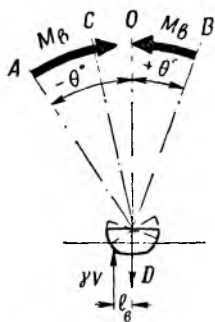


Рис. 72

На сильном ветре можно наблюдать аналогичные ритмичные раскачивания полотняных транспарантов, висящих поперек улицы.

Таким образом, одной из причин, вызывающих поперечные раскачивания яхты, являются периодические изменения аэродинамических сил.

Представим себе (рис. 72), что яхта, находящаяся на спокойной воде, выведена из равновесия внешней силой так, что ее мачта отклонилась от вертикального положения на угол $-\Theta$, после чего действие силы прекратилось.

Тогда под действием пары сил γV и D возникнет некоторый восстанавливающий момент $M_{\text{в}}$, который будет стремиться вернуть яхту в вертикальное положение. Мачта начнет двигаться в направлении от A до начального положения в точке O . Но в точке O движение не прекратится, и мачта по инерции отклонится до положения B . Угол $+\Theta$ наклона мачты вправо меньше угла $-\Theta$ вследствие тормозящего действия воды. В положении B возникнет восстанавливающий момент с обратным знаком, и под его действием мачта отклонится влево до положения C .

После нескольких колебаний с затухающими размахами мачта придет в положение O , т. е. в состояние равновесия.

Теоретическими положениями и практическими опытами установлено, что любой плавающий корабль обладает собственным постоянным периодом времени T_0 , в течение которого происходит его полное колебание. В нашем примере под полным колебанием подразумевается время, прошедшее между двумя максимальными отклонениями мачты в одну и другую стороны. Отклонения по

своему размаху могут быть большими или меньшими, но их время для данной яхты всегда остается постоянным и называется периодом свободных бортовых колебаний яхты.

Явления постепенного затухания свободных колебаний яхты графически изображены на рис. 73. Не трудно заметить, что, несмотря на постепенное уменьшение амплитуды, т. е. наибольшего угла наклона и размаха мачты, период полного колебания по времени не изменяется.

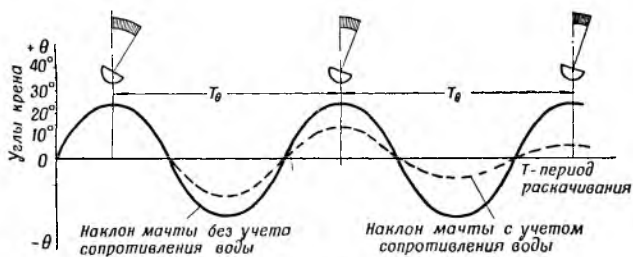


Рис. 73

Угловая же скорость, с которой мачта раскачивается с борта на борт, изменяется — она постепенно затухает.

Период свободных бортовых раскачиваний яхты зависит от двух факторов: поперечной остойчивости яхты и момента инерции веса, на величину которого влияет расположение в корпусе подвижного балласта. Чем больше момент инерции, тем больше и период свободных колебаний T_θ . Меняя положение команды, опуская или поднимая тяжелый шверт, рулевой может несколько изменять величину момента инерции своей яхты, и эти возможности увеличиваются с увеличением отношения веса передвижного балласта (включая вес команды) к весу самой яхты.

Не вдаваясь в подробное рассмотрение этого вопроса, скажем только, что период собственных колебаний яхты тем больше, чем дальше от ее центра тяжести находится подвижной балласт, чем ниже опущен шверт и перо руля и чем ближе к борту и выше над центром тяжести расположен рулевой. Период колебаний будет тем меньше, чем ближе к центру тяжести будут сосредоточены массы подвижного балласта. Кроме того, чем шире

действительная ватерлиния и чем ниже опущены шверт и перо руля, тем сильнее будет сопротивление воды, и поэтому колебания будут затухать быстрее. Форма ватерлинии зависит от дифферентовки яхты, т. е. от размещения балласта по длине яхты.

При дифференте на нос ширина ватерлинии уменьшается, одновременно уменьшается и поперечная остойчивость яхты. При дифференте на корму ширина ватерлинии и остойчивость увеличиваются. Все высказанные соображения особенно убедительны для рулевых яхты класса «Финн», испытавших на практике, как мала остойчивость этих яхт и как легко они опрокидываются, если они имеют дифферент на нос.

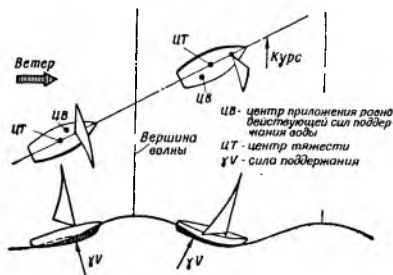


Рис. 74

Другой вид бортовой качки — раскачивание корпуса при плавании на волнении — можно назвать вынужденным. При прохождении яхты через волну изменяются силы давления воды на корпус, т. е. происходит смещение линий действия сил гидростатического и гидродинамического давлений относительно центра тяжести яхты (рис. 74). В результате появляются переменные моменты, вызывающие новый род боковых колебаний яхты. Период этих вызванных волнением колебаний, очевидно, будет зависеть от длины волны и отношения скорости яхты к скорости волны.

В механике существует закон резонанса, согласно которому если период колебаний тела, вызванных внешними силами, окажется одинаковым с периодом собственных колебаний данного тела, то они накладываются друг на друга и амплитуда суммарных колебаний возрастает.

Обратимся к примеру с яхтой класса «Финн». Теперь мы можем сказать, что опасные раскачивания вплоть до опрокидывания могут возникнуть, когда период колебаний T_1 , вызванных изменениями аэродинамических сил или внешних сил, рожденных волнением, будет одинаковым или близким к периоду свободных,

собственных колебаний T_0 самой яхты*. Практически колебания яхты становятся все сильнее, и, когда будет пройден безопасный угол поперечной остойчивости Θ , яхта перевернется. Если периоды колебаний разного рода близки друг к другу и фазы этих колебаний совпадают, они вступают во взаимодействие, что приводит к максимальному усилению качки. Качка будет уменьшаться, если колебания разного рода не будут совпадать по фазе.

Это можно наблюдать на практике: яхта идет фордевиндом с постепенно возрастающим раскачиванием, которое вдруг неожиданно успокаивается. Через некоторое время весь цикл повторяется снова. Здесь мы имеем дело с периодическим совпадением и несовпадением фаз различных колебаний яхты**.

Многие рулевые на яхтах класса «Финн» ошибочно полагают, что с опасным раскачиванием яхты можно бороться с помощью потравливания шкотов.

Они считают, что, «выпуская ветер из паруса», можно заметно уменьшить действующие на парус силы. Такой маневр скорее всего может закончиться вынужденным купанием. Что же происходит при потравливании шкотов на курсе фордевинд? Равнодействующая сила F , возникающая на парусе, может даже возрасти, но, что важнее всего, действуя вдоль оси корпуса яхты (рис. 75), эта сила обычно меняет направление своего действия. Раскладывая равнодействующую силу F на две силы — F_x и F_{yz} — убедимся, что сила крена F_{yz} усиливает крен яхты на наветренный борт, на котором обычно находится и рулевой.

Яхтсмены редко имеют дело с опрокидыванием на ветер — это непривычно, и потому естественно удивление рулевого, не предполагавшего такого оборота событий.

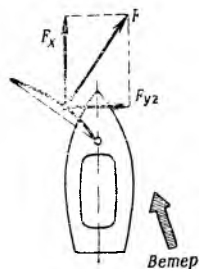


Рис. 75

* Период зависит и от курса яхты относительно направления движения волн (прим. ред.).

** Такого рода колебания, называемые «биениями», появляются при близком значении периодов возмущающей силы и собственных колебаний яхты, а также при относительно регулярном действии возмущающих сил (прим. ред.).

Во время шквала рулевой иногда теряет и инстинктивно травит шкоты, что может привести к опрокидыванию. «Финн» может опрокинуться и тогда, когда рулевой не травил шкотов, но прозевал опасное увеличение угла раскачивания яхты, который перешел безопасные пределы.

Какие же существуют предохранительные меры против опрокидывания? Вспомним, что раскачивание яхты может стать опасным, когда период колебаний, возбужденных аэродинамическими силами или волнением моря, станет равным или близким к периоду свободных колебаний яхты и если при этом совпадают фазы разного рода колебаний. Действия рулевого должны быть такими, чтобы препятствовать сложению колебаний с подобными периодами. Этого можно достичь:

а) изменением периода аэродинамических реакций на парусе;

б) изменением периода свободных колебаний самой яхты;

в) противодействием резонансным колебаниям, соответствующим размещением балласта.

Первый способ основан на выборе шкотов или переходе с курса фордевинд на полный бакштаг. При этом благодаря изменению угла установки паруса относительно вымпельного ветра мы влияем на ритм образования и отрыва вихрей на подветренной стороне паруса. При этом угол установки паруса относительно диаметральной плоскости яхты не должен быть меньше 70° . По мере приближения к курсу фордевинд раскачивание яхты, вызванное аэродинамическими силами, увеличивается, так как увеличивается расстояние между противоположными вихрями, что, в свою очередь, вызывает увеличение разницы аэродинамических сил.

На бакштаге раскачивание яхты заметно уменьшается, так как отрыв вихрей Кармана происходит не столь резко, а обтекание подветренной стороны паруса становится более беспорядочным, чем на курсе фордевинд. Иногда как последнюю меру спасения можно рекомендовать резкое, мгновенное выбирание шкотов, когда начинается крен на наветренную сторону. При таком маневре радикально меняется ритм аэродинамических реакций на парусе и раскачивание яхты постепенно затухает. При свободных колебаниях яхты задача рулевого заклю-

чается в том, чтобы, смотря по обстоятельствам, постараться или увеличить, или уменьшить период этих колебаний.

Допустим, что период свободных колебаний яхты T_0 несколько больше периода колебаний, вызванных волнением. Тогда желательно еще увеличить период собственных колебаний T_0 , чтобы увеличить разницу между ними. Это можно сделать, опустив до предела шверт и перо руля. Сам же рулевой должен управлять яхтой, стоя как можно ближе к корме. Лучшая позиция для него — стоять над румпелем, упираясь ступнями ног в корпус яхты в районе ватервейса. Дифферент на корму увеличивает ширину ватерлинии, отчего усиливается успокаивающее действие воды на раскачивание яхты. Этому помогают глубоко вытравленные шверт и перо руля.

Огромное значение для борьбы с раскачиванием яхты класса «Финн» имеет техника откренивания. Она основана на правильном перемещении рулевого с борта на борт для противодействия нарастающему раскачиванию. Рулевой должен перемещаться таким образом, чтобы вызывать раскачивание яхты, равное половине фазы раскачивания мачты. При этом необходимо учитывать некоторую инерцию в движениях яхты.

На согласование действий рулевого с поведением яхты надо обращать особое внимание еще и потому, что рулевой почти всегда находится в сильном нервном напряжении, а ошибки, которые он может допустить в откренивании, принесут вред, так как увеличат и без того сильное раскачивание яхты.

Рулевой должен знать, что использовать руль на курсе фордевинд так, как им пользуются на лавировке, нельзя. На лавировке, когда яхту приводит, а мачта наклонена под ветер, рулевой, чтобы удержать яхту от приведения, кладет руль под ветер, выбирая румпель на ветер. Теперь, если на курсе фордевинд рулевой будет инстинктивно делать то же самое, возникающие на руле гидродинамические силы только увеличат амплитуду раскачивания яхты (рис. 76). В этих случаях необходимо сознательно контролировать свои действия на руле. В таких условиях можно рекомендовать следующее: по возможности меньше пользоваться рулем для того, чтобы удерживать яхту на идеальном курсе фордевинд; яхта должна чуть приводиться при наклоне мачты на подвет-

ренную сторону и, наоборот, рулевой должен позволить яхте уваливаться, когда мачта кренится на ветер.

Боковое раскачивание яхты на курсе фордевинд знакомо каждому яхтсмену. Для яхт многих классов оно не угрожает опрокидыванием, как это случается в классе



Рис. 76

«Финн», но тем не менее бортовая качка всегда нежелательна, так как нервирует команду и снижает скорость хода яхты.

11. Форма паруса

На ранней стадии развития парусных гонок усилия конструкторов шли в направлении оснащения яхты максимальной парусностью. Считалось, что скорость яхты находится в прямой зависимости от площади парусов и пропорциональна этой площади.

Из соображений остойчивости применялись паруса низкие и широкие. Для размещения таких парусов яхты строили длинными. На длинных бушпритах ставилось несколько передних парусов широких и коротких, т. е. с малым удлинением. Например, в 1870—1880 годах в американских водах плавали яхты с длиной корпуса 8,8 м, причем расстояние от нока бушприта до нока гика у этих яхт было равно 21,5 м.

В результате достигнутых успехов в науке (например, опубликование аэродинамических исследований Эйфеля в 1910 году) основное внимание конструкторов было направлено на форму и взаимодействие парусов. Дальнейший прогресс парусного вооружения яхт пошел в направлении усовершенствования формы парусов, получения наибольшей силы тяги без увеличения площади паруса

с одновременным уменьшением угла между курсом яхты и направлением ветра.

Эти задачи удалось решить путем:

- 1) увеличения удлинения паруса,
- 2) снижения вредного влияния мачты,
- 3) улучшения взаимодействия парусов,
- 4) применения специальных парусов, используемых на определенных курсах, — спинакера, генуи и т. п.

Исследования, проведенные с моделями парусов, показали большое влияние формы поверхности паруса и его удлинения на характер аэродинамических сил. На рис. 77 даны поляры аэродинамических коэффициентов для четырех моделей парусов, без мачт, с одинаковой величиной пуза $= \frac{1}{13,5}$ (7,4%), но с разным удлинением $\lambda_a = 6,3, 1$ и $\frac{1}{3}$. Сравнивая аэродинамические характери-

стики этих парусов, можно отметить, что при малых углах атаки, например $\alpha = 10^\circ$, наибольшую по величине и выгодную по направлению аэродинамическую силу дает парус с наибольшим удлинением. Сравнивая величины коэффициентов и соответственно направление векторов аэродинамических сил, указанных для $\alpha = 10^\circ$, не трудно увидеть, что наилучшим лавировочным парусом будет парус, имеющий удлинение $\lambda_a = 6$. Угол ϵ_a для этого паруса будет наименьшим.

Такие свойства высокого бермудского вооружения не являются неожиданными. Этот вопрос уже затрагивался при рассмотрении значения индуктивного сопротивления.

Рассмотрим теперь некоторые другие характерные отличия между моделями. Определяя углы атаки, при которых величина аэродинамической силы или коэффициента C достигает максимума, заметим, что для модели с удлинением $\lambda_a = 6$ максимум силы получается при угле несколько менее 15° . Для паруса с удлинением $\lambda_a = 3$ этот угол будет равен примерно 25° , для паруса с удлинением $\lambda_a = 1$ угол α равен примерно 38° , для $\lambda_a = \frac{1}{3}$ — несколько более 45° .

Прежде всего можно отметить общую тенденцию: чем меньше удлинение паруса, тем больший угол атаки необходим для получения максимальной аэродинамической силы. Обратим внимание, что при больших углах атаки,

например $\alpha = 35^\circ$, величина аэродинамической силы больше у паруса с меньшим удлинением. Особенно большая аэродинамическая сила у паруса с удлинением $\lambda_a = 1$.

На рис. 77 показаны значения коэффициентов аэродинамической равнодействующей силы C для моделей с удлинением 6 и 1.

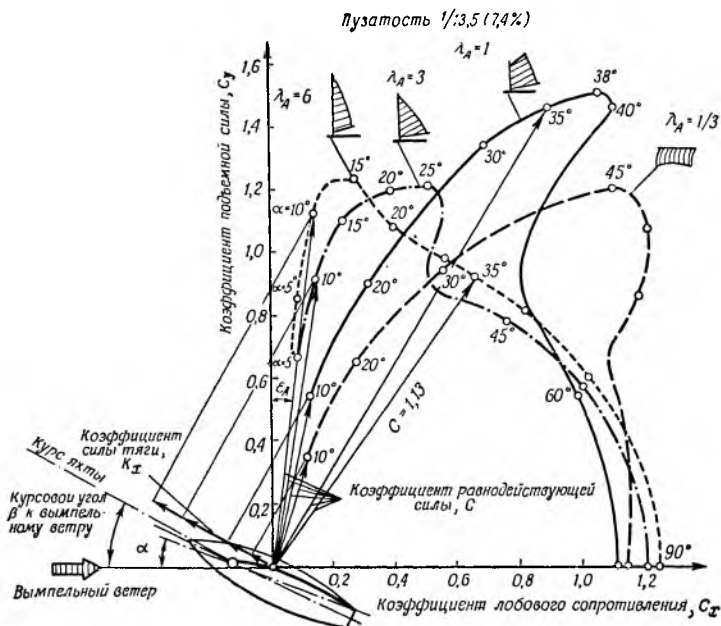


Рис. 77

Результаты исследований моделей парусов без мачт затем были подтверждены аэродинамическими испытаниями моделей жестких парусов с мачтами, проведенными в Саутгемптонском университете. На рис. 78 показаны формы парусов и приведены поляры трех испытанных моделей. Модели I, II и III имели мачты одного диаметра — 9,5 мм, а также одинаковое пузо, равное $1/25$, т. е. 4%. Максимум пуза был расположен на расстоянии 15% длины хорды профиля, считая от мачты.

Сравнивая кривые моделей I и III, можно отметить тенденцию к увеличению угла атаки α , при котором величина аэродинамической силы достигает максимума, ес-

ли удлинение паруса уменьшается, т. е. подтверждается тенденция, которую мы наблюдали при анализе рис. 77.

При сравнении поляр моделей I и II как будто бы наблюдается противоречие с только что сделанным выводом о влиянии удлинения паруса на лавировочные качества яхты. Удлинение модели II равно 6, т. е. больше, чем у модели I, однако аэродинамическая характеристика

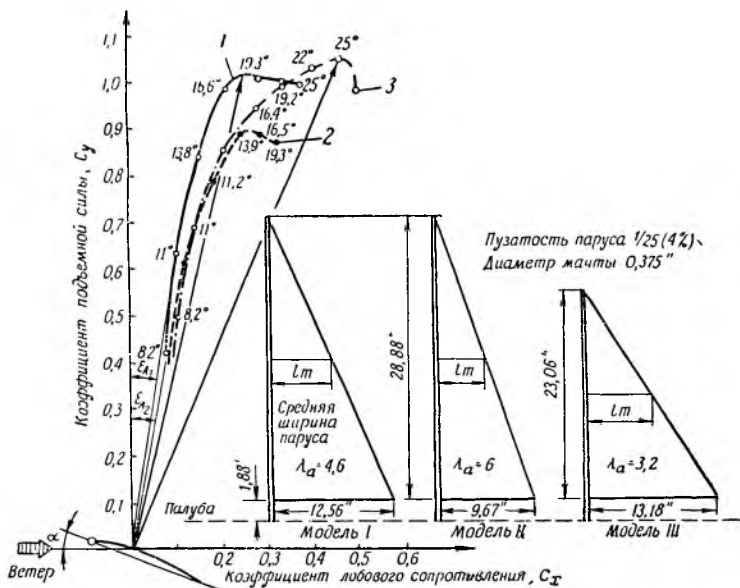


Рис. 78

модели II хуже, чем модели I. Угол ϵ_{a2} модели II больше угла ϵ_{a1} модели I. Таким образом, парус II, несмотря на большее удлинение, на лавировке будет вести себя хуже паруса соответствующего модели I. Это противоречие объясняется неблагоприятным влиянием мачты.

При большем удлинении паруса, т. е. когда отношение длины l_m хорды середины профиля паруса к диаметру мачты меньше, вредное влияние мачты будет сильнее. Завихренный поток за мачтой станет охватывать большую поверхность у модели II, чем у модели I, а следовательно, будет увеличено сопротивление X и уменьшена величина подъемной силы Y . Эти выводы подтверждают-

ся данными, о которых шла речь при рассмотрении рис. 35 и 36.

В качестве примера недооценки вредного влияния мачты можно привести эксперимент, проделанный Шерманом Хойтом на яхте класса « $R=6M$ » «Атросия». На этой яхте была значительно уменьшена площадь грота и одновременно настолько же увеличена площадь стакселя. Так как диаметр мачты оставался прежним, вредное влияние мачты стало распространяться на относительно большую поверхность грота. Вместе с тем увеличение площади стакселя не всегда приносит пользу: при относительно узком корпусе стакселя приходится работать на невыгодных углах атаки, и полного, полезного эффекта не наблюдается. К работе переднего паруса мы еще вернемся.

Влияние мачты на эффективность работы паруса все еще недооценивается, особенно конструкторами. Следует подчеркнуть, что судить о качествах паруса можно только при одновременном рассмотрении его площади, формы, полноты профиля, удлиненности, взаимодействий с другими парусами и влияния мачты при определенных углах атаки.

Теперь рассмотрим подробнее, как изменяется величина коэффициентов равнодействующей аэродинамической силы C для парусов различного удлинения. Из рис. 77 видим, что коэффициент C в случае $\lambda_a=1$ может быть больше, чем для модели паруса с большим удлинением. Например, для модели с удлинением $\lambda_a=6$ максимум C (при угле атаки около 15°) равен примерно 1,3, для модели с удлинением 1 при угле атаки 35° коэффициент C будет равен примерно 1,7. При этом же угле атаки величина коэффициента C для модели с удлинением $\lambda_a=6$ едва достигает значения 1,13.

Возникает вопрос, возможно ли эти полезные свойства парусов с небольшим удлинением использовать несмотря на то, что по своим лавировочным качествам они уступают парусам с большим удлинением? Паруса с большим удлинением не сохраняют свои полезные свойства на всех курсах, и на более полных курсах преимущества их перед парусами с меньшей удлиненностью утрачиваются.

Принимая во внимание коэффициент C для двух парусов — бермудского с удлинением 6 и гафельного с уд-

линией 1 (см. рис. 77), рассмотрим системы сил на парусах при курсе бакштаг. Допустим, что две яхты имеют одинаковую площадь парусности, но разное вооружение и идут курсом $\beta = 90^\circ + 35^\circ = 125^\circ$ относительно вымпельного ветра. Паруса растравлены до вант, и, таким образом, угол их установки относительно вымпельного ветра будет $\alpha = \text{около } 35^\circ$ (рис. 79).

Если условия плавания будут одинаковыми для обеих яхт, аэродинамические силы на их парусах — F_1, F_2 —

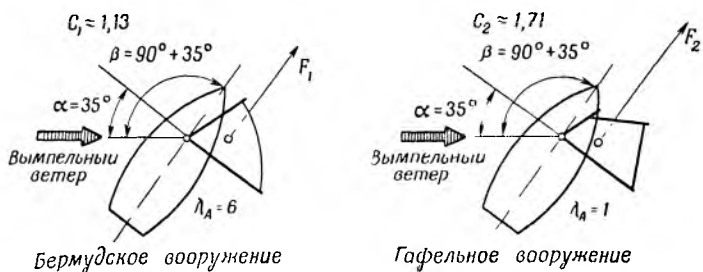


Рис. 79

будут пропорциональны соответствующим коэффициентам C_1 и C_2 . Коэффициент C_1 для бермудского паруса при угле атаки $\alpha = 35^\circ$ примерно $= 1,13$, а коэффициент C_2 для гафельного паруса будет около $1,71$. Следовательно, сила F_2 ,двигающая яхту с гафельным вооружением, будет примерно на 50% больше силы, действующей на яхту с бермудским вооружением. Поэтому яхта с гафельным вооружением на этом курсе пойдет быстрее.

Итак, можно сделать вывод, что идеального типа вооружения, одинаково пригодного для всех курсов, не существует. Этот вывод графически изображен на рис. 80. Здесь представлены величины коэффициентов силы тяги K_x для парусов различного удлинения в зависимости от курса (угол β), которым идет яхта относительно ветра.

Здесь следует отметить, что во время испытаний модели парусов не подвергались скручиванию, как это обычно бывает в натуре, и, таким образом, паруса по всей высоте работали под одним и тем же углом атаки. Практически гафельное вооружение более склонно к скручиванию в верхних частях паруса, чем бермудское. Поэтому коэффициент полезного действия гафельного воору-

жения на полных курсах, когда начинает проявляться скручивание, заметно понижается. Вследствие этого качественная разница между бермудским и гафельным парусами будет уменьшаться в пользу первого.

Паруса с большим удлинением сохраняют свои преимущества на курсах от острого до полного бейдевинда, т. е. до момента, когда курсовой угол β не превышает при-

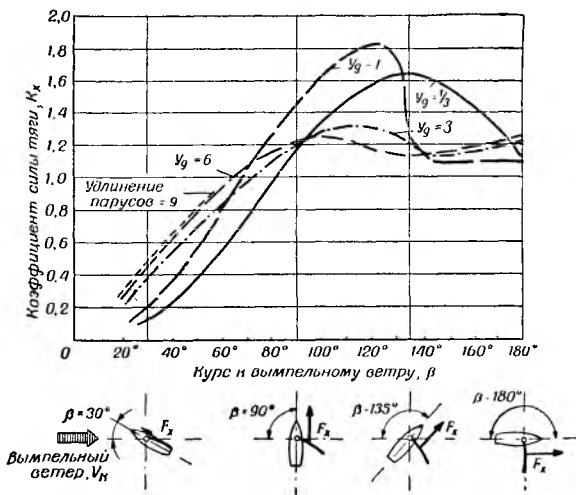


Рис. 80

мерно 70° . Если угол β больше 70° , то предпочтительнее иметь паруса с меньшим удлинением, например гафельные. В таких условиях плавания особенно эффективными могут оказаться паруса с удлинением около 1. На полных курсах от полного бакштага до фордевинда наилучшим может оказаться прямое вооружение. Этот вывод напрашивается из анализа рассмотренных ранее графиков. Здесь кроется ответ на вопрос: почему клипера с прямым вооружением не имели соперников на полных курсах, но уступали гафельным шхунам на лавировке? Причина заключалась в форме парусов и была интуитивно понята, прежде чем получила теоретическое объяснение.

Итак, прежде чем решить, какое вооружение предпочтительнее, надо принять во внимание курс плавания.

Очевидно, что в гонках по дистанции, имеющей форму треугольника с большим удельным весом лавировки, паруса с большим удлинением будут наиболее выгодными. В крейсерских гонках, проходящих на более полных курсах, могут стать более выгодными паруса с меньшим удлинением, например гафельное вооружение.

Всегда надо помнить, что для достижения наивысшей скорости на яхте, плывущей курсом, позволяющим изменять угол атаки, следует учитывать тот характерный угол атаки, именно для данного паруса, при котором образуется самая эффективная аэродинамическая сила. Этот оптимальный угол будет несколько больше для гафельных парусов, чем для бермудских. Широко известно правило установки паруса таким образом, чтобы он был на грани запласкивания. Несмотря на широкую популярность, этот практический рецепт не является обоснованным. Ко многим факторам, которые надо учитывать при нахождении оптимального угла установки паруса (полнота пуза, курс плавания относительно ветра, сила ветра и т. п.), надо добавить еще один, новый, фактор — удлинение паруса.

12. Взаимодействие парусов

Возможно наиболее спорным теоретическим вопросом в области взаимодействия парусов является совместная работа грота с передними парусами. Об этом можно судить по высказываниям не только самих гонщиков, конструкторов яхт и парусных мастеров, но и ознакомившись с классификационными правилами *RORC*, *CR*, *CCA* и др., в которых в той или иной форме этот вопрос находит отражение.

Существующие на этот вопрос взгляды можно разделить на две основные группы. Приверженцы теории Вентури, перенесенной в парусный спорт из авиации, основным назначением переднего паруса считают повышение скорости воздушного потока, обдувающего подветренную сторону грота, особенно в районе, где паруса перекрывают друг друга (например, сочетание генуи и грота). При этом увеличивается разрежение на подветренной стороне грота и заметно улучшаются его аэродинамические качества.

Сторонники других взглядов считают, что на работу грота передние паруса в сущности не влияют. Передний парус — стаксель или гюеня — отлично работает как самостоятельно, так и в комплексе парусов, поставленных на яхте. В отличие от грота эти паруса гораздо лучше обтекаются воздухом, так как мачта не портит потока, и потому коэффициент полезного действия передних парусов выше, чем у грота. Сторонники той и другой теории приводят различные примеры в доказательство своей

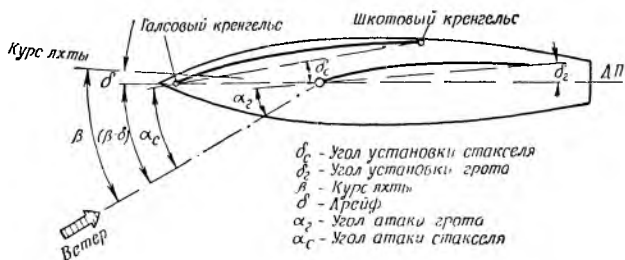


Рис. 81

правоты и одновременно дают советы по размещению на палубе кип шкотов передних парусов. Эти советы можно встретить во многих печатных изданиях, но они часто противоречат друг другу.

Достаточно вспомнить, что рекомендуемый различными авторами угол установки стакселя δ_c (рис. 81) относительно диаметральной плоскости корпуса изменяется от 7° до 20° . Вероятно, приверженцы теории Вентури будут стараться улучшить действие сопла и больше выбирать шкоты. Кто же прав?

Как это обычно бывает в принципиальных спорах, частично правы обе стороны. Несомненно, стаксель может быть весьма совершенным парусом. Что это именно так, подтверждают испытания, проведенные Варнером и Обером на яхте «Папуас». Несомненно и то, что, взаимодействуя с гротом, стаксель улучшает условия обтекания его подветренной стороны. Проблема состоит именно в том, чтобы на определенных курсах относительно вымпельного ветра добиться условий, при которых стаксель работал бы наиболее эффективно сам по себе и во взаимодействии с гротом.

Создание таких условий — весьма трудное дело, а в некоторых классах яхт и просто недостижимое. Традиционные взгляды, имеющие еще большое влияние при составлении формул классов, правил обмера, и незнание основ аэродинамики работы паруса тормозят отыскание наиболее совершенных форм паруса.

а) Влияние переднего паруса на грот

Взаимодействие грота с передним парусом рассмотрим на примере самого популярного вооружения — бермудского шлюпа с далеко заходящей за грот генуей (рис. 82). На рисунке частично даны результаты наблюдения за потоком на подветренной стороне модели паруса в аэродинамической трубе Саутгемптонского университета.

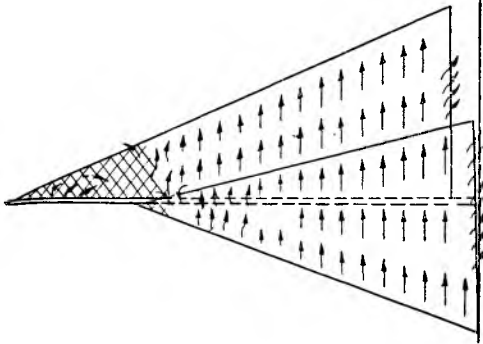
Геометрия взаимного расположения парусов показана на рис. 81. Угол установки стакселя δ_c был равен 10° , а угол установки грота $\delta_z = 5^\circ$. Полнота пуза обоих парусов была одинаковой — примерно $1/25$, или 4% . Скручивание парусов было минимальным, так что можно считать, что по всей высоте паруса углы установки стакселя δ_c и грота δ_z были одинаковыми.

На рис. 82 (*а, б, в, г*) показан характер обтекания парусов при разных углах ($\beta - \delta$), заключенных между направлением вымпельного ветра и диаметральной плоскостью корпуса. При уваливании на больший угол ($\beta - \delta$) углы атаки α_c и α_z изменялись, но взаимное положение парусов сохранялось, так как это обычно бывает на практике в лавировку при выбранных шкотах. Характер обтекания парусов, показанный на рис. 82, более подробно рассматривается на рис. 83.

Поток типа *а* возникает, когда частицы воздуха движутся на определенной площади паруса равномерно в одном направлении.

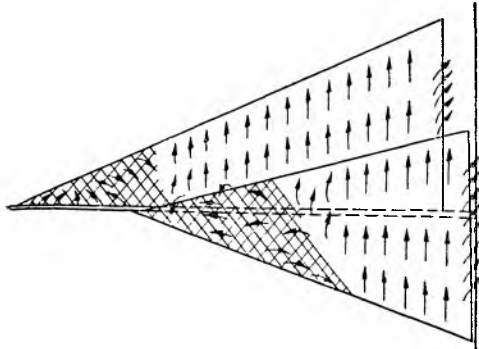
Обтекание типа *б* отличается от первого возникновением случайных местных отклонений от направления основного потока.

Завихренный поток *в* образуется, когда частицы воздуха начинают отрываться от поверхности ткани и не обтекают профиль паруса (на больших углах атаки). Все эти типы потоков (*а, б, в*) можно наблюдать невооруженным глазом на реке. Первый тип потока *а* возникает



$(\beta - \delta) = 20^\circ$
 $\alpha_c = 10^\circ$
 $\alpha_2 = 15^\circ$

a



$(\beta - \delta) = 25^\circ$
 $\alpha_c = 15^\circ$
 $\alpha_2 = 20^\circ$

b



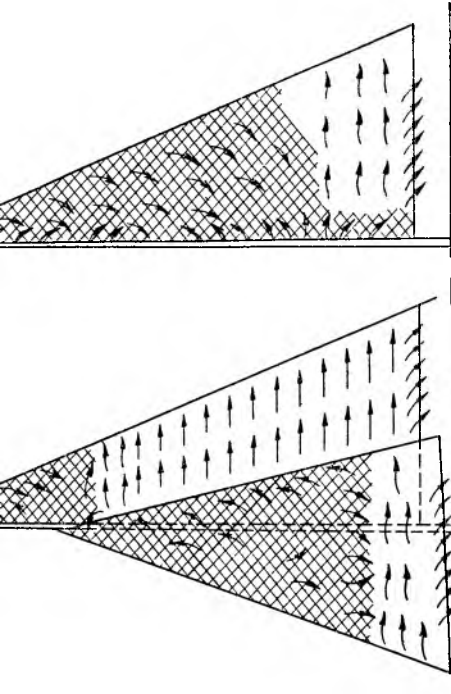


Рис. 82

при спокойном, свободном течении глубокой реки, тип *б* — при быстром и более мелком течении, а тип *в* — после преград, за которыми появляются местные завихрения с направлением струй, обратных главному потоку.

На рис. 82 видно, что обязательным условием для хорошей работы паруса является его обтекание потоком типа *а*. На малых курсовых углах, когда $\beta = \delta = 20^\circ$, обтекание по типу потока *а* распространяется на большую часть поверхности обоих парусов. Только в районе фаловой дощечки стакселя и на гроте выше точки крепления стаксельштага возникает завихренный поток типа *б* или *в*. Если увеличить курсовой угол до 25° (рис. 82, *б*), область завихренного обтекания на гроте будет расти, опускаясь по парусу. Верхние части паруса, где отношение диаметра мачты к длине хорды профиля наибольшее, практически не работают, поскольку они

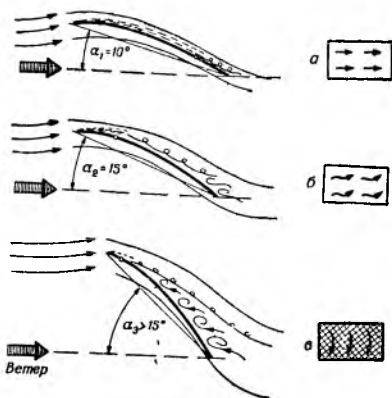


Рис. 83

находятся в области аэродинамической тени от мачты, вызывающей завихрения. Влияние генуи на верхнюю часть грота очень незначительно. Большая часть поверхности самого стакселя также захвачена завихренным потоком, а при дальнейшем увеличении курсового угла $\beta - \delta$ до 30° область завихрений доходит почти до нижней шкаторины. Что же касается грота, то его обтекание остается почти неизменным, даже когда курсовой угол увеличивается до 40° .

На рис. 82, *г* показано обтекание одного грота без стакселя, поставленного под таким же углом, как и на рис. 82, *а*.

На рисунке отчетливо видно, в сколь значительной степени передний парус способствует сохранению устойчивого обтекания подветренной стороны грота, сохраняя обтекание по типу *а*. Стаксель вызывает определенный эффект ускорения потока в пространстве между парусами, способствуя снижению вредного действия

мачты и трения. На рис. 82, в дана типичная картина при лавировке, поскольку в средних условиях яхты обычно держатся курса $\beta-\delta$ в границах около 30° .

Заметим, что в этих условиях стаксель, предотвращая завихрения на подветренной стороне грота, сам «заболевает» этой болезнью.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: при комбинации парусов (их взаимное расположение, форма и размеры), применявшихся во время опытов и довольно часто на практике, добиться полной, идеальной работы парусного вооружения невозможно.

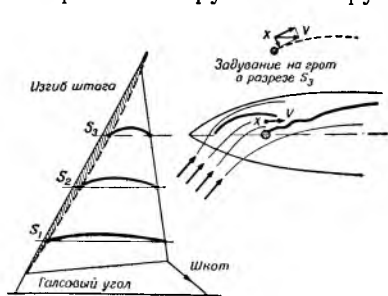


Рис. 84

Кроме того, во многих случаях стаксель из-за неправильного покрова или положения может задуть на грот, что нежелательно. Такой случай показан на рис. 84.

На основании экспериментов и практики можно утверждать, что хорошая совместная работа стакселя с гротом возможна только тогда, когда про-

ход между этими парусами будет иметь нужную форму.

Обязательное условие — направление движения частиц воздуха между парусами должно быть касательным к поверхности грота. Этого не трудно добиться, если максимально возможный угол установки стакселя δ_c будет достаточно велик. Как известно, он ограничивается шириной палубы, так как выносить килы шкотов за пределы палубы запрещено правилами.

Когда расстояние между парусами слишком мало или у стакселя очень полное пузо, вектор скорости частиц воздуха в выходном сечении прохода между парусами получает направление, перпендикулярное поверхности грота.

На рис. 84 вектор скорости V в точке X разложен на два основных направления: перпендикулярно и касательно к поверхности грота. Вредное действие перпендикулярной слагаемой, снижающей разрежение на подветренной стороне грота, больше всего проявляется непосредственно за мачтой.

Замеры расположения разрежений на подветренной стороне грота подтверждают, что за мачтой разрежение невелико. Это особенно чувствительное место на гроте, и, наблюдая за ним, рулевой получит первое предостережение о том, что яхта идет слишком остро к ветру или что шкоты слишком потравлены.

Когда разрежение в точке X уменьшится настолько, что разница давлений на обеих сторонах паруса подойдет к нулю, парус начнет заполаскивать в этом месте. Как только это случится, плавный профиль паруса деформируется. Такие выводы сделал Варнер на основании исследования давлений на поверхности паруса, которые подтверждаются на практике.

Увеличение жесткости паруса в районе передней шкаторины уменьшает склонность паруса к заполаскиванию, вследствие чего яхта может идти более круто. Поэтому паруса, имеющие сквозные латы, менее склонны к заполаскиванию и могут работать на меньших углах атаки, чем паруса с короткими латами. Уменьшая отрицательное действие задувания стакселя на грот, сквозные латы не могут полностью устранить этот вред. Естественно, что жесткость парусной ткани может до некоторого предела препятствовать деформации профиля. Надо заботиться, чтобы наилучшая форма сопла между гротом и стакселем сохранялась на всех сечениях парусов по высоте, считая от палубы. Часто бывает, что правильная форма сопла в нижней части паруса из-за увеличения пуза в верхних частях паруса вызывает задувание на среднюю часть грота. Кроме того, увеличенное пузо стакселя часто бывает результатом изгиба штага. Это особенно заметно в верхней и средней частях стакселя, где отношение стрелки изгиба штага к стрелке профиля паруса наибольшее.

Из всего сказанного выше (рис. 84) можно наметить следующие меры, уменьшающие последствия задувания на грот:

1) пользоваться более плоским стакселем и генуей совместно с более полным гротом;

2) проводить шкоты и держать их на ходу так, чтобы расстояние между поверхностями парусов в районе их перекрытия резко не изменялось. Иными словами, чтобы на этом участке парусов сечение сопла, образуемого их поверхностями, изменялось по возможности мало;

3) устранить вредное действие изгиба штага соответствующим кроем стакселя по передней шкаторине, например как показано на рис. 85. Это особенно полезно для парусов в сильный ветер, когда приходится считаться с чрезмерно большим изгибанием штага.

Содержание пунктов 1 и 2 указывает на важность не только сечения сопла, но и его формы. В связи с этим посмотрим на рис. 34. Здесь паруса поставлены так, что изменение сечения потока в пунктах $A-A$ и $B-B$ хотя и небольшое, но достаточное для благоприятного влияния на грот. В задачу стакселя входит также поддержание ламинарного обтекания подветренной стороны грота. Этого можно достичь, изменив направление потока (сравните направление векторов V_1 и V_2), или увеличив скорость потока, или обоими способами одновременно.

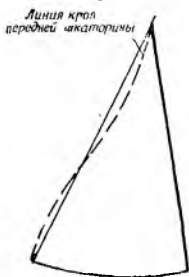


Рис. 85

Испытания (см. рис. 82), которые проводились в условиях образования между парусами сопла с малым изменением сечений, подтвердили благоприятное влияние стакселя на обтекание подветренной стороны грота.

б) Влияние угла установки переднего паруса

Проблема взаимодействия стакселя и грота может быть рассмотрена еще в одном аспекте, обосновывающем целесообразность несильного уменьшения свободного пространства между парусами в месте их перекрытия. Как уже было отмечено, хорошо работающий передний парус не только улучшает действие грота, но и отлично работает сам по себе. Производительность стакселя могла бы быть даже больше, чем грота, если бы удалось создать необходимые условия, позволяющие использовать его потенциальные возможности.

Вернемся к рис. 82, б и в. При лавировке, т. е. когда угол $\beta-\delta=25-30^\circ$, а угол атаки стакселя $\alpha_c=15-20^\circ$, стаксель, если его рассматривать отдельно от грота, производительно не работает. Препятствуя образованию завихрений на гроте, стаксель сам подвергается завихренному обтеканию. При курсе $\beta-\delta=25^\circ$ почти половина

его поверхности, а при $\beta - \delta = 30^\circ$ почти вся его поверхность обдувается завихренным потоком. Это значит, что угол атаки слишком велик и необходимо его уменьшить, или, говоря иначе, надо увеличить угол установки стакселя δ_c .

Из практики хорошо известно, что угол установки стакселя имеет огромное значение, особенно на лавировке. Можно сказать, что ничто не действует так вредно на скорость яхты в лавировку, как слишком тугое выбиравание стаксельных шкотов, подтягивающих заднюю

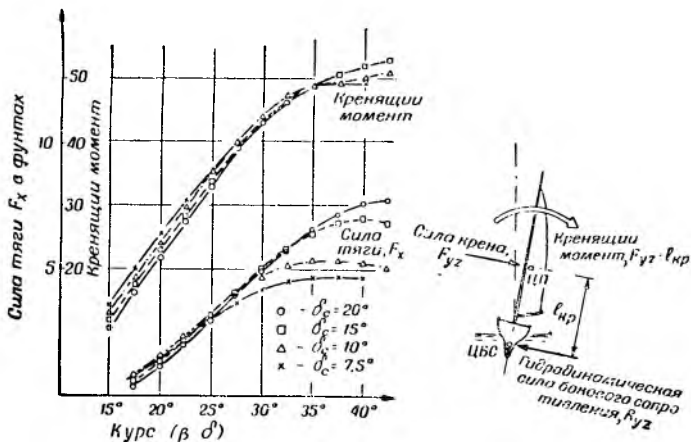


Рис. 86

шкаторину стакселя близко к гроту. Потравливание стаксельшкотов всего на несколько сантиметров или незначительное смещение кип наружу может радикально поправить ход яхты.

Эти практические выводы были подтверждены автором в результате исследований, проведенных в аэродинамической трубе Саутгемптонского университета.

Подвергнем анализу некоторые результаты измерений, проведенных на моделях в масштабе $1/3$ паруса яхты класса «Х-монотип». Из рис. 86 и 87 видно, как велико может быть влияние угла установки стакселя на полезную работу всего парусного вооружения. Измерения снимались с парусов без крена при скорости ветра

12 узлов (6,2 м/сек). За время опытов угол установки грота $\delta_2 = 5^\circ$ не менялся, а замеры велись при разных углах установки стакселя — $\delta_c = 7,5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ и 20° (сравните с рис. 15), а также при изменении курса плавания ($\beta - \delta$).

Если для примера возьмем типичный лавировочный курс $\beta - \delta = 30^\circ$, то можно легко увидеть (см. рис. 86), что при увеличении угла атаки стакселя с $7,5^\circ$ до 15° сила тяги F_x возрастет, примерно, на 20%. При этом прирост кренящего момента едва достигает 3,5%. Значение

угла установки стакселя увеличивается, когда яхта уваливается на более полный курс. Для плавания курсом $\beta - \delta = 35^\circ$ и 40° прирост силы тяги может достичь примерно 40% и 60% при условии, что имеется возможность увеличить угол установки стакселя с $7,5^\circ$ до 20° .

Из приведенных данных на рис. 87 можно сделать вывод, что существует определенный оптимальный угол установки стакселя для каждого лавировочного курса. Для типичного лавировочного курса $\beta - \delta = 25^\circ - 30^\circ$ таким оптимальным углом (по отношению к диаметральной плоскости яхты) будет угол в пределах $12 - 18^\circ$.

Из рис. 86 не трудно сделать вывод, что изменение угла установки стакселя δ_c (положение грота не изменяется) вызывает довольно большую разницу силы тяги F_x , при относительно незначительных изменениях силы крена или соответствующего ей кренящего момента.

Добавим, что курсы яхт порядка $\beta - \delta = 22 - 25^\circ$ по отношению к вымпельному ветру достигаются только на самых быстрых гоночных яхтах классов «R=12 М» или «R=6 М»: курсы ($\beta - \delta$) около 25° достигаются на меньших гоночных яхтах, например «R=5,5 М», «Дракон» и др.; углы в пределах $30 - 35^\circ$ относятся к небольшим швертботам, например «Летучий голландец» и яхтам крейсерско-гоночных типов.

Добавим, что курсы яхт порядка $\beta - \delta = 22 - 25^\circ$ по отношению к вымпельному ветру достигаются только на самых быстрых гоночных яхтах классов «R=12 М» или «R=6 М»: курсы ($\beta - \delta$) около 25° достигаются на меньших гоночных яхтах, например «R=5,5 М», «Дракон» и др.; углы в пределах $30 - 35^\circ$ относятся к небольшим швертботам, например «Летучий голландец» и яхтам крейсерско-гоночных типов.

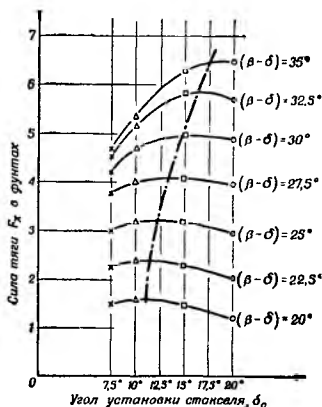


Рис. 87

в) Настройка парусов

Угол установки стакселя в границах углов $\delta_c = 12^\circ - 18^\circ$, т. е., по-видимому, в оптимальных пределах для лавировки находится вне пределов возможностей многих классов однокорпусных яхт. В основном правилами всех классов запрещается проводка шкотов за пределами палубы, т. е. вынесение шкотов за борт. Исключение составляют правила ССА, разрешающие проводку шкотов через нок грота-гика. Следовательно, положение кип стаксельшкотов ограничивается шириной палубы, на которой они могут быть укреплены. Из рис. 81 видно, что угол установки стакселя, считая по нижней шкаторине, а вернее, по линии, соединяющей галсовый и шкотовый углы стакселя δ_c , зависит:

а) от ширины палубы в месте крепления кип,

б) от длины нижней шкаторины паруса.

Учитывая эти ограничения, нетрудно отыскать на чертеже максимально возможный угол установки стакселя для различных гоночных яхт:

«R = 12 М»	—	$\delta_c = 8^\circ - 9^\circ$,
«R = 6 М»	—	$\delta_c = 9^\circ - 10^\circ$,
«Звездный»		$\delta_c = 11^\circ$,
«Дракон»		$\delta_c = 14^\circ$,
«R = 5,5 М»		$\delta_c = 15^\circ$,
«Летучий голландец»		$\neq 18^\circ$,
«5-0-5»		$\delta_c = 20^\circ$.

Таким образом, угол установки стакселя более ограничен на типичных гоночных килевых яхтах, чем на современных швертботах, на которых поэтому значительно легче добиться хорошей установки стакселя.

Традиционный взгляд на форму корпуса, которым руководствуются конструкторы, делает практически недостижимыми возможности, потенциально заложенные в вооружении яхты «R = 12 М». Вероятно, в данном случае следовало бы идти на компромисс между требованиями, предъявляемыми к форме корпуса, и условиями лучшего использования вооружения. Такой путь мог бы улучшить гоночные характеристики яхты. Решить эту задачу следует путем согласованной экспериментальной работы в гидродинамическом бассейне и аэродинамической трубе.

Здесь возникает вопрос: что может сделать команда или парусный мастер, чтобы, вопреки ограничению угла установки стакселя, улучшить условия работы обоих парусов грота и стакселя? Основным условием правильной установки стакселя на современных узких яхтах с большим заходом переднего паруса за грот является размещение кип или погонов для них как можно дальше от диаметральной плоскости.

Каждый сантиметр перемещения кип наружу имеет большое значение.

Выполнение этих условий связано с неизбежным скручиванием паруса, что увеличивает угол δ_c в его верхних частях.

Дальнейшая настройка будет сводиться к следующему:

а) уменьшению угла атаки α_c стакселя для улучшения условий его работы независимо от грота, т. е. самостоятельно;

б) сохранению достаточного расстояния между гротом и стакселем, т. е. борьба с уменьшением поперечного сечения сопла между этими парусами. Это необходимо для полного или частичного устранения задувания на грот.

На форму сопла, образующегося между гротом и стакселем, в большей или меньшей степени влияют следующие факторы:

- 1) расположение кип,
- 2) место крепления галсового угла стакселя,
- 3) сила натяжения шкотов,
- 4) изгибание штага,
- 5) форма стакселя (удлинение, высокая или низкая постановка и т. д.),
- 6) полнота пуза паруса (стакселя).

Прежде всего парусный мастер и команда яхты располагают несколькими путями для достижения в большей или меньшей степени целей, указанных в пунктах а и б. По-видимому, они не смогут добиться идеальной настройки, поскольку предусмотренные правилами класса размеры корпуса и парусности этому препятствуют.

Однако, вероятно, можно найти хороший компромисс между выгодными и невыгодными аэродинамическими факторами, возникающими при взаимодействии парусов.

Посмотрим на эту проблему с практической стороны. Трудности настройки особенно заметны на яхтах класса « $R=12-M$ », для которых характерен слишком малый угол установки переднего паруса δ_c . Для примера возьмем случай с генуэзским стакселем, поставленным очень низко и далеко заходящим на грот.

Относительно небольшая пузатость в нижней части генуэзского стакселя значительно увеличивается к верхним частям паруса.

Если сделать рисунок сечения обоих парусов горизонтальной плоскостью, получим картину, которую мы имеем на рис. 84.

Во время испытаний яхты «Норсага» на лавировочных курсах автор наблюдал, что около 20% всей поверхности грота подвергалось задуванию. Принимая во внимание, что это происходило на передней части грота в районе расположения наиболее выгодных разрежений, можно себе представить, насколько снижаются гоночные качества вооружения. Грот задувало, несмотря на усилия команды устранить это нежелательное явление.

Потравливанием шкотов можно увеличить угол установки генуи δ_c и одновременно увеличить сопло между парусами.

Однако это не очень помогает, так как увеличивается пузатость паруса, в основном его нижней части, что невыгодно на лавировке.

Особенно вредным будет увеличение полноты переднего паруса при сильных ветрах. Что же надо предпринять, чтобы сделать геную наиболее плоской и одинаковой полноты по всей высоте паруса и одновременно расширить сопло между гротом и генуей? Необходимо перешить парус.

Как уже упоминалось, одним из важных факторов, влияющих на полноту переднего паруса, является изгибание штага, которое увеличивается пропорционально силе ветра. Чем сильнее гнется штаг, тем больше становится пузо паруса, и в результате стаксель начинает задувать на грот, чего при более слабом ветре с этим же парусом не наблюдалось. Выемка при закрое передней шкаторины (см. рис. 85) в некоторой мере может компенсировать прогиб штага, но может оказаться и недостаточным средством, например, если генуя работает при сильном ветре.

Единственным средством тогда будет уменьшение площади паруса в районе задней шкаторины, придав ей форму вогнутой кривой. Выбиранием шкотов задняя шкаторина вытягивается и стремится выпрямиться, вследствие чего появляются перпендикулярные к ней силы, в результате которых ткань паруса будет перемещаться в сторону задней шкаторины, уменьшая пузо. Величина этих сил будет зависеть:

- а) от степени кривизны задней шкаторины. Чем больше вогнутость, тем больше силы и более плоский парус;
- б) от длины нижней шкаторины.

Чем короче шкаторина, тем больше силы, уменьшающие пузатость паруса.

Шкаториной можно регулировать величину скручивания паруса по высоте: чем длиннее шкаторина, тем больше скручивается парус. Это положение находится в противоречии с условием б. В данном случае необходимо руководствоваться испытаниями, чтобы путем нескольких проб и ошибок отыскать наилучший компромисс между допустимым скручиванием паруса и желательной степенью уменьшения его пуза. Очевидно, если удастся настолько убрать пузо, что парус делается достаточно плоским, то скручивание удастся тем самым свести до допустимого минимума и свести до минимума или устранить совсем задувание на грот.

Насколько надо уменьшить площадь генуи (срезая по задней шкаторине парусину по вогнутой кривой), зависит от того, какой силы ветер, на который рассчитывается данный парус. Если на яхте имеется два паруса, один надо подготовить для сильного ветра с более вырезанной задней шкаториной, а второй — с менее срезанной шкаториной для легкого ветра. Очевидно, что у специальных парусов для полных курсов, как, например балун-кливер, задняя шкаторина будет прямой, поскольку нет никакой необходимости убирать пузо, так как оно в данном случае полезно.

Сопло между парусами, его форма и размеры зависят также от положения грота-гика. Подбирая гика-шкоты, можно увеличивать размер сопла и, следовательно, уменьшить или совсем устранить задувание на грот. На узких килевых яхтах подтягивание гика до диаметральной плоскости корпуса является почти единственным средством борьбы с задуванием на грот, так как пределы

изменения угла установки стакселя на таких яхтах очень ограничены.

Рассмотрим рис. 88 и попытаемся установить границы, в которых уменьшение угла установки гика будет обоснованным, и насколько это полезно. График касается

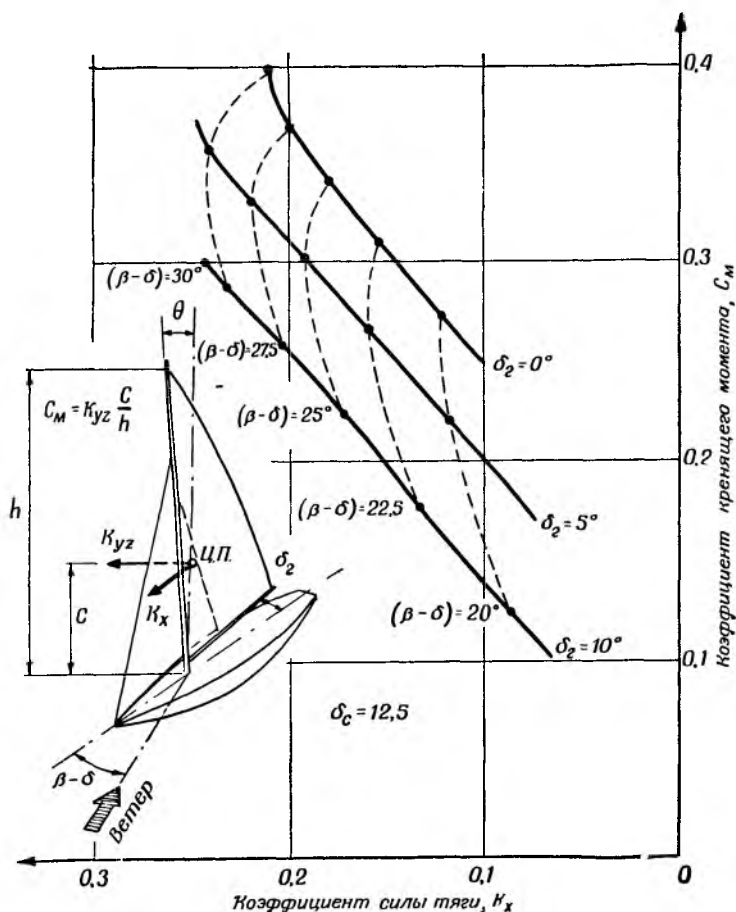


Рис. 88

ся вооружения, имеющего полноту или размеры пуза и остальные пропорции такие же, какие показаны на рис. 82. Угол установки гены не изменялся и был равен $\delta_c = 12,5^\circ$. Величину силы тяги и кренящего момента определяли, изменяя угол установки грота последовательно от 0° , 5° и 10° . Для примера возьмем курс яхты $(\beta - \delta) = 22,5^\circ$.

Когда грот поставлен под углом $\delta_2 = 10^\circ$, величина коэффициента силы тяги $K_x = 0,135$. Выбирая шкоты и уменьшая угол установки грота до 5° , вызываем рост коэффициента силы тяги K_x до 0,16; при этом одновременно увеличивается и коэффициент кренящего момента C_m , от которого зависит крен яхты. Сравнивая значения обоих коэффициентов для углов установки грота $\delta_2 = 10^\circ$ и 5° , найдем, что выбор шкотов дает прирост величины C_x на 18,5% с одновременным нежелательным увеличением кренящего момента примерно на 50%. Дальнейшее подтягивание гика к диаметральной плоскости уже не принесет никакой пользы, так как вызывает уменьшение коэффициента тяги K_x при одновременном росте коэффициента кренящего момента C_m .

Анализируя величины коэффициентов силы тяги и кренящего момента на более полных курсах, заметим, что кренящий момент меняется очень сильно в зависимости от угла установки грота δ_2 . На курсе $(\beta - \delta) = 30^\circ$ коэффициент силы тяги C_x увеличился очень незначительно и очень сильно вырос коэффициент кренящего момента. Сравнивая графики на рис. 86 и 88, можно прийти к важному выводу, касающемуся той главной роли, которую играют грот и стаксель, взаимодействуя на лавировке.

Меняя угол установки стакселя δ_c и оставляя грот в том же положении (см. рис. 86), мы вызовем большие изменения величины силы тяги. Прирост силы тяги в крайних случаях может достигнуть 60%. При этом величина кренящего момента изменяется сравнительно незначительно. Таким образом, передние паруса прежде всего имеют исключительное значение как решающий фактор в образовании силы тяги.

Анализируя рис. 88, как это мы делали с рис. 86, убедимся, что угол установки грота, при неизменном положении стакселя, оказывает главное влияние на величину кренящего момента. Таким образом, в системе

грот — стаксель, влияние грота на силу тяги имеет в некотором роде второстепенное значение.

В лавировку полезная работоспособность вооружения в основном зависит от установки переднего паруса и только потом уже от грота. Меняя угол установки грота, можно лишь незначительно повлиять на ход яхты, если при этом генауя будет поставлена неудовлетворительно.

Итак, пытаясь улучшить работу вооружения, всегда надо начинать с передних парусов. Если в настроенной яхте появляется необходимость внести некоторые исправления, пусть они коснутся грота, а не стакселя.

Никакими теоретическими положениями нельзя обосновать распространенный взгляд на то, что шкотовые по своим знаниям и квалификации могут быть ниже рулевого.

Рулевые должны подбирать себе команду одного с собой уровня и не считать, что имеют право относиться к членам команды пренебрежительно.

А теперь попытаемся ответить на такой вопрос: чем надо руководствоваться, выбирая угол установки грота? Обратимся к рис. 88. При слабом ветре главной целью будет получение от вооружения максимальной силы тяги, т. е. максимального значения K_x . В этом случае подтягивание гика ближе к диаметральной плоскости будет весьма полезно. Здесь не идет речь о чрезмерном, слишком усердном выборе, что не редко можно видеть на килевых яхтах: выбирают шкоты на лавировке, можно сказать, до отказа, а потом мало заботятся о соответствии угла установки грота меняющимся силе и направлению ветра.

Когда ветер усилился и решающим фактором, ограничивающим скорость яхты, становится сила крена, целесообразно потравливать шкоты грота до получения наиболее выгодного минимального соотношения силы крена к силе тяги $\frac{F_y}{F_x}$. Это отношение следует поддерживать таким, чтобы не допускать крена более 30° .

Часто рулевые швертботов задают вопрос, какие шкоты травить в первую очередь, когда ветер усилился и возникает опасность? Это вопрос, особенно щекотливый для яхт, имеющих слишком жесткую мачту, так как при выборе гикашкотов пузо грота не уменьшается. Такой же вопрос возникает и на килевых яхтах при крене

более 30° (при отдельных порывах ветра), когда брать рифы нет оснований. Тогда во время порыва следует травить грот, не меняя угла установки переднего паруса, и вот почему: стаксель является совершенным парусом с низко расположенным центром парусности, образующим относительно большую тяговую силу.

Потравливание грота даст некоторое задувание на грот, снижение аэродинамических сил и особенно кренящего момента, изменяющегося в довольно больших границах. Начиная от легкого задувания, можно дойти до полного полоскания, когда грот полностью перестает работать. И, наоборот, потравливание шкотов стакселя увеличит его пузатость и скручивание, вызывая увеличение силы крена и одновременное уменьшение силы тяги.

Приведем еще одно соображение, почему не нужно менять угол установки переднего паруса. Хороший стаксель облегчает рулевому лавировку, указывая своим поведением правильный курс при переменах направления ветра. Обычно во время крена яхта автоматически приводится, а для борьбы с этим надо, чтобы общий центр парусности находился по возможности дальше впереди. Уменьшая аэродинамическую силу на гроте путем потравливания, мы этому способствуем, а потравливая в этих же условиях стаксельшкоты, наоборот, увеличиваем приводимость яхты.

Интересно рассмотреть приемы, которыми пользуются в работе с передним парусом на лавировке в олимпийском классе «Летучий голландец». Слабая сторона этой необыкновенно легкой яхты заключается в недостаточной жесткости корпуса, не позволяющего достаточно туго набить штаг. Сохранение правильной формы генуи при недостаточно набитом штаге не представляет трудности при слабом ветре. Широкая палуба позволяет держать довольно большой угол δ_c , что при незначительном изгибе штага дает хорошую установку генуи относительно грота в границах их перекрытия.

Трудности начинаются с усилением ветра: сильный изгиб штага увеличивает пузатость верхней части паруса и вызывает задувание на грот. В этих условиях полезно наклонить мачту назад (рис. 89). Наклоняя мачту назад, мы сохраняем нижнюю часть генуи под натяжением, верхняя же часть паруса несколько уходит под ветер.

Это происходит потому, что расстояние между B_1C меньше расстояния между BC .

Верхняя часть задней шкаторины отклоняется под ветер, расстояние между гротом и генуей увеличивается и эффект задувания на грот уменьшается. Если этот прием окажется недостаточным, полезно поменять большую геную ABC на меньшую AB_2C . Меньший парус не будет вызывать столь значительного изгиба штага, что, в свою очередь, не будет увеличивать пузо паруса. Как следствие — уменьшится задувание на грот в наиболее вредной части паруса — в районе фалового угла генуи. Техника работы с генуей заключается в следующем:

при слабом ветре: прямая мачта, нижняя шкаторина довольно свободна (парус имеет большое пузо), задняя шкаторина довольно напряжена;

при сильном ветре: мачта наклонена назад, нижняя шкаторина (парус плоский), задняя шкаторина свободна (выдувается под ветер);

при очень сильном ветре: ставится генуя меньших размеров с более низким положением фалового угла.

Когда генуя поставлена низко, так, что нижняя шкаторина почти касается палубы, то на лавировке шкотовый угол касается или почти касается кипы на палубе. При этом необходимо найти наилучшее положение кипы относительно диаметральной плоскости. В большинстве случаев принимается простое решение: кипу ставят возможно ближе к борту, чтобы использовать всю ширину палубы.

Если стаксель имеет такую же форму, что и на рис. 90, с поднятым шкотовым углом, представляется возможность несколько увеличить угол атаки в нижней

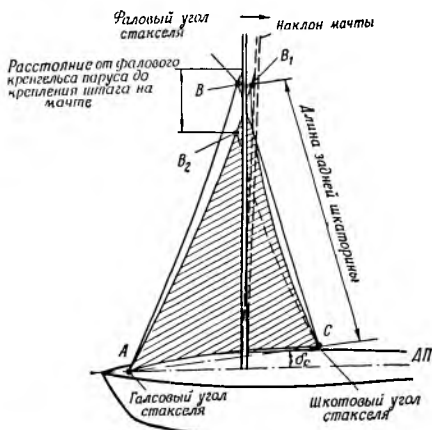


Рис. 89

части паруса. Но при этом место для установки кип надо искать не только относительно диаметральной плоскости, но и в продольном направлении. На этот счет существуют различные мнения.

В различных парусных руководствах можно встретить следующие рекомендации: 1) направление силы натяжения шкотов должно совпадать с биссектрисой шкотового угла; 2) линия тяги шкотов должна идти несколько выше биссектрисы шкотового угла; 3) линия тяги шкотов должна идти ниже биссектрисы шкотового угла.

Ценность всех этих рекомендаций заключается в том, что они обращают внимание яхтсменов на важность правильного

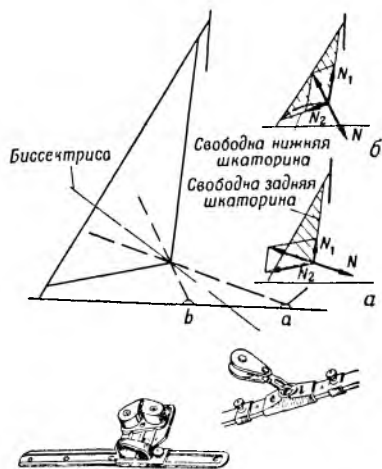


Рис. 90

расположения кип для хорошей взаимной работы парусов. Однако слепое применение любого из этих советов пользы не принесет.

Проблема правильной постановки кип заключается в отыскании такого расположения их на палубе, которое позволяло бы при работе со шкотами контролировать скручиваемость паруса и полноту его пуза. На рис. 90, а сила натяжения шкотов N разложена на две составляющих силы N_1 и N_2 .

Эти силы будут соответственно натягивать заднюю и нижнюю шкаторины паруса. Нижняя шкаторина натянута сильнее задней, и поэтому напряжение ткани в верхней части паруса может оказаться недостаточным. Парус будет скручиваться, ветер из паруса начнет выдуваться, и все это приведет к заполаскиванию его в верхней части. В случае как показано на рис. 90, б, задняя шкаторина натянута сильнее, чем нижняя. В результате пузо увеличивается по всей площади, парус будет скручиваться меньше, но задняя шкаторина может начать заворачиваться на ветер, чего нельзя допускать.

Проверить правильность установки кип стаксельско-

тов рекомендуется тем же способом, что и для контроля грота. Если яхта плывет определенным курсом, необходимо начать понемногу приводиться, не трогая парусов. При правильно поставленных кипах заполаскивание начинается сразу по всей высоте стакселя. Если вначале заполаскивать начнет верхняя часть паруса, то: или у паруса наверху слишком большое пузо, или кипы шкотов стоят слишком далеко назад, как показано на рис. 90, а. Если же вначале заполаскивать начнет нижняя часть паруса, то это значит, что кипы расположены слишком близко к шкотовому углу, как показано на рис. 90, б.

На широких яхтах скручивание паруса удается уменьшить до необходимого минимума. На узких яхтах не всегда удается так поставить передний парус, чтобы заполаскивание начиналось сразу по всей его высоте.

Для решения проблемы правильной работы с передним парусом прежде всего надо уяснить себе цель, которая преследуется в каждом конкретном случае.

То или иное расположение кип будет зависеть, во-первых, от типа парусов, а во-вторых, от курса яхты. Хорошее расположение кип для лавировки не будет столь же хорошим для полного курса. Целесообразно разместить на палубе несколько кип, позволяющих изменять проводку шкотов, если это не запрещено правилами данного класса.

Вместо нескольких кип применяют различные конструкции, позволяющие менять положение кип на палубе во время гонки. Из многих возможных конструкций две приводятся на рис. 90.

Слишком узкая, ограниченная база для шкотов на килевых яхтах привела к некоторой традиционной манере регулирования постановки парусов. Даже на таких судах, где ничто не мешает более широкой постановке кип, или разносу шкотов, часто блоки шкотов ставят слишком близко к диаметральной плоскости. Например, катамараны позволяют особенно широко держать шкоты с помощью постановки длинных погонов как для грота, так и для передних парусов. Это, несомненно, улучшило бы коэффициент полезного действия вооружения, однако в большинстве случаев под влиянием традиции это не делается.

г) Перекрытие грота передним парусом

Долгое время вплоть до 1956 года по правилам *RORC* площадь переднего паруса определялась как 85% площади треугольника, заключенного между мачтой, штагом и палубой. Коэффициент 0,85 в формуле: $0,85 J \frac{J}{2}$ приблизительно отражал фактическое отношение, в каком площадь переднего паруса заполняла указанный выше треугольник: мачта — штаг — палуба. Этот взгляд установился еще до появления в 1927 году генуэзского стакселя, когда передний парус далеко не доходил до палубы и не заходил за грот.

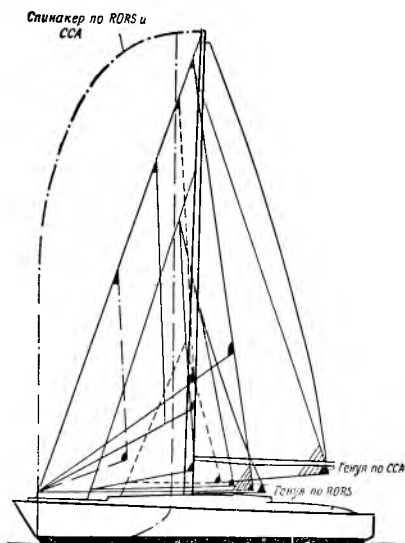


Рис. 91

Вскоре была выяснена высокая эффективность низкого и далеко заходящего за грот генуэзского стакселя, причем большая часть его площади не входила в обмер. Такое положение было использовано конструкторами в поисках новых форм передних парусов, где бы грот был перекрыт в большей степени. Одновременно площадь грота несколько уменьшалась, а площадь стакселя увеличивалась.

Следует заметить, что правила *RORC* ограничивали длину ниж-

ней шкаторины стакселя таким образом, что стаксель мог заходить на грот не более чем на $\frac{1}{2}$ величины основания переднего треугольника. Однако, несмотря на это ограничение, едва ли 40% площади большой генуи входило в обмерную площадь парусности. Нет ничего удивительного, что такая методика обмера передних парусов оказала большое влияние на конструкцию яхты и форму парусного вооружения. Типичным примером влияния правил обмера на форму вооружения может служить изве-

стная английская яхта «Миф Мальхама» (рис. 91), вооруженная шлюпом. Мачта поставлена почти посередине. Яхта имеет небольшой грот и тринадцать различных передних парусов.

№ паруса	Название паруса	Площадь, м ²
0	Грот	28,3
1	Большая генуя	59,0
2	Легкая генуя (нейлон)	48,0
3	Широкий кливер	28,0
4	Второй фок	17,0
5	Третий фок	9,3
6	Генуя — стаксель на переднем штаге	23,2
7	Первый стаксель	20,0
8	Второй стаксель	13,1
9	Малый стаксель (нейлон)	6,0
10	Большой спинакер	81,0
11	Малый спинакер	56,0
12	Малый кливер	23,0
13	Второй легкий стаксель	13,3
14	Штормовой триссель (лен)	11,2

Чем больше отношение площади переднего треугольника к общей площади парусности, тем важнее расчленивать передние паруса, чтобы облегчить оптимальный выбор парусов соответственно условиям погоды и курсу. Правильный подбор передних парусов, как и правильное управление ими, требует высокой квалификации экипажа. Последние коррективы, внесенные в формулы *RORC* и *IIRU*, дают для площади переднего паруса формулу $I \times J / 2$, т. е. всю площадь переднего треугольника, и одновременно ограничивают заход переднего паруса на грот на длину не более $0,5 \times J$. В американской формуле *ССА** площадь переднего паруса определяется как 1,2 площади переднего треугольника и никаких ограничений для захода генуи на поверхность грота не дается.

На рис. 91 даны два варианта генуэзского стакселя по формулам *RORC* и *ССА*.

Как бы ни изменялись в будущем способы оценки площади переднего паруса, всегда будет существовать

* *ССА* — Американский клуб крейсерских гонок.

проблема величины наивыгоднейшего перекрытия грота передним парусом, т. е. степени перехода переднего паруса за линию мачты. Некоторый свет проливают на эту проблему опыты, проведенные профессором Ричардом Фэйри в аэродинамической трубе в Англии с моделью яхты класса *J*. Целью опытов было установление влияния перекрытия грота стакселем на эффективность работы всего вооружения. В опытах использовались три стакселя разных размеров по нижней шкаторине, а грот и кливер оставались без изменения.

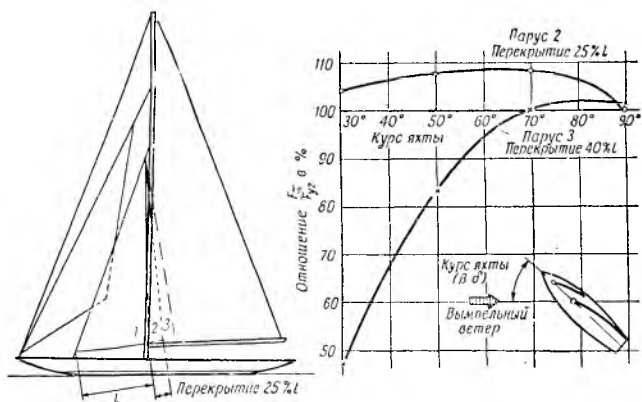


Рис. 92

Схематически вооружение показано на рис. 92. Стаксель *1* доходил только до мачты, а стаксели *2* и *3* заходили на грот на 25 и 40% по отношению к длине l нижней шкаторины стакселя *1*. Измерялись силы тяги F_x и сила крена F_{yz} для разных углов плавания в пределах от $(\beta - \delta) = 30^\circ$ до $(\beta - \delta) = 90^\circ$, т. е. от курса бейдевинд до курса галфвинд. Паруса ставились под наиболее выгодным углом с целью получения максимальной по эффективности работы. Измерения велись при постоянном умеренном ветре, а результаты относились к единице площади парусности кг/м^2 , т. е. делились на площадь парусности. Полученные результаты приводятся в таблице:

Углы ($\beta - \delta$)	F_x — сила тяги в кг/м ²	F_{yx} — сила дрейфа в кг/м ²
Стаксель 1		
30°	0,630	3,27
50°	1,560	4,37
70°	2,060	4,38
90°	2,90	3,95
Стаксель 2		
30°	0,655	3,71
50°	1,655	4,44
70°	2,215	4,41
90°	2,92	4,11
Стаксель 3		
30°	0,298	3,71
50°	1,285	4,48
70°	2,055	4,49
90°	2,940	4,17

Например, на лавировке при курсе $(\beta - \delta) = 30^\circ$ паруса тянут с силой 0,630, 0,655 и 0,298 кг/м² соответственно для стакселей 1, 2 и 3, перекрывающих грот, как известно, в отношении 0%, 25% и 40% l — длины нижней шкаторины стакселя 1. Следовательно, наиболее эффективным оказалось вооружение со стакселем 2, заходящим на грот на 25%. Однако на курсе галфвинд, когда $(\beta - \delta) = 90^\circ$, величины для силы тяги соответственно будут: 2,90, 2,92 и 2,94 кг/м². Теперь наилучшие результаты будут у стакселя 3.

Практические наблюдения подтверждают, что на более полных курсах выгодно использовать паруса, которые дальше заходят за грот. На рис. 92 результаты опытов показаны в виде графика, причем замеры, полученные для стакселей 2 и 3, приводятся относительно тех же замеров, сделанных на стакселе 1, взятых за 100%. Эффективность вооружения при применении стакселя 2 вначале примерно на 4% выше, чем у вооружения со стакселем 1, потом постепенно увеличивается примерно до 8% на курсе $(\beta - \delta) = 60-70^\circ$, а затем уменьшается и становится почти одинаковой на курсе $(\beta - \delta) = 90^\circ$. Стаксель 3 с 40-процентным перекрытием дает результаты значительно ниже стандартных результатов, имеющих

у стакселя 1. И только на курсах $(\beta - \delta) = 70^\circ$ и полнее его показатели становятся несколько выше принятых в качестве стандартных. Стаксели 2 и 3 предпочтительнее иметь на курсах более близких к галфвинду вследствие их большей поверхности, а не более высокого коэффициента полезного действия.

О наилучшем расположении пуза гота при применении большой гениу свидетельствуют опыты, проведенные в Саутгемптонском университете с моделью воору-

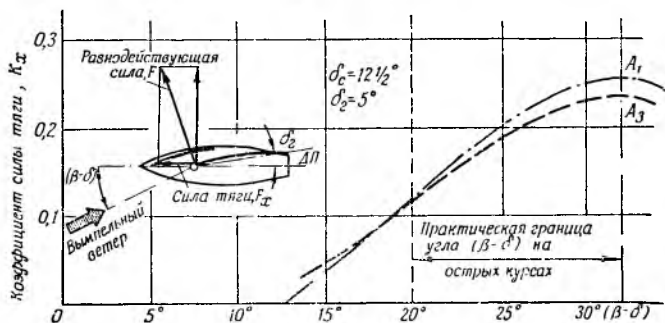
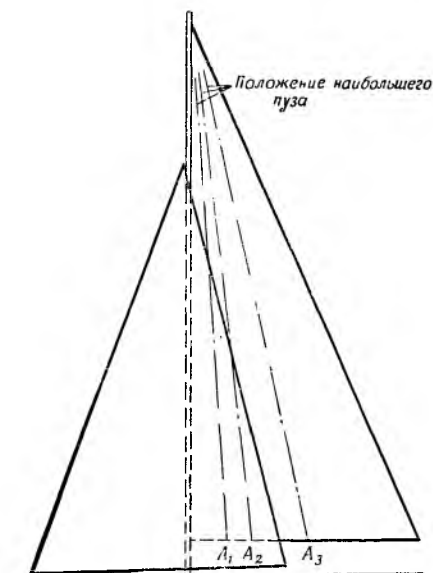


Рис. 93

жения типа шлюп, имеющей размеры, приведенные на рис. 93. Полнота пуза грота равнялась $\frac{1}{25}$ (4%), а пузо генуи было несколько больше. Для моделей A_1 , A_2 и A_3 максимум пуза находился на расстоянии 15%, 25% и 50% длины хорды профиля паруса, считая от мачты.

Во время опытов форма профиля генуэзского стакселя оставалась неизменной. Эксперименты показали, что максимальное пузо грота должно располагаться впереди задней шкаторины перекрывающего паруса, при этом достигается наилучшее взаимодействие обоих парусов. Кривые, изображенные на рис. 93, показывают коэффициент силы тяги K_x на курсах (β — δ) в пределах 20—30°.

Угол постановки генуи был равен $\delta_c = 12,5^\circ$, а грота $\delta_2 = 5^\circ$. Не трудно заметить преимущество модели A_1 , у которой коэффициент K_x увеличился примерно на 7% по сравнению с моделью A_3 . Замеры показали также, что у модели A_1 коэффициент кренящего момента примерно на 20—25% меньше, чем у модели A_3 . Аэродинамическая характеристика модели A_2 была несколько хуже, чем у модели A_1 , и чуть лучше, чем у модели A_3 .

Аэродинамическое различие, выявленное у этих трех моделей, наиболее правдоподобно объясняется различным влиянием, которое они оказывают на обтекание подветренной стороны грота (см. рис. 34). Одна из задач, выполняемая передним парусом, заключается в отдалении от мачты места отрыва струй от поверхности грота. Без стакселя отрыв струй начинается, по-видимому, сразу же за максимумом пуза. Если задняя шкаторина стакселя находится впереди наибольшего пуза грота, весьма сомнительно, чтобы передний парус мог выполнить задачу по упорядочению обтекания поверхности грота. Эти эксперименты дают основания для следующего вывода: максимальное пузо грота следует располагать в районе перекрытия грота передним парусом, и чем ближе к мачте, тем лучше.

Интересные выводы можно сделать, анализируя результаты опытов, проведенных с двумя разными моделями вооружения, показанными на рис. 94. Модель A_1 имеет те же размеры, что и модель на рис. 93, т. е. отношение площади переднего треугольника $I \times J/2$ ко всей площади парусности было равно 1 : 3. Сравнимая модель С

имела такую же площадь парусности и полноту пуза, но отношение площади переднего треугольника ко всей парусности равнялось 1:2. У модели С очень большая гюня начиналась от самого топа мачты и перекрывала значительно большую часть грота по сравнению с моде-

$$\text{Удлинение паруса } (\lambda_A) = \frac{\text{Высота паруса}^2}{\text{Площадь паруса}}$$

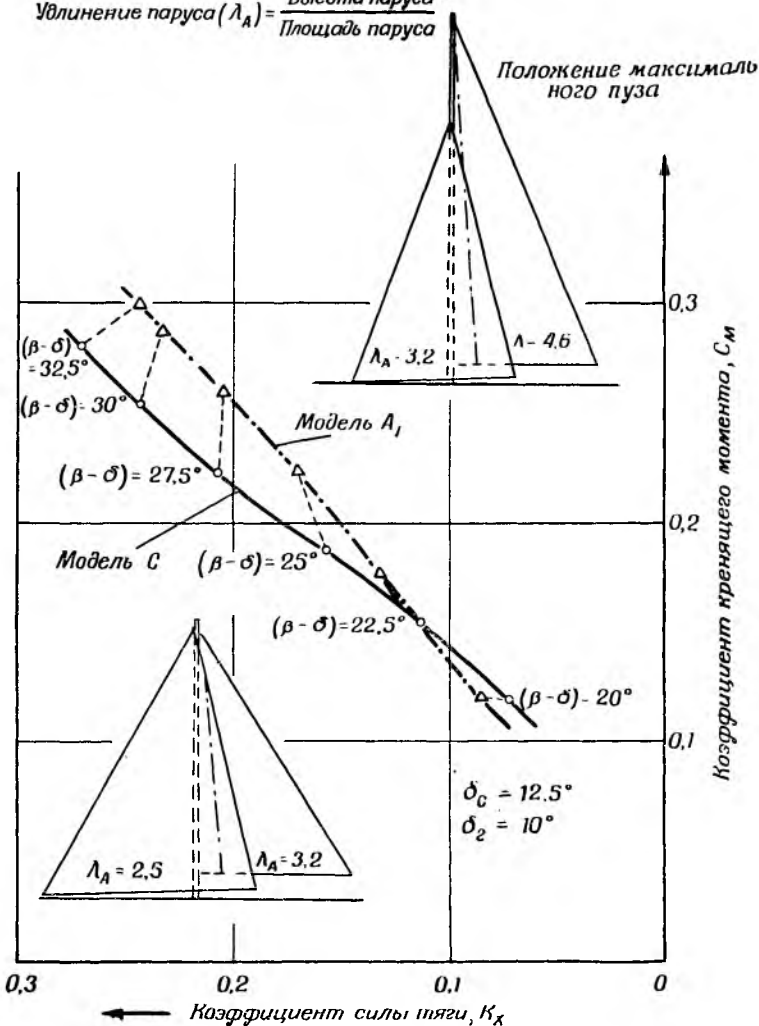


Рис. 94

лью A_1 . У обеих моделей максимальное пузо располагалось в районе, перекрытом генуей. Модель A_1 в сущности отражала типичные пропорции международных классов *IRRU*, как, например, яхты « $R=12M$ », « $R=6M$ », а также крейсерско-гоночных яхт *RORC*, когда отношение высоты паруса к длине гика находится в границах 2,7—3,2.

Модель *C* соответствует крайним пропорциям американских яхт, строящихся по формуле *CCA*, где штраф, налагаемый на вооружение с высокими парусами (большим удлинением парусов), приводит к тому, что отношение высоты паруса к длине гика редко бывает больше 2.

Измерялись значения коэффициентов силы тяги K_x и коэффициента кренящего момента C_m в пределах практических углов лавировки $(\beta-\delta)=20^\circ-32,5^\circ$. Во время опытов изменялись углы установки парусов δ_c и δ_z , но кривые, нанесенные на рис. 94, относятся к углам установки генуи $\delta_c=12,5^\circ$ и углу установки грота $\delta_z=10^\circ$, одинаковым для обеих моделей. Однако характер показанных кривых сохраняется и для других углов установки парусов.

В случае, если на одном и том же курсе $(\beta-\delta)$ на одной из моделей коэффициент силы тяги больше, чем на другой, а коэффициент кренящего момента такой же или меньше, — значит, вооружение этой модели более эффективное. Некоторые сомнения в оценке аэродинамических качеств вооружения возникают, когда модель дает большую величину обоих коэффициентов одновременно. Тогда следует обратить внимание на силу ветра. Например, на курсе $(\beta-\delta)=20^\circ$ гораздо предпочтительнее вооружение модели A_1 с парусами большой удлиненности, потому что при почти одинаковой величине кренящего момента с моделью *C* коэффициент силы тяги K_x заметно лучше.

Величина коэффициента силы тяги у модели A_1 при курсе $(\beta-\delta)=22,5^\circ$ также лучше. При курсе $(\beta-\delta)=25^\circ$ трудно сказать, которая модель лучше, если не принять во внимание остойчивость корпуса.

При слабых ветрах и при дальнейшем уваливании на более полный бейдевинд модель A_1 должна иметь преимущества, поскольку коэффициент силы тяги у нее больше. Положение меняется в пользу модели *C* при уве-

личении курсового угла более 25° . При курсовом угле $(\beta - \delta) = 27,5^\circ$ кренящий момент у модели С меньше при такой же силе тяги, следовательно, ее вооружение лучше, особенно если ветер усиливается. Чем сильнее ветер, тем предпочтительнее вооружение модели С по сравнению с вооружением модели A_1 . Очевидно, что вооружение модели A_1 лучше при плавании острым бейдевиндом, тогда как вооружение модели С предпочтительнее на курсах острого бакштага. В условиях гонок по «треугольнику», когда решающее значение имеет бейдевинд, лучшим окажется вооружение модели A_1 . В океанских открытых гонках, проходящих в условиях меняющихся погоды и курсов, когда требуется при всех курсах хорошая работа вооружения, предпочтительнее будет вооружение модели С. Эксперименты, результаты которых показаны на рис. 94, подтверждают выводы, сделанные в разделе II.

В кругах английских яхтенных конструкторов обсуждаются причины успехов американских яхт с бульбкилями, построенных по формуле *ССА*. На гонках с гандикапом американские яхты почти постоянно побеждают английские узкие, глубоко сидящие яхты. Причину успеха усматривают в разнице корпусов, главным образом в лучшей гидродинамической характеристике бульбкилей. Однако недавно в формулу *ССА* ввели изменение, направленное на уменьшение преимуществ широких с малой осадкой яхт с бульбкилем. Не предвешая вопроса о преимуществах того или иного корпуса с точки зрения гидродинамики, следует обратить внимание на критерии яхт с точки зрения аэродинамики.

Американские яхты с небольшим удлинением парусов должны лучше себя проявить в гонках типа Бермудских или трансатлантических, в которых курс бейдевинд не является основным. Другим важным свойством американских яхт является их широкая палуба (сравнительно с английскими), на которой кипы шкотов могут быть поставлены лучше, а следовательно, и паруса будут работать лучше.

д) Спинакер

Формулы *RORC* и *ССА* дают следующие допустимые размеры спинакера:

ширина спинакера на произвольной высоте = $180\% J$.

Длина боковых шкаторин = $0,95 \sqrt{I^2 - J^2}$ (рис. 95).

Длина спинакергика, измеренная перпендикулярно к диаметральной плоскости яхты, не должна быть больше основания переднего треугольника J . Если например взять паруса известной яхты «Миф Мальхама» (см. рис. 91), то площадь большого спинакера будет равна 81 м^2 , т. е. примерно в три раза больше площади грота. В классе « $R=12 \text{ М}$ » это отношение доходит до 4,4 (518 м^2).

Безусловно, не во всех классах применяются такие большие спинакеры, но площадь его всегда больше пло-

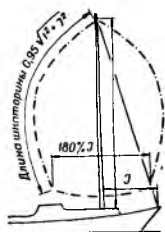


Рис. 95

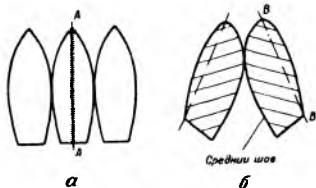


Рис. 96

щади грота. Это само по себе подчеркивает их значение как парусов, очевидно, позволяющих получить желаемую силу тяги.

Особенно возросло значение спинакера за последние несколько лет, когда изменилась оценка его работы. Прежний взгляд на спинакер, как на мешок для ловли ветра на полных курсах, был отброшен. В настоящее время спинакер рассматривается как весьма полезный передний парус, способный с успехом заменить на полных курсах геную: например, на остром бакштаге.

Уяснить эволюцию спинакера легче всего, рассмотрев основы раскроя и его значение для качества сферической поверхности паруса при разных потоках воздуха, действующих на спинакер. В прежнее время шаровой поверхности спинакера добивались сшивая полотнища парусины, скроенные на манер долек апельсина или «долей» глобуса (рис. 96, *а*).

Скроенный таким образом спинакер обладал значительными дефектами, у него появлялись фалды. Причина заключается в разнице свойств растяжения ткани по

линии *A—A* и ткани, прилегающей к швам, которые располагались по диагонали — наиболее растяжимому направлению в ткани (см. главу I «Несколько замечаний относительно раскроя, выхаживания и дефектах паруса»). Фалды были тем крупнее, чем крупнее были полотнища, из которых сшивался спинакер.

Затем перешли на другой раскрой, хотя он был менее экономичным с точки зрения расхода ткани, но давал лучшее расположение ткани по диагонали, выгодное напряжение на поверхности паруса и устранял фалды.

Растяжимость ткани по сечению *B—B* в направлении среднего шва и в диагональном направлении примерно одинакова. Пользуясь закладками, уменьшая ширину полотнищ, очевидно, можно влиять на форму поверхности спинакера в нужном направлении (см. рис. 96, б).

На полных курсах, особенно на фордевинде, когда основным критерием паруса является величина подставленной ветру поверхности, диагонально скроенные сферические спинакеры работают вполне удовлетворительно. Лучше всего спинакер работает при слабом ветре, когда он поставлен высоко и полностью вынесен из аэродинамической тени грота. При этом спинакергик находится под углом примерно 90° к направлению вымпельного ветра.

За спинакером образуется область завихренного воздушного потока (рис. 97), так как парус работает под большим углом атаки. Отрыв струй воздуха начинается сразу по обоим шкаторинам паруса, а завихрения распространяются почти на всю подветренную сторону сферической поверхности. При этом качество поверхности не играет никакой роли. Возможно, что и складочки ткани около швов также не имеют большого значения для работы паруса. Равномерное расположение напряжений на обеих сторонах паруса устраняет фалды.

Применявшийся для этого типа спинакеров тянущийся нейлон в месте наибольших напряжений растягивался больше, что помогало сгладить возможные ошибки в крае и шитье паруса.

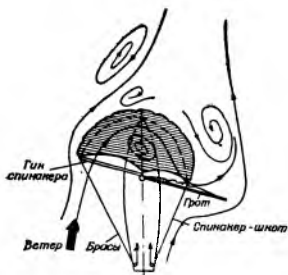


Рис. 97

На фордевинде шкаторины паруса ведут себя спокойно, за исключением случаев сильного раскачивания яхты в результате действия вихрей Кармана, образующихся на подветренной стороне паруса.

Этих недостатков нет у спинакера Вентури, внедренного в практику американской фирмой «Ратсей и Лапторн». Фирма использовала идею авиационного парашюта. У спинакера Вентури склонность к раскачиванию

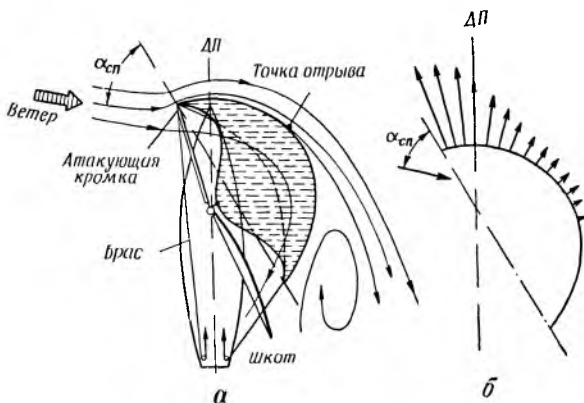


Рис. 98

заметно меньше, чем у обычных классических парусов, в связи с чем ими легче управлять. Потoki воздуха, проходящие через сопла Вентури в верхней части паруса, стабилизируют его поведение и способствуют высокому положению паруса.

Форма и качество поверхности спинакера играют важнейшую роль при плавании курсами острее фордевинда и до полного бейдевинда (рис. 98). После курса галфвинд, когда угол $\alpha_{сп}$ становится меньше 90° , если наветренная шкаторина стоит устойчиво и не заваливается, спинакер может полезно работать, аналогично гроту и передним парусам. Обдувание всех этих парусов ветром в этом случае примерно одинаковое.

Граница отрыва струй от поверхности паруса смещается назад, а на передней подветренной части паруса образуется относительно высокое разрежение, увеличивающее силу тяги.

Кроме того, равнодействующая аэродинамическая сила направлена ближе к линии симметрии яхты и не вызывает увеличения кренящей силы, несмотря на то, что большая часть спинакера расположена на подветренном борту.

На рис. 98, б показан характер расположения разрежений на подветренной стороне спинакера. Он напоминает картину расположения разрежений на стакселе, рассмотренную в разделе 2 «Расположение давлений на парусе».

Характерной чертой такого расположения давлений является то, что наибольшие величины находятся непосредственно за передней шкаториной. Это вызовет на парусе очень большие напряжения именно в районе передней шкаторины.

При диагональном крое ткань в этом месте будет сильно растягиваться, особенно если ткань легкая. Более прочный ликтрос не тянется так сильно, как соседняя ткань, и образуется большая фалда, идущая от галсового угла наверх.

Не трудно представить себе, какой вред приносит такая фалда спокойному обтеканию паруса ветром. Фалда в данном случае так же вредна, как и толстая мачта, вызывающая за собой завихренный поток.

Между прочим, это одна из причин беспокойного поведения и заламывания передней шкаторины, ограничивающей возможный угол атаки спинакера $\alpha_{сп}$.

На курсе галфвинд, в конце концов, можно держать угол $\alpha_{сп}=90^\circ$ и предупредить беспокойное поведение передней шкаторины. При этом парус будет работать хорошо и устойчиво, но за счет некоторого уменьшения площади выгодно обтекаемой подветренной его части и одновременно некоторого увеличения кренящей силы. Положение ухудшается, если яхта станет приводиться на более острый курс, что явится строгим экзаменом как проверки спинакера, так и умения с ним обращаться. Предельный угол атаки $\alpha_{сп}$, при котором передняя шкаторина еще хорошо стоит, определяет область курсов и самый крутой курс, на котором еще можно применять спинакер.

Склонность к деформации в районе наветренной шкаторины является преградой к использованию спинакеров диагонального кроя на курсах острее галфвинда. Преж-

де всего необходимо изменить основы кроя паруса таким образом, чтобы устранить образование фалд вблизи наветренной шкаторины. Спинакер, сшитый из горизонтальных полотнищ (при таком покрое наибольшие напряжения в районе шкаторины располагаются по направлению наибольшей сопротивляемости вытягиванию ткани, т. е. по основе и утку), позволяет получить исключительно гладкие и плоские шкаторины, допускающие плавание с меньшими углами атаки $\alpha_{сп}$. Горизонтальное расположение полотнищ уменьшает также вредное влияние швов на обтекание поверхности паруса.

Несомненно, на курсе фордевинд и при слабых ветрах диагональный спинакер Хербуло по меньшей мере равноценен всем другим спинакерам. На других курсах, когда работа спинакера похожа на работу генуи, важнейшим критерием становится не величина, а форма паруса. Преимущества переходят к горизонтально скроенным спинакерам с меньшей шириной нижней шкаторины. Такие паруса будут лучше работать в любых условиях на всех курсах, и особенно на более свежих ветрах.

Уменьшая ширину основания спинакера, т. е. делая парус более плоским, можно уменьшить предельный угол $\alpha_{сп}$, при котором наветренная шкаторина не будет заламываться.

Таким путем можно расширить границу использования спинакера вплоть до полного бейдевинда. Спинакер может с большим успехом заменить геную, часто посредственно работающую в этих условиях из-за жесткого ограничения угла установки.

Можно предположить, что дальнейшее развитие конструкции спинакера пойдет в направлении, среднем между ним и генуей. Такой парус мог бы получить название спинопя (горизонтально скроенный плоский спинакер). Он позволил бы преодолеть слабые стороны комбинации грот — генуя, возникающие из-за ограниченности угла установки на однокорпусных яхтах.

Исключительно важным является выбор ткани для спинакера. Сам парус в готовом виде должен быть как можно легче. Если вес ткани велик, на слабом ветре парус работать не будет. Парус, сшитый из слишком легкой ткани, станет деформироваться и на сильном ветре может разорваться. В сущности, универсальный парус

сделать невозможно: чем больше будем стараться сделать парус универсальным, тем меньше он будет пригоден для определенных условий.

Здесь уместно подчеркнуть неоправданность утверждения, что нейлон является якобы наилучшей тканью для спинакера. Оно правильно по отношению к глубоким шаровым спинакерам типа Хербуло: растяжимость самой ткани в этом случае может быть даже полезной. Для

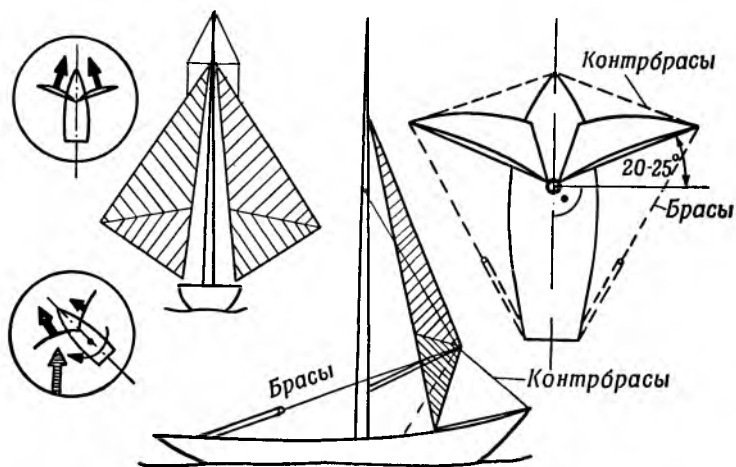


Рис. 99

спинакера типа Литтл Харри (спиноа), когда надо всячески препятствовать деформации формы паруса, такая растяжимость ткани вредна. Наиболее подходящей в данном случае будет ткань типа дакрон, отличающаяся особым сопротивлением растяжению.

В настоящее время спинакеры применяются не только как паруса при легком ветре, но и в тяжелых метеорологических условиях (штормовые спинакеры). Штормовые спинакеры по размерам значительно меньше и шьются из более прочной ткани.

Форма так называемого двойного спинакера, используемая в сильный ветер, показана на рис. 99. Спинакер сделан из двух треугольных парусов, например стакселя и кливера одинаковых размеров.

Поскольку аэродинамическая сила приложена в районе бака, а центр бокового сопоставления находится даль-

ше к корме, создается возможность автоматического управления. Это достигается в результате установки обоих парусов под углом $20\text{--}25^\circ$ к диаметральной плоскости яхты. Когда по каким-либо внешним причинам яхта отклонится от курса фордевинд, один из парусов попадает в тень другого паруса и перестает работать. Возникает момент, разворачивающий яхту на прежний курс, пока оба паруса не станут работать одинаково.

Двойной спинакер особенно хорош в гонках на больших дистанциях и одиночных морских плаваниях, так как сильно облегчает работу команды. Один из французских яхтсменов использовал такое вооружение в Трансатлантической гонке в 1933 году. По его словам, он не притрагивался к рулю 26 дней — настолько отлично действовало автоматическое управление, причем одинаково надежно и в слабую и в штормовую погоду.

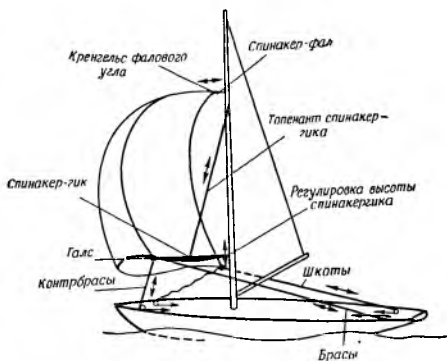


Рис. 100

На туристских яхтах, как правило, не очень охотно пользуются спинакерами, разве что на фордевинде и при несильном ветре. В отличие от грота и передних парусов, крепящихся к мачте или штагам и управляемых простыми шкотами, спинакер висит свободно и управляется сравнительно сложной системой снастей.

Взгляните на рис. 100, чтобы представить разницу в управлении гротом и спинакером. Как никакой другой парус, спинакер требует исключительно слаженной работы команды на носу яхты и рулевого. На сильном ветре спинакер может стать наказанием для недостаточно опытной команды.

Значительно облегчают работу команды современные оковки спинакергика, но тренированность команды имеет первостепенное значение.

Несение спинакера сводится к нахождению оптимального положения фалового, галсового и шкотового углов. Последние меняются ролями при поворотах фордевинд. Желательное расстояние от мачты до верха паруса зависит от курса яхты, покроя паруса и склонности яхты к поперечному раскачиванию. На полных курсах может оказаться полезным несколько потравить фал, отчего спинакер уйдет слегка вперед и на ветер, а следовательно, выйдет из тени, создаваемой гротом. При этом надо следить за поведением нижней части паруса, которая не должна наклоняться, причем по возможности поверхность нижней части паруса должна быть перпендикулярна к поверхности моря. Слишком заметный наклон низа паруса назад очень вреден.

Когда яхта начинает раскачиваться, длина фала, потравленного между мачтой и верхним углом паруса, приобретает особо важное значение. Меняя длину фала, можно контролировать взаимные раскачивания паруса и мачты. В каких-то определенных условиях наступит критическое расстояние между мачтой и верхом паруса, при котором раскачивание яхты увеличится, а спинакер будет заворачиваться. В этом случае необходимо подтянуть спинакер фалом вплоть до самой мачты. Делать это надо в несколько приемов, переходя для выполнения этого маневра на курс бакштаг.

Спинакергик следует держать параллельно палубе, чтобы в максимальной степени использовать его длину. Погон на мачте, по которому перемещается пятка спинакергика, должен быть достаточной длины (см. рис. 100), чтобы можно было поднять весь спинакер. В этом случае эффективность работы спинакера возрастает, во-первых, потому что он выходит из тени грота, во-вторых, потому что ветер чем выше, тем сильнее. Положение спи-

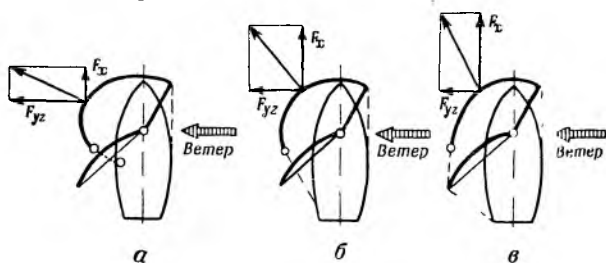


Рис. 101

накергика регулируется брасами, контрбрасами и топенантами, которые вместе со шкотами служат для установки спинакера под желательным углом атаки $\alpha_{сп}$ (см. рис. 98).

Правильность положения галсового угла зависит от проводки шкотов, устанавливающих положение шкотового угла. Угол атаки $\alpha_{сп}$ зависит от взаимного положения галсового и шкотового углов. От этого же зависит форма, какую примет нижняя часть паруса. На рис. 101 показано влияние системы проводки шкотов на силу тяги спинакера. Особенно эффективна проводка, когда блок шкота крепится на нок грота — гика, что теперь разрешается правилами RORC (см. рис. 101, в). При этом удается получить самое выгодное расположение давления по поверхности паруса, относительно большую силу тяги при небольшой силе крена.

Поворот фордевинд с большим спинакером и на сильном ветре — маневр не всегда безопасный. В этих условиях для облегчения работы команды очень полезно использовать ветровую тень других парусов, например грота или генуи.

На рис. 102 показан способ перемены галса. Спинакергик на обоих концах имеет одинаковые оковки, пригодные для крепления паруса и для крепления на ползуне мачты. На крупных яхтах с большими спинакергиками применяются несимметричные гики с топенантом, укрепленным у нока, и постоянно закрепленной на мачте пяткой.

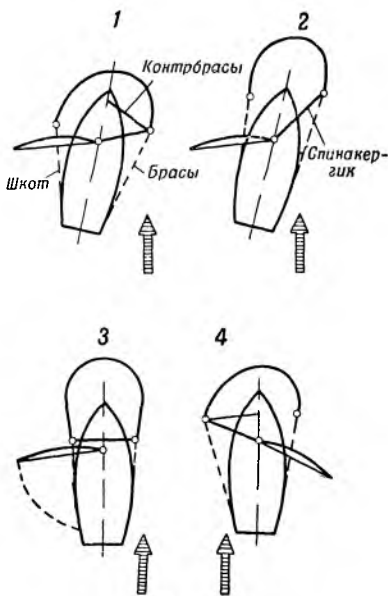


Рис. 102

13. Центр парусности

Рассматривая вопросы аэродинамики паруса, для простоты было принято, что все действующие на парус силы разрежения на его подветренной стороне и давления на наветренной стороне сводятся к единственной равнодействующей силе F , направленной по определен-

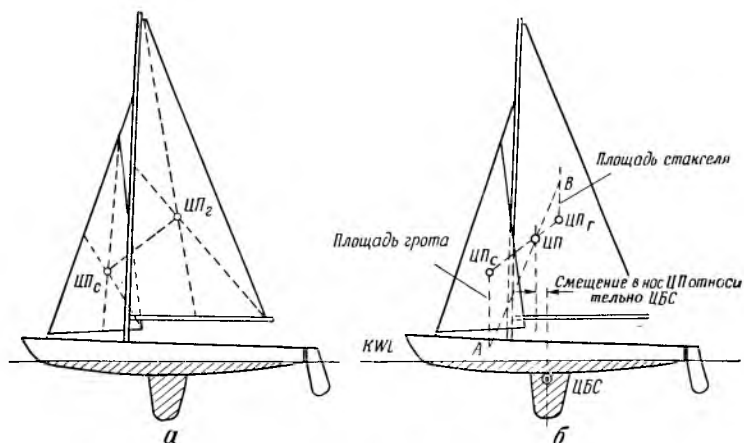


Рис. 103

ной прямой. На рис. 49 эта прямая действия силы F пересекает парус в определенной точке — центре давления, или, как принято называть среди яхтсменов, центре парусности (ц. п.).

В подавляющем большинстве опубликованных на эту тему статей и материалов ц. п. трактуется как постоянная точка, расположенная в геометрическом центре площади парусности яхты.

Общепринятый способ определения положения ц. п. показан на рис. 103, а, б. Вначале определяют геометрический центр площадей грота и стакселя ц. п._г и ц. п._с. Затем, учитывая величину площадей этих парусов, находят геометрический центр всей парусности — ц. п.

Расстояния от общего ц. п. до ц. п._г и ц. п._с обратно пропорциональны их площадям.

а) Центр парусности и уравновешенность яхты на курсе

Найденный таким способом ц. п. в действительности не соответствует положению точки приложения равнодействующей аэродинамических сил. Тем не менее он используется в расчетах конструкторов, так как облегчает оценку способности яхты сохранять заданный курс, т. е. уравновешенность яхты на курсе. Практически под фактическим ц. п. подразумевается не геометрический центр площадей стакселя и грота, а точка приложения равнодействующей аэродинамической силы, которая меняет свое положение в зависимости от курса яхты и находится несколько впереди от геометрического ц. п. Погрешность, допущенная в положении ц. п., затем компенсируется такой же ошибкой при определении так называемого центра бокового сопротивления (ц. б. с.) подводной части корпуса. Ц. б. с., так же как и ц. п., расположен в геометрическом центре проекции корпуса, чуть ниже ватерлинии, включая площадь шверта. При этом площадь руля не учитывается (рис. 103 б) *.

В действительности, так же как и в случае ц. п., положение ц. б. с. не остается постоянным. Ц. б. с. перемещается вдоль яхты от геометрического центра в зависимости от характера аэродинамических сил, образующихся на парусах. Как будет показано дальше, перемещения ц. б. с. больше соответствующих ему перемещений ц. п. На лавировке ц. б. с. фактически находится заметно впереди геометрического центра: по мере уваливания на более полный курс и потравливания шкотов ц. б. с. перемещается в сторону кормы. Показанный на рис. 103, а и б способ нахождения ц. п. позволяет оценить грубо устойчивость яхты на курсе при лавировке. Простейшая оценка такова: яхта будет хорошо уравновешена, если равнодействующие аэродинамическая сила F , проходящая через ц. п., и гидродинамическая сила R , проходящая через ц. б. с. (см. рис. 13, а), будут располагаться по одной прямой. Если это условие не соблюдено, то расстояние a между ц. п. и ц. б. с., которое можно назвать

* Площадь руля следует учитывать, так как он тоже создает боковое сопротивление, тем более при небольшом отклонении под ветер, что может быть полезным (прим. ред.).

неуравновешенным плечом, будет служить мерой нецентрированности яхты. Чем больше это плечо, тем сильнее придется действовать рулем для удержания яхты на курсе. Иначе говоря, придется рулем компенсировать действие приводящего или уваливающего момента $F \cdot a$.

Яхтсмены знают, что «медленные» яхты, неспособные плыть с высокими скоростями, как правило, бывают плохо уравновешены и потому в той или иной степени «лежат на руле».

Плохо уравновешенная яхта резко приводится на порывах, не слушаясь руля, несмотря на усилия рулевого, и имеет склонность задерживаться в положении левентика.

В любом случае, когда из-за ошибок в расчете местоположения ц. п. и ц. б. с., приходится пользоваться рулем, это вредно влияет на скорость, так как возникает дополнительное сопротивление руля.

Чаще всего оценка уравновешенности яхты делается по величине расстояния, на котором находятся друг от друга условные, расчетные центры парусности и бокового сопротивления. Рассмотрим их проекции на диаметрально плоскость яхты (см. рис. 103, б и рис. 13). Примем, что яхта приводится или уваливается в зависимости от расстояния, на которое ц. п. находится впереди ц. б. с. На хорошо уравновешенной яхте ц. п. должен быть впереди ц. б. с. Во многих руководствах эти расстояния даются в процентах к длине конструктивной ватерлинии KWL , причем мнения сильно расходятся и разные авторы определяют его в пределах от 0 до 20% длины KWL . Поскольку истинное положение ц. п. и ц. б. с. можно определить только экспериментальным путем, практически конструкторы руководствуются только накопленным опытом и интуицией. Поэтому не следует удивляться, встречая яхту с плохим взаимным расположением ц. п. и ц. б. с.

На практике, когда яхта уже построена, очень трудно вносить коррективы в форму корпуса, положение шверта или дейдвуда и киля без существенных переделок в конструкции.

Решающим фактором при центровке яхты является перемещение парусности вдоль яхты. Перестановка мачты или иное перераспределение общей площади парусности между передними парусами и гротом может сильно изменить центровку.

На рис. 104, а показано, насколько можно изменить положение геометрического ц. п. на яхтах типа шлюп и тендер в зависимости от соотношения между передними парусами и гротом. При взятии рифов или замене парусов всегда следует подумать, как это отразится на центровке. Некоторое влияние на центровку яхты оказывает наклон мачты. Это наглядно показано на рис. 104, б.

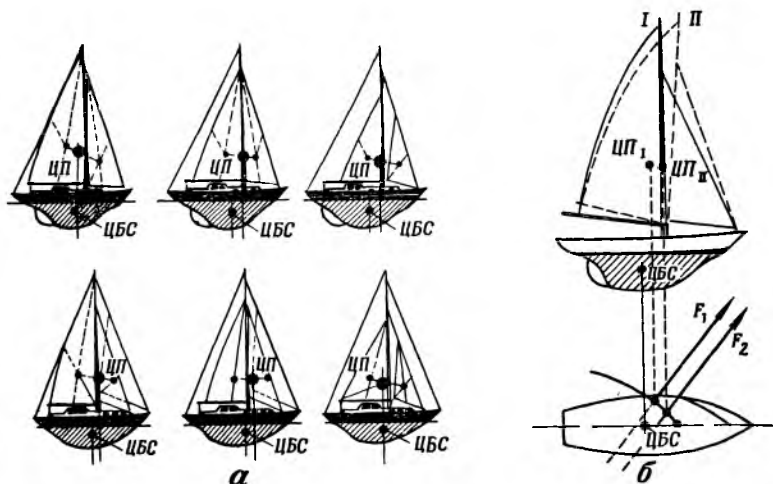


Рис. 104

В одном случае яхта будет приводиться, а при наклоне мачты вперед яхта начнет уваливаться, если ее не сдерживать рулем.

При отыскании правильного взаиморасположения ц. п. и ц. б. с. прежде всего надо стремиться к достижению наиболее эффективной работы парусов на лавировке, а затем добиваться такого положения, чтобы яхта хорошо держалась на курсе при очень незначительном отклонении руля — не более чем на несколько градусов. Первейшая задача — это правильно установить стаксель относительно грота. Можно свести к нулю все старания по центровке яхты, если одновременно не позаботиться о наиболее эффективной работе парусного вооружения с точки зрения аэродинамики.

б) «Блуждание» центра приложения аэродинамических сил

На основании опытов с моделями парусов, имевших различные полноту пуза и удлинение, было установлено, что действительное положение ц. п. (центра давления аэродинамических сил) меняется в зависимости от угла

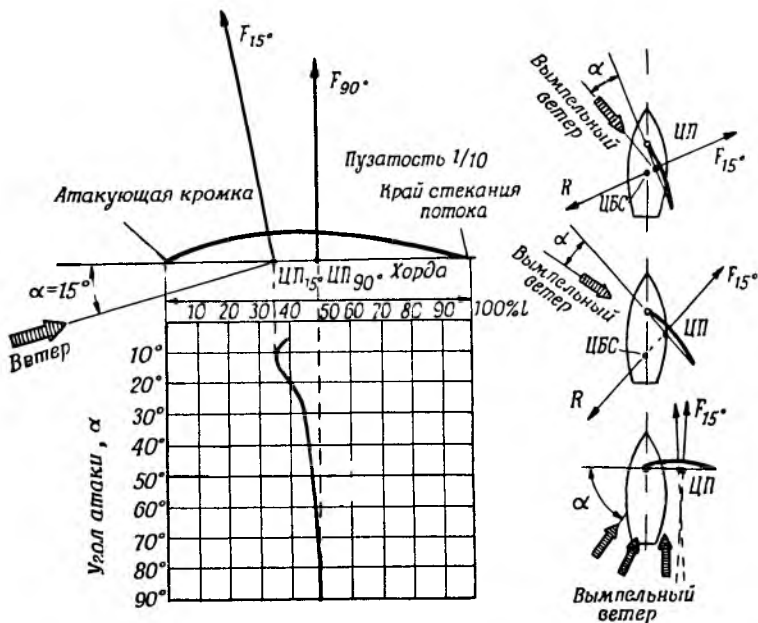


Рис. 105

установки паруса относительно ветра, т. е. от угла атаки α . На малых углах атаки ц. п. находится ближе к передней шкаторине и с увеличением угла атаки до 90° перемещается по направлению к середине паруса, т. е. приближается к геометрическому ц. п. Рассматривая рис. 105, можно представить, в каких границах происходит такое перемещение точки ц. п. Оно выражено в процентах длины хорды профиля паруса l . График построен для модели с удлинением 5 и полнотой пуза 1:10. Попробуем объяснить, почему точка приложения равнодействующей аэродинамической силы при малых углах ата-

ки находится ближе к мачте. Для этого сравним, как располагаются давление и разрежение на парусе (см. рис. 8 и 11). Не трудно убедиться, что на малых углах атаки в передней части паруса находится область самых высоких разрежений. Следовательно, в этой области лежит точка приложения равнодействующей силы. С увеличением угла атаки расположения давлений и разрежений на поверхности паруса становятся более симметричными по отношению к передней и задней шкаторинам паруса (см. рис. 12, б). Очевидно, что и равнодействующая сила должна перемещаться в сторону середины паруса. При угле атаки, равным 90° , равнодействующая аэродинамическая сила будет проходить через геометрический центр площади паруса.

Векторы сил F при $\alpha = 15^\circ$ и F при $\alpha = 90^\circ$ (см. рис. 105) показывают крайние положения точек приложения и направления действия равнодействующих сил, обычно наблюдаемые на практике. Когда угол атаки $\alpha = 15^\circ$, сила F приложена на расстоянии около 35% длины хорды профиля паруса, считая от передней шкаторины. С точки зрения аэродинамики следовало бы термин «передняя шкаторина» везде заменить термином «атакующее ребро», или «атакующая кромка паруса». Поэтому при дальнейшем изложении вопросов, касающихся аэродинамики парусов, понятия «передняя» или «задняя» шкаторины употребляются в смысле передней, атакующей кромки паруса или задней кромки паруса, с которого стекает воздушный поток.

Этот случай относится к движению яхты курсами от бейдевинда до острого бакштага, т. е. когда парус относительно ветра стоит под острым углом. По мере дальнейшего уваливания и увеличения угла атаки α равнодействующая сила F движется по направлению к геометрическому ц. п. Через геометрический ц. п. аэродинамическая равнодействующая сила проходит в одном только случае, когда угол атаки $\alpha = 90^\circ$, т. е. когда яхта идет курсом фордевинд. Это графически представлено вектором F_{90} на рис. 105. На этом же рисунке справа помещены три графика, наглядно поясняющих, как меняется положение точки приложения и направление силы с увеличением угла атаки. Отметим, что с ростом угла атаки точка пересечения линии действия аэродинамической силы с диаметральной плоскостью яхты постепенно перемещает-

ся в сторону кормы. В результате ц. б. с., через который проходит равнодействующая гидродинамическая сила R (вследствие суммарного действия погруженной части корпуса и пера руля), также должен изменить свое положение. Таким образом, ц. б. с. вовсе не «привязан» к геометрическому центру подводной части корпуса, как это многие считают. Его положение неразрывно связано с перемещениями ц. п. и изменениями направления равнодействующей аэродинамической силы. Подробно этот вопрос будет рассмотрен при разборе взаимодействия корпуса и руля в создании гидродинамических сил.

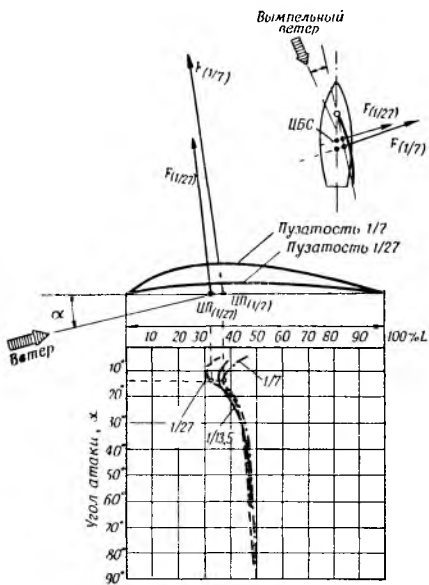


Рис. 106

метно приводиться. На рис. 106 показан график движения центра давления для трех моделей паруса с полнотой пуза в 1/7, 1/13,5 и 1/27 при одинаковом удлинении, равном —5. Линия действия аэродинамических сил менее пузатого паруса находится ближе к передней шкаторине паруса. Сравнивая положение ц. п. парусов с полнотой пуза 1/7 и 1/27 при угле атаки α около 14° , заметим, что разница между ц. п. 1/27 и ц. п. 1/7 равна примерно 4% длины хорды. Учитывая это и одновременно направление действия аэродинамических сил, можно представить, какое влияние оказывает аэродинамика вооружения на расположение ц. б. с. Графически это показано на рис. 106. На курсе фордевинд, когда угол атаки $\alpha = 90^\circ$, фактиче-

ский ц. п. независимо от степени его полноты совпадает с геометрическим ц. п.

Перемещения ц. п. (см. рис. 106) можно наблюдать на всех моделях парусов различного удлинения. Не трудно понять, что изменение положения ц. п. в границах 35—50% длины хорды сечения паруса, показанное в единицах длины, будет больше у парусов с меньшим удлинением при условии, что площади обоих парусов равны. Таким образом, у гафельного паруса точка ц. п. может находиться от геометрического ц. п. дальше, чем у бермудского. Поэтому на яхтах с гафельным вооружением может встретиться больше ошибок в центровке яхты, чем на яхтах с высокими и узкими парусами.

Принимая во внимание все, что было сказано относительно расположений ц. п. и ц. б. с., можно сделать следующие выводы: на яхтах с высоким, бермудским вооружением действительный и геометрический центры парусности отдаляются друг от друга сравнительно мало, поэтому ц. п. не следует выносить далеко вперед относительно ц. б. с. На яхтах с низким и широким гафельным вооружением ц. п. необходимо выносить вперед на большее расстояние от ц. б. с.

Очевидно, эти положения будут правильны при условии, если иные влияющие факторы, как, например, длина корпуса, остойчивость и др., будут одинаковыми.

в) Центр парусности для системы вооружения: грот, стаксель и бизань

Определяя ц. п. для комбинации одновременно работающих парусов, надо помнить об одном важном обстоятельстве, а именно: об эффективности работы каждого из них в отдельности. Из анализа расположения давлений на гроте и стакселе нам известно, что стаксель может работать в два раза эффективнее грота. Следовательно, прежде всего нельзя согласиться с тем, что положение общего центра парусности (о. ц. п.) этих парусов будет зависеть только от размеров их площадей, как это обычно считают на практике (см. 103). С другой стороны, определить эффективность работы различных комбинаций парусов без тщательных экспериментов не легко. Было бы недопустимым упрощением принять для расчетов, что коэффициент полезного действия стакселя в два раза больше, чем у грота.

Чтобы облегчить нахождение о. ц. п. для комбинации нескольких парусов, например: стаксель, грот и возможно бизань, — воспользуемся разумным допущением, принятым в лаборатории Давидсона (Институт Стивенса в Хобокене, США). Для этого обратимся к рис. 107, а, б, в.

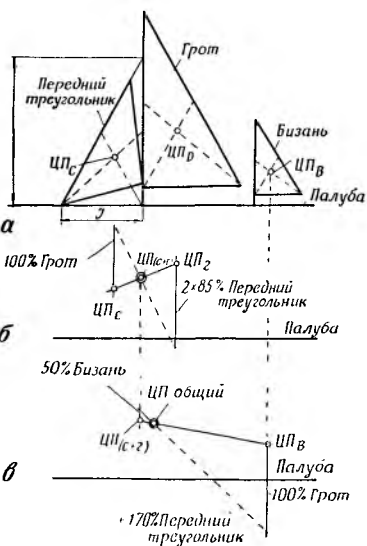


Рис. 107

обмера класса судов. На рис. 107, б предлагаемый способ показан более наглядно. Можно видеть, что о. ц. п. грота и стакселя расположен ближе к стакселю и находится почти на оси мачты, несмотря на то, что площадь грота значительно больше площади стакселя. Доля участия стакселя, благодаря его более высокой аэродинамической эффективности, подсчитана в размере 170% площади переднего треугольника. Когда на яхте имеется бизань, для определения положения о. ц. п. берется только 50% площади бизани.

Эффективность работы бизани, находящейся в аэродинамической тени впереди стоящих парусов, значительно снижена (см. рис. 107, в).

Рассчитанная подобным способом еще во время разработки проекта центровка впоследствии оправдалась при натуральных испытаниях яхты.

Сначала определим ц. п. отдельно для каждого паруса, полагая, что они находятся в геометрическом центре переднего треугольника, грота и бизани, как показано на рис. 107, а. Затем графически определим о. ц. п. для комбинации двух парусов, принимая, что доля участия грота определяется по его площади, взятой за 100%, а доля участия стакселя определяется по формуле:

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

где $0,85 \frac{I \cdot J}{2}$ является площадью переднего треугольника с коэффициентом 0,85, как это принято в правилах

Зависимость положения ц. п. от аэродинамической эффективности работы паруса не трудно обнаружить на практике во время настройки гоночных яхт. Например, иногда центровку яхты можно заметно улучшить, изменив только положение и угол установки нижней части стакселя. Переставлять мачту или менять соотношение площадей парусов не следует, пока не будут испробованы все другие варианты настройки.

14. Несколько замечаний по раскрою, уходу и дефектам парусов

Каждый рулевой, желающий улучшить гоночные свойства яхты, должен уметь оценивать качество парусного вооружения. Под качеством вооружения понимается форма сферической поверхности паруса, от которой зависит его аэродинамическая эффективность. Полагая, что парус сшит из доброкачественной ткани, к нему предъявляют следующие требования. Он должен иметь:

1) надлежащий профиль (полнота пуза) от основания и до верха паруса;

2) гладкую и плавную сферическую поверхность (без морщин и без изломов);

3) полные размеры, допускаемые правилами класса.

Независимо из чего сшит парус (хлопчатка, дакрон, нейлон) во время эксплуатации его форма будет несколько изменяться: у хлопчатобумажного паруса больше, у синтетического меньше. Рулевой должен за этим следить, и, возможно, потребуется кое-что перешивать. Парус, изготовленный даже очень квалифицированным мастером, сразу хорошо стоять не будет.

Самый лучший портной не шьет без примерки. Это целиком относится и к изготовлению парусов, которое все еще остается искусством, несмотря на проводимые в этой области научные эксперименты.

Без всякого сомнения наилучший способ изучения паруса, его достоинств и недостатков — это способ самостоятельной пошивки парусов для своей яхты, что вполне возможно для небольших швертботов. Но большинство яхтсменов боятся стать на этот путь. Нехотя принимают они за работу по устранению даже вполне очевидных дефектов паруса, чаще всего привлекая для консульта-

ции парусного мастера. А между прочим самый квалифицированный мастер не в состоянии исправить и довести парус так, как это может сделать сам рулевой, знающий все особенности и дефекты своего паруса. Только рулевой имеет возможность наблюдать за своим парусом длительное время и в любых условиях погоды и плавания. Примером этому может служить неоднократно чемпион олимпийских игр и мира датчанин Пауль Эльвстрем.

Он начал шить паруса для своей яхты и, постепенно расширяя свою деятельность, стал одним из самых известных парусных мастеров в мире.

Однако прежде чем приступить к раскрою ткани для паруса, необходимо овладеть определенными знаниями, а именно:

- а) знать технологическую характеристику ткани, из которой собираетесь шить парус;
- б) усвоить основы раскроя паруса;
- в) изучить причины, вызывающие дефекты паруса;
- г) уметь правильно оценивать аэродинамические качества паруса.

Безусловно, кроме всего перечисленного, надо обладать еще способностями к наблюдению и анализу. Но даже если самому шить не захочется (например, из-за трудностей шитья большого паруса), хорошее знание ответов на пункты *а*, *б*, *в* и *г* намного облегчит переговоры с парусным мастером.

Кто этого не знает, обязательно встретится с трудностями при заказе новых парусов или исправлении имеющихся.

а) Физические свойства парусных тканей

В работе парус подвержен действию разных по величине и направлению сил, начиная от давления ветра, дождя, натяжения снастей и т. п. Под влиянием этих сил ткань паруса подвергается растяжению, причем в разных его местах оно неодинаково, и форма, приданная парусу при раскрое, может искажаться чаще всего в нежелательном направлении.

Парусная, как и всякая другая, ткань деформируется в разных направлениях неодинаково, что непосредственно связано с технологией ее изготовления. Процесс создания ткани заключается в том, что прямую нитку утка

протягивают между изогнутыми нитями основы. Более извилистая нить основы способна к большему растяжению, чем более прямая нить утка. На рис. 108 даны характеристики (на растяжение) трех сортов английского терилена фирмы «Ричард Хейворд К°». Номера ткани 17, 215 и 32 весят соответственно 135, 165 и 250 г/м².

Испытания проводились на полосках шириной 2,54 мм, вырезанных из ткани в следующих направлениях:

- вдоль по утку — А
- вдоль по основе — В
- по диагонали (45°) — D
- 22,5° по отношению к утку — С
- 22,5° по отношению к основе — E.

Длина испытываемых полос ткани равна 380 мм, вес груза 6,1 кг. В таблице на рис. 108 приводятся удлинения ткани, полученные в этих условиях испытаний.

Можно отметить, что по диагонали ткань тянется значительно больше, чем по основе или утку. При испытании на растяжение в направлениях основы или утка ткань кажется более жесткой и прочной, в направлении тяги заметной склонности к образованию фалд не наблюдается.

Когда напряжения в ткани располагаются равномерно по утку и основе, поверхность ткани остается гладкой, т. е. плоской, без морщин или фалд. Как только напряжения по одному из этих натяжений становятся больше, на поверхности ткани появляются фалды, расположенные вдоль больших напряжений. Однако по основе и ут-

Вес парусины в гр/м ²	№г	Растяжение в мм вдоль					число рядов фалд на 100мм	
		А	С	D	E	В	Основа	Утки
135	17	7,9	36,5	57,2	34,9	6,4	92	76
165	215	9,5	22,2	31,7	15,9	2,4	71	71
250	32	2,4	15,9	30,2	15,9	5,5	55	52

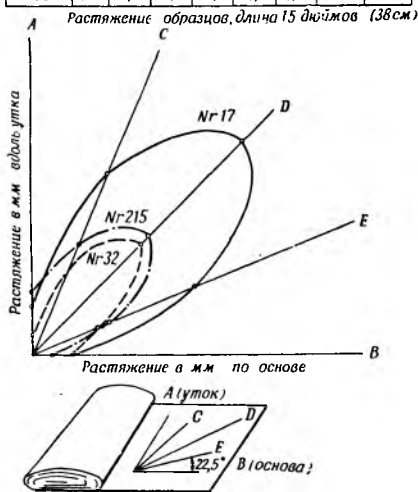


Рис. 108

ку они не так уж велики. Но они заметно увеличиваются, когда ткань растягивается под углом к основе или утку, и достигают максимума при диагональном растяжении, когда ткань растягивается под углом 45° к основе и утку.

Диагональная сопротивляемость ткани растяжению в значительной степени зависит от плотности набивки материала, т. е. от количества нитей основы и утка, помещенных на одном дюйме длины ткани. Чем плотнее материал, тем он более стоек. Так, например, хорошая парусина весом 130 г/м^2 должна иметь на дюйм длины около 100 нитей как по основе, так и по утку. Весьма желательно, чтобы число нитей по основе и утку было одинаковым, что особенно важно для синтетических тканей дакрон и других, высокая степень гладкости которых позволяет им легко скользить и сдвигаться относительно друг друга. Сравнение характеристик тканей 17 и 215 на рис. 108 легко нас убеждает в том, какое большое значение имеет одинаковая набивка по утку и основе. Ткань 215, набитая «по квадрату», значительно лучше ткани 17, набитой «по прямоугольнику».

Когда число нитей на дюйм длины недостаточно, получается малопрочная и недостаточно плотная ткань, которая будет продуваться ветром. Следовательно, разность в давлениях и разрежениях на наветренной и подветренной сторонах паруса будет уменьшаться, и аэродинамические свойства паруса начнут теряться.

Для исправления структурных недостатков дакроновой ткани и снижения продуваемости в конце технологического процесса ткань смачивают синтетической смолой и затем пропускают через нагретые вальцы. В результате такой обработки, называемой каландрованием, происходит как бы склеивание всех нитей ткани. Продуваемость ткани устраняется практически полностью, а поверхность приобретает почти стеклянную гладкость и блеск.

Однако каландрование и пропитка смолой могут не дать желаемых результатов, если ткань набита слишком слабо. Под влиянием больших переменных нагрузок, испытываемых парусом во время сильного ветра, частично склеенные нити могут отрываться друг от друга. Ткань может прийти примерно в такое же состояние, которое она имела до процесса каландрования.

Практически это проявится в том, что хорошо скроенный и сшитый дакроновый парус потеряет свою форму после нескольких гонок при сильном ветре. Такой парус будет непригоден для гонок, и чем легче была ткань, тем скорее его можно испортить. Учитывая свойства ткани при раскрое, ее надо располагать так, чтобы наибольшие напряжения в работающем парусе приходились на основу или уток — наиболее прочные направления ткани.

Возьмем для примера бермудский парус (рис. 109), работающий с аэродинамической силой F . Этой силе ткань должна противопоставить равную и противоположно направленную реакцию R . Поскольку аэродинамические силы воспринимаются только волокнами ткани, силу реакции R можно разложить по правилу параллелограмма на два направления соответственно кривизне формы паруса. Принимая во внимание усилия в плоскости утка (рис. 109, б и в), заметим, что равновесие наступит тогда, когда сила натяжения шкотов уравновесит аэродинамическую силу F . Величина этой силы будет зависеть от степени выбора шкотов, что, как известно, сильнее всего на острых курсах. На более полных курсах, когда парус становится менее плоским, напряжения в волокнах ткани уменьшаются.

Аналогично можно проанализировать действие силы F и реакции R вдоль основы (см. рис. 109, в, г). Аэродинамическая сила F действует таким образом, что стягивает ткань к середине паруса, вызывая увеличение полноты профиля, т. е. пузатость паруса. Ей противостоят усилия M и L , как составляющие реакции R . Усилия M передаются мачте, а усилия L — на заднюю шкаторину. Можно предполагать, что сравнительно с передней слабо укрепленная за счет лат задняя шкаторина склонна к изгибанию в сторону середины паруса, и тем сильнее, чем свежее ветер. В результате в районе задней шкаторины парус будет склонен к деформации и смещению максимума пуза в сторону задней шкаторины.

Наибольшие напряжения в ткани появляются в районе задней шкаторины, где парус имеет наиболее плоский профиль, т. е. вдоль линии $A-A$. Поэтому ткань должна быть расположена таким образом, чтобы именно в этом направлении она была наиболее прочной на растяжение. Приступая к раскрою паруса, прежде всего надо представить себе направления действия наибольших на-

пряжений и соответственно раскладывать материал. Надо полагать, что правильный раскрой сам по себе не сможет устранить в будущем деформацию паруса, если прочность ткани не соответствует условиям работы.

В результате многолетнего опыта парусные мастера установили определенные нормативы, которыми надо руководствоваться, выбирая ткань в зависимости от площади, назначения паруса и условий его работы.

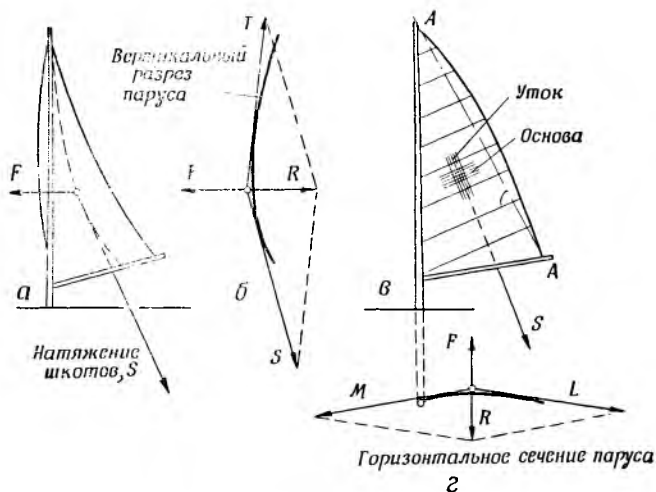


Рис. 109

Прочность парусных тканей практически принято характеризовать весом квадратного метра ткани в граммах. На рис. 110 даны рекомендуемые характеристики парусины для парусов крейсерско-гоночных яхт. В Англии принято указывать вес квадратного ярда в унциях, в США — вес ткани на ярд длины, считая, что ширина ткани равна 28,5 дюйма, или 72,5 см. Это следует учитывать во избежание ошибок при заказе ткани: английский стандарт тяжелее американского. Например, английский терилен весом в 6 унций будет соответствовать американскому дакрону весом 4,8 унции.

Для яхт, предназначенных к плаванию по внутренним водоемам, можно брать ткань полегче, чем указано на графике. Многие квалифицированные яхтсмены предпочитают паруса, сшитые из более тяжелой ткани.

Этот взгляд можно считать правильным, если ориентироваться на один комплект парусов. Когда есть возможность получить несколько комплектов, лучше подобрать ткань по весу соответственно форме и назначению каждого комплекта.

Вопреки распространенному убеждению паруса из более тяжелой ткани бывают очень хорошими в слабый ветер, особенно на волнении. Парус лучше сохраняет форму, если он не будет реагировать на каждое отклонение мачты и повисать, как занавеска, когда ветер временно утихает.

По этим соображениям гоночные паруса предпочитают делать из несколько более тяжелых тканей, несмотря на то, что:

1) по соображениям прочности можно было бы шить парус из ткани значительно более легкой;

2) получить плавную, гладкую поверхность паруса из тяжелой ткани труднее, чем из легкой.

Чтобы парус не мять, лучше его хранить не в кисе, а навитым на гик. Появившиеся заломы можно прогладить слегка подогретым утюгом. Тщательное хранение паруса из синтетических материалов имеет определенное влияние на результаты гонок, особенно на слабых ветрах, когда любые морщинки и помятости ткани не разглаживаются под действием ветра.

б) Основы края грота

Рассматривая простейший четырехугольный рейковый парус (рис. 111, а), мы видим, что под действием ветра он автоматически приобретает некоторую пузатость. Прямые наружные его кромки изгибаются внутрь, как показано на рисунке. Стрелка f характеризует глубину изгиба поверхности паруса, иначе говоря, полноту или величину его пуза, образованного за счет укорочения пер-

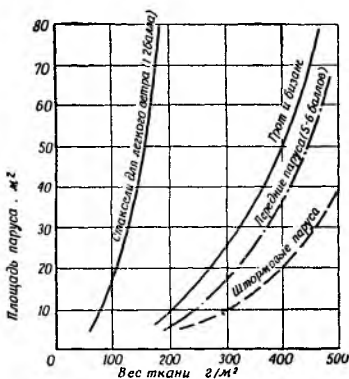


Рис. 110

воначальной ширины паруса АВ на величину $2X$. Если бы мы хотели сохранить края паруса прямыми и одновременно придать парусу кривизну с величиной стрелки f , нам пришлось бы добавить ткани по обеим сторонам паруса, как показано на рис. 111, б. Запас ткани, необходимый для получения заданного пуза, можно определить спрямлением дуги, заключенной между точками 1 и 2.

Разница между длиной отрезков CD и точками 1—2 даст величину необходимого запаса ткани в этом сече-

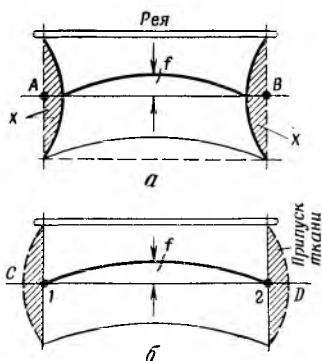


Рис. 111

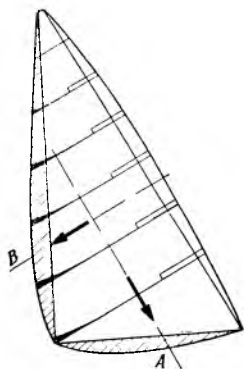


Рис. 112

нии. Приведенный пример знакомит нас с общими основами раскроя паруса.

Возьмем для примера хлопчатобумажный бермудский грот, поднятый на мачте и растянутый по гикю. Желая получить пузатый парус, мы должны при его раскрое соответственно добавить ткань по передней и нижней шкаторинам. Добавлять ткань надо пропорционально по двум направлениям — A и B (рис. 112), в противном случае на парусе будут образовываться фалды и желаемого профиля не получится.

Если запас ткани дать только по передней шкаторине, фалды пойдут по направлению A , т. е. там, где не хватает ткани. Фалды свидетельствуют о появлении в ткани чрезмерных напряжений, возникающих вследствие неравномерного натяжения нитей основы и утка. Нарушения плавности поверхности паруса указывают на ошибки, допущенные при раскрое. Таких недостатков можно избежать правильным раскроем паруса, при котором созда-

ются условия для пропорционального и плавного распределения напряжений между всеми нитями парусной ткани. Это первая и наиболее важная проблема при изготовлении паруса.

Достигается это не легко, и не для любого ветра удастся эти условия выдержать. Любой парус в зависимости от покроя лучше всего стоит в каких-то определенных границах силы ветра. На ветре другой силы, мень-

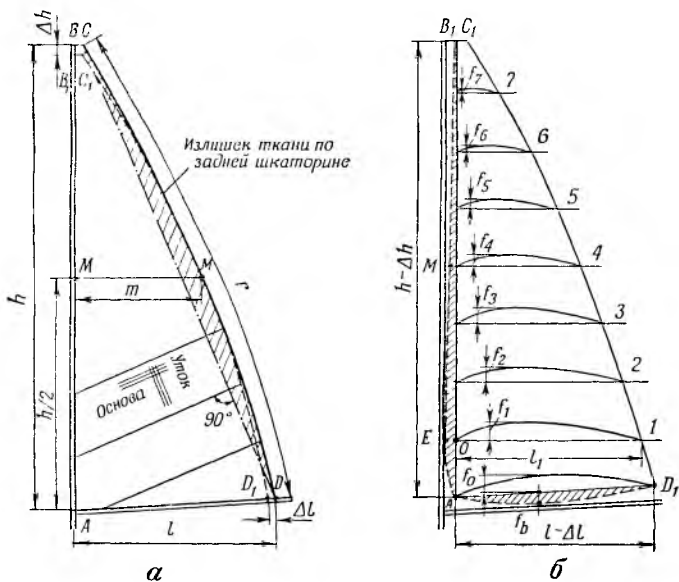


Рис. 113

шей или бóльшей, его форма уже не так безупречна. Парус обладает некоторой податливостью, степень которой надо предвидеть и учитывать при раскрое, т. е. следует учитывать поправку на растяжимость парусины под действием ветра. В зависимости от сорта и веса ткани размеры паруса по передней и по нижней шкаторинам будут меняться по-разному. На размеры паруса оказывают влияние помимо ветра натяжение фала, натяжение вдоль гика и тяга шкотов. Учитывая действие всех перечисленных сил, парус кроют меньших размеров по передней и задней шкаторинам с поправкой Δh и Δl (рис. 113, а).

Поправка по передней шкаторине h больше, чем по-

правка l по нижней шкаторине, что пропорционально величине действующих в этих направлениях напряжений. Итак, если размеры паруса, указанные в правилах класса, равны — $h=AB$ и $l=AD$, то размеры в крое должны быть: высота $h-\Delta h=AB_1$ и ширина $l-\Delta l=AD_1$. Размер m , контролируемый по правилам класса на разных высотах паруса, при раскрое не изменяется.

Можно сказать, что все искусство парусного мастера состоит в предвидении и практическом учете следующего:

1) необходимых поправок на растяжение ткани Δh и Δl ,

2) необходимого запаса ткани, заключенного между прямой AB_1 и кривой передней шкаторины и между прямой AD_1 и кривой нижней шкаторины.

На рис. 113, б этот запас ткани заштрихован. Для хлопчатобумажной ткани поправка по передней шкаторине берется в размерах от 2,5 до 4,0% от размера h , взятого из правил класса. Большая поправка необходима для парусов на сильный ветер. Для дакрона или терилена Δh берется от $1/3$ до $1/10$ от величины поправок, принятых для хлопчатобумажной ткани.

Какую поправку взять — большую или меньшую — зависит от характера окончательной обработки ткани: каландрования. Для дакрона высокого качества поправка Δh может быть даже 0,25—0,40% от размера h .

Поправка для нижней шкаторины не должна быть больше половины поправки, принятой для передней шкаторины, т. е. в пределах 1,2—2,0% для хлопчатобумажной ткани и 0,1—0,2% для дакрона.

Задняя шкаторина кроится тоже несколько короче, чем указано в правилах класса. Величина поправки зависит от качества ткани, но для хорошего дакрона на растяжение задней шкаторины следует брать не более 0,5% указанной в правилах ее длины.

Часто встречаются паруса, сшитые с расчетом на слишком большую вытяжку ткани, а следовательно, скроенные по уменьшенным размерам. Такие паруса не доходят до марок на рангоуте, и размеры их меньше разрешаемых правилами класса. Попытки дотянуть шкаторины до марок, чрезмерно натягивая фал или оттяжку, могут только испортить парус, поскольку возникают неравномерные напряжения большой силы.

Приступая к ликовке, надо учитывать вытяжку в пределах принятых поправок Δh и Δl .

Основное правило кроя паруса гласит: лучше скроить и сшить парус несколько больших размеров и потом его исправлять, чем меньших, а потом пытаться силой дотягивать его до нужных размеров.

Только в первом случае всегда можно получить в итоге отличный гоночный парус.

Учитывая поправки на вытяжку шкаторин, можно начертить кривые линии, определяющие запас материала по шкаторинам, необходимый для получения заданного пуза. Впоследствии во время эксплуатации паруса этот запас ткани переместится внутрь и образует нужный профиль паруса.

На чертеже с основными размерами паруса A , B_1 , C_1 , D_1 в масштабе $1/15$ или $1/10$ (см. рис. 113, б) сделаем несколько горизонтальных сечений 1 , 2 , 3 , 4 и т. д. на одинаковом друг от друга расстоянии. Допустим, что парус должен иметь пузатость $1/10$. Зная длину хорды l профиля в сечении 1 , определим стрелку $f_1 = 1/10 l$. Для простоты можно начертить профиль паруса в виде дуги круга. Поступая аналогично поочередно на всех горизонтальных сечениях, находим необходимый запас ткани. Заметим, что наши действия рассчитаны на применение прямой негнушейся мачты.

В сечении 1 величина запаса ткани выражена отрезком OE , находящимся в определенной пропорции к длине хорды l . Эта же пропорция соблюдается во всех остальных сечениях. Для полноты пуза $1/10$ запас материала EO равен $2,7\%$ l_1 . Для пуза $1/25$, $1/15$, $1/13$ и $1/7$ запас материала будет соответственно равен $0,7\%$, $1,2\%$, $1,6\%$ и $5,3\%$ длины хорды профиля.

Когда форма передней шкаторины начерчена, следует определить форму задней шкаторины таким образом, чтобы размер MM , предписанный правилами, был выдержан без сокращения. Здесь важно предостеречь парусников от горячего желания добиваться наибольшей площади паруса за счет максимальной величины задней шкаторины, что впоследствии может доставить много неприятностей.

Задняя шкаторина на сильном ветре будет или западать под ветер или заламываться на ветер (рис. 114, а и б). Кроме того, наблюдается тенденция к перемещению

ткани, заключенной между линией CD и шкаториной в сторону мачты, в результате напряжений, пытающихся выпрямить заднюю шкаторину (рис. 115). Короткие латы не в состоянии устранить такое перемещение. При очень сильном ветре и, следовательно, больших аэродинамических силах нарушается равновесие между напряжениями типа L (см. рис. 109, z) и обратной реакцией лат и напряжениями типа S и T .



Рис. 114

Линия CD (вдоль утка) начинает выгибаться в сторону центра паруса. В результате образуются фалды около внутренних концов латкарманов и увеличивается полнота пуза.

Задняя шкаторина может заламываться на наветренную сторону (см. рис. 114, b) потому, что сама шкаторина и парус по линии CD растягиваются неодинаково: латы вдавливаются в карманы тем сильнее, чем больше стрелка серпа. Этот дефект можно исправить (ослабив жесткость шкаторины) с помощью уменьшения зашивок или даже их уничтожения, заменяя швы горячей склейкой. Когда эта мера не поможет, надо уменьшить серп и длину задней шкаторины, может быть, даже за счет некоторого уменьшения площади паруса.

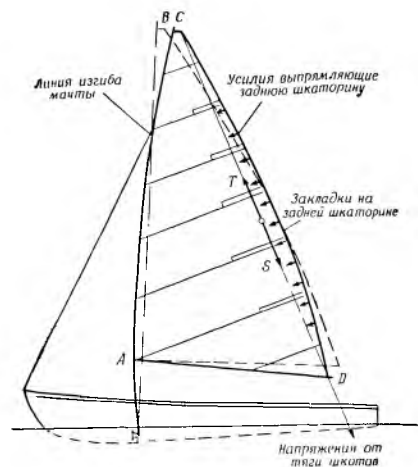


Рис. 115

Случается, что задняя шкаторина западает под ветер (см. рис. 114, a). При сильном ветре это может быть даже желательно, так как уменьшается крен яхты. При слабом ветре это — определенный дефект, полученный в результате выхаживания нового паруса при слишком

сильном ветре или вследствие недостаточной прочности ткани, например, в процессе каландрования нити ткани склеились недостаточно прочно и стали разделяться. В таком случае парус надо считать испорченным.

Основным правилом при раскрое грота на сильный ветер будет уменьшение серпа по задней шкаторине или даже прямая шкаторина без серпа.

Надо помнить, что увеличение площади паруса за счет серпа снижает его аэродинамические качества, которые зависят прежде всего от плавности и гладкости его поверхности.

Парус работал бы значительно лучше, если бы его нижняя шкаторина, вытягиваясь по гикю, постепенно не превращалась в прямую. При этом выгодная изогнутая форма низа паруса становится плоской. Были попытки сделать гик таким, чтобы внизу паруса сохранялось нужное пузо, однако такой гик сложен по конструкции, дорог, тяжел и потому не нашел широкого применения. Относительно плавный переход криволинейной поверхности паруса к прямому гикю достигается с помощью некоторого запаса ткани, оставляемого по нижней шкаторине паруса (см. рис. 113, б). Величину этого запаса возьмем в пределах 30—50% высоты профиля паруса f_0 , хордой которого будет длина нижней шкаторины на гике, т. е. отрезок AD_1 . Если например длина шкаторины по гикю равна 3,0 м, а пузатость 1/10, то наибольшая высота (стрелка) профиля паруса на этой длине будет $f_0 = 30$ см. Чтобы переход от пуза к прямому гикю сделать плавным, надо взять такой запас ткани, при котором наибольшая стрелка f_s была бы в пределах 30—50% f_0 , т. е. $f_s = 9—15$ см. Меньшее значение — 30% f_0 — берется для прямых, жестких мачт; большее — 50% — для гибких мачт, например на яхтах класса «Финн» и «Звездный».

Форма кривой, очерчивающей нижнюю шкаторину, имеет большое значение для качества всего паруса. Лучше всего очертания нижней шкаторины находить экспериментальным путем.

Такой путь наиболее целесообразен, когда шьется первый парус из ткани, свойства которой не изучены, а также когда неизвестно, как гнется рангоут. Тогда ликуют только переднюю шкаторину, а нижнюю приметывают, чтобы после постановки паруса можно было сделать необходимые поправки.

От положения стрелки кривизны нижней шкаторины $f_в$ (см. рис. 113, б) в большой степени зависит положение максимального пуза f_1, f_2, f_3, f_4 и т. д. вдоль сечений 1, 2, 3, 4 паруса. Чем ближе стрелка $f_в$ сдвинута к мачте, тем больше вперед сдвинется и максимальная полнота (пузатость) всего паруса. Надо иметь в виду, что когда у паруса наблюдается большая серповидность по задней шкаторине, то переме-

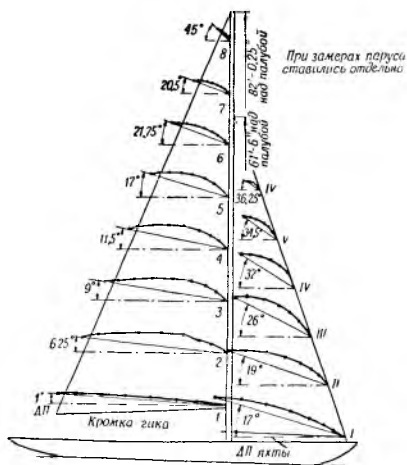


Рис. 116

ещение стрелки $f_в$ в крайнее переднее положение может вызвать отклонение шкаторины под ветер. Это отклонение наступит тем раньше, чем меньше будет кривизна нижней шкаторины по отношению к положению максимальной стрелки $f_в$ к задней шкаторине.

Если мачта не слишком гибкая, стрелку $f_в$ надо располагать в районе 1/3—1/2 длины нижней шкаторины паруса. Для эластичной

мачты, хорошо гнущейся на ветру, вероятно, лучше располагать стрелку $f_в$ посередине длины гика.

Ошибки, закравшиеся во время изготовления паруса, такие, например, как неудачное определение запаса ткани по шкаторинам, или неточности в подсчете поправок Δl и Δh , или, наконец, неудачная оббивка шкаторин и др., в конце концов, обнаружатся в том, что пузатость паруса на разных уровнях по вертикали будет разной. Для примера на рис. 116 показан профиль паруса, замеренный на яхте «ВИМ» класса «R=12 М». Во время замеров паруса ставились отдельно, чтобы задувание со стакселя не меняло профиля грота.

В таблице приводятся величины пуза на разных уровнях 1, 2, 3 и т. д. для грота и I, II, III и т. д. для стакселя, в процентах длины хорд профиля на этом уровне.

Отметим большое увеличение пуза в средних сечениях стакселя III и IV. На гроте обратим внимание на резкое

Грот		Стаксель	
сечение	полнота пуза в %	сечение	полнота пуза в %
1	1,2	I	5,9
2	9,1	II	11,8
3	11,4	III	17,0
4	12,7	IV	18,0
5	13,5	V	16,0
6	10,7	VI	—

нарушение плавности профиля в сечении 2, переходном от полного профиля 3 к плоскому профилю 1 около гика. Следует отметить большое скручивание грота, достигающее 40° с лишним. Таким образом, грот яхты «ВИМ» очень далек от «идеального», у которого профили 1, 2, 3, 4 и 5 и т. д. должны иметь одинаковые формы и полноту пуза и стоять относительно вымпельного ветра под одним и тем же углом. Тогда допустимое, обоснованное, скручивание паруса было бы не более нескольких градусов, отвечающих вертикальному градиенту изменения ветра.

Чем ближе форма паруса к «идеальной», тем он будет эффективнее аэродинамически. В действительности же существует некий определенный участок скорости ветра, в котором будет достигнут оптимальный для данного паруса компромисс между:

1) формой паруса, заданной при раскрое и затем деформированной под действием аэродинамических сил и тяги шкотов;

2) скручиванием паруса и вертикальным градиентом вымпельного ветра, в результате чего углы атаки на разных уровнях высоты мачты отличаются от оптимальных.

Заслуживает внимания способ соединения низа паруса с гиком, примененный Вильсоном (Новая Зеландия) и показанный на рис. 117. Его успешно применяли на маленьких яхтах и катамаранах. По замыслу он несколько напоминает Парк Авеню-гик: по его нижней шкаторине проходит сравнительно толстая и прочная лата, которую по желанию можно изгибать больше или меньше с помощью устройства, помещенного на конце гика. Щель между гиком и низом паруса прикрывается складкой ткани.

Это устройство позволяет придавать парусу любую форму пуза от топа мачты до гика. Одновременно ткань между гиком и нижней шкаториной паруса препятствует переходу ветра на подветренную сторону, чем снижается индуктивное сопротивление. Латы, проходящие через всю поверхность паруса, устраняют морщины при любой силе ветра.

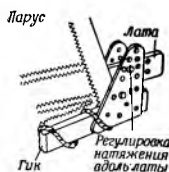
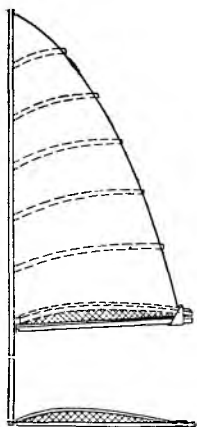


Рис. 117

Другим положительным качеством этого вооружения является возможность регулировать положение пуза в зависимости от силы ветра посредством подбора нужного профиля лат, а также степени изгиба.

в) Проблема гибкого рангоута

Рассмотренный способ (см. рис. 113) определения запаса ткани относится к парусам, работающим на прямой мачте, жесткость которой сохраняется при помощи штагов и вант.

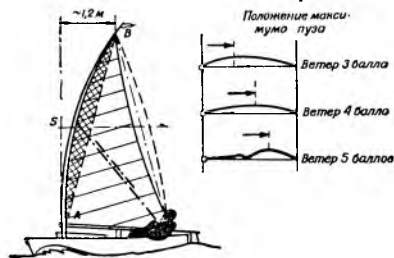


Рис. 118

Если мачта гнется, как, например, на яхтах класса «Звездный», «Финн» или «Летучий голландец», то, определяя кривизну передней шкаторины, надо учитывать степень и характер изгиба мачты.

На рис. 118 схематично показана яхта класса «Финн» на лавировке. Заштрихованная площадь между мачтой и линией АВ представляет часть паруса, которая изгибом мачты выбрана вперед. Можно предположить, что парусина будет перемещаться вперед не совсем так, как было предусмотрено при раскрое. В результате в некоторых частях парус

может быть слишком плоским, тогда как в других частях останется пузо того или иного размера. Следовательно, для получения равномерно пузатого паруса на гибкой мачте надо при раскрое предусмотреть дополнительный запас ткани, соответствующий кривизне изогнутой мачты. Окончательно для получения кривой передней шкаторины C (рис. 119) надо суммировать кривую A , необходимую для создания желательного пуза, с кривой B , представляющей изгиб мачты. Суммарная кривая C , по которой кроится передняя шкаторина, получается сложением стрелок кривых A и B .

Но учет гибкости мачты, введенный в крой паруса, не всегда обеспечивает сохранение правильной формы паруса. Когда мачта гнется слишком сильно, профиль паруса может деформироваться больше или меньше в зависимости от разных напряжений по основе и утку ткани.

Это схематично показано на рис. 118. Такое искажение профиля паруса будет увеличиваться пропорционально силе ветра и величине изгиба мачты, так как запаса ткани не хватит для покрытия недостачи впереди от линии AB (см. рис. 118).

Высокая структурная прочность дакрона препятствует компенсации такой недостачи за счет средних частей паруса. В результате передняя прилегающая к мачте часть паруса скорее теряет полноту и становится более плоской, чем его задняя часть. Положение максимального пуза перемещается назад, чему может еще способствовать большая прочность задней шкаторины (например, большие закладки). Для выравнивания напряжений в ткани, вероятно, придется применить регулирование способом, показанным на рис. 66, a и b .

Когда передние паруса поднимаются на штаге, идущем на топ мачты, мачта едва ли будет гнуться, и то только под действием сил, направленных вдоль ее оси. Если же штаг крепится примерно на $\frac{3}{4}$ высоты (рис. 120, b), мачта гнется удовлетворительно. На крейсерско-гоночных яхтах гибкие мачты не нужны, так как всегда есть возможность заменить паруса на ходу яхты.

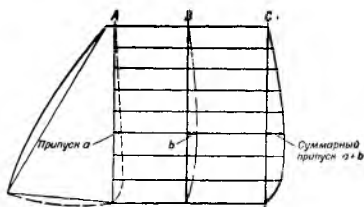


Рис. 119

На чисто гоночных яхтах, таких, как «Звездный» и «Дракон», во время гонки менять паруса невозможно, а следовательно, весьма желательно использовать преимущества, которые можно получить, применяя гибкие мачты.

Изгиб мачты, удерживаемой стоячим такелажем, будет зависеть:

- а) от жесткости самой мачты, ее сечений, материала, из которого она изготовлена;
 б) от устройства и крепления стоячего такелажа.

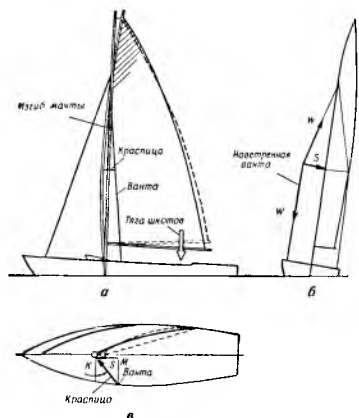


Рис. 120

Рассмотрим для примера устройство такелажа, аналогичное применяемому на яхтах класса «Звездный» (см. рис. 120). Нетрудно заметить, что кривизна изгиба мачты будет зависеть: от положения точки крепления штага, от высоты установки краспиц и от угла K , под которым они поставлены. Этот угол зависит от местоположения вант на палубе. Мачта будет гнуться назад под действием натяжения шкотов,

а также в значительной степени автоматически, под действием возникающих на парусе аэродинамических сил.

Как только наветренная ванта натягивается с силой W , краспица будет давить на мачту с силой S (см. рис. 120, б и в). Поскольку сила S действует под некоторым углом, появляется слагаемая сила M , выгибающая мачту вперед тем сильнее, чем свежее ветер.

Сильно гнущиеся эластичные мачты, например, как на яхтах класса «Финн» или «Звездный», создают много проблем для парусного мастера, но зато обладают огромными преимуществами, позволяя регулировать пузатость паруса в зависимости от силы ветра.

Вспомним общую формулу для определения равнодействующей аэродинамической силы: $F = 0,0625 \cdot V_k^2 \cdot S \cdot C$.

При чрезмерной скорости вымпельного ветра V_k для борьбы с креном следует уменьшить аэродинамическую силу F . Для этого надо уменьшить площадь парусности

С, взяв рифы, или снизить величину аэродинамического коэффициента C , уменьшая полноту пуза паруса, т. е. делая парус более плоским путем изгиба мачты.

Второй метод впервые с большим успехом был использован немцем Хютчлером на Олимпийских играх 1932 года. Это было революцией в гоночной технике для малых яхт. С развитием гонок взятие рифов на яхтах олимпийских классов стало редкостью, а умение приспособить паруса к меняющимся условиям погоды приобретало все более важную роль. Подгонка паруса к особенностям мачты или, наоборот, мачты к парусу является делом, требующим от парусного мастера и рулевого больших знаний и наблюдательности.

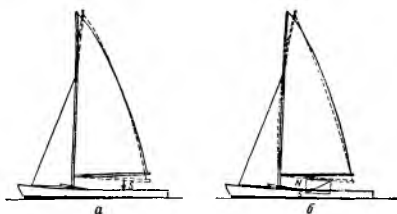


Рис. 121

Контролировать изгиб свободно стоящей мачты на яхтах класса «Финн» довольно трудно. Мачта гнется в зависимости от своей общей жесткости, и прежде всего от величины и формы поперечных сечений на разных высотах. Без переделки мачты рулевой практически может влиять только на величину, а не на характер изгиба мачты. В других же классах, как, например, «Звездный», «Летучий голландец», команда может влиять как на величину, так и на характер изгиба мачты.

На рис. 121 показано, как можно регулировать изгиб мачты посредством различной проводки шкотов. В примере *a* направление тяги шкотов вертикальное, изгибаться будет в основном верх мачты, выше точки крепления штага. В примере *б* тяга шкотов направлена под углом к мачте. Возникает сила, действующая вдоль гика, которая будет изгибать мачту вперед. Таким образом, меняя проводку шкотов относительно длины гика, можно влиять на характер изгиба мачты.

В зависимости от материала, из которого сделана мачта (сосна, ель, алюминий), она будет гнуться по-разному.

Таким образом, все это еще раз подтверждает, насколько сложна проблема раскрытия парусов, отвечающих требованиям гонок, даже для одного класса яхт.

Изгибание гика заметно влияет на форму поверхности паруса и на его пузатость. Аналогично с мачтой гик может гнуться независимо от желаня рулевого, и можно предусмотреть заранее желательный изгиб гика.

Характер изгибания гика зависит от его жесткости, поперечных размеров и формы, с одной стороны, и от способа проводки шкотов — с другой. Особенно поддаются регулированию гики круглого сечения.

В зависимости от точки крепления шкотов на гике могут быть три следующие комбинации:

1) шкоты крепятся только к ноку (рис. 122, а). При сильном ветре гик выгибается вверх, увеличивая пузатость паруса, что нежелательно во время лавировки. Чем больше аэродинамическая сила, тем сильнее гнется гик, что очень невыгодно. Только на полных курсах сильно согнувшийся гик не будет вреден, поскольку рост аэродинамических

сил почти не влияет на поперечную остойчивость яхты;

2) шкоты крепятся за нос и за середину гика (рис. 122, б). Этот способ крепления позволяет сохранить прямой гик почти без всякого изгиба на любом курсе, независимо от силы ветра;

3) шкоты крепятся за середину гика (рис. 122, в). При этом способе крепления шкотов гик гнется посредине вниз и тем самым пузатость паруса уменьшается. Перемещая точку крепления шкотов вдоль гика, можно в определенных границах влиять на характер изгиба, а следовательно, и на уменьшение полноты пуза паруса.

Паруса из синтетических тканей очень чувствительны к растяжению по мачте и гику. Когда фал и оттяжка на ноке гика перебираются вдоль мачты и гика, появляются характерные фалды. Если шкаторины чрезмерно не натянуты, такие фалды на лавировке должны пропасть

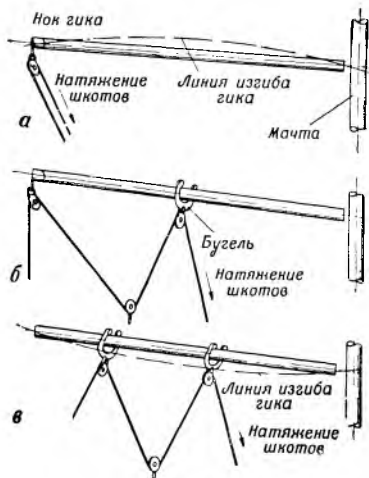


Рис. 122

Выхаживанием положение максимального пуза и плавность всей поверхности постепенно доводятся до желаемых. Дакроновый парус без выхаживания должен иметь вполне удовлетворительные размеры и форму сразу же при первой установке на рангоуте. Это «безжалостный» материал по отношению к парусному мастеру: все ошибки края будут видны при первой постановке паруса. Следовательно, при раскрое синтетических парусов должны учитываться свойства этих тканей.

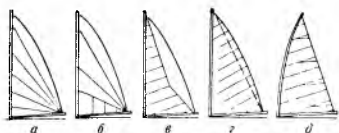


Рис. 124

На рис. 124 показано несколько необычных способов раскроя, применявшихся с целью получения более плоского паруса в районе задней шкаторины. Новизна края (см. рис. 124, а, б, в и г) заключается в своеобраз-

ной раскладке полотнищ, цель которой — позволить возможно больше вытягиваться парусу в районе задней шкаторины.

В способе раскроя паруса (см. рис. 124, д), запатентованном Мишелем Оклером, в швах задней шкаторины сделаны вставки клиньев из более эластичной ткани, чем дакрон.

Считая плоскую заднюю шкаторину критерием качества паруса, вспомним о латах, помогающих сохранить форму задних частей паруса. Несомненно, сквозные латы, проходящие через весь парус, будут наилучшим решением. Они помогают добиться плавности поверхности паруса. Латы должны быть эластичными, неломкими и достаточно жесткими к своим внешним концам, чтобы поддерживать парус плоским около задней шкаторины. Латы, имеющие постоянную толщину по всей длине, никуда не годятся. Жестковатые латы лучше чрезмерно эластичных. Невозможно обойтись одним комплектом лат для разных парусов и различных метеорологических условий. Жесткость лат должна соответствовать пузу паруса и силе ветра.

При сильном ветре надо ставить более жесткие латы, но и самые жесткие из них должны быть эластичными к внутренним концам, чтобы парус не ломался у латкарманов. Для дакроновых парусов нужны более жесткие латы, особенно около внешних концов.

г) Раскрой передних парусов

Передние паруса имеют в основном треугольную форму. Как правило, они не крепятся к рангоуту и свободно растягиваются между тремя точками: фаловым, галсовым и шкотовым углами. В результате все шкаторины паруса в той или иной степени могут изгибаться в зависимости от: а) силы ветра, б) жесткости штага, в) натя-



Рис. 125

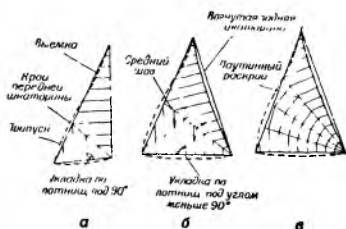


Рис. 126

жения шкотов, г) прочности ткани, из которой шит парус.

Поэтому спроектировать хороший стаксель с правильно расположенным пузом труднее, чем грот.

Рассмотрим это на примере стакселя, помещенного на рис. 84. Парус скроен с прямой передней шкаториной, как, между прочим, и рекомендуется в некоторых руководствах по парусному спорту. Посмотрим, как будет вести себя пузо паруса на лавировке в зависимости от изгиба передней шкаторины, т. е. атакующей кромки паруса. Можно предвидеть, что пузо будет увеличиваться в каждом сечении по высоте паруса неодинаково. Это увеличение возможно за счет перемещения части ткани (на рисунке заштрихована) в сторону задней шкаторины. Самым пузатым парус будет в сечении S_3 , где отношение стрелки изгиба штага к хорде профиля окажется наибольшим. У скроенного таким образом паруса пузо начнет увеличиваться вверху быстрее, чем внизу. Это наиболее часто встречающийся дефект парусов. При выбранных шкотах стаксель начинает задувать на грот. Еще хуже будет работать стаксель, у которого передняя шкаторина скроена, как показано на рис. 125, хотя такой покрой можно встретить в рекламных публикациях.

Итак, при правильном раскрое стакселя нельзя не учитывать изгиба штага, особенно для узких и высоких парусов. Рассматривая форму кривизны передней шкаторины горта, мы установили, что для пуза в $\frac{1}{7}$ необходим запас ткани около 5% от длины хорды профиля грота. В случае высокого, узкого стакселя отношение стрелки изгиба штага к длине хорды профиля может быть значительно больше 5%, а увеличение пуза столь большим, что начнется задувание, даже если стаксель не заходит за грот.

Вредное влияние изгиба штага пытаются уменьшить с помощью набивания штага до предела. Отсюда и широко известный совет «набивать штаг как струну». Совет, безусловно, правильный, но только частично, не для всех классов яхт. На конструктивно легких яхтах, например на «Летучем голландце», жесткость корпуса ограничена и чрезмерное натяжение такелажа может вызвать деформации.

Но даже и на жестких корпусах нельзя так натянуть штаг, чтобы он совсем не прогибался. Следовательно, совершенно необходимо вводить поправки в раскрой передних парусов: кривизна передней шкаторины в нижних частях паруса должна быть выпуклой, а в верхних — вогнутой (рис. 126, а).

Окончательно форму передней шкаторины можно определить только экспериментальным путем, несколько раз ушивая парус и пробуя его на ходу. Цель — добиться такого паруса, чтобы можно было совсем устранить или свести до минимума вредное задувание на грот.

На увеличение пуза паруса аналогично влияет и кривизна задней шкаторины. Для сильного ветра у стакселя лучше делать заднюю шкаторину вогнутой. Вогнутая шкаторина не только уменьшает возможность сильного роста пузатости в верхних частях паруса, но и предотвращает заворачивание на наветренную сторону или полоскание.

Правила многих классов яхт не оговаривают обязательную форму парусов, применяемую для различных условий погоды, например если надо уменьшить площадь парусности в сильный ветер. Тогда возникает вопрос, что лучше выбрать: а) высокий узкий стаксель с короткой нижней шкаториной или б) низко стоящую геную с длинной нижней шкаториной и короткой передней.

Часто пользуются правилом «а», однако испытания, проведенные на яхтах класса « $R=12M$ » и «Летучий голландец», показали, что выгоднее действовать по правилу «б». В пользу такого выбора можно привести следующие соображения:

1) с низкой генуей штаг будет гнуться меньше, а пузо если и будет увеличиваться, то незначительно по сравнению с высоким узким стакселем;

2) понижается центр парусности, а следовательно, уменьшается крен;

3) низкая постанровка паруса, при которой нижняя шкаторина почти касается палубы, способствует уменьшению индуктивного сопротивления стакселя (см. рис. 25 и 26).

У низкого генуэзского стакселя есть еще один источник увеличения пуза, которого нет у стакселей высоких и узких. Этот источник — сравнительно большая способность к растяжению по направлению центрального шва паруса. Полотнища ткани расположены в этом шве по диагонали (см. рис. 126, б), т. е. по линии наименьшего сопротивления ткани. У генуэзского стакселя средний шов в два-три раза длиннее, чем у обычного стакселя. Примерно настолько же увеличится пузо за счет вытяжки ткани в районе среднего шва.

У хлопчатобумажного паруса местные деформации, появившиеся в районе среднего шва, благодаря большой эластичности всей ткани легко выравниваются. На дакроновом же парусе они проявляются резко и тем сильнее, чем легче ткань. Бороться с этим дефектом раскроя паруса можно двумя способами:

а) увеличением растяжимости ткани по задней и нижней шкаторинам. Для этого полотнища ткани укладывают под углом менее 90° (см. рис. 126, б). При таком крое парус будет более равномерно растягиваться по всей площади и в какой-то мере компенсировать растяжение по среднему шву;

б) применением нового раскроя паруса, получившего название паутинообразного (см. рис. 126, в). Полотнища ткани соединяются в нескольких швах под более выгодными углами, чем при крое с одним центральным швом. Этот раскрой дает более равномерное распределение напряжений по всему парусу и способствует смещению максимального пуза вперед и удержанию задней половины

паруса наиболее плоской. Как видно, этому помогает группирование большого количества швов около шкотового угла, упрочняющих ткань.

С увеличением пуза в районе среднего шва можно бороться посредством зашивок, сокращающих длину среднего шва, как показано на рис. 126, б.

Применяя зашивки, можно исправить дефекты как новых, так и уже работавших парусов.

В комплекте передних парусов желательно всегда иметь особый стаксель с большим пузом, пригодный для полных курсов. При крое такого паруса надо оставить запас ткани по передней и нижней шкаторинам, а задняя шкаторина может быть прямой (см. рис. 125).

д) Настройка такелажа

Среди яхтсменов можно встретить самые крайние взгляды относительно настройки стоячего такелажа: по мнению одних, такелаж должен быть сравнительно свободен, другие же, наоборот, предлагают вытяжку такелажа «в струну».

Очень часто последователи любого из этих взглядов не имеют для этого никаких обоснований, кроме веры в непогрешимость именно такого способа. Следует сразу же подчеркнуть, что оба эти способа настройки стоячего такелажа не влияют на ходовые качества яхты. Основное назначение стоячего такелажа — поддержание рангоута (мачт, рей и т. д.) и поднятых на них парусов.

В зависимости от деталей доводки такелажа у экипажа имеются возможности, регулируя такелаж в определенных границах, влиять на форму и взаимное положение парусов, т. е. влиять на эффективность парусного вооружения. Пример такого регулирования гелуэзского стакселя был рассмотрен на яхте класса «Летучий голландец» (см. рис. 89).

Другой пример: ослабив ромбанты и позволив мачте с помощью шкотов больше гнуться в определенном месте по высоте, можно уменьшить пузо в этой части паруса.

В качестве общего положения можно принять следующее: настройка и регулирование стоячего такелажа имеет значение в той степени, в какой они влияют на форму и профиль парусов, аэродинамику их взаимодействия и на центровку яхты.

В сущности нельзя рекомендовать одни и те же рецепты, одинаково обоснованные для яхт разных классов и в различных условиях плавания.

Если ослабить подветренную ванту на полных курсах, несомненно, грот будет работать лучше, так как профиль его не станет переламываться. Задачу ослабления подветренных вант можно решить двумя путями:

1) держать обе ванты достаточно свободными. При этом мачта будет несколько уходить под ветер или изги-

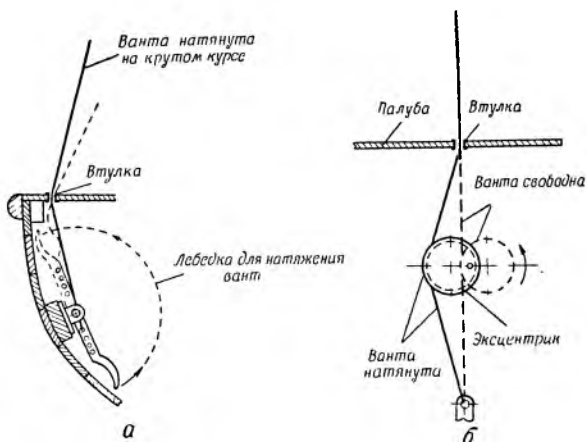


Рис. 127

баться вбок, что зависит от проводки вант. Этот путь настройки, очевидно, применяется сторонниками «свободного такелажа»;

2) держать обе ванты хорошо обтянутыми, но подветренную в случае надобности ослаблять на полных курсах с помощью специальных устройств (рис. 127, а, б), расположенных под палубой (лебедка, рычаг и т. п.).

Второй способ, безусловно, предпочтительнее первого, так как мачта при этом не сгибается вбок, что может заметно ухудшить обдувание грота по подветренной стороне.

Каждый класс яхт имеет свои проблемы в регулировании и настройке стоячего такелажа, который следует рассматривать индивидуально. Но в любом случае, намереваясь заняться настройкой или доводкой стоячего таке-

лажа, надо прежде всего ясно ответить на следующие два вопроса:

1) что мы желаем получить, какие цели поставили себе и что для этого собираемся сделать?

2) как намеченные изменения в положении, конструкции, характере стоячего такелажа могут отразиться на центровке яхты?

ГИДРОМЕХАНИКА ПАРУСНОЙ ЯХТЫ

1. Гидродинамическое сопротивление корпуса

Скорость парусной яхты значительно меньше скорости буера из-за сопротивления воды ее движению. Это сопротивление очень сильно возрастает с увеличением скорости яхты. Причин для этого несколько. Независимо от типа яхт, будь то килевая водоизмещающая яхта или новейший глиссирующий швертбот, часть выработанной парусами энергии отдается воде. Например, образование волн от движения корпуса требует расхода энергии и, следовательно, является одним из видов сопротивления движению в водной среде.

Волновое сопротивление — самое наглядное, но не единственное гидродинамическое сопротивление, преодолеваемое яхтой за счет расхода энергии ветра. Во время движения, помимо волнообразования, возникает ряд иных явлений, столь же вредных для скорости яхты. В определенных условиях плавания появляется резкий барьер гидродинамических сопротивлений, ограничивающий дальнейший рост скорости, а также способность яхты идти круто к ветру.

Обтекание корпуса яхты водой, даже если она движется без крена и дрейфа, относится к сложным явлениям. Меняющаяся форма подводной части корпуса, движение яхты по деформированной поверхности двух сред — воздуха и воды, — крен и дрейф — вот причины сложности анализа движения яхты с точки зрения гидродинамики.

Опираясь на современные методы измерения гидродинамических сопротивлений, общее сопротивление движению яхты в воде можно разделить на четыре составляющих сопротивления:

- 1) сопротивление трения — R_T
- 2) волновое сопротивление — R_B
- 3) индуктивное сопротивление — R_{II}

4) сопротивление крена — R_k

Суммарное сопротивление:

$$R = R_r + R_v + R_n + R_k.$$

Такая классификация сопротивлений принята прежде всего из-за легкости их измерения, а также благодаря простоте сравнения при обсуждении проблемы в целом. Можно было бы выделить еще вихревое сопротивление (сопротивление формы), образующееся в результате завихрения потока, обтекающего кормовую часть корпуса. Однако этот вид сопротивления невозможно измерить отдельно, и он частично входит в величину сопротивления трения и волнового сопротивления. К вихревому сопротивлению еще вернемся в последующем изложении.

В зависимости от типа яхты, ее скорости и курса плавания удельный вес составляющих сопротивлений 1—4, входящих в общее сопротивление R , будет меняться, и каждое из них может в значительной степени повлиять на ходовые качества яхты.

Наиболее надежным путем изучения всех явлений, связанных с движением корпуса в воде, будет экспериментальный путь. Замеры и наблюдения проводят на специально оборудованных яхтах в натуральных условиях или с помощью моделей в лабораторных условиях. Оба эти способа были впервые применены более 30 лет тому назад профессором Давидсоном в США. В настоящее время уже накоплено достаточно данных, позволяющих с большим приближением предвидеть поведение яхты в разных условиях плавания.

Испытания моделей дают возможность сократить время, необходимое для усовершенствования конструкции яхты. Опыт и знания, приобретаемые прежде в течение нескольких лет, теперь могут быть получены за несколько недель.

Исследования и измерения гидродинамических сопротивлений на моделях корпусов начаты профессором Давидсоном в США, а затем продолжены в других странах, ведутся по некоторой общей методике, уже много лет применявшейся в морском судостроении. Она была разработана около 80 лет тому назад Вильямом Фрудом, выдвинувшим в то время следующее, гениальное по простоте, положение: общее сопротивление можно рассматривать

как сумму двух сопротивлений — сопротивления трения и остаточного сопротивления.

Термин «остаточное сопротивление» обозначает сумму всех видов сопротивлений, кроме сопротивления трения. Следовательно, сумма сопротивлений 2—4, т. е. $(R_B + R_{и} + R_R)$, будет остаточным сопротивлением.

Это, как будто бы простое, решение имеет огромное значение на практике, так как позволяет рассматривать сопротивление трения и остаточное сопротивление как независимые, измеряющиеся отдельно части общего сопротивления. Основа действий такова: если от измеренного в бассейне общего сопротивления отнять сопротивление трения, которое может быть вычислено, то получим остаточное сопротивление модели. Теперь можно рассчитать величину остаточного сопротивления для яхты в натуре по методике, разработанной Фрудом, основанной на подобии форм модели и природы.

Сопротивление трения модели тоже можно пересчитать для натурной яхты и в сумме мы получим величину общего гидродинамического сопротивления яхты.

В сущности, можно говорить о существовании некоторого взаимного влияния между сопротивлением трения и остаточным сопротивлением, вследствие чего окончательный результат в какой-то степени неточен. Однако без упрощения, введенного Фрудом, целый ряд практических и теоретических вопросов, касающихся ходкости судов, оказался бы слишком трудным для решения или даже неразрешимым.

Ошибка, которая может возникнуть в результате использования методики Фруда, по-видимому, очень незначительна. Характеристики яхт, определенные на модельных испытаниях с применением методики Фруда, вполне удовлетворительно подтверждаются при натуральных испытаниях построенных яхт.

а) Сопротивление трения

Общие основы образования сопротивления трения, рассмотренные в разделе «Аэродинамика парусного вооружения», применимы и к сопротивлению трения корпуса о воду. Если сделать замеры скорости частиц воды в слое, прилегающем к корпусу яхты, то получим разные величины. В тончайшем слое воды, частицы которого не-

посредственно прилегают к поверхности корпуса, скорость будет равна скорости хода яхты.

Движение этих частиц вследствие сил вязкости передается более отдаленным от корпуса частицам воды. В результате возле корпуса образуется как бы оболочка или слой из движущихся за яхтой частиц воды. Толщина этого слоя может быть различной. Установлено, что сопротивление трения действует в пределах этого слоя, который получил название пограничного. В пограничном слое скорость части воды меняется от нуля до скорости, равной скорости хода яхты. Толщина пограничного слоя растет от носа к корме яхты и достигает от 1% до 2% длины корпуса по ватерлинии. Например, при длине корпуса 10 м толщина пограничного слоя может дойти до 20 см.

Существование пограничного слоя можно наблюдать в натуре, если опустить у самого борта в воду какие-нибудь мелкие плавающие предметы. Они будут двигаться вместе с яхтой, пока случайными водяными вихрями не будут выброшены за пределы этого слоя.

Очевидно, что чем толще пограничный слой, иначе говоря, чем большее количество воды тянет за собой корпус, тем больше тратится энергии, т. е. тем выше сопротивление трения.

Величину сопротивления трения можно вычислить по следующей формуле:

$$R_T = \zeta_T \cdot \frac{\rho}{2} V^2 \cdot \Omega,$$

где ζ_T — коэффициент сопротивления трения; $\rho = \frac{\gamma}{g}$ — массовая плотность воды; γ — удельный вес воды, равный 1000 кг/м³ (пресная) и 1020 кг/м³ (морская); g — ускорение земного притяжения = 9,81 м/сек²; V — скорость яхты в м/сек; Ω — смоченная поверхность в м².

Таким образом для пресной воды:

$$R_T = 51 \zeta_T \cdot V^2 \cdot \Omega,$$

а для морской:

$$R_T = 52 \zeta \cdot V^2 \Omega.$$

Коэффициент сопротивления трения ζ_T — величина непостоянная и зависит от характера потока в пограничном

слое, длины корпуса L , скорости V и, наконец, от степени гладкости смоченной поверхности.

В главе «Аэродинамика парусного вооружения» было объяснено значение числа Рейнольдса R_l , как величины, связанной с характером потока в пределах пограничного слоя, и связанного с этим коэффициента сопротивления трения. Вспомним, что число Рейнольдса определяется тремя показателями, от которых зависит характер потока: скоростью потока, длиной погруженного в поток тела и коэффициентом вязкости среды.

В случае обтекания погруженного в воду корпуса число Рейнольдса будет выражено следующей формулой:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu},$$

где V — скорость яхты в м/сек.; L — длина поверхности корпуса, погруженного в воду, в м.; ν — кинематический коэффициент вязкости, который для воды при 15°C будет равен $1,2 \cdot 10^{-6} = \text{м}^2/\text{сек.}$

Для пресной воды:

$$Re = \frac{V \cdot L \cdot 10^6}{1,2}.$$

Кинематический коэффициент вязкости для морской воды будет на 5% больше, чем для пресной воды.

Рассмотрим на конкретном примере практическое значение числа Рейнольдса и зависящего от него коэффициента сопротивления трения ζ_r . На рис. 128 схематически представлена картина обтекания корпуса международной «Каноз» в непосредственной близости к ее бортам.

Толщина пограничного слоя не соответствует натурным соотношениям и принята такой для наглядности изображения. В общем схема дает правдоподобную картину потока при скорости яхты $V=2$ узлам. Соответствующие значения чисел Рейнольдса для нескольких точек, расположенных по длине ватерлинии, указаны над линиями потока и подчеркнуты сплошными стрелками.

Заметим, что на некоторой длине, примерно на 20% L или в 1 м от форштевня, сохраняется ламинарный характер потока до точки, где число Рейнольдса еще несколько меньше критической величины — 10^6 . За этой точкой наступает момент, когда характер потока переходит от ла-

минарного к турбулентному вследствие появления в пограничном слое беспорядочно движущихся частиц.

Возникают волнообразные колебания частиц с частотой около 100 периодов в секунду, способствующие распространению начальных поперечных колебаний в слой

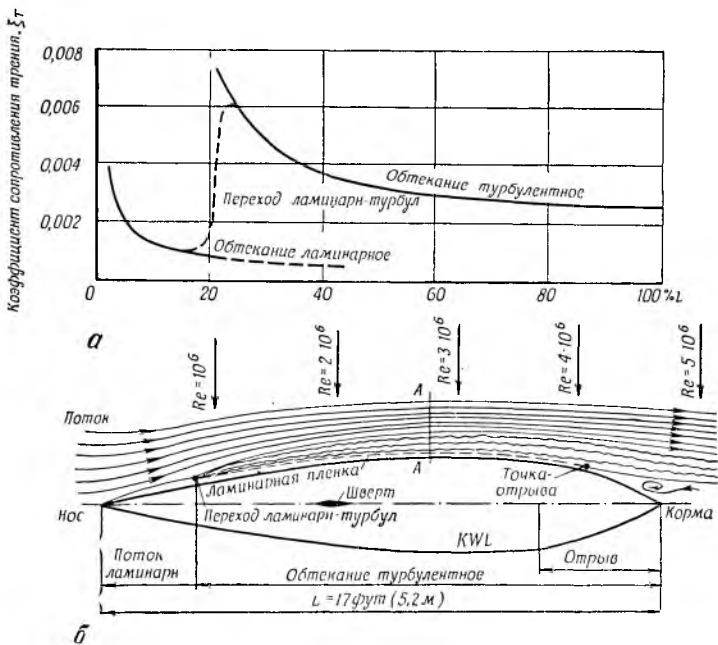


Рис. 128

воды, расположенные дальше от корпуса. Вследствие этого толщина пограничного слоя увеличивается.

Эти явления сопровождаются увеличением расхода энергии. Если сравнить величину коэффициента сопротивления трения в районе перехода ламинарного движения в турбулентное (см. рис. 128, а), то заметим внезапный скачок величины ζ_T с 0,001 до более чем 0,006, т. е. увеличение более чем в шесть раз. Волнообразные колебания внутри пограничного слоя заставляют ламинарный поток переходить в турбулентный, когда амплитуда колебаний становится достаточно большой.

При малых числах Рейнольдса вязкость воды в какой-

то мере автоматически гасит поперечные колебания и тем препятствует возникновению турбулентности.

Критическая величина числа Рейнольдса, при которой возникает турбулентное обтекание, лежит в пределах $5 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^6$ и в значительной степени зависит от формы и гладкости погруженной в поток поверхности. Под гладкой понимается такая поверхность, когда на ощупь нельзя обнаружить какие-либо неровности поверхности. Дефекты в обработке поверхности приближают момент появления турбулентности.

Теоретически можно предположить, что на хорошо подготовленной поверхности передней части корпуса, турбулентное обтекание появится не ранее, чем когда число Рейнольдса будет равным примерно $5 \cdot 10^6$. Для международного «Каноз» (см. рис. 128, б), по-видимому, есть возможность сохранить ламинарный поток по всей длине корпуса, поскольку точка с числом Рейнольдса, равным $5 \cdot 10^6$, находится за кормой.

На практике, однако, рассчитывать на сохранение ламинарного потока можно только до так называемой точки отрыва струй, расположенной в кормовой части корпуса. За этой точкой по направлению к корме начинается отрыв струй воды, возникает завихренное обтекание в более широком слое и появляется новое сопротивление, называемое вихревым (сопротивлением формы).

Измерить отдельно величину вихревого сопротивления с достаточной надежностью не удастся, и оно входит составной частью в сопротивление трения, что может быть причиной ошибок в объяснении рассматриваемых явлений и анализе результатов исследований.

Веретенообразная, обтекаемая, форма передней подводной части корпуса с плавным увеличением поперечных сечений лучше способствует сохранению ламинарного обтекания при больших числах Рейнольдса, чем простая, плоская поверхность. Начиная от форштевня и до сечения А—А (см. рис. 128, б), поперечные размеры корпуса медленно и плавно увеличиваются.

За сечением А—А наблюдается обратная картина, начинает увеличиваться свободное сечение потока, что благоприятствует возникновению турбулентного обтекания. Эти наблюдения можно использовать при проектировании нового или исправлении формы старого кия или дейдвуда.

Опыты, проведенные на яхтах в классе «Дракон», подтвердили, что смещение наибольшей толщины дейдвуда и фальшкиля к корме и заострение передней кромки, сделанные даже в рамках правил, заметно улучшают ход яхты. Разрез корпуса (см. рис. 128, б) можно считать вполне подходящим, обтекаемым профилем для дейдвуда и фальшкиля с округлением передней кромки по предписанному правилам радиусу.

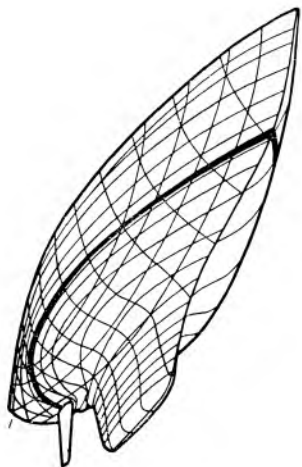


Рис. 129

Очень удачна форма подводной части корпуса у английской яхты «Аутлоо». Отдельная постановка руля от дейдвуда позволяет сделать очертания последнего более обтекаемыми (рис. 129).

Итак, число Рейнольдса увеличивается в направлении к корме и критическое число $Re = 5 \cdot 10^6$ находится уже за кормой. Чем быстрее будет идти яхта, тем скорее начнут расти значения чисел Рейнольдса (см. рис. 128, а). Помещенная в верхней части рисунка шкала чисел Рейнольдса будет перемещаться в сторону носа яхты, а вместе с ней и критическое число Рейнольдса.

Попробуем расчетным путем определить положение точки, в которой начинается переход ламинарного движения в турбулентное, если скорость яхты увеличится до 10 узлов. Допустим, что поверхность корпуса гидродинамически гладкая и на ощупь никаких шероховатостей не ощущается.

Попробуем расчетным путем определить положение точки, в которой начинается переход ламинарного движения в турбулентное, если скорость яхты увеличится до 10 узлов. Допустим, что поверхность корпуса гидродинамически гладкая и на ощупь никаких шероховатостей не ощущается.

Подставим в формулу $Re = \frac{V \cdot L}{\nu}$ известные значения:

$$V = 10 \text{ узлов} = 5,15 \text{ м/сек};$$

$$\nu = \frac{1,2}{10^6} \text{ м}^2/\text{сек}^2,$$

$$Re = 5 \cdot 10^6.$$

Теперь определим критическую длину по ватерлинии L , считая от форштевня, после которой возникает турбулентное обтекание:

$$L_{kwL} = \frac{Re \cdot \nu}{V} = \frac{5 \cdot 10^6 \frac{1,2}{10^6}}{5,15} = 1,16 \text{ м.}$$

Следовательно, около 20% длины корпуса, считая от форштевня, обтекается ламинарным потоком, на остальных 80% длины смоченная поверхность обтекается турбулентным потоком.

Отсюда можно сделать следующий вывод: даже при самой гладкой зеркальной смоченной поверхности нельзя рассчитывать на малый коэффициент трения (соответствующий ламинарному обтеканию), если скорость яхты и отвечающее ей число Рейнольдса достаточно велики.

В только что рассчитанном случае при скорости яхты $V=10$ узлам, т. е. в идеальных теоретических условиях ламинарный поток сохраняется на длине максимум 1,16 м.

Особенно полезно шлифовать шверт, перо руля и переднюю часть корпуса от штевня до задней кромки шверта. Испытания, проведенные в Англии профессором Таннером в Национальной физической лаборатории, подтвердили, что ламинарное обтекание сохраняется даже на 80% ширины шверта.

Очень важно, чтобы любые кромки или ребра, встречающие поток, были идеально гладкими. Даже незначительные неровности на форштевне или кромке шверта и руля могут вызвать турбулентное обтекание. Наоборот, неровности, расположенные дальше от кромок, такого вреда не принесут.

На практике чаще всего различные повреждения появляются именно на штевне, передней части корпуса и шверте. Поэтому в обращении с корпусом, перевозке и хранении надо особенно оберегать эти места.

Рассмотрим, какое значение имеют неровности поверхности в случае турбулентного потока, появляющегося при обычных скоростях яхты. Вспомним, что турбулентный поток характерен возникновением поперечных движений частиц воды в пограничном слое. Однако на самой поверхности корпуса яхты сохраняется тончайшая пленка с ламинарным движением как след существовавшего

прежде ламинарного обтекания (см. рис. 128,б). Эта пленка может покрывать мельчайшие шероховатости смоченной поверхности таким образом, что все неровности полностью будут в ней утоплены.

В этом случае смоченную поверхность можно рассматривать как гидродинамическую гладкую поверхность.

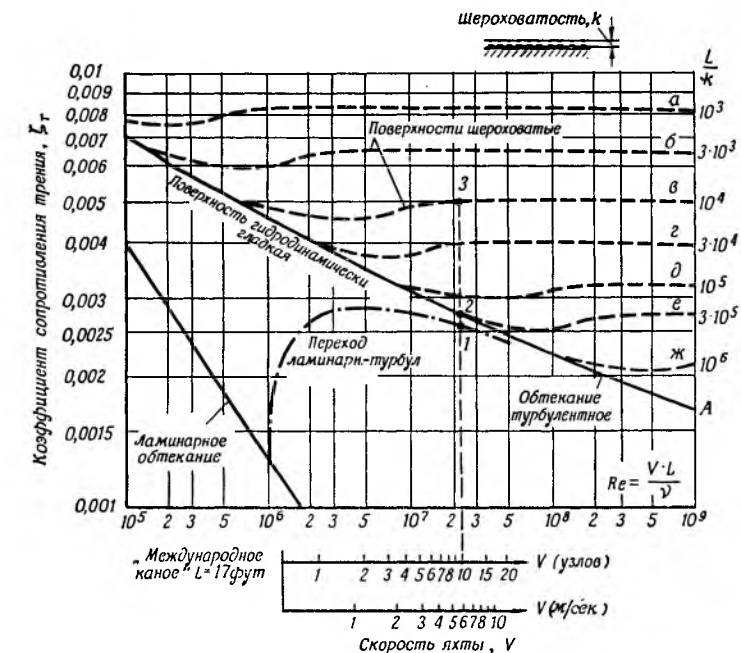


Рис. 130

С увеличением скорости яхты растет и величина чисел Рейнольдса, а ламинарный слой (пленка) делается все тоньше. Неровности поверхности, которые ранее покрывались этой пленкой, начинают выступать из нее, и сопротивление трения соответственно увеличивается.

Рассмотрим влияние качества поверхности на сопротивление трения, пользуясь данными, помещенными на рис. 130, на котором графически изображены зависимости, существующие между коэффициентами ζ для поверхностей с различной гладкостью и различной величиной числа Re .

Кривая A дает изменения коэффициента в турбулентном потоке при гидродинамически гладкой поверхности. В данном случае кривая A получена для плоской поверхности, но ее можно применить и к поверхностям, которые сравнительно не сильно изогнуты.

Теперь остановимся более детально на понятии «гидродинамической гладкости» и турбулентности потока в пограничном слое. Над кривой A нанесен ряд кривых $a, б, в$ и т. д., показывающих величину коэффициентов трения ζ_t для поверхностей с различной шероховатостью K . Числа около этих кривых показывают отношение $\frac{L}{K}$, т. е.

отношение длины L поверхности, омываемой потоком, к высоте неровностей этой поверхности K . Это позволяет данные графика применять к яхтам разной величины. Для примера возьмем международный класс «Каноз» с длиной $L=17$ футов (5,2 м). Допустим, что скорость яхты $V=10$ узлов (5,15 м/сек). Тогда

$$Re = \frac{V \cdot L \cdot 10^5}{1,2} = \frac{5,15 \cdot 5,2 \cdot 10^5}{1,2} = 2,23 \cdot 10^7.$$

Для удобства пользования графиком под шкалой чисел Рейнольдса помещена шкала скорости в узлах и м/сек.

Допустим, что относительная шероховатость днища яхты $\frac{L}{K} = 10^4$. Тогда фактическая шероховатость днища будет равна:

$$K = \frac{5,2 \cdot 1000}{10\,000} = 0,52 \text{ мм.}$$

Если бы шероховатость днища яхты не превышала 0,52 мм, коэффициент трения ζ_t был бы равен 0,005 (точка 3 на кривой $в$).

Для сравнения ниже приведены шероховатости в миллиметрах различным способом подготовленных поверхностей:

зеркальная поверхность	— 0,00
шлифованная и лакированная	— 0,005
патентованные покрытия (гладкие)	— 0,05
гальванизованное покрытие	— 0,15
обычная доска	— 0,5
обросшее ракушками днище	— 4,0

Во взятом нами примере при отношении $\frac{L}{K} = 10^4$ коэффициент трения ζ_T относится к обычной поверхности нелакированного дна. Патентованное покрытие уменьшит K до 0,05 мм, а коэффициент трения снизится до 0,003 вдоль кривой 1 ($\frac{L}{K} = \text{около } 10^5$). Однако такую поверхность нельзя считать гидродинамически гладкой. Коэффициент трения ζ_T можно снизить до точки 2 на кривой А, доведя шлифовкой шероховатость дна до допустимой степени $K_{\text{доп}}$, которую можем высчитать по следующей формуле:

$$K_{\text{доп}} = \frac{1}{5 \cdot V}.$$

Для скорости $V = 10$ узлов K не может быть более 0,02 мм. Допустимую шероховатость для точки 2 можно найти интерполяцией непосредственно по графику с помощью кривых d и e , касательно смыкающихся с кривой А, причем точка 2 находится между ними.

Точка 1, расположенная на кривой с надписью «Переход ламинарный — турбулентный», находящейся несколько ниже кривой А, свидетельствует о существовании на некоторой части корпуса ламинарного обтекания. Обратимся к шкале скоростей яхты (помещена под графиком), на основе которой можно сделать вывод о зависимости между допустимой шероховатостью поверхности днища и скоростью яхты. С увеличением скорости требования к гладкости днища растут и становятся особенно высокими для глиссирующих яхт и для водных лыж.

Какую часть в сумме всех гидродинамических сопротивлений составляет сопротивление трения и в какой степени оно влияет на скорость яхты? На первую часть вопроса можно ответить с помощью графика (рис. 131). На нем представлены результаты замеров сопротивления корпуса яхты класса «Каноз», сделанные в бассейне Национальной физической лаборатории в Англии профессором Т. Таннером.

Замеры проводились на корпусе натурального размера, а не на модели.

Сплошной кривой показано полное суммарное сопротивление корпуса, но без шверта и руля, без крена и дрейфа в границах скоростей от 0 до 10 узлов. Пунктир-

ная линия, расположенная выше сплошной, показывает сопротивление корпуса со швертом в границах скоростей от 2 до 5 узлов. Пунктирная линия, проходящая под сплошной кривой, определяет только сопротивление трения.

Гидродинамическое сопротивление корпуса без крена (что бывает на полных курсах) складывается из сопротивления трения и остаточного сопротивления, которое

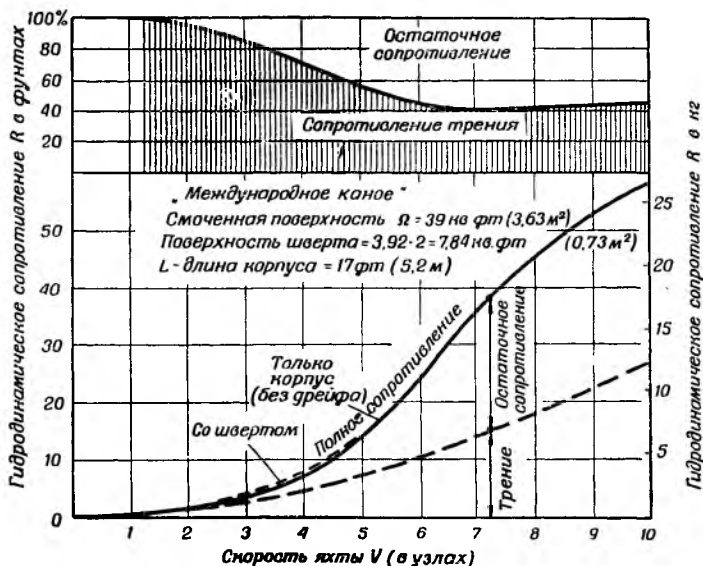


Рис. 131

в этом случае сводится к волновому сопротивлению. Взаимное соотношение этих двух сопротивлений в общем суммарном сопротивлении показано в верхней части графика (см. рис. 131).

На малых скоростях доминирующее значение принадлежит сопротивлению трения. С увеличением скорости растет волновое сопротивление, достигающее примерно до 60% величины всего сопротивления.

Затем снова продолжается рост сопротивления трения (это область глиссирующих яхт). Заметим, что этот характер соотношений между двумя видами сопротивле-

ний относится к легким швертботам. Но и для килевых яхт на полных курсах общая картина соотношений двух видов сопротивления аналогична рассмотренной.

На лавировочных курсах при появлении еще двух видов сопротивлений — индуктивного и кренового — по-

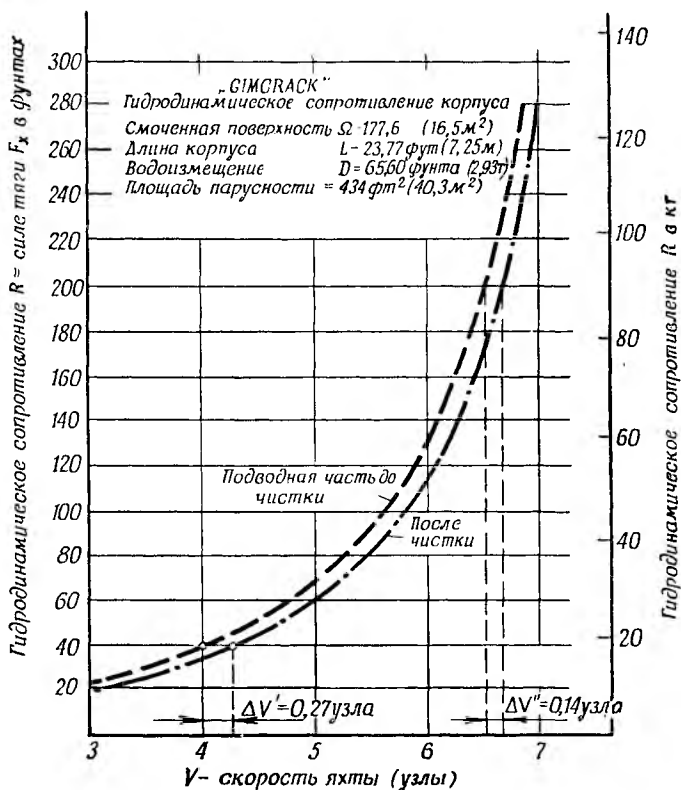


Рис. 132

ложение радикально меняется: главное значение приобретает остаточное сопротивление. К рассмотрению этого вопроса вернемся далее.

Ответ на вторую часть вопроса — как влияет изменение величины сопротивления трения на скорость яхты — найдем на рис. 132. На рисунке изображены две кривые

полного гидродинамического сопротивления, полученные при испытании яхты «Джимкрак». На ней в США впервые проводились испытания парусного вооружения с определением числовых значений аэродинамических коэффициентов, названных по имени яхты коэффициентами «Джимкрака». Одна кривая относится к яхте с чистым днищем, а другая — с обросшим днищем.

Представим, что эти кривые принадлежат двум абсолютно одинаковым яхтам, которые участвуют в одной и той же гонке при слабом ветре. Сила тяги $F_x = 40$ фунтам (16 кг) уравновешивается гидродинамическим сопротивлением R_x , яхта с обросшим дном будет двигаться со скоростью $V = 4,0$ узла. Скорость яхты с чистым днищем больше на $\Delta V = 0,27$ узла. Легко подсчитать, что на дистанции в 1 милю первая яхта отстанет от второй на 117 м, или на расстояние в 16 длин корпуса. При более сильном ветре, например когда сила тяги достигнет 200 фунтов (около 80 кг), разница между скоростями яхт будет составлять только $\Delta V = 0,14$ узла.

Следовательно, роль сопротивления трения при больших скоростях уменьшается. Происходит это потому, что основную долю будет составлять волновое сопротивление, на которое шероховатость поверхности не влияет.

Как влияют на сопротивление трения отделка днища различными составами, включая силиконовые покрытия? На этот вопрос среди парусников существуют противоречивые ответы. Исследованиями в гидродинамических бассейнах установлено, что сопротивление трения от применений гидрофобных покрытий не снижается. Были случаи, когда такие покрытия даже увеличивали сопротивление трения. Но снизить сопротивление трения все же можно. Надо найти лишь средства, устраняющие или поглощающие поперечные колебания частиц воды в пограничном слое. Было сделано предположение, что эластичное покрытие поверхности днища должно воспринимать энергию поперечных колебаний частиц воды и тем самым снижать их амплитуду или гасить полностью.

Такое покрытие было разработано Максом Крамером из эластичного резинового слоя, названного «ламинфло» (за прототип его была взята структура шкуры дельфина). Оказалось, что такое покрытие поглощает часть энергии поперечных колебаний и в пределах некоторых чисел Рейнольдса препятствует образованию турбулент-

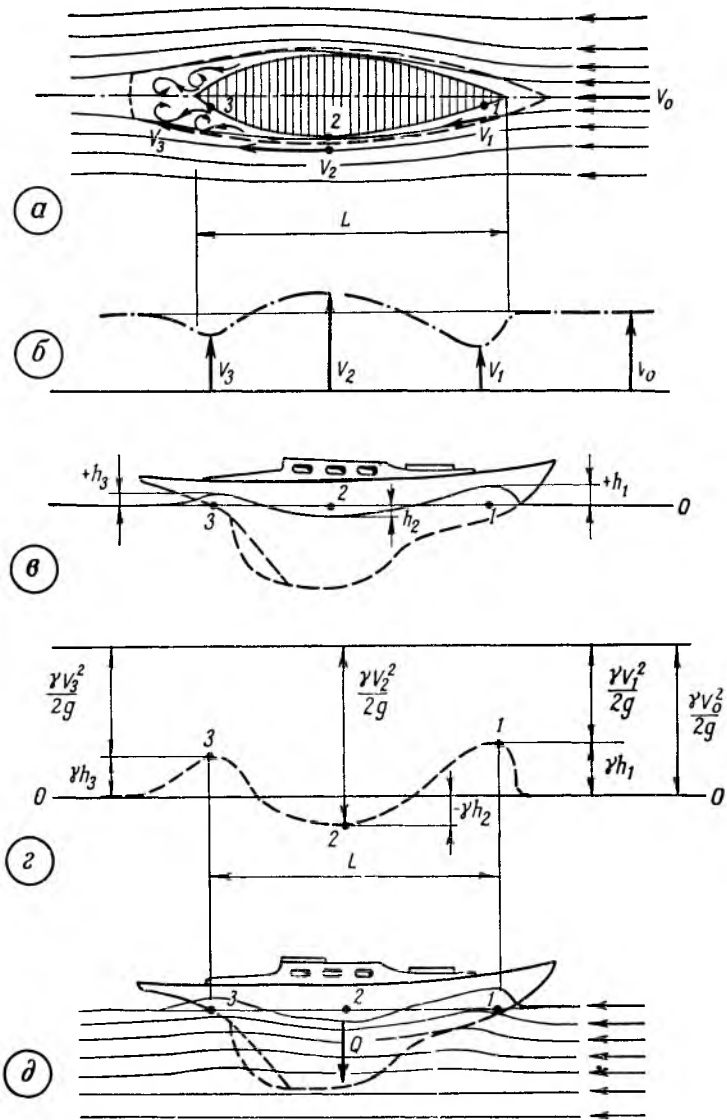


Рис. 133

ного движения. Опытами была установлена возможность уменьшения сопротивления трения примерно на 50%.

Таким образом, открываются некоторые перспективы успешной борьбы с трением, но в применении к яхтам можно предвидеть значительные трудности.

б) Волновое сопротивление

Прежде всего попытаемся ответить на вопрос, почему около движущейся яхты образуются волны и каким образом это происходит? Для простоты картины будем рассматривать яхту, стоящую неподвижно на якоре в потоке воды (суть дела от такого допущения не изменится).

Сущность волнообразования можно объяснить с помощью закона сохранения энергии. Возьмем практический пример: камень массы m брошен вверх со скоростью V . Сообщенная камню кинетическая энергия $E_k = \frac{m \cdot V^2}{2}$ будет полностью израсходована в высшей точке полета камня.

Вместо кинетической энергии теперь камень будет обладать равной ей потенциальной энергией $E_p = m \cdot g \cdot h$, где g — ускорение силы тяжести, а h — количественный показатель полученной потенциальной энергии.

Падая на землю, камень снова приобретает кинетическую энергию за счет уменьшения потенциальной в тех же количествах (без учета трения о воздух).

Независимо от того, чем вызваны волны — ветром или движением корпуса яхты — они представляют собой периодические вертикальные колебания частиц воды, на что расходуется какая-то энергия. Уравнение Бернулли применительно к образованию волн можно написать следующим образом:

$$\frac{\gamma V_1^2}{2g} + \gamma h_1 = \frac{\gamma V_2^2}{2g} + \gamma h_2 = \text{const.}$$

Первый член формулы $\frac{\gamma V^2}{2g}$ выражает кинетическую энергию, второй член $\gamma \cdot h$ — потенциальную, где γ — удельный вес воды. Итак, сумма кинетической и потенциальной энергий остается постоянной.

Допустим, что на некотором расстоянии от корпуса яхты частицы воды движутся со скоростью V_0 (рис. 133, а). Наталкиваясь на корпус, как на преграду, вода будет притормаживаться до скорости $V_1 < V_0$. В точке 2 в результате сужения потока скорость частиц воды увеличится до V_2 ($V_2 > V_0$). В районе кормы в результате расширения потока скорость снизится до V_3 .

Таким образом, вблизи корпуса яхты скорость потока будет изменяться (см. рис. 133, б), а следовательно, будет меняться и кинетическая энергия частиц воды. В точке 1 кинетическая энергия уменьшается, потенциальная энергия увеличивается. В точке 1 (см. рис. 133, в) произойдет подъем частиц воды на более высокий уровень h_1 с сохранением требований, выраженных уравнением:

$$\frac{\gamma V_0^2}{2} = \frac{\gamma V_1^2}{2g} + \gamma h.$$

В точке 2 кинетическая энергия возрастет и соответственно уменьшится потенциальная энергия на величину $\Delta p = \gamma \cdot h_2$. Частицы воды опускаются до уровня О—О. При этом соблюдаются условия, выраженные уравнением:

$$\frac{\gamma V_0^2}{2g} = \frac{\gamma V_2^2}{2g} - \gamma h_2.$$

Графически на рис. 133, г показаны происходящие изменения этих двух форм энергии. Заметим, что сужение потока под корпусом яхты (см. рис. 133, д), особенно в точке 2, вызовет некоторое падение давления, из-за чего осадка яхты несколько увеличится относительно ватерлинии. Величина силы Q , увеличивающая осадку, будет изменяться в зависимости от скорости яхты.

В местах, где кинетическая энергия частиц воды уменьшается, начнут периодически образовываться волны, величина которых будет прямо пропорциональна изменениям энергии. Образуются два рода волн: носовые и кормовые. Величина волн зависит от скорости яхты и водоизмещения. Анализируя рис. 133, в, г, можно заметить, что носовые волны выше кормовых. Это отчасти объясняется возникновением в районе кормы турбулентного потока, на что расходуется часть энергии.

Система волн, образующихся около яхты, схематически показана на рис. 134. Можно отметить две группы волн: 1) косые, расходящиеся волны, 2) поперечные волны.

И те, и другие волны непрерывно образуются в районе носа и кормы, на что расходуется энергия движения яхты.

Система расходящихся волн состоит из отдельных коротких волн, расположенных примерно под углом 18—20° к направлению хода яхты. Косые кормовые волны ниже носовых. Вершины поперечных волн перпендикулярны к направлению хода яхты и не выходят из района ограниченного расходящимися волнами. Носовые поперечные волны по мере приближения к корме делаются длиннее и ниже.

Носовые и кормовые косые волны распространяются самостоятельно, не смешиваясь. Поперечные волны, наоборот, могут накладываться друг на друга, так как их длина не постоянна и зависит от скорости яхты.

При скорости яхты V длину λ поперечных волн можно вычислить по формуле:

$$\lambda = \frac{2\pi V^2}{g}$$

λ (в метрах) = $0,64 V^2$, если скорость V в м/сек.

$\lambda = 0,17 V^2$, если скорость V в узлах.

В таблице приводятся длины поперечных волн, образуемых яхтой при скорости хода от 1 до 10 узлов.

V	Длина волны, м	V , узлов	Длина волны, м
1	0,17	6	6,12
2	0,68	7	8,33
3	1,53	8	10,90
4	2,72	9	13,76
5	4,25	10	17,00

На яхте, имеющей длину ватерлинии 8 м и скорость хода $V=3$ узлам, на длине корпуса разместится примерно 5 поперечных волн. При скорости 4 узла — около трех, а при скорости 7 узлов — только одна.

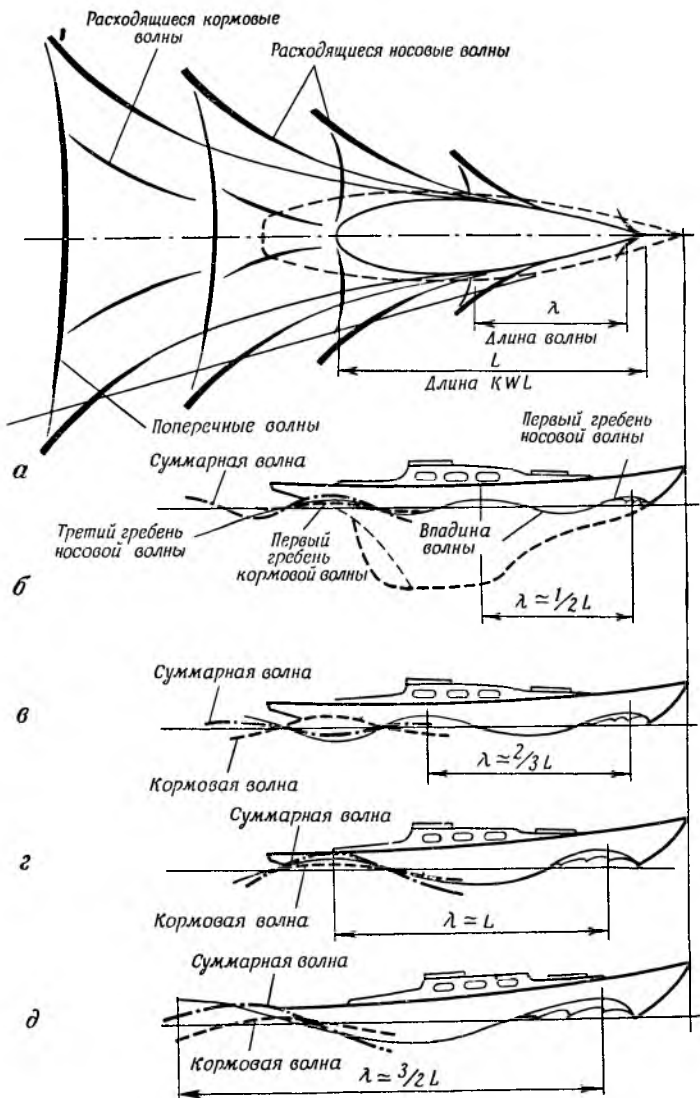


Рис. 134

Зависимость длины поперечных волн и хода яхты позволяет высчитать скорость яхты, когда известна длина поперечной волны.

Зависимость между длиной поперечной волны λ , созданной движущимся корпусом, имеющим длину L и скоростью V , играет важную роль в поведении любой плавающей яхты. Впервые обратил на это внимание В. Фруд (1810—1870 гг.), наблюдая образование волн на моделях корпусов. Он установил, что гидродинамическое сопротивление корпуса зависит от системы волн, образующихся около корпуса, и в особенности от отношения

$$\frac{V}{\sqrt{L}}$$

В специальной литературе это отношение называется относительной скоростью. Связь между количеством волн, помещающихся на длине ватерлинии L и $\frac{V}{\sqrt{L}}$,

показана на рис. 135. Если $\frac{V}{\sqrt{L}} = 0,6$, где V в узлах, а L в футах вдоль ватерли-

нии L помещается 5 волн. При $\frac{V}{\sqrt{L}} = 0,95$ поместится 2 волны, а при $\frac{V}{\sqrt{L}} = 1,34$ — только одна волна.

В труде «Законы подобия» Фруд изложил основные условия, позволяющие определять сопротивление корпуса в натуре на основании модельных испытаний. Фруд установил, что отношение волнового сопротивления R_B к водоизмещению $D \left(\frac{R_B}{D} \right)$ геометрически подобных корпусов будет постоянной величиной, если отношения $\frac{V}{\sqrt{L}}$ одинаковы.

Отношение $\frac{V}{\sqrt{L}}$ является модифицированной формой

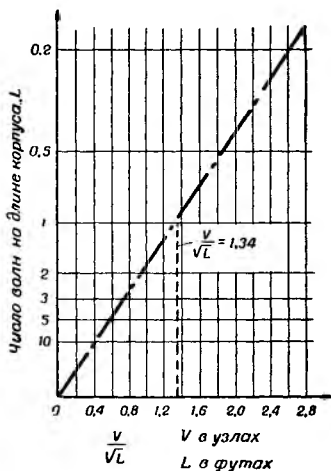


Рис. 135

так называемого числа Фруда $\frac{v}{\sqrt{gL}}$, где g — ускорение земного притяжения. В этом виде число Фруда сейчас употребляется редко, поскольку постоянная величина $g = 9,81$ м/сек² может быть опущена.

Влияние волнообразования или отвечающего ему отношения $\frac{v}{\sqrt{L}}$ на величину волнового сопротивления не

трудно понять из анализа рис. 134. На рис. 134, *а* и *б* показано, когда на длине ватерлинии L помещаются две носовые поперечные волны. Если гребень третьей носовой поперечной волны совпадает с гребнем первой кормовой волны, происходит интерференция волн. В результате образуется общая более высокая волна.

Очевидно, что за кормой волновая картина будет следствием взаимодействия носовых и кормовых поперечных волн. Иногда это взаимодействие может быть желательным, так как ведет к уменьшению волнового сопротивления. Это случится, когда гребень одной волны придется на впадину другой и волны будут сглаживаться.

Кормовой след при этом становится более спокойным (рис. 134, *в*).

Наоборот, на рис. 134, *г* и *д* показан невыгодный случай интерференции волн, сильно увеличивающий суммарную волну. В случае (см. рис. 134, *г*), когда отношение $\frac{v}{\sqrt{L}} = 1,34$ (яхта плывет на собственной волне), положение таково, что около штевня образуется одна крутая волна, другая волна — под кормой, середина корпуса помещается на впадине волны.

Одновременно можно наблюдать изменение дифферента с подъемом передней части корпуса. Если $\frac{v}{\sqrt{L}}$ продолжает увеличиваться, еще больше увеличится дифферент на корму, так как впадина волны сместится ближе к корме.

Заметим, что распределение водоизмещения вдоль корпуса зависит от профиля волны. В нашем случае осадка корпуса увеличилась по сравнению с первоначальной. Все эти вместе взятые факторы оказывают значительное влияние на величину волнового сопротивле-

ния, ограничивая максимальную скорость особенно глубоко сидящих крупных яхт. Можно сказать, что вызванное движением яхты волнообразование становится ловушкой, в которую попадает яхта при достижении определенной скорости.

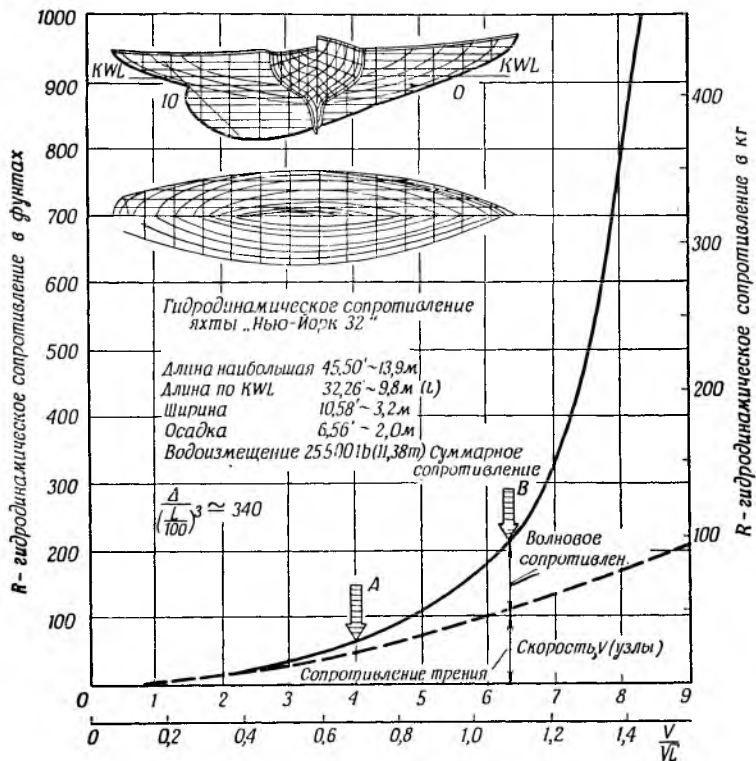


Рис. 136

Энергия, расходуемая на волнообразование, пропорциональна второй степени высоты волны h , а также ее длине λ . В таком же отношении находится сопротивление движению яхты, т. е. R_B пропорционально $(h^2\lambda)$.

Вычислить теоретически величину волнового сопротивления очень трудно вследствие огромного разнообра-

зия форм и размеров корпусов. Практически волновое сопротивление определяют на моделях в гидродинамических бассейнах.

На рис. 136 даны результаты определения гидродинамического сопротивления модели яхты «Нью-Йорк-32» в бассейне Технологического института Стивенса (США), пересчитанные затем для натуры. Кривые относятся к современной крейсерской быстроходной яхте, плавающей без крена и дрейфа.

Следовательно, гидродинамическое сопротивление складывается только из сопротивлений трения и волнового. Поэтому кривую можно рассматривать как основную гидродинамическую характеристику яхты; кроме того, она позволяет оценить возможности яхты на полных курсах, при плавании без крена и дрейфа. Характерной особенностью яхт так называемого «водоизмещающего» типа (имеющих большое водоизмещение относительно длины корпуса) является то, что кривая сопротивления вначале медленно поднимается до точки, в которой $\frac{V}{\sqrt{L}} = \text{около } 1,1$; за этой точкой кривая резко идет вверх.

Это значит, что в этой точке сопротивление начинает резко увеличиваться.

Обратим внимание, что кривая общего сопротивления, показанная на рис. 136 на участке от 0 до отношения $\frac{V}{\sqrt{L}} = 0,7$, поднимается очень медленно.

Сопротивление растет примерно пропорционально квадрату скорости V : при двукратном увеличении скорости сопротивление возрастет в четыре раза. Иначе говоря, для того чтобы яхта увеличила скорость в два раза, надо, чтобы аэродинамическая сила тяги возросла в четыре раза.

На участке скорости от 0 до 4 узлов, т. е. до момента, когда отношение $\frac{V}{\sqrt{L}}$ не станет больше 0,7, волновое

сопротивление не играет главной роли и скорость яхты зависит в основном от сопротивления трения. Следовательно, большое значение имеет величина смоченной поверхности и гладкость днища. Когда $\frac{V}{\sqrt{L}}$ будет больше 0,7, заметно начинает проявляться влияние волнового

сопротивления, в результате чего общее сопротивление начнет расти заметно быстрее на участке $A—B$, чем это было на участке $O—A$. Если отношение $\frac{V}{\sqrt{L}}$ станет боль-

ше 1,1, волновое сопротивление начинает быстро расти, а общее сопротивление становится пропорциональным соответственно 3, 4, 5 и даже 6-й степени скорости V (особенно для тяжелых килевых яхт).

Чтобы увеличить скорость V с 7 узлов до 8, т. е. на 14,3% (см. рис. 136), придется повысить силу тяги со 150 кг до 350 кг, т. е. на 135%. Прирост скорости относится к приросту силы тяги, как 1 : 10. Положение становится еще хуже, если взять скорость яхты больше, чем в примере. Кроме того, возможность увеличения силы тяги ограничена остойчивостью яхты и прочностью корпуса и вооружения. Соображения прочности особенно касаются чисто гоночных яхт, например таких, как «*R-5,5M*» и «*Дракон*», которые легко можно перегрузить парусами на полных курсах, что совсем не безопасно.

Практически наилучшие водоизмещающие килевые яхты в самых благоприятных условиях плавания могут достичь отношения скорости к длине $\frac{V}{\sqrt{L}} = 1,4$, или, ина-

че, максимальная относительная скорость $V = 1,4 \sqrt{L}$. В исключительных условиях крупные яхты класса J , когда-то гонявшиеся на Кубок Америки (это самые быстрые яхты, когда-либо построенные), достигали максимальной скорости порядка $1,45 \sqrt{L}$.

Известная яхта «*Stormy Weather*» на фордевинде и попутной волне в открытом океане имела рекордную скорость 8,8 узла в течение 48 часов, что дает относительную скорость $V = 1,42 \sqrt{L}$. В гонках, вроде Бермудских, яхты ходят со средней скоростью $V = 0,8 — 1,1 \sqrt{L}$. Маленькая яхта «*Сопранино*» в 1951 году прошла Атлантику за 28,5 дня при средней скорости $V = 1,03 \sqrt{L}$.

Интересно сравнить относительные скорости парусных яхт с моторными судами.

Миноносцы достигают скорости $V = 2,0 \sqrt{L}$ при исключительно большой мощности турбинной установки, которая составляет около 36 000 лошадиных сил. Океанские лайнеры, например «*Куин Мэри*», имеют скорость

около 30,5 узла при длине ватерлинии около 1000 футов. Следовательно, отношение скорости к длине будет равно: $\frac{V}{\sqrt{L}} = \frac{30,5}{1000} = 0,96$, а относительная скорость $V = 0,96 \sqrt{L}$.

«Куин Мэри» плавает на двух собственных волнах (см. рис. 135), т. е. на участке меньше критического значения величины $\frac{V}{\sqrt{L}} = 1,1$, при которой сильно проявляется волновое сопротивление. Обычные сухогрузные суда редко превышают скорость $V = 0,5 \sqrt{L}$, иначе говоря их двигатели преодолевают главным образом сопротивление трения.

Отсюда вытекает, что яхты несколько не уступают судам с механическим двигателем и даже превосходят их, если сравнивать относительные скорости, являющиеся основным критерием для сопоставления судов различной длины по ватерлинии.

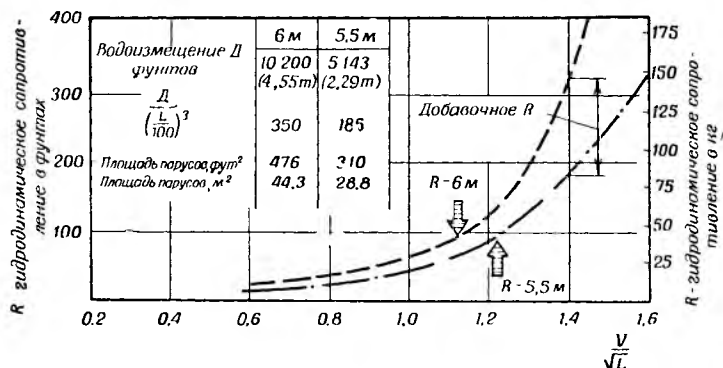
В общем большую часть времени яхты плавают со средней относительной скоростью $V = 0,9 \sqrt{L}$, при которой зависящее от смоченной поверхности сопротивление трения составляет основную долю в сумме сопротивлений. Из предыдущего изложения известно, что гидродинамическое сопротивление корпуса растет пропорционально второй степени высоты собственных волн яхты.

Яхта во время движения толкает и поднимает перед собой воду, давая начало волнообразованию. Водоизмещение, иначе говоря объем погруженной части корпуса, должен иметь определенное влияние на характер кривой сопротивления, а следовательно, и на скорость хода яхты. В оценке способности судна развивать наилучшую скорость полезно пользоваться таким показателем, как отношение водоизмещения D к длине ватерлинии L — $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$, где D выражено в тоннах, а L — длина ватерлинии в футах.

Величина D — показатель, снижающий скорость; длина L — показатель, увеличивающий скорость. Воспользуемся этим отношением для сравнения сопротивлений двух яхт: « $R=6M$ » и « $R=5,5 M$ » — при плавании без крена (см. рис. 137). У обеих яхт длина ватерлинии

одинакова и равна $L = 23$ футам; обе яхты близки по форме корпусов, но по водоизмещению различаются почти в два раза. Соответствующие числа отношений $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$

показаны на рис. 137.



Яхта класса « $R = 6 M$ » принадлежит к яхтам типа «Нью-Йорк-32», т. е. большого водоизмещения с отношением $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3} = 340$.

Класс « $R = 5,5 M$ » может относиться к яхтам малого водоизмещения. Сравнения этих классов яхт идет в пользу яхт класса « $R = 5,5 M$ » при любой силе ветра независимо от отношения $\frac{v}{\sqrt{L}}$. Если относительная скорость обеих яхт равна $v = 1,4 \sqrt{L}$, то для яхты « $R = 5,5 M$ » потребуется сила тяги, равная 80 кг, а для яхты « $R = 6 M$ » — около 150 кг.

Допустим, что сила тяги пропорциональна площади парусности, тогда «шестерка» должна иметь на 80% больше парусов, чтобы уравнять сопротивление, вызванное большим водоизмещением. В действительности же площадь парусов на яхте класса « $R = 6 M$ » только на 54% больше, чем на яхтах « $R = 5,5 M$ ». Следовательно, она будет уступать в скорости.

Кривая сопротивлений яхты « $R=5,5 M$ » менее круто поднимается вверх, чем у яхты « $R=6 M$ », так как у первой сопротивления не образуют такого резкого барьера, как у второй. Следовательно, яхты « $R=5,5 M$ » относятся к судам, имеющим небольшое волновое сопротивление. Снизить степень нарастания гидродинамического сопротивления путем понижения отношения $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$ легче у

небольших судов, у которых ватерлиния не превышает 30 футов (9,1 м). У больших крейсерско-гоночных яхт трудно построить корпус достаточно прочный и одновременно легкий. Возможно, что использование новых материалов, например синтетических смол и стеклянного волокна, а также новый подход к конструкции корпуса помогут в этом деле.

Яхты класса « $R=5,5 M$ » едва ли могут достичь скоростей глиссирования, так как отношение водоизмещения к длине у них еще слишком велико. Для достижения скоростей глиссирования в первую очередь надо резко уменьшить объем подпалубного помещения, т. е. резко снизить мореходность яхты.

Еще В. Фруд пришел к правильному выводу, что яхта должна представлять собой наилучшую комбинацию, сочетающую в себе удобство для экипажа со скоростью.

Для крейсерско-гоночных яхт создание условий для экипажа в длительном плавании, очевидно, будет на первом месте. Примером удачной комбинации водоизмещения с длиной корпуса может служить яхта английского конструктора Уффа Фокса «Фляинг Фифтиин». Ее отношение $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3} = \frac{0,447}{\left(\frac{15}{100}\right)^3} = 132$. Яхта развивает макси-

мальную скорость порядка 12 узлов. Следовательно, относительная скорость ее

$$\frac{V}{\sqrt{L}} = \frac{12}{\sqrt{15}} = 3,1.$$

На протяжении многих десятков лет крейсерско-гоночные яхты строятся в соответствии с классификационными требованиями Международного парусного союза. Конструкции У. Фокса далеко отошли от этих требова-

ний. Эта разница хорошо видна, если посмотреть на рис. 138. Заметим разницу в величине смоченной поверхности, ширине ватерлинии и смещение их в сторону кормы на яхте У. Фокса.

Исследованиями было установлено, что отношение $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$ = около 150, по-видимому, является пределом для

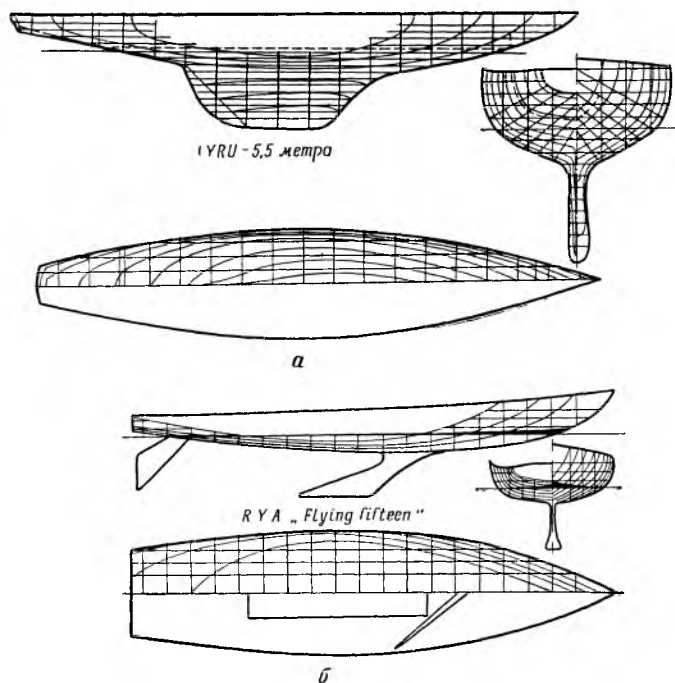


Рис. 138

гליссирующих судов. Однако это не единственный и достаточный критерий. Есть другие столь же важные показатели.

Чтобы лучше понять смысл и значение других факторов, попытаемся разобраться в самом явлении плавания с большими скоростями.

в) Основы движения яхты

Из практики экспериментальных исследований в специальных бассейнах известно, что с изменением скорости меняется и дифферент судна. Он зависит от характера собственных волн и от действия гидродинамических сил на погруженную часть корпуса.

Однако независимо от длины корпуса или от водоизмещения можно наблюдать типичный характер изменения дифферента при увеличении скорости хода. Для примера рассмотрим результаты экспериментов, проведенных в Национальной физической лаборатории (Англия) профессором Т. Таннером на яхте «Каноз» водоизмещением 0,203 тонны. Испытания велись так, что дифферент корпуса мог свободно изменяться, а сила тяги была приложена на уровне воды.

Попробуем применить к другим яхтам результаты исследований, проведенных на «Каноз» (рис. 139). Так

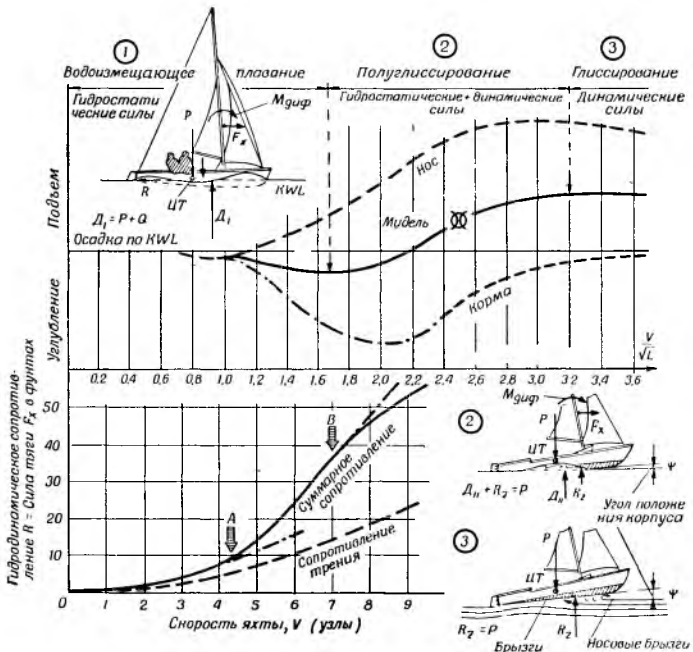


Рис. 139

будет легче разобраться в том, как различные факторы влияют на поведение яхты в плавании (в нижней части рисунка вычерчена кривая общего сопротивления корпуса без крена и дрейфа, для скоростей V от 0 до 9,5 узла).

В верхней части рисунка показано, как меняется положение носа, кормы и миделя относительно горизонтальной конструктивной ватерлинии KWL . Масштаб $\frac{V}{\sqrt{L}}$, помещенный между верхним и нижним графиком, относится к ним обоим.

Верхние кривые на основании дополнительных данных распространены на область скоростей больше 9,5 узла. В пределах скоростей от 0 до 3 узлов, что соответствует $\frac{V}{\sqrt{L}}$ от 0 до 0,7, дифферент корпуса сохраняется таким, как был при $V=0$.

При небольших скоростях хода момент силы тяги F_x , заглубляющий нос и поднимающий корму яхты, совсем небольшой.

Результат его действия зависит от веса яхты. Для тяжелых килевых яхт им можно пренебречь. Рассмотрим это на примере яхты «Нью-Йорк-32» (см. рис. 136). Когда $\frac{V}{\sqrt{L}}=0,7$, сила тяги F_x , уравновешивающая сопротивление R_x по отношению к водоизмещению D яхты, едва составляет $\frac{F_x}{D} = \frac{27}{11\ 380} = 0,28\%$.

Практический вывод: сравнительно небольшая сила тяги не в состоянии вызвать заметных изменений дифферента яхты. Для «Каноз» при скорости $V=3$ узла величина силы тяги F_x составляет относительно веса лодки около 1%. Тогда «Каноз» плывет примерно на четырех длинах волн λ , а вес ее поддерживается гидростатическими силами, равными весу объема вытесненной воды, погруженной частью корпуса D .

Начиная от величины $\frac{V}{\sqrt{L}}=0,7$, осадка корпуса «Каноз» слегка увеличивается по сравнению с исходным заглублением (по KWL) вследствие появления сил динамического засасывания.

Одновременно начинается рост гидродинамического сопротивления частично за счет дополнительного заглуб-

ления корпуса, а в основном из-за растущего волнового сопротивления.

Гидростатическая плавучесть, эквивалентная водоизмещению D , теперь должна уравновесить вес лодки P и силу F_x (положение 1 на рис. 139). После точки, в которой $\frac{V}{\sqrt{L}} = 1,0$, появляется дифферент на корму с подъемом носа, и тем больше, чем меньше в корме полнота обводов.

Такой характер изменения дифферента будет проявляться с увеличением скорости V до определенного предела. Одновременно, вплоть до точки $\frac{V}{\sqrt{L}} = 1,7$, постепенно увеличивается общее углубление корпуса. Этой тенденции к увеличению дифферента на корму, вызванного системой собственных волн, противостоит аэродинамический момент силы тяги F_x , заглубляющий нос яхты.

Очевидно, чем больше сила тяги, тем больше величина момента. Влияние этого момента на килевых яхтах относительно невелико, но на легких швертботах, таких, как «Финн» или «Летучий голландец», с ним надо считаться. В некоторых условиях плавания для противодействия этому моменту команду приходится перемещать ближе к корме. К этому вопросу еще вернемся в последующем изложении.

На участке $\frac{V}{\sqrt{L}} = 0—1,7$ еще не проявляется достаточно четко действие гидродинамических сил и корпус поддерживается на поверхности воды гидростатическими силами в полном соответствии с законом Архимеда.

Этот вид плавания следует назвать «водоизмещающим плаванием». Большинство плавающих судов, в том числе все килевые яхты водоизмещающего типа, плавают в пределах этих значений: $\frac{V}{\sqrt{L}} = 0—1,7$ (см. рис. 139, *г*).

Заметим, что гидростатическая плавучесть яхты изменяется в движении и соответствует собственному весу яхты только во время стоянки или в движении с очень малой скоростью.

Когда отношение силы тяги парусов к весу яхты приблизится к 0,1, скорость станет настолько большой, что корпус будет легко преодолевать подъем на носовую вол-

ну. Тотчас же на определенной части днища, стоящего относительно водной поверхности под очень малым углом дифферента ψ (см. рис. 139, 2), появляются силы динамического давления — подъемная сила R_z .

На определенной скорости, обозначенной на нижнем графике стрелкой B , результат действия динамического подъема R_z становится больше действия заглубляющей силы Q и корпус начинает постепенно выходить из воды. Это можно увидеть на верхней части рисунка, проследив за кривой осадки миделя относительно положения горизонтальной ватерлинии KWL . Одновременно с уменьшением осадки корпуса уменьшается угол наклона кривой гидродинамического сопротивления, т. е. уменьшается степень его роста.

Этот важный критический момент при плавании на больших скоростях можно отметить на рис. 139, проследив за изменением кривой сопротивления после точки, обозначенной стрелкой B .

Для «Каноэ» этот переходный момент наступил, когда отношение силы тяги к весу лодки стало $\frac{F_x}{P} = 0,08$,

т. е. 8%, а отношение $\frac{V}{\sqrt{L}}$ было около 1,7.

Величина отношения $\frac{V}{\sqrt{L}}$, при котором начинается эффективное действие динамической подъемной силы R_z , в большой степени зависит от формы корпуса и отношения $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$.

$$\text{Для «Каноэ» отношение } \frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3} = \frac{0,203}{\left(\frac{17}{100}\right)^3} = 41,5$$

прежде всего исключительно небольшое, что способствует быстрому достижению высоких скоростей. На способность лодки развивать высокую скорость влияют также остойчивость и площадь парусности.

Большая остойчивость «Каноэ», достигаемая за счет применения выдвигного сидения рулевого, а также необычно большая длина корпуса и площадь парусности,— все это радикально отличаются от обычных, традиционных решений.

Интересно сравнить отношение водоизмещения к длине $\frac{D}{L}$ у «Каноз» с другими скоростными яхтами:

«Финн»	—	92
«Летучий голландец»	—	54
«5—0—5»	—	79
14 ф. «Международный швертбот»	—	98
«Мерлин Рокет»	—	105
Класс А («Инланд Лэйк Скоу»)	—	70
«Каноз»	—	41,5

Здесь, собственно, можно найти объяснение преимуществам «Каноз». Конструктор У. Фокс говорит: «Никакая другая одиночка не может сравниться в скорости с «Каноз», летящей по волнам, словно морская птица».

Яхты класса «Каноз» могут ходить со скоростями около 16 узлов, что дает отношение $\frac{V}{\sqrt{L}} = \frac{16}{\sqrt{17}} = 4,0$, и, следовательно, относительная скорость $V = 4,0\sqrt{L}$.

Представление о том, насколько сильно влияет отношение водоизмещения к длине $\frac{D}{L}$ на скорость яхты, $\left(\frac{L}{100}\right)^3$

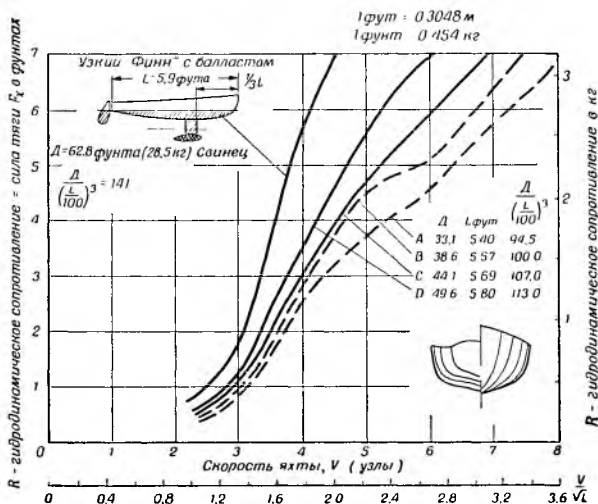


Рис. 140

можно получить, проанализировав график на рис. 140. На нем нанесены кривые сопротивлений модели «узкого» «Финна», без крена и дрейфа, при различном балласте на корпусе.

Кривые *A*, *B*, *C* и *D* относятся к корпусу без шверта и руля. Для сравнения крайняя левая кривая построена для этой же модели, снабженной плавниковым килем и рулем.

Все размеры корпуса «узкого» «Финна» по ширине были взяты с коэффициентом 0,8, а все размеры по высоте — с коэффициентом 1,2.

При силе тяги $F_x = 3$ фунта на моделях *A*, *B*, *C* и *D* были соответственно получены следующие относительные скорости:

$$V = 1,69\sqrt{L}; 1,79\sqrt{L}; 1,82\sqrt{L} \text{ и } 1,94\sqrt{L}.$$

Разница относительных скоростей между крайними, легким и тяжелым, корпусами достигает примерно 15%. При больших силах тяги, т. е. при усилении ветра, эта разница увеличивается. Аналогичная картина должна быть и на яхтах класса «Финн» натуральных размеров, если будут сохранены те же пропорции между их весом (водоизмещением).

Отсюда можно сделать вывод, что в таких монотипах, как, например, «Финн», «Летучий голландец», «5—0—5» и т. д., лучшим средством для уменьшения гидродинамического сопротивления будет снижение собственного веса яхты до минимально допустимого по правилам класса.

Во многих гоночных классах яхтсмены стремятся снизить вес яхты за счет веса экипажа с одновременным использованием команды в качестве подвижного балласта.

Для выноса команды как можно дальше за борт используются трапедии, выносные доски, ремни и т. д. Для яхт с командой, состоящей из нескольких человек, отыскание оптимального веса команды не напрасное занятие. Большое значение надо придавать сохранению корпуса сухим, удалению воды из него во время гонки, особенно в плохую погоду.

Теперь вернемся к графику, помещенному на рис. 139, 2. Если сила тяги достаточно велика, т. е. составляет более $\frac{1}{10}$ общего веса лодки, корпус под действием гидродинамической подъемной силы R_z постепенно начнет приподниматься из воды, а площадь смоченной

поверхности при этом уменьшается. Обратим внимание на это новое чрезвычайно важное обстоятельство. Появляется возможность резкого снижения степени или темпа роста гидродинамического сопротивления при одновременном увеличении скорости. Носовая волна перемещается теперь к середине корпуса. Нос яхты, поднимаясь из воды, создает у наблюдателя впечатление начинающегося скольжения или глиссирования. Но такое движение яхты еще не глиссирование. Яхта частично еще погружена в воду и поддерживается на поверхности одновременным совместным действием гидростатических и гидродинамических сил, уравнивающих вес яхты.

Движение лодки, когда она поддерживается одновременно статическими и динамическими силами, является переходным между обычным плаванием и чистым глиссированием — «полуглиссирование» (см. рис. 139, 2).

Этот род движения закончится в момент начала чистого глиссирования, т. е. движения, в котором корпус поддерживается над водой динамическими силами, т. е. подъемной силой R_2 . При этом корпус действительно находится над водой, двигаясь частично рикошетом по ее поверхности*.

Для яхты класса «Каноз» район «почти глиссирования» находится в пределах отношения $\frac{V}{\sqrt{L}} = 1,7—3,2$.

Для разных глиссирующих яхт эти величины будут различными. Они зависят от сочетания основных конструктивных характеристик: площади парусности, водоизмещения, длины корпуса и остойчивости.

В предыдущем изложении использовались понятия двух типов яхт: водоизмещающего и глиссирующего. Вернемся к этим определениям еще раз и посмотрим, чем они отличаются друг от друга. К яхтам первого типа относятся: «Нью-Йорк-32», международные « $R=6$ М», « $R=5,5$ М», «Дракон» и др., у которых отношение водоизмещения k к длине, т. е. $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$ более 150. Поскольку у та-

* «Двигаясь рикошетом» — определение, не соответствующее глиссированию. Рикошетированием называется движение при еще больших, чем при глиссировании, относительных скоростях, когда судно, коснувшись воды, пролетит некоторое расстояние над ее поверхностью до следующего касания и т. д. (прим. ред.).

ких яхт относительная скорость не превышает $V=1,4\sqrt{L}$, так называемой «скорости водоизмещения», а на воде они поддерживаются силами гидростатическими, форма корпуса должна быть приспособлена в первую очередь для преодоления волнового сопротивления.

Характерной особенностью водоизмещающих яхт является достаточно большое отношение длины корпуса к ширине, большая осадка и узкие сравнительно с шириной по миделю плавно обтекаемые формы носа и кормы. Очертания корпуса должны быть максимально обтекаемыми.

К типу глиссирующих яхт можно отнести только такие, при проектировании которых предусматривалась возможность наиболее

выгодного использования гидродинамических подъемных сил. Характерной чертой таких яхт являются небольшое отношение длины корпуса к его ширине, малая осадка и переход корпуса после миделя в широкую плоскую корму. Особенно важно выдержать необходимую форму шпангоутов, начиная от миделя к корме, и, возможно, малое отношение $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$

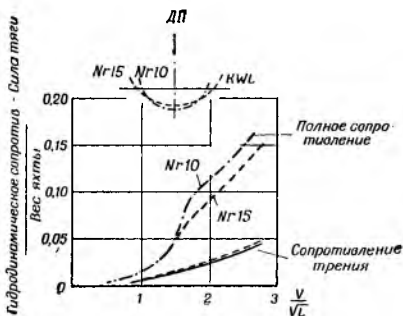


Рис. 141

Значение формы днища лучше всего можно оценить, сравнив кривые на рис. 141, построенные в исследовательском институте судостроения профессором Ата Нутку (Турция). Кривые 10 и 15 относятся к моделям, одинаковым по длине и весу, но отличающимся формой днища, очерченных разными радиусами. Отношение водоизмещения к длине обеих моделей $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3} = \text{около } 140$.

Характерный изгиб кривой сопротивления, которым обозначается начальное состояние глиссирования, названное нами «почти глиссирование», у более плоскодон-

ной модели 15 проявляется при соотношении $\frac{F_x}{D} = 0,065$, т. е. 6,5%, и отношении $\frac{V}{\sqrt{L}}$ около 1,6.

Для модели 10 начальное состояние глиссирования проявляется при соотношении $\frac{F_x}{D} = 0,095$, т. е. 9,5%, когда величина $\frac{V}{\sqrt{L}} = 1,7$. Модель 15 приобретет большую скорость при ветре меньшей силы.

Интересно сравнить форму шпангоутов легкой глиссирующей яхты «Фляйнг» У. Фокса (см. рис. 138) со шпангоутами «узкого» «Финна» с балластом (см. рис. 140).

По кривой гидродинамического сопротивления яхты «Финн» можно видеть, что возможность глиссировать сильно ограничена, несмотря на низкое соотношение $\left(\frac{D}{\frac{L}{100}}\right)^3 = 141$.

Яхта, построенная для глиссирования, всегда будет уступать яхтам, специально предназначенным для слабого ветра, и наоборот. Поэтому до сих пор не удается придать корпусу яхты такую форму, чтобы обеспечить раннее глиссирование и одновременно отличные гоночные качества при плавании с малыми скоростями на «водоизмещающем режиме». По необходимости корпусам придают некоторую компромиссную форму между этими противоположными требованиями. Примером бескомпромиссного решения может служить исключительно плоскодонная яхта класса «Скоу». Для улучшения ее лавировочных качеств ее закрепляют, чтобы уменьшить величину смоченной поверхности и тем самым сопротивление трения.

Рассмотрим более подробное состояние полного глиссирования и определим, в чем состоит сущность динамической подъемной силы R_z (см. рис. 139, 3 и 142).

Воспользуемся уже известным допущением, что яхта неподвижна, а водный поток движется со скоростью, равной скорости глиссирования V . Очевидно, что существо явления от этого не меняется.

Динамические силы, возникающие под плоским дном глиссирующей яхты, аналогичны силам, возникающим на

наветренной стороне паруса. В результате торможения потока, обтекающего корпус, кинетическая энергия переходит в динамическое давление p , действующее перпендикулярно к днищу, стоящему относительно движения под некоторым углом (рис. 142, а). Суммарное действие всех частичных давлений p можно выразить одной рав-

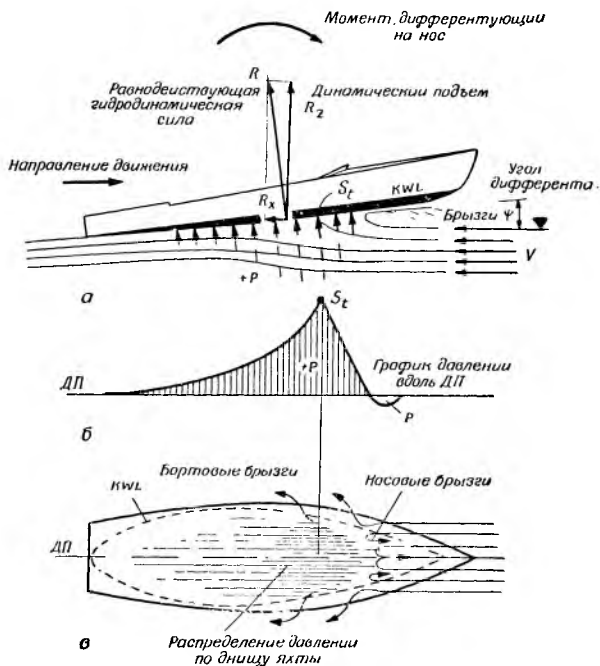


Рис. 142

нодействующей силой R . Наибольшее давление будет в точке S_t , в которой поток затормаживается полностью.

Наглядно это видно на рис. 142, б, где показано расположение давлений вдоль линии симметрии корпуса. Недалеко от точки S_t некоторая часть воды будет отбрасываться вперед в виде брызг. На рис. 142, в приводятся распределения давлений на днище корпуса. Высота штриховки соответствует интенсивности давления: чем выше штриховка, тем сильнее давление.

Заметим, что давления уменьшаются, чем они ближе к ватерлинии: происходит как бы «утечка» давлений наружу, проявляющаяся в виде брызг.

Чем уже корпус, тем больше «утечка». Брызги такого рода можно легко наблюдать у яхт на глиссировании.

Пена и брызги вокруг корпуса являются наглядным доказательством затрат части энергии движения на их образование, аналогично затратам на образование волн. Эти затраты, пропорциональные интенсивности появления брызг и пены, могут служить мерой величины сопротивления движению. Величину этого сопротивления найдем, разложив равнодействующую силу R на две составляющих силы R_z и R_x . Первая сила R_z уравнивает вес лодки p (см. рис. 139, 3). Вторая сила — сопротивление R_x . Эта сила неразрывно связана с подъемной силой R_z .

Измерения и расчеты показали, что этот новый вид сопротивления R_x (назовем его сопротивлением брызг *) по величине может быть почти таким же, как волновое сопротивление. Таким образом, общее гидродинамическое сопротивление и замедление его роста при глиссировании зависят главным образом от снижения сопротивления трения вследствие уменьшения площади смоченной поверхности.

Проведенные автором наблюдения на яхте класса «Финн» во время глиссирования подтвердили большую чувствительность лодки к изменению величины смоченной поверхности. Даже самое незначительное, сверх необходимого, потравливание шверта может прервать начавшееся глиссирование, что будет сопровождаться внезапным торможением и увеличением осадки кормы.

Дифферент корпуса, угол ψ , сильно влияет на сохранение глиссирования, поскольку от него зависит взаимное соотношение между силами R_z и R_x . В свою очередь, угол дифферента ψ зависит от формы корпуса, положения центра тяжести яхты, величины момента, дифференцирующего яхту на нос, и от скорости хода.

Очевидно, что расположение живого балласта (команды) ближе к носу или корме может иметь решающее влияние на угол дифферента ψ . Не трудно понять, что

* Называть общее сопротивление при глиссировании сопротивлением брызг нельзя, так как будут одновременно действовать и другие виды сопротивлений (волновое, трения, выступающих частей (прим. ред.).

слишком близкое размещение команды к носу лодки препятствует началу глиссирования. Чем короче корпус лодки и чем тяжелее команда, сравнительно с общим весом, тем чувствительнее лодка к местоположению команды.

Среди парусников часто можно слышать мнение, что, как только лодка начала глиссировать, ее гидродинамическое сопротивление перестает расти.

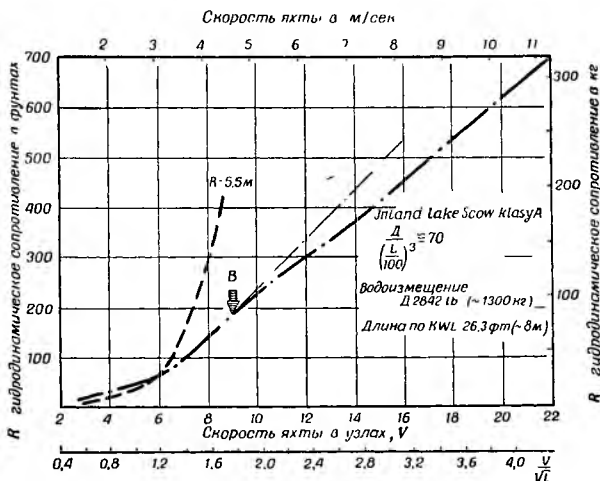


Рис. 143

В одном американском журнале можно было прочесть следующее утверждение: «В случае классических глиссирующих яхт, таких, как, например, «Скоу», суть явления легко понять: движущийся рикошетом по поверхности воды корпус почти или совсем не вытесняет воды, и поэтому сопротивление воды практически равно нулю». Хотя такое мнение и довольно распространено, тем не менее оно безосновательно. Достаточно взглянуть на рис. 143, на котором представлена кривая гидродинамического сопротивления яхты «Скоу» класса А.

Кривая построена на основании опытов с моделью в бассейне Хобокен (США) в положении без крена. Можно видеть, что сопротивление движению непрерывно растет независимо от скорости хода яхты. Такое положение не трудно было бы предвидеть, поскольку совсем устра-

нить сопротивление трения мы не в состоянии, а оно растет пропорционально квадрату скорости; кроме того, появляется сопротивление брызг одновременно с появлением динамической силы R_z . Единственно характерным явлением в состоянии «полуглиссирования» будет снижение степени, темпа роста гидродинамического сопротивления, обнаруживаемого при отношении $\frac{V}{\sqrt{L}}$ около 1,7

(точка B на кривой рис. 143), о чем уже упоминалось в анализе сопротивления «Каноз».

В момент перехода «гидростатического плавания» в полуглиссирование команда отчетливо ощущает, как скачками увеличивается скорость. Это положение способствовало созданию мнения, что сопротивление пропало.

Вторая кривая (см. рис. 143) представляет гидродинамическое сопротивление легкой водоизмещающей яхты класса « $R=5,5 M$ ». Сравнение второй кривой с первой кривой яхты «Скоу» показывает, как велико влияние темпа роста сопротивления на достижение максимальных скоростей. При двойном увеличении силы тяги с 200 до 400 фунтов скорость яхты « $R=5,5 M$ » увеличивается с 7,3 примерно до 8,5 узла, т. е. на 16,5%. В таких же условиях скорость яхты «Скоу» с 9,3 узла увеличится до 14,7 узла, т. е. на 58%.

В этом разделе рассматривалось движение яхты без крена на попутных курсах, когда против движения действуют главным образом волновое сопротивление и сопротивление трения. На лавировке появляются два рода новых сопротивлений, значение которых постепенно растет по мере уменьшения курсового угла.

г) Индуктивное сопротивление, вызываемое дрейфом

Анализируя систему аэрогидродинамических сил (см. рис. 13) для лавирующей яхты, можем установить следующее: аэродинамическая сила тяги F_x возникает одновременно с вредной, но неизбежной силой крена F_{yz} , вызывающей нежелательные крен и дрейф * Корпус ях-

* Дрейф вызывается горизонтальной составляющей силы F_{yz} , т. е. силой F_y (прим. ред.).

ты может противодействовать кренящей силе F_{yz} : а) своей остойчивостью (поперечной); б) гидродинамической силой бокового сопротивления R_y , возникающей на подводной части корпуса яхты, движущейся в воде с некоторым углом дрейфа.

Как впоследствии убедимся, задачу борьбы с кренящей силой F_{yz} корпус выполняет за счет появления дополнительного сопротивления, которое теперь прибавится к уже известным видам сопротивлений: волновому и трения. Ходовые качества яхты будут тем лучше, чем меньше это новое сопротивление. Что же влияет на гидродинамические свойства корпуса яхты? Очевидно, что сила бокового сопротивления R_y является результатом суммарного действия дейдвуда с килем (или шверта), корпуса и руля. Рассмотрим пока только действие дейдвуда с килем, не принимая во внимание корпус и руль.

Если угол дрейфа $\delta=0$ (рис. 144, б), гидродинамическое сопротивление будет складываться в основном из сопротивления трения и в небольшом размере сопротивления формы. Теперь поставим плоскость киля под некоторым углом δ к курсу яхты (см. рис. 144, в). Это вызовет появление характерного обтекания и расположения давлений на обеих его сторонах, подобно уже рассмотренному в аэродинамике паруса. В результате разницы между повышенным и пониженным давлениями на сторонах киля возникает равнодействующая гидродинамическая сила R . Ее можно разложить на две составляющих: боковую силу R_y и сопротивление R_x , направленных вдоль курса.

Сравнив величину гидродинамического сопротивления (см. рис. 144, а и в), убедимся, что сопротивление увеличилось, когда угол дрейфа достиг некоторой положительной величины δ . Так как при незначительных углах атаки δ (в границах от 0 до 10°) сопротивление трения и сопротивления профиля не увеличиваются, рост общего сопротивления можно объяснить только появлением нового рода сопротивления. Оно вызвано перемещением воды вокруг нижней кромки киля с одной стороны на другую, аналогично движению воздуха под гиком с наветренной на подветренную сторону. Вследствие такого движения воды образуются завихрения.

По аналогии с парусом это сопротивление можно назвать индуктивным $R_{ин}$, поскольку оно нераздельно свя-

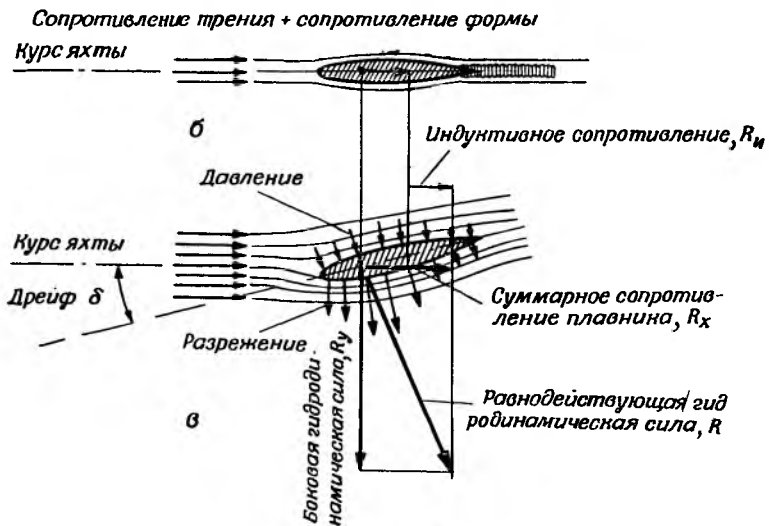
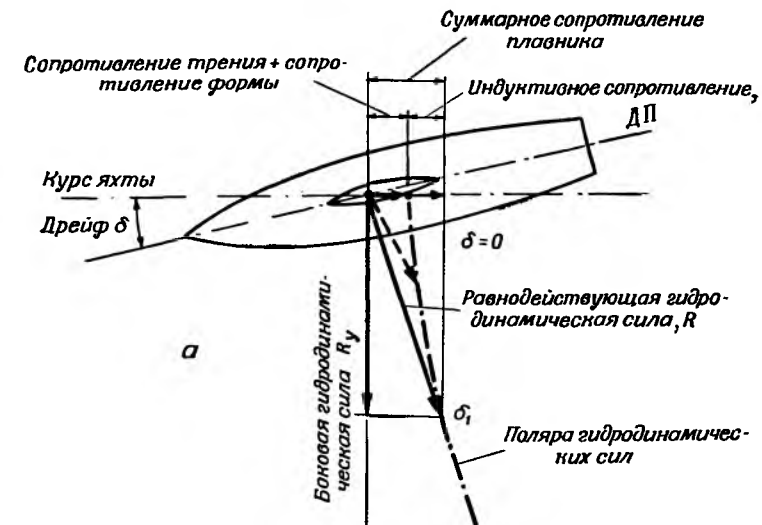


Рис. 144

зано с боковой силой R_y . Иначе говоря, сила R_y , являющаяся результатом расположения давлений на плавнике, порождает индуктивное сопротивление. Почти все сказанное ранее об индуктивном сопротивлении паруса относится и к плавнику, дейдвуду, шверту и перу руля.

Из анализа рис. 144, а можно представить, как изменяется индуктивное сопротивление $R_{и}$ в зависимости от роста угла дрейфа от $\delta=0$ до δ , т. е. с ростом гидродинамической силы на плавнике. Направленная вниз поляра, показанная на этом рисунке, аналогична поляре аэродинамической силы паруса, построенной для различных углов атаки относительно ветра. В рассматриваемом случае (плавник или шверт) углом атаки является угол дрейфа.

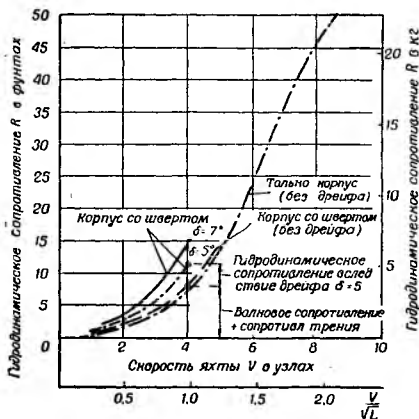


Рис. 145

Индуктивное сопротивление $R_{и}$ зависит от величины боковой силы F_y и от удлинения плавника λ_2 . Эту зависимость можно выразить следующей формулой:

$$R_{и} = K \frac{R_y^2}{\lambda_2},$$

где K — коэффициент формы плавника, зависящий от размеров и профиля.

Теперь на конкретном примере класса «Каное» посмотрим, какая часть общего сопротивления приходится на индуктивное сопротивление при плавании без крена (рис. 145). Самая нижняя кривая дает суммарное гидродинамическое сопротивление корпуса при плавании без дрейфа. Следующая над ней кривая дает сопротивление корпуса без дрейфа, но с опущенным швертом. Не трудно убедиться, что сопротивление выросло примерно на 10% только за счет опущенного шверта. Две следующие кривые относятся к плаванию с углом дрейфа $\delta=5^\circ$ и

углом $\delta=7^\circ$. Заметим, что при скорости $V=4$ узла, когда $\frac{V}{\sqrt{L}} =$ примерно 1,0 в плавании с углом дрейфа $\delta=5^\circ$ прирост гидродинамического сопротивления составляет 45%, а с углом дрейфа $\delta=7^\circ$ — около 90% основного сопротивления.

Повторяем, что эти результаты относятся к корпусу, имеющему шверт, но без руля. На величину сопротивле-

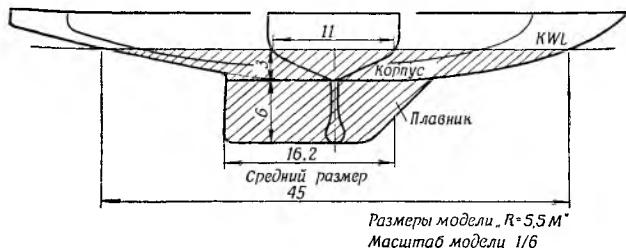


Рис. 146

ния большое влияние может оказать руль, особенно на яхте недостаточно уцентрированной. Во время опытов подтвердилось мнение, что мелко сидящий корпус «Каное» дает только около 2,5% боковой гидродинамической силы R_y , т. е. один корпус без шверта и руля в этом отношении совершенно не эффективен.

Этот вывод подтверждается результатами опытов, проведенных в Давидсоновской лаборатории в 1962 году. Испытывалась модель яхты «R=5,5 М», у которой было ярко выражен переход от корпуса к плавнику, прикрепленному к днищу, как показано на рис. 146. Техника экспериментов позволяла замерять силы отдельно на:

- 1) изолированном плавнике (подобно плоской пластине);
- 2) плавнике с корпусом;
- 3) изолированном корпусе;
- 4) корпусе с плавником;
- 5) всей модели (полностью).

В таблице даны в процентах результаты замеров величины боковой силы R_y для разных углов крена при скорости модели в 4 фута/сек (1,2 м/сек), $\frac{V}{\sqrt{L}} = 1,2$ и угле дрейфа $\delta=4^\circ$.

	Угол крена в градусах			
	0	10	20	30
1. Изолированный плавник, %	52	51	49	56
2. Добавочная сила на плавнике, %	28	23	20	6
3. Изолированный корпус, %	6	6	6	7
4. Добавочная сила на корпусе, %	14	20	25	31
5. Модели в целом, %	100	100	100	100

В пунктах 2 и 4 показан добавочный прирост боковой силы R_y для плавника и корпуса, соединенных вместе, когда они полезно взаимодействуют. Например, один корпус без крена дает только 6% боковой силы, а соединенный с плавником — 14%.

Аналогично улучшается эффективность и плавника, когда он работает совместно с корпусом. В прямом положении примерно 80% величины боковой силы приходится на плавник и едва 20% — на корпус. С увеличением угла крена обтекание корпуса становится асимметричным, его эффективность несколько улучшается (в части роста боковой силы), но одновременно уменьшается эффективность всей яхты в целом. К этому вопросу вернемся в следующем разделе, а теперь рассмотрим, какие факторы влияют на гидродинамическое качество плавника.

Несомненно, наибольшее значение в достижении высокого коэффициента полезного действия плавника имеет его удлинение. Аналогично с парусом удлинение плавника можно выразить отношением осадки (высоты) к ширине плавника. Если плавник не прямоугольный, а сложной конфигурации, лучше за удлинение считать отношение $\frac{\text{осадка}^2}{A}$, где A — площадь проекции плавника на диаметрально плоскость.

Чем больше удлинение плавника λ_r , тем меньше индуктивное сопротивление и выше его гидродинамическое качество. Поскольку плавник прикреплен к днищу, выравнивание разности давлений на его сторонах может происходить только по нижней кромке. Корпус действует на обтекание плавника так, что его удлинение как бы удваивается. Сравнительно с геометрическим удлинени-

ем $\lambda_r \left(\frac{\text{осадка}^2}{A} \right)$ так называемое эффективное удлинение можно тогда выразить $2 \left(\frac{\text{осадка}^2}{A} \right)$.

Это определение требует допущения, что движение воды около корпуса и плавника происходит только в горизонтальной плоскости. На малых скоростях, когда волнообразование слабо выражено, такое допущение приемлемо. На больших скоростях будет сказываться заметное влияние волн, и картина обтекания корпуса и плавника сильно усложнится. При этом «эффективное удлинение» плавника и его качество снизятся. На основании опытов можно принять эффективное удлинение = 1,7 $\left(\frac{\text{осадка}^2}{A} \right)$. Коэффициентом 1,7 следует пользоваться в случае, когда при вычислении удлинения знаменатель A является суммой боковых площадей плавника и корпуса. Это относится к типичным килевым яхтам, у которых трудно определить границу между корпусом и собственно плавником.

Для плоскодонных яхт целесообразно вообще не принимать во внимание корпус, а только боковую поверхность шверта с коэффициентом 2. Тогда эффективное удлинение будет $= 2 \times \left(\frac{\text{осадка}^2}{A} \right)$ (рис. 147).

Несколько упрощая задачу, рассмотрим на рис. 147 зависимость, существующую между удлинением плавника, боковой силой R_y и углом дрейфа. Четыре кривые коэффициента боковой силы характеризуют свойства плавников, имеющих одинаковый профиль («Гёттинген-409»), но различное удлинение.

При угле атаки (угле дрейфа) $\delta = 5^\circ$, коэффициенты C_y для удлинения = 5; 2; 1 и 0,5 будут соответственно равны 0,3; 0,2; 0,13 и 0,09. Взяв для примера площадь плавника $A = 1,0 \text{ м}^2$, а скорость плавания $V = 3 \text{ м/сек}$ (5,8 узла), можно подсчитать величину боковой силы R_y , образуемой плавниками разного удлинения:

$$R_y = 51 \cdot C_y \cdot V^2 \cdot A \text{ — для пресной воды;}$$

$$R_y = 52 \cdot C_y \cdot V^2 \cdot A \text{ — для морской воды.}$$

При плавании в пресной воде вычислить боковую силу можно по формуле: $R_y = 51 \cdot C_y \cdot 3^2 \cdot 1,0 = 45,9 C_y$ (кг),

а следовательно, для удлинения +5, 2, 1 и 0,5 боковая сила соответственно будет равна $R_y = 13,8; 9,2; 6,0; 4,1$ (кг).

Полученные результаты показывают огромную разницу в величине боковой силы, образующейся на одном квадратном метре площади плавника, зависящей от формы погруженной поверхности корпуса, точнее от распре-

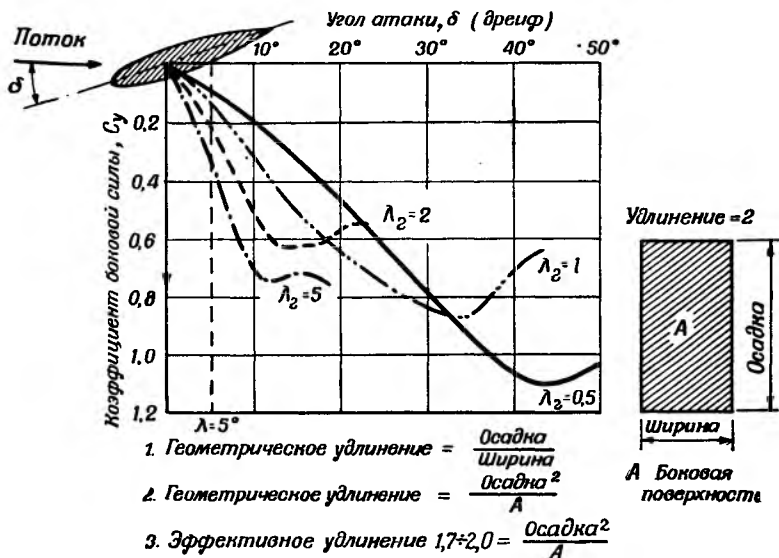


Рис. 147

деления этой поверхности преимущественно в глубину или вдоль корпуса. Отсюда напрашиваются следующие выводы:

а) увеличивая осадку и прежде всего удлинение плавника, можно получить желаемую величину боковой силы R_y при меньшей площади бокового сопротивления. За счет этого можно уменьшить величину смоченной поверхности, а следовательно, сопротивление трения и индуктивное сопротивление;

б) увеличивая осадку и сохраняя площадь бокового сопротивления, получим желаемую величину боковой силы R_y при меньшем угле дрейфа.

В обоих случаях улучшаются лавировочные качества

яхты. Что же препятствует использованию выгод большого удлинения площади бокового сопротивления корпуса?

1. Во многих случаях правила класса ограничивают максимальную осадку. Например, в правилах *RORC* предусмотрен штраф за превышение осадки.

2. Очень часты традиции и привычные эстетические критерии, касающиеся формы корпуса.

3. Остойчивость яхты, которая с увеличением осадки и одновременным понижением центра бокового сопротивления, ухудшается. В результате на лавировке крен увеличивается.

Это последнее ограничение, хотя и, несомненно, важное, под влиянием привычных традиционных взглядов часто переоценивается. Во многих случаях можно увеличить удлинение плавника без ухудшения лавировочных качеств яхты. Особенно это касается легких яхт, у которых остойчивость достигается в основном за счет широкого плоского корпуса. Полностью сказанное относится к яхтам типа «Скоу», а также двухкорпусным судам.

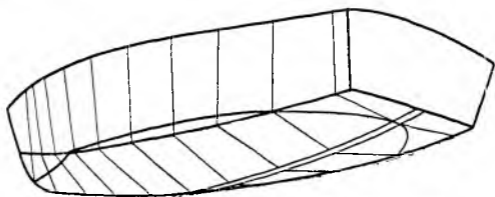
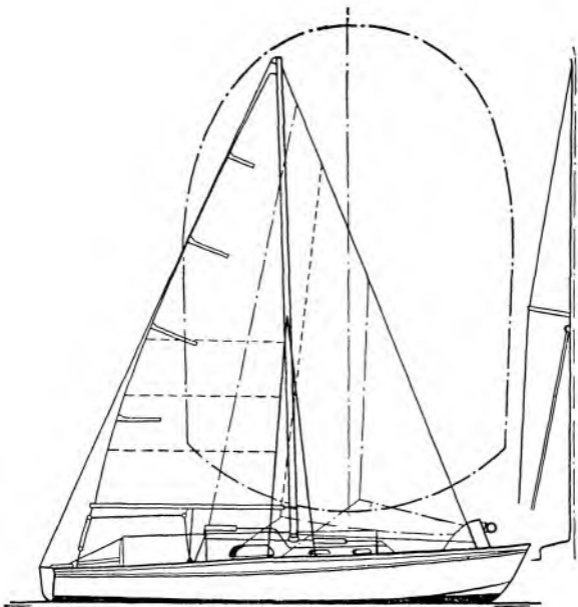
Примером смелого, новаторского подхода к проблеме может быть яхта «Блек Соо» конструктора Е. Г. Ван де Штадта, показанная на рис. 148. Эта легкая, глиссирующая яхта имеет длину $L=9,0$ м при водоизмещении 1,57 тонны. Обращает на себя внимание исключительно узкий и длинный плавник. Отношение водоизмещения к

длине $= \frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3} = 90$, и максимальная скорость временами

доходит до 20 узлов.

Компромиссы при опускании шверта на лавировке и при уборке его на полных курсах будут иметь некоторые преимущества перед обычными килевыми яхтами.

На рис. 149 показаны два шверта различной формы. Безусловно, эллиптический шверт (рис. 149, *а*) с большим удлинением будет гораздо эффективнее секторного шверта, показанного на рис. 149, *б*. Только за счет постановки шверта лучшей формы можно уменьшить угол дрейфа. Представим, что за счет удлинения шверта на яхте *А* удалось уменьшить угол дрейфа на 1° (рис. 150). Тогда на расстоянии одной морской мили яхта *А* выигрывает у яхты *Б* около 32 м. На дистанции 10 миль, когда лавировка занимает примерно 50%, яхта *А*, уйдет от ях-



Яхта малого водоизмещения
E.G. van de Stadt

Длина $L=9$ м
Водоизмещение $\Delta=1,57$ тонны

Рис. 148

ты B на 150 м. Если мастерство рулевых примерно одинаковое, то это даст заметный выигрыш во времени.

Поперечный профиль плавника или шверта тоже влияет на его эффективность. Обтекаемый профиль предпочтительнее плоского. Этот вывод не трудно сделать, анализируя рис. 151, на котором показаны две поляры: одна для профилированного плавника, другая для плоского (удлинение одинаковое).

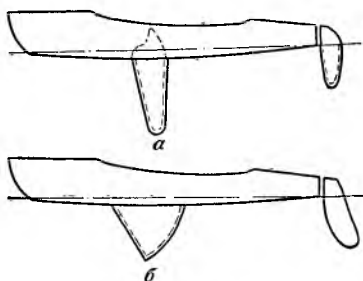


Рис. 149

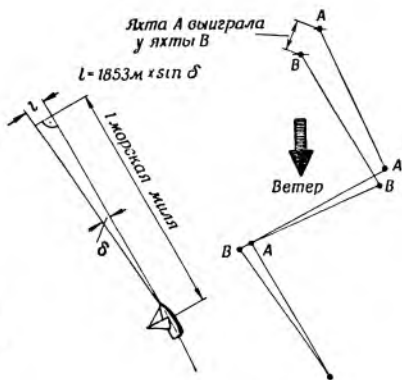


Рис. 150

Сравнивая эскизы, помещенные сбоку, заметим, что направления равнодействующих сил R_I и R_{II} разные, хотя оба плавника установлены под одним углом атаки $\delta = 10^\circ$. Разложив обе силы R на слагаемые: боковую силу R_y и сопротивление R_x — убедимся, что при той же величине боковой силы сопротивление плоского плавника больше (см. рис. 151).

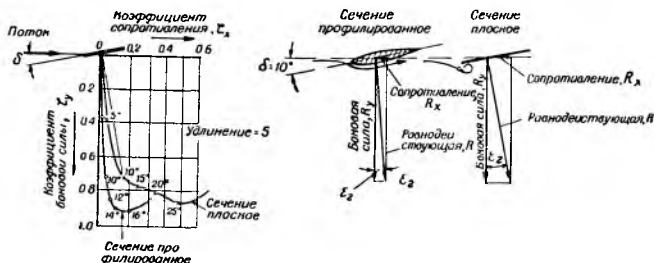


Рис. 151

Иными словами, боковая сила на профилированном плавнике образуется при меньшем гидродинамическом угле сопротивления ϵ_2 . Какое практическое значение это имеет?

Представим себе, что рассмотренные плавники являются рулями, которые для борьбы с приведением яхт приходится отклонять на угол 10° . По диаграмме найдем, что коэффициенты сопротивления будут для профилированного руля $\zeta_x = 0,05$, для плоского $\zeta_x = 0,14$. Если площадь рулей одинакова и равна $A = 0,5 \text{ м}^2$, а скорость яхт $V = 3 \text{ м/сек}$, то сопротивления рулей в пресной воде не будет:

$$R_x = 51 \cdot \zeta_x \cdot V^2 \cdot A = 51 \cdot \zeta_x \cdot 3^2 \cdot 0,5 = 22,9 \cdot \zeta_x.$$

Отсюда сопротивление профилированного руля = $1,15 \text{ кг}$, а плоского руля = $3,2 \text{ кг}$. Чтобы компенсировать большее сопротивление руля, площадь парусов на второй яхте должна быть больше, чем на первой. Чем больше угол отклонения, тем больше преимущества профилированного руля. Объясняется это более плавным обтеканием, которого для плоского руля достичь почти не удастся. Кроме профиля, большое влияние на характер обтекания, а вместе с тем и на сопротивление оказывает форма передней, атакующей кромки плавника.

На рис. 152 показаны результаты измерения сопротивлений четырех типовых швертов класса «Каноз», имеющих одинаковые наружные очертания и площадь $A = 0,365 \text{ м}^2$, но различные поперечные профили. Изображения профилей швертов a, b, c и d выдержаны в пропорциях фактических размеров. Первая, самая левая, кривая показывает изменение сопротивления только одного корпуса в зависимости от угла дрейфа в пределах от 0° до 7° . Кривые a, b, c , и d показывают изменение сопротивления корпуса вместе со швертом различного профиля.

В области практических углов дрейфа для «Каноз», т. е. $\delta = 2^\circ - 5^\circ$, разница в сопротивлениях между швертами доходит до $15 - 20\%$.

Самым выгодным оказался профиль a , что подтвердилось результатами гонок. Заметим, что когда угол дрейфа $\delta = 0$, корпус дает около 90% общего сопротивления, а шверт только около 10% .

Если угол дрейфа $\delta = 7^\circ$, то корпус дает около 50% общего сопротивления, причем сопротивление корпуса в результате дрейфа увеличивается примерно на 20%.

Отсюда напрашивается вывод, что можно уменьшить общее сопротивление лодки, если снизить дополнитель-

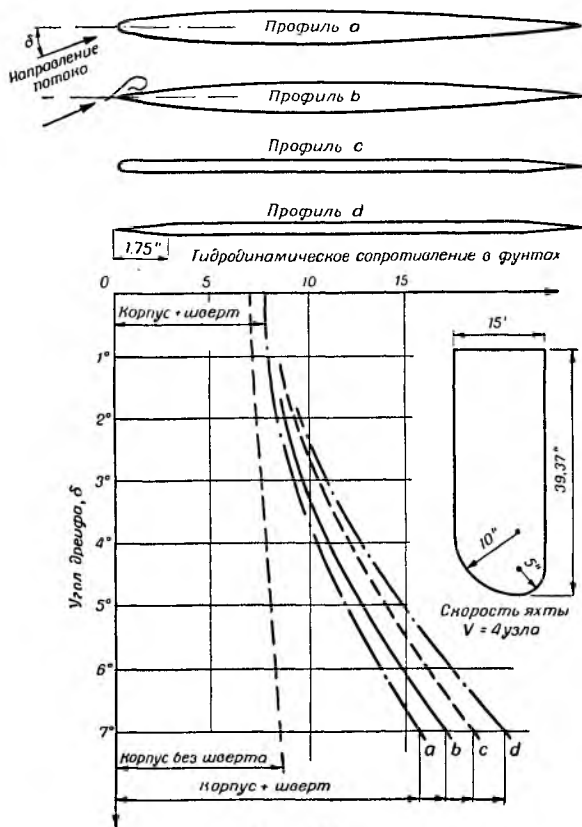


Рис. 152

ное сопротивление, возникающее на корпусе в результате дрейфа. Этого, по-видимому, можно достичь, если шверт установить по отношению к диаметральной плоскости под некоторым углом, обеспечивающим движение корпуса по курсу без дрейфа.

Пытаясь бороться с сопротивлением движению, строители яхт применяли шверты специальной конструкции. Примером может быть яхта, изображенная на рис. 153. На плоскодонном корпусе поставлены два шверта по линиям, сходящимся под некоторым углом к диаметральной плоскости. На лавировке наветренный шверт выбирается. Когда шверт *B* поднят, на шверте *A* образуется достаточная боковая сила, причем корпус движется без дрейфа.

Такой же результат можно получить и со швертом, установленным под углом в границах 3—5° к диаметральной плоскости яхты.

Теперь вернемся еще раз к вопросу формы атакующей кромки шверта или пера руля (рис. 154).

Острая кромка — самая невыгодная, кроме условий плавания с очень малым углом атаки, как, например, на попутных курсах. Тупая кромка хуже параболической, но лучше острой. Помещенный внизу обтекаемый профиль с точки зрения гидродинамики самый выгодный. Наибольшая ширина профиля расположена примерно на середине его длины.

Задняя кромка плавника имеет относительно небольшое значение, поскольку находится в области возмущенного потока. Таким образом, нет никаких оснований считать, вопреки широко распространенному мнению, что кромки шверта и руля надо заострять, как бритву.

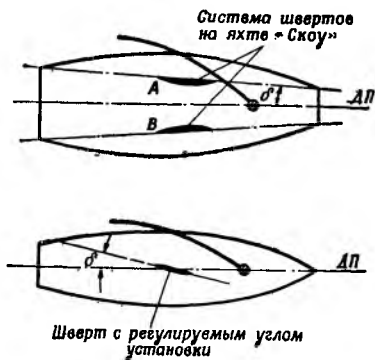


Рис. 153

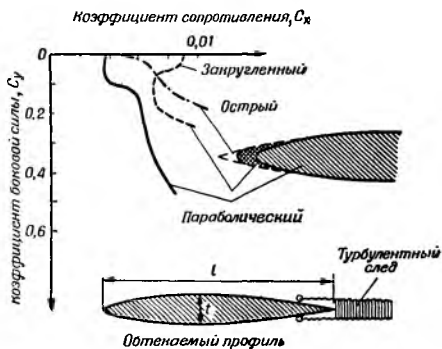


Рис. 154

Опытами установлено, что округление задней кромки даже на 5% длины профиля l не оказывает влияния на сопротивление, а с точки зрения эксплуатационной оно удобнее.

Сила бокового сопротивления, уравнивающая силу дрейфа, в большой степени зависит от скорости яхты V , которая в формулу определения гидродинамиче-

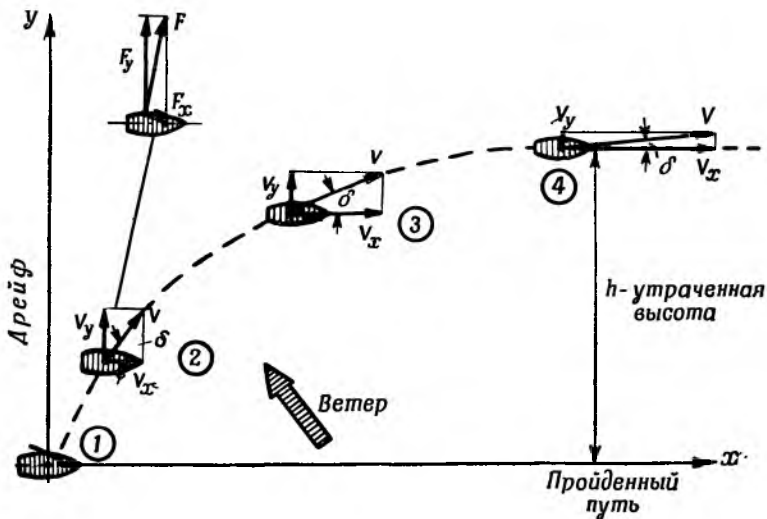


Рис. 155

ской реакции входит во второй степени. Из анализа формулы для расчета силы бокового сопротивления R_y , а также графика, приведенного на рис. 147, следует, что чем больше будет скорость V , тем при меньшем дрейфе можно будет получить достаточную силу бокового сопротивления.

На рис. 155 показана зависимость между скоростью дрейфа V_y , скоростью вдоль диаметральной плоскости яхты V_x и углом дрейфа δ при ходе в лавировку, в границах от начала движения до полной скорости, т. е. для периода разгона яхты. Этот период для килевых яхт вследствие большой инерции, очевидно, значительно больше, чем для легких швертботов. Но в обоих случаях для набора скорости потребуется время, что может при-

вести к потере выгодного положения, особенно на старте, у наветренного знака стартовой линии.

Время разгона увеличится при перебранных шкотах, что часто бывает с недостаточно опытными командирами, стартующими с другими яхтами.

При малой скорости V (рис. 155, 1 и 2) вымпельный ветер будет довольно полным (больше, чем надо). Выбранные шкоты дадут большую силу F_y , вызывающую дрейф, при одновременно небольшой силе тяги F_x . Яхта с поставленными таким образом парусами будет упорно дрейфовать, пока, с медленно нарастающей скоростью V и с изменением направления вымпельного ветра, не улучшится гидродинамическая эффективность подводной части корпуса.

д) Сопротивление, вызванное креном

Типичное поведение килевой яхты (однокорпусной) на лавировке показано на рис. 156 на примере яхты «Джимкрак». В диапазоне небольших скоростей вымпельного ветра и, следовательно, небольшом крене (в пределах $0-10^\circ$) прирост скорости ветра вызывает заметное увеличение скорости яхты V .

По мере того, как усиливается ветер и растет крен, прирост скорости яхты становится медленнее. Когда скорость вымпельного ветра доходит до $V_k=20$ узлам, что соответствует скорости истинного ветра $V_n=15$ узлам, яхта достигает предела своей скорости $V=6$ узлам при критическом угле крена 30° . При дальнейшем усилении ветра, когда крен достигает 35° и более, скорость яхты начинает падать ниже уже достигнутого максимума. Это доказывает, что в определенных условиях силы ветра прирост гидродинамического сопротивления, вызванный креном и дрейфом, больше прироста силы тяги на парусах.

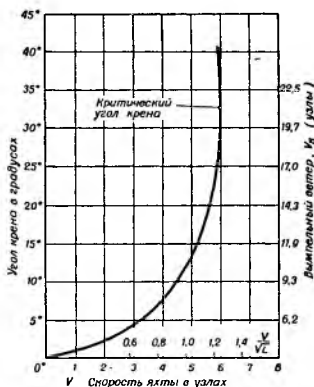


Рис. 156

Обработанные результаты замеров на яхте «Джимкрак» и на ее модели в бассейне, помещенные на рис. 157, показывают, сколь большим может быть прирост гидродинамических сопротивлений, вызванный аэродинамической силой крена. Сплошная линия показывает изменение гидродинамического сопротивления R на разных скоростях яхты, на полном курсе, без крена. Короткими линиями показано изменение сопротивления на разных углах крена, включая индуктивное сопротивление, вызванное дрейфом яхты на лавировке.

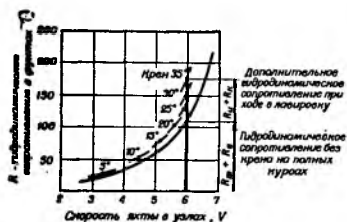


Рис. 157

Для скорости $V=6$ узлам дополнительное сопротивление у лавирующей яхты, идущей с креном 35° , примерно на 40% больше, чем когда яхта плывет без крена на попутном курсе.

Полное гидродинамическое сопротивление можно разделить на две основные группы, которые в зависимости от курса будут проявляться неодинаково. На полном курсе на корпус действует, главным образом, сопротивление трения R_T и волновое сопротивление R_B . На рис. 157 они обозначены векторами R_T и R_B . По мере перехода к более острым курсам приобретает все большее значение два новых сопротивления: индуктивное $R_{и}$, вызванное дрейфом, и сопротивление крена $R_{к}$. При малых углах крена большее значение имеет индуктивное сопротивление, а при больших — сопротивление крена. Их суммарная относительная величина показана на рис. 158 по данным яхты « $R=6M$ » («Джилл»), корпус которой близок к корпусу яхты «Джимкрак» (длина по KWL — 7,15 м).

Масштаб сопротивлений R на рисунке взят для наглядности пятикратным по сравнению с масштабом силы бокового сопротивления R_y . Две кривые, представленные в виде полярных диаграмм, показывают, как изменяется сопротивление $R_{и}$ и сила бокового сопротивления R_y на углах крена 20° и 30° при скорости яхты $V=6$ узлам в зависимости от углов дрейфа. Прирост сопротивления от крена в 20° невелик по сравнению с сопротивлением корпуса без крена и едва достигает нескольких процентов.

Заметим, что закрепленный корпус дает силу бокового сопротивления даже в том случае, если дрейф отрицательный. При угле дрейфа 0° и крене 20° величина силы бокового сопротивления R_y (показанная черточкой) достигает около 30% значения силы R_x , которая уравнивает кренящую силу парусов, вызывающую этот крен.

Гидродинамическое сопротивление в фунтах, R_x

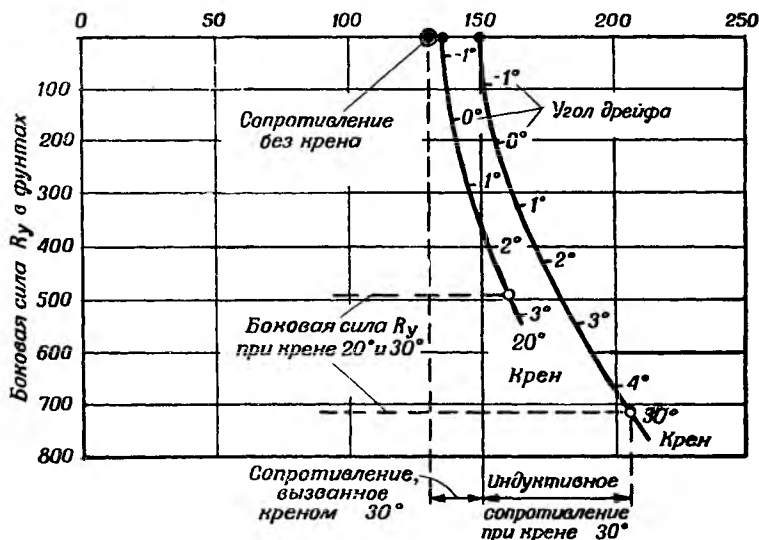


Рис. 158

Таким образом, закрепленный корпус более эффективен в образовании боковой силы, вследствие чего угол дрейфа, который был бы необходим для образования боковой силы такой же величины, уменьшается (на незакрепленном корпусе). Отрицательное действие крена, вызывающего появление добавочного сопротивления, в определенных границах компенсируется уменьшением дрейфа на угол $1,0-1,5^\circ$. Сопротивление, вызванное только креном в 30° , становится уже равным примерно 15% основного сопротивления (без крена). Из общего прироста сопротивления 25% приходится на сопротивление крена, а остальные 75% составляет индуктивное сопротивление.

По мнению профессора К. Давидсона (Институт Стивенса в США), «...добавочное сопротивление, вызываемое действием кренящей силы, образуется в результате неблагоприятных перемен в характере волнообразования накрененного корпуса. Это проявляется резко, когда крен становится более 20° ».

Такое утверждение полностью согласуется с хорошо известными фактами: скорость яхты на лавировке тем больше, чем меньше у нее крен. Подходя с другой позиции, можно сказать, что ходовые качества яхты на лавировке будут тем выше, чем сильнее ветер, при котором она достигает критического угла крена (см. рис. 156). Собственно по этим причинам надо уменьшать площадь парусности или ставить более плоские паруса, когда усиливается ветер, чтобы не оказаться в таком положении, как показано на рис. 156: скорость падает, когда с усилением ветра крен доходит до критической точки.

Интересные результаты были получены на яхте, оборудованной лагом. Оказалось, что на сильном ветре с полными парусами скорость лавирующей яхты, как правило, меньше (иногда значительно), чем с зарифленными парусами, даже тогда, когда команда не видит никакой необходимости брать рифы.

Многие яхтсмены, особенно начинающие рулевые легких лодок, не задумываются над тем, какой вред приносит слишком большой крен. Некоторые из них любят ходить с большим креном, что выглядит эффектно, но практически пользы не приносит. Чрезмерный крен влияет не только на скорость яхты, но и на способность идти круто к ветру.

Вернемся к рис. 54 и вспомним, что лавировочный курс β равен сумме двух углов: угла аэродинамического сопротивления ϵ_a и угла гидродинамического сопротивления ϵ_2 .

Если под действием каких-либо факторов увеличится угол ϵ_a или ϵ_2 , тотчас автоматически снизятся лавировочные способности яхты, показателем которых наряду с другими является и угол β . Кренящая сила, вызвавшая слишком большой крен, может способствовать увеличению как того, так и другого угла. О влиянии крена на аэродинамическую эффективность работы паруса упоминалось при анализе рис. 56. Крен, безусловно, вреден, так как увеличивает угол ϵ_a .

Ряд интересных выводов можно сделать по результатам замеров, сделанных на яхте «Джимкрак» во время лавировки:

	Угол крена в градусах						
	5	10	15	20	25	30	35
Вымпельный ветер в узлах	6,2	9,3	11,9	14,3	17,0	19,7	22,5
Скорость яхты в узлах	3,3	4,5	5,2	5,6	5,9	6,0	6,0
Боковая сила в кг	39,8	78,2	117,0	144,0	174,0	202,0	225,0
Гидродинамическое сопротивление в кг	11,8	24,1	35,7	46,8	59,0	70,0	79,5
Угол гидродинамического сопротивления	16,6	17,5	18,1	19,1	20,5	21,8	23,5
Курс яхты к вымпельному ветру в градусах	26,1	26,5	27,0	27,6	28,6	29,7	31,0

Гидродинамический угол сопротивления ϵ_2 по мере увеличения скорости яхты также непрерывно растет, соответственно с приростом сопротивления R_x . Известно, что величина боковой силы R_y увеличивается пропорционально квадрату скорости яхты, а сопротивление растет еще быстрее. Рулевой ничем не может повлиять на происходящие явления. Но, когда яхта достигнет максимума скорости (в нашем примере $V=6$ узлам при скорости вымпельного ветра $V=19,7$ узла), можно избежать ухудшения ее лавировочных качеств, если взять рифы. Яхта, на которой не взяли рифов, тоже может идти со скоростью $V=6$ узлам, что покажет лаг, но менее остро, примерно на $1,5^\circ$, т. е. на разность гидродинамических углов ϵ_r при крене в 30° и 35° . На нижней строчке таблицы показаны соответствующие курсы яхты относительно вымпельного ветра — β .

Все рассуждения о влиянии крена относятся к тяжелым, килевым яхтам. Для легких плоскодонных яхт типа «Скоу» (см. кривую сопротивления на рис. 143) умеренный крен в пределах $20-30^\circ$ может даже улучшить ходовые качества яхты. На слабых ветрах целесообразно

посадить команду на подветренный борт для искусственного закренивания, что даст уменьшение смоченной поверхности и зависящего от нее сопротивления трения.

В таблице приводятся величины сопротивлений в кг при разных углах крена для яхты «Скоу» класса А, замеренные в лаборатории Давидсона в США.

Крен	0°		10°		20°		30°	
V в узлах	Сопротивление							
	общее	трения	общее	трения	общее	трения	общее	трения
7,8	50,5	49,0	48,2	33,7	40,8	25,4	37,7	22,8
9,4	82,2	65,5	77,2	48,2	67,7	36,7	61,8	32,7
14,6	170,0	133,0	173,5	86,8	138,5	90,8	124,5	81,4
Смоченная поверхность, м ²	18,5		18,0		14,4		13,3	

Таким образом, пересадив команду на подветренный борт, можно довести угол крена до 20° и снизить гидродинамическое сопротивление примерно на 19%, вследствие чего лавировочные качества яхты улучшатся примерно на 5%.

Следует, однако, добавить, что, когда крен превысит определенный предел, аэро- и гидродинамические качества яхты могут настолько ухудшиться, что выгоды от уменьшения смоченной поверхности не смогут компенсировать возросших потерь.

Кроме того, чрезмерный крен нарушает устойчивость на курсе и увеличивает склонность яхты приводиться. Сравнивая системы сил на рис. 159, а и б, убедимся, что склонность приводиться у яхты с большим креном (рис. 159, б) сильнее, чем у первой яхты (рис. 159, а), идущей с меньшим креном. С увеличением угла крена Θ автоматически все сильнее будет сказываться склонность яхты приводиться.

Склонность приводиться можно определить с помощью момента $R_2 \cdot a$ (рис. 159), который стремится изменить

курс яхты. Заметим, что, как только возникает крен, появляется и неуравновешенное плечо a , в результате перемещения прежнего ц. б. с. относительно линии действия аэродинамической силы. При сильных порывах ветра и большом крене момент может стать настолько большим, что рулевому не удастся удержать яхту, и она может привести до левентика.

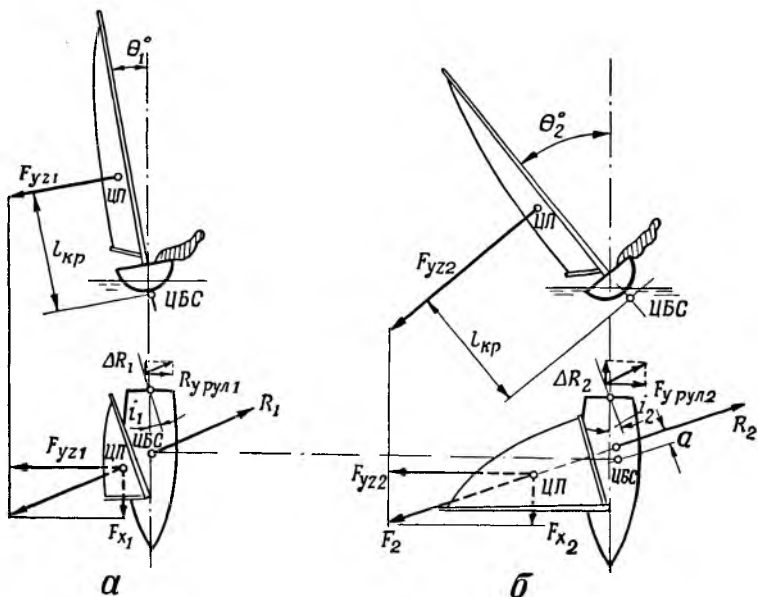


Рис. 159

Для удержания яхты на курсе приводящему моменту $R_2 \cdot a$ приходится противодействовать отклонением руля. Увеличивая отклонение руля с i_1 до i_2 , мы тем самым увеличиваем его гидродинамическое сопротивление с величины ΔR_1 до величины ΔR_2 , что, очевидно, вредно для скорости. Дополнительное сопротивление, возникающее из-за склонности яхты приводиться, может дойти до 40% общего сопротивления. Поэтому нет никаких доводов сохранять большую парусность, если яхта сильно приводится.

2. Гоночные качества яхты

а) Общая оценка яхты

Влияние курса относительно ветра на скорость хода типичной килевой яхты сравнительно невелико. В этом

можно убедиться, рассматривая поведение яхты на разных курсах, показанное на рис. 160. Данные относятся к яхте класса «R=6M» при скорости истинного ветра $V_{и}=12$ узлам и составлены по результатам опытов, проведенных профессором Давидсоном для плавания четырьмя курсами: бейдевиндом, галфвиндом, бакштагом и фордевиндом. Скорость яхты оставалась в границах от 5,9 до 6,4 узла независимо от курса, т. е. разница была менее 10%. Это объясняется двумя причинами, к рассмотрению которых мы приступим.

Первую причину обнаружим при сравнении векторов скорости вымпельного ветра $V_{к}$, от которого в прямой зависимости находится величина аэродинамических сил. Когда яхта уваливает, резко снижается скорость вымпельного ветра, а вместе с этим величина равнодей-

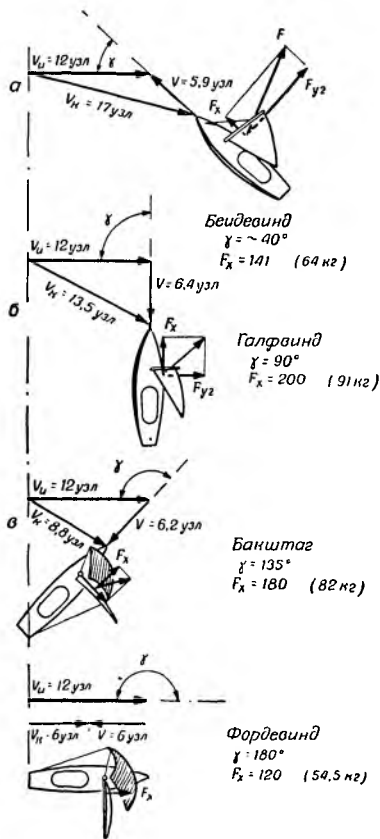


Рис. 160

ствующей аэродинамической силы.

Вначале уменьшение аэродинамической равнодействующей силы F компенсируется даже с избытком ее лучшей направленностью, что можно усмотреть из геомет-

рических построений на графиках (см. рис. 160, а и б). Затем, когда яхта переходит на курс бакштаг и фордевинд, сила тяги F_x уменьшается до минимума, поскольку неуклонно понижается скорость вымпельного ветра V_k .

Постановка спинакера, так же как и увеличение пуза паруса, несколько улучшает положение. Однако ни то, ни другое не может полностью компенсировать частичной потери скорости вымпельного ветра.

Скорость вымпельного ветра от бейдевинда до фордевинда падает от 17 до 6 узлов, т. е. почти в три раза, а если вспомнить, что аэродинамическая сила пропорциональна квадрату скорости ветра, станет понятным невозможность практически преодолеть потери.

Заметим, что скорость яхты меняется не столь значительно и не эквивалентно величине силы тяги F_x . Дело в том, что в районе плавания, где соотношение скорости к длине $\frac{V}{\sqrt{L}} > 12$, находится крутой барьер гидродинамических сопротивлений (см. рис. 136, резкий подъем кривой сопротивления). А когда отношение $\frac{V}{\sqrt{L}}$ становится более 1,2, увеличение силы тяги очень незначительно отражается на скорости яхты.

Ходовые качества килевой яхты на различных курсах относительно истинного ветра можно представить в ви-

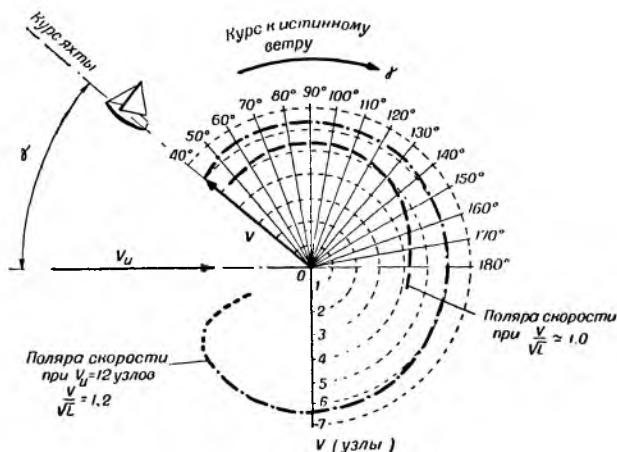


Рис. 161

де полярного графика скоростей, как показано на рис. 161.

При скорости ветра $V_{и}=12$ узлам график скоростей для разных курсов γ относительно истинного ветра представляет собою почти окружность. Внутренняя кривая представляет собой теоретическую кривую (предположительную) для условий, когда отношение $\frac{V}{\sqrt{L}} = \text{около } 1,0$.

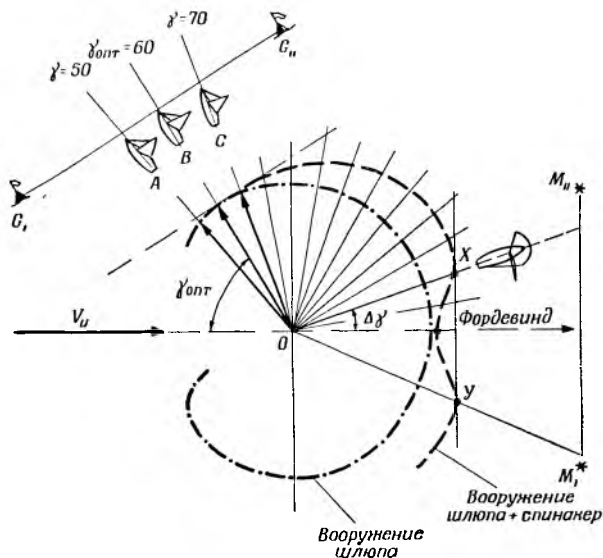


Рис. 162

В этом случае влияние площади парусов или их полноты, а также разницы в скорости вымпельного ветра на скорость яхты будет сильнее. Поэтому кривая скоростей на полных курсах становится меньше (очерчена большим радиусом).

Для яхты со спинакером на курсе фордевинд может получиться даже вогнутая кривая в результате попадания спинакера в тень от грота, что сразу отразится на скорости яхты.

Знакомство с полярными графиками скоростей может помочь в решении некоторых тактических проблем в гонках. Рассмотрим два случая использования графика. На

рис. 162 показана гоночная ситуация, когда три конкурента A , B и C приближаются к финишу: $G_I—G_{II}$. Возникает вопрос, каким курсом относительно ветра следует идти, чтобы скорее финишировать? Многие рулевые ошибаются.

Надлежащий или оптимальный курс $v_{\text{опт}}$ к финишу можно определить, проведя параллельно линии финиша касательную к поляре скоростей. В нашем случае это дает курс $v_{\text{опт}} = 60^\circ$.

Таким образом, яхты A и C идут не оптимальными курсами и проиграют яхте B , держащей оптимальный курс. Некоторые рулевые любят слишком острые курсы, особенно когда проходят длинный участок лавировки. Иногда на выбор курса влияет чисто психологический фактор, как, например, желание финишировать ближе к судейскому судну в надежде, что их быстрее примут.

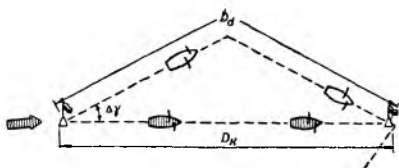


Рис. 163

Второй пример пользования графиком относится к плаванию полным курсом. Яхта со спинакером, по-видимому, быстрее придет на финиш $M_I—M_{II}$ двумя бакштагами вместо фордевинда.

На курсе бакштаг спинакер выводится из ветровой тени грота, скорость вымпельного ветра увеличивается, яхта пойдет намного быстрее и, несмотря на более длинный путь, финиширует раньше.

Лавировка на попутном ветре выгодна еще потому, что позволяет избавиться от ветровой тени наседающих сзади противников и занять выгодную позицию у поворотного знака (рис. 163).

$\Delta\gamma = 10^\circ$	$- Dd = 101,5\%$	Dk
$\Delta\gamma = 15^\circ$	$- Dd = 103,5\%$	Dk
$\Delta\gamma = 20^\circ$	$- Dd = 106,4\%$	Dk
$\Delta\gamma = 25^\circ$	$- Dd = 110,3\%$	Dk
$\Delta\gamma = 30^\circ$	$- Dd = 115,5\%$	Dk
$\Delta\gamma = 35^\circ$	$- Dd = 122,0\%$	Dk
$\Delta\gamma = 40^\circ$	$- Dd = 130,5\%$	Dk

Опытные плавания на яхте « $R=5,5M$ » позволили установить, что при слабом ветре даже значительное отклонение от прямого фордевинда может быть выгодным. При

отклонении $\Delta\gamma=40^\circ$ скорость яхты была на 60% больше, чем на чистом фордевинде.

Путь увеличивался на 30%, а чистая выгода во времени оказалась около 19%. На более сильном ветре и отклонении от чистого фордевинда на $\Delta\gamma=30^\circ$ скорость возросла только на 10%, длина пути увеличилась на 15,5%. Проигрыш во времени оказался около 5%.

Несхожесть результатов, полученных на слабых и на сильных ветрах, опять же объясняется резким приростом гидродинамического сопротивления килевых яхт при большой относительной скорости. Поэтому хотя скорость вымпельного ветра и увеличится на курсе бакштаг, но это увеличение почти не даст прироста скорости.

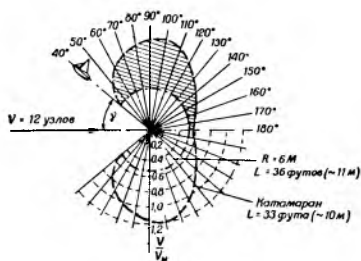


Рис. 164

Во время опытных плаваний на яхте « $R=5,5$ М» установлено, что выгоды такого плавания зависят также от волнения моря. Наилучшие результаты получаются на спокойной воде и слабом ветре. Отклонение от чистого фордевинда тогда выгодно держать в границах $30\text{—}40^\circ$. Окончательный выбор этого угла зависит от индивидуальных особенностей яхты.

Скоростные достижения катамаранов принципиально отличаются от таковых на обычных килевых яхтах. Рассмотрим рис. 164, где даны две поляры скоростей для яхты « $R=6$ М» с длиной ватерлинии 36 футов и катамарана «Симметри» конструктора Хуго Майерса длиной 33 фута.

Кривые позволяют судить о поведении обоих судов при одном и том же ветре (истинный ветер $V_{и}=12$ узлам) на различных курсах γ . Вместо шкалы скоростей график построен по шкале отношения скорости судна к скорости истинного ветра $\frac{V}{V_{и}}$.

Не трудно убедиться, что на остром курсе и на фордевинде большой разницы в скоростях не наблюдается, но на курсах галфвинд и близко к нему скорость катамарана выше скорости яхты в два с лишним раза.

Эти две кривые, в сущности, представляют два противостоящих друг другу типа судов: с одной стороны, типичные однокорпусные килевые суда, с другой — двухкорпусные катамараны. Для первых судов взгляды на соотношение размеров корпуса, площади парусности, формы корпуса и величины водоизмещения сложились в течение веков, в результате чего они лучше приспособлены для плавания с относительной скоростью V в районе $1,4\sqrt{L}$. Традиционный подход к решению основных вопросов в проектировании килевых яхт практически лишает всяких надежд повысить их скорость за пределы отношения $\frac{V}{V_n}$ более 0,6.

С точки зрения возможностей достижения высоких скоростей с отношением $\frac{V}{V_n}$ более 0,6 катамараны обладают большими возможностями. Энтузиаст катамаранов Хуго Майерс считает, что «появление катамарана можно сравнить с появлением реактивного двигателя в авиации. С точки зрения конструктора переход к высоким скоростям плавания можно сравнить с переходом самолетов к сверхзвуковым скоростям: в обоих случаях и самолетам и яхтам надо преодолеть высокое волновое сопротивление».

Возвращаясь к рис. 164, заметим, что между кривыми в пределах заштрихованного поля будут размещаться поляры скоростей всех других яхт малого водоизмещения или швертботов, как, например, «Летучий голландец», «Финн», «Скоу» и т. п.

В зависимости от величины отношения $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$, а также отношения площади парусности к водоизмещению $\frac{S}{D}$ кривые скоростей различных яхт будут располагаться ближе к той или другой кривой. Взятое для примера отношение $\frac{V}{V_n} = 1,2$ у катамаранов может быть превышено.

Ни легкие скоростные яхты и швертботы, ни катамараны, изобретение которых считается прогрессивным явлением в современном спорте, по идее не новы, а давно

известны. Сейчас происходит их вторичное открытие в благоприятное время, когда современный человек стремится к высоким скоростям, пока не приносящим ему счастья. Но, если его лишить надежд на достижение высоких скоростей, он будет разочарован, если не обижен. Вспомним, что легкие яхточки, насмешливо называвшиеся «скользящими посудинками», плавали еще в конце прошлого века в США и Англии. Что же касается катамаранов, то древние обитатели Тихого океана строили катамараны и тримараны без единого гвоздя и, не пользуясь компасом, сумели заселить острова Тихого океана.

Для достижения высоких скоростей парусные суда должны удовлетворять следующим основным условиям: иметь минимальный вес при максимальной остойчивости и площади парусности.

Решающее значение в соблюдении этих требований принадлежит приемам и средствам, благодаря которым судно приобретает остойчивость. Рассмотрим этот вопрос на примере, показанном на рис. 165. На диаграммах представлены системы сил, действующих на однокорпусную яхту и катамаран на курсе галфвинд, т. е. когда скорость может быть максимальной. Путем простого сравнения можно прийти к выводу, что скорость будет тем больше, чем: 1) большей кренящей силе F_{yz} может противодействовать корпус при сохранении малого угла крена и 2) меньше при этом растет гидродинамическое сопротивление R_x , зависящее, как известно, в основном от водоизмещения D .

Высокое отношение $\frac{F_{yz}}{D}$ может быть критерием для оценки способностей данной конструкции в достижении высоких скоростей. Когда истинный курс $\gamma = 90^\circ$ и скорость ветра $V_{и} = 12$ узлам относительно вымпельного ветра, катамаран плывет в области бейдевинда, тогда как однокорпусная яхта идет почти вполветра. Большая скорость катамарана $V = 1,15 V_{и}$ является причиной того, что вектор вымпельного ветра сильно отклоняется в направлении носа яхты. В результате у катамарана отношение силы крена к силе тяги больше, чем у обычной килевой яхты. Требования к остойчивости (поперечной) растут по мере увеличения отношения скоростей $\frac{V}{V_{и}}$.

Рассчитывать на какие-либо радикальные изменения эффективности действия паруса как движителя не придется, и, следовательно, сила тяги F_x , к сожалению, остается только большей или меньшей частью кренящей силы F_{yz} . Следовательно, увеличить силу тяги F_x можно только в том случае, если одновременно будет найдено средство для уменьшения вредного действия кренящей силы F_{yz} . Эффективно бороться с креном можно только посредством применения новых основ создания поперечной остойчивости.

Несмотря на концентрацию более 70% общего веса (водоизмещения) яхты класса « $R=6$ М» в свинцовом фальшкиле, расположенном на нижней кромке дейдвуда, остойчивость ее, выраженная, как отношение $\frac{F_{yz}}{D}$, едва достигает $\frac{1}{15} - \frac{1}{20}$.

Это значит, что, когда сила крена F_{yz} достигнет 465 фунтов (211 кг), т. е. $1/20$ водоизмещения ($D = 9400$ фунтов, или 4,27 тонны), яхта накренится на 20° . Это — угол, близкий к углу критическому, при котором яхта набирает наибольшую скорость.

В сущности, нет возможностей изменить в лучшую сторону приведенные взаимные соотношения действующих здесь факторов. Расположение балласта относительно корпуса само по себе малоэффективно. Это легко заметить на рис. 165.

Плечо восстанавливающего момента килевой яхты в положении без крена равно нулю и ее начальная остойчивость совсем невелика. Восстанавливающий момент медленно растет с увеличением крена. Таким образом, с ростом аэродинамических сил на парусе ухудшается возможность их полезного действия. Наибольшая остойчивость будет у яхты с мачтой, наклоненной на 90° , когда она никому не нужна. Рост остойчивости за счет крена весьма полезен с точки зрения безопасности, но с гоночных позиций такое положение будет совсем неоптимальным.

Для катамаранов положение представляется совсем другим. На небольшом крене, как только один из корпусов начнет выходить из воды, момент остойчивости растет очень быстро за счет большого плеча.

Одновременно сильно улучшаются гидродинамиче-

ские показатели катамарана, уменьшается сопротивление почти в два раза.

Таким образом, остойчивость катамарана достигается за счет сравнительно легких корпусов, отстоящих друг от друга на расстоянии, которое и является плечом остойчивости*. Остойчивость катамарана может быть значи-

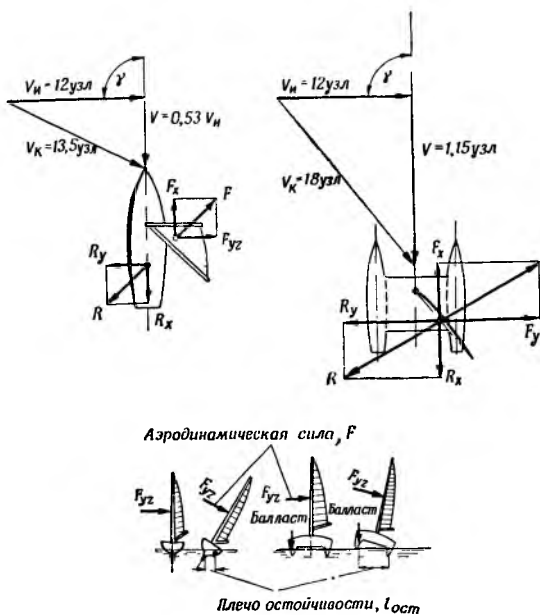


Рис. 165

тельно увеличена за счет применения балластных цистерн, размещенных в корпусах, или перемещения команды на наветренный корпус.

Таковыми средствами отношение площади парусности к водоизмещению $\frac{S}{D}$ может быть заметно увеличено по сравнению с однокорпусными яхтами.

Обычно килевые яхты имеют 9,0—14 м² парусов на тонну водоизмещения, яхты « $R=6$ М» — около 10,2 м² на

* Плечом остойчивости называется горизонтальное расстояние между равнодействующими сил веса и сил поддержания. Оно обычно меньше расстояния между поплавками катамарана (прим. ред.).

тонну. На гоночных катамаранах, например английском катамаране «Хелькат», площадь парусов достигает 59,5 м² на тонну. Столько же парусов на тонну водоизмещения приходится на глиссирующих швертботах, у которых остойчивость достигается при откренивании команды с применением трапеций, выносных досок и т. п. Так, например, отношение $\frac{S}{D}$ для:

«Летучего голландца»	= 56,5 м ² /т
«5—0—5»	= 60,5 м ² /т
«Финна»	= 50,0 м ² /т
Международного «Каноз»	= 50,0 м ² /т

Для глиссирования действительно необходима парусность около 40 м² на тонну водоизмещения.

Всегда выгодно уменьшить водоизмещение, не снижая остойчивости, так как при этом уменьшается сопротивление и увеличивается скорость. Это можно видеть на рис. 166, на котором представлены результаты опытов профессора Ата Нутку, проведенных на трех моделях, близких по длине, но отличающихся по водоизмещению и форме корпусов: это узкий «Финн» — $L=1,73$ м, «Финн» — $L=1,62$ м и катамаран — $L=1,54$ м. Сравнив их характеристики, можно убедиться, что сопротивление у катамарана меньше, чем у «Финна», несмотря на то, что отношение $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$ больше. Кривая сопротивления ка-

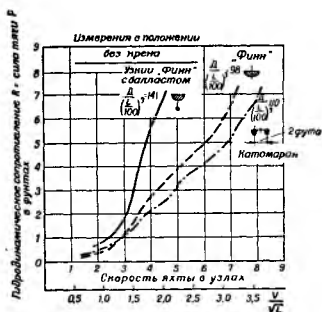


Рис. 166

тамарана сдвинута в сторону больших значений $\frac{V}{\sqrt{L}}$ главным образом вследствие меньшего волнового сопротивления узких корпусов. По сравнению с однокорпусными яхтами катамараны могут без труда заметно увеличить скорость за счет уменьшения отношения $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$.

Заметим, что отношение $\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3}$ у катамарана «Хель-

кат», на котором была выиграна международная регата 1961 года, равно примерно 38, тогда как для большинства килевых однокорпусных яхт это отношение примерно в два раза больше.

Сравнение кривых сопротивлений узкого «Финна» с балластным килем и обычного показывает, какую цену надо заплатить за применение балласта: сопротивление быстро растет из-за увеличившегося водоизмещения. Кривая сопротивлений катамарана имеет несколько волнообразный характер, что объясняется интерференцией волн, возникающих на обоих корпусах, вследствие чего меняется величина сопротивления.

Высокое отношение силы тяги F_x к водоизмещению, без особого труда достигаемое у катамаранов, говорит о перспективности двухкорпусных судов. Относительные скорости катамаранов иногда превышают ($V=4,5\sqrt{L}$) даже скорости крейсерских судов, у которых конструкторы в первую очередь заботятся не о скорости, а о безопасности.

Плавание на таких высоких скоростях требует от команды несколько иной психологической настроенности, чем плавание на обычной яхте. Об этом можно судить по заметкам Дэва Рохлина, участника океанской гонки 1955 года на 40-футовом (12,2 м) катамаране «Вайкики Серф»:

«Нам приходилось плыть при ветре, дувшем со скоростью до 40 узлов, при высоте волны до 15—18 футов. На палубу обрушивались волны высотой 5—8 футов. Часто нас несло на одной волне. Уверен, что катамаран — самая подходящая яхта для плавания в тяжелых морских условиях, не уступающая обычным килевым яхтам аналогичных размеров. Не представляю более удобного плавания при скорости 25—30 узлов. Иногда мы были близки к опрокидыванию, но для безопасности могли взять рифы. Временами на лавировке и на галфвинде поднимало наветренный корпус, однако это не было опасно. Никаких трудностей с парусами и такелажем мы не испытывали».

В настоящее время насчитывается огромное количество различных типов многокорпусных яхт, катамаранов и

тримаранов, так как их конструирование и постройка не ограничиваются никакими правилами*. Различные конструкции катамаранов обычно помещаются в публикациях Любительского общества исследования яхт.

Для примера приведем две конструкции туристского катамарана. Один из них катамаран «Ярро» конструкции австралийца И. Шабо, показанный на рис. 167, имеет следующие размеры:

Общая длина	— 8,7 м
Длина по ватерлинии	— 7,15 м
Максимальная ширина	— 4,2 м
Осадка	— 0,56 м
Водоизмещение	— 1,3 т
Площадь парусности	— 55 м ²
Максимальная скорость	— около 20 узлов

Характерной особенностью катамарана «Ярро» является отсутствие швертов, или плавников, под корпусами.

Необходимая боковая сила создается в результате корпусов асимметрической формы см. рис. 168, а (судами такой же формы пользовались в старину жители Полинезии). Чрезвычайно интересно устроено рулевое управление.

В первом варианте роль руля выполняла (рис. 168, б) подвижная часть вытянутого корпуса. Во втором варианте руль совершенно неподвижен: между ним и корпусом имеется щель, открываемая или прикрываемая с помощью специального устройства. Регулируя



Рис. 167

протекание воды через щель, добиваются возникновения желаемых гидродинамических давлений. В результате

* В действующих в СССР правилах постройки, классификации и обмера спортивно-парусных судов предусмотрены два класса катамаранов.

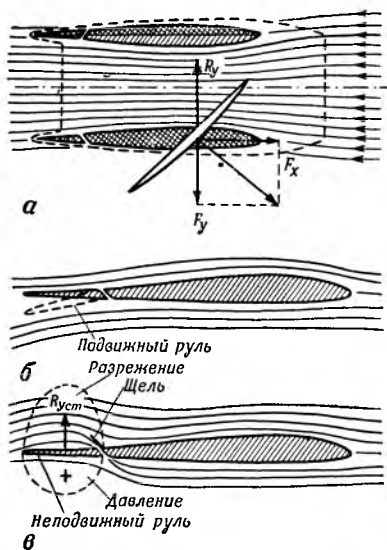


Рис. 168

разности гидродинамических давлений по обеим сторонам руля образуется сила $R_{уст}$, поворачивающая катамаран.

По словам конструктора, «в общем довольно неповоротливый катамаран благодаря такому устройству рулевого управления поворачивается так же легко, как и швертбот».

Катамаран «Голден Миллер» английского конструктора М. Гендерсона представляет собою туристское судно весьма небольших размеров:

Общая длина	— 6,35 м
Длина по ватерлинии	— 5,5 м
Расстояние между корпусами	— 1,7 м
Площадь парусности	— 25 м ² (грот и генуя)
Водоизмещение	— 1,24 т (три человека и 7-дневный запас продуктов)

В отличие от «Ярро» он имеет симметричную форму корпусов и профилированные шверты и рули (рис. 169).

Из практики и данных некоторых экспериментов оказалось, что корпуса симметричной формы имеют преимущество в области малых и больших скоростей, когда отношение $\frac{v}{\sqrt{L}}$ находится или в пределах 0—1,5, или

становится выше 3,0. В области средних скоростей (в указанных границах) разницы между сопротивлениями симметричных и несимметричных корпусов не наблюдается.

Для гарантированной безопасности плавания в открытых водах к швертам прикреплены металлические балласты весом по 136 кг, а на топе мачты помещен

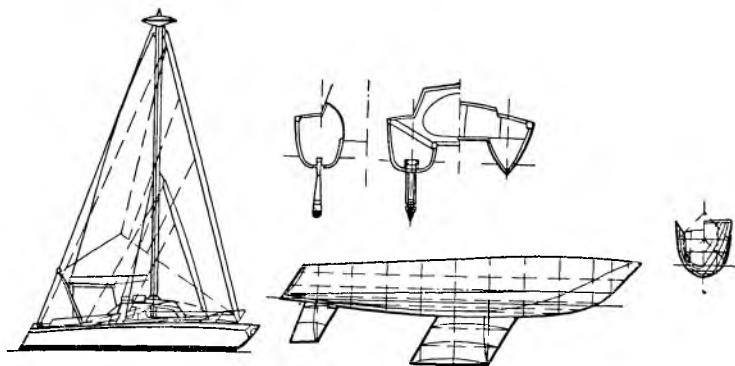


Рис. 169

особый плавник, предохраняющий мачту от погружения в воду при опрокидывании катамарана. Автор видел фильм, который убедил его в исключительной остойчивости этого катамарана: судно легко вставало, казалось бы, из безнадежных положений.

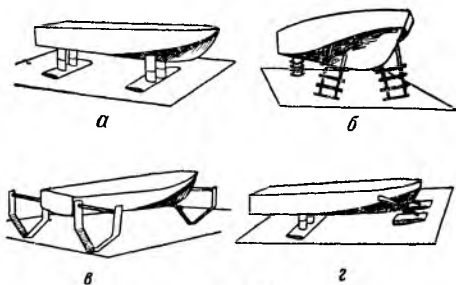


Рис. 170

В последние годы начали появляться яхты на подводных крыльях. На рис. 170, а, б, в, г показаны четыре основные системы таких крыльев. Использование подводных крыльев в парусном спорте встречает ряд трудностей, особенно в области остойчивости. Во-первых, задача состоит в том, чтобы удержать крылья на постоянном

уровне от поверхности воды и при постоянном угле атаки при любых условиях плавания.

Вспомним, что в зависимости от скорости и влияния волн подъемная сила крыльев будет изменяться. При выходе из воды верхних частей крыльев подъемная сила сразу упадет и крыло резко погрузится в воду. Может начаться сильное продольное раскачивание. Во-вторых, имеются трудности в борьбе с дрейфом и креном. Разрабатываются специальные устройства для устранения этих трудностей, однако они усложняют конструкцию и вызывают сильное волнообразование.

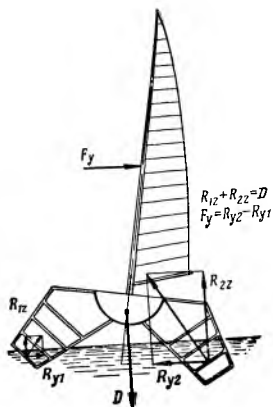


Рис. 171

На больших скоростях вертикальные колебания корпуса становятся столь резкими, что команда может быть выброшена за борт, что и случилось однажды в Швейцарии.

Несмотря на указанные трудности, экспериментальные яхты на подводных крыльях уже достигали скорости около 30 узлов.

Удачную конструкцию крыльев можно видеть на рис. 171. По мере увеличения скорости крыло поднимается не целиком, а частично, в своей верхней части.

За счет ступенчатого расположения опорных поверхностей уменьшаются тряска, раскачивание и удары. Наклонное положение опорных поверхностей крыльев вызывает возникновение боковой силы, противодействующей дрейфу (R_y).

Поперечная остойчивость в данном случае аналогична поперечной остойчивости катамарана (рис. 172). Сила крена F_{yz} и собственного веса яхты D должна проходить через центр приложения равнодействующей гидродинамических сил, возникающих на опорных крыльях.

На рис. 173 показана система крыльев, предложенная Грюнбергом. Она отличается специальной лыжей, расположенной под носом яхты, связанной с основными крыльями. Скользя по воде, лыжа регулирует угол атаки опорных поверхностей крыльев, расположенных ниже центра тяжести яхты.

Величину гидродинамической подъемной силы можно вычислить с некоторым приближением по следующей формуле:

подъемная сила $R_z = 51 \cdot \zeta \cdot V^2 \cdot A$ (для пресной воды) и $R_z L = 52 \cdot \zeta_z \cdot V^2 \cdot A$ (для морской воды), где ζ_z — коэффи-

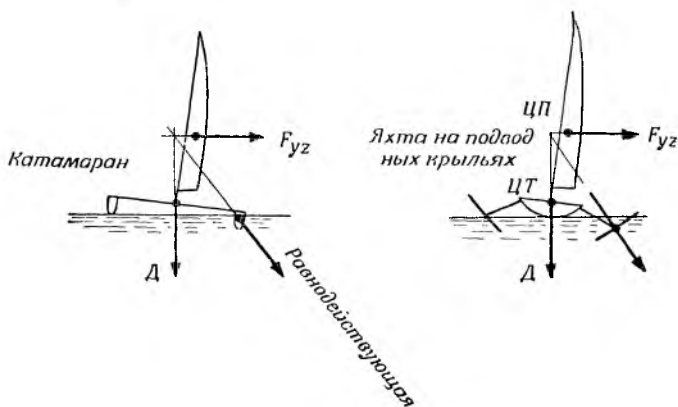


Рис. 172

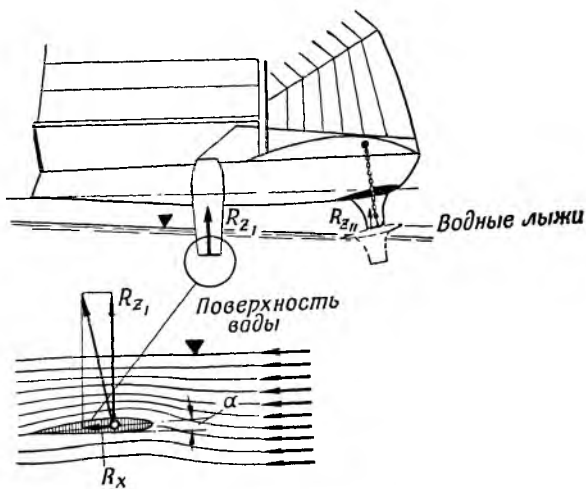


Рис. 173

циент подъемной силы, V — скорость движения в м/сек, A — площадь крыльев в м².

График коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления ζ_z и ζ_x показан на рис. 174. Он относится к крылу с удлинением 5 и с профилем, расположенным в верхней части рисунка. Наиболее выгодное отношение

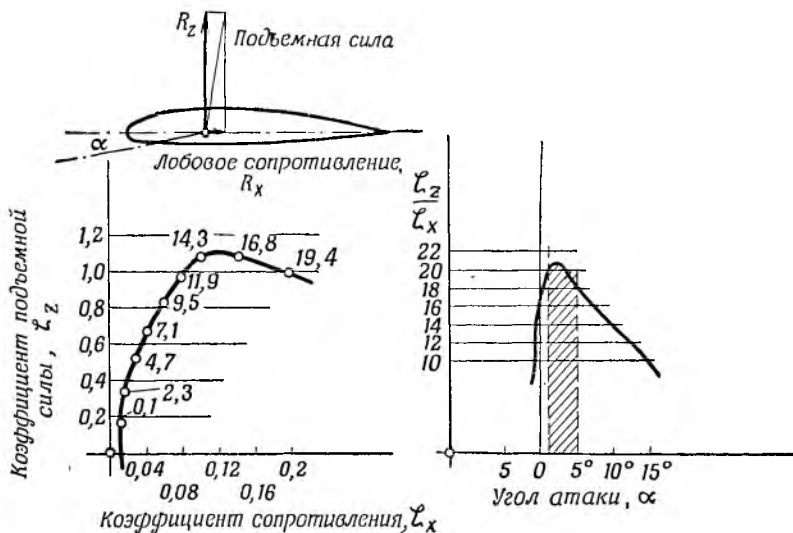


Рис. 174

подъемной силы R_z к сопротивлению R_x или $\frac{\zeta_z}{\zeta_x}$ получается в области углов атаки $\alpha = 1^\circ - 5^\circ$. Приняв угол атаки $\alpha = 3^\circ$, найдем, что коэффициент ζ_z будет равен 0,4. Сделаем примерный расчет величины подъемной силы R_z при скорости плавания $V = 20$ узлам (10,3 м/сек), если площадь опорных поверхностей крыльев $A = 1,0$ м²:

$$R_z = 51 \cdot 0,4 \cdot 10,3^2 \cdot 1 = 2160 \text{ кг.}$$

Одновременно возникающее сопротивление движению R_x будет примерно в двадцать раз меньше, чем было:

$$R_x = \frac{2160}{20} = 108 \text{ кг.}$$

Сюда же следует добавить сопротивление вертикальных стоек, сопротивление руля и автоматического уст-

ройства (лыжи) и т. п. Однако даже такой беглый подсчет показывает, какие огромные возможности в достижении высоких скоростей открываются с применением подводных крыльев. Однако на практике возникают большие трудности главным образом в обеспечении автоматического контроля работы крыльев в зависимости от состояния моря.

б) Ходовые качества яхты на лавировке

Известно, что при данном лавировочном курсе и скорости истинного ветра $V_{и}$ существует некий оптимальный угол установки парусов относительно направления ветра,

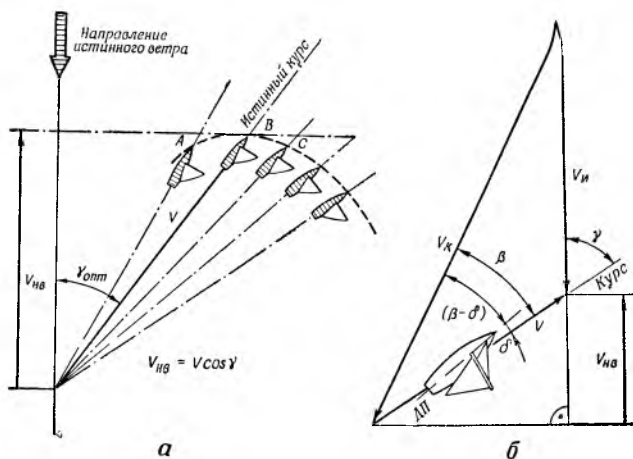


Рис. 175

при котором скорость движения V будет наибольшей. Вместе с тем известно и то, что есть оптимальный курс — это такой курс, при котором яхта быстрее всего придет к цели, т. е. выберется на ветер. Следовательно, можно сказать, что скорость яхты «прямо на ветер» $V_{иv}$ будет максимальной.

Яхта B (рис. 175, а) идет с наибольшей скоростью V . Несмотря на то, что яхта B идет с меньшей скоростью, чем яхта C , и менее круто, чем яхта A , к цели, лежащей прямо по ветру, она придет быстрее.

Скорость «прямо на ветер» — $V_{\text{нв}}$ — является суммарным следствием скорости яхты относительно воды V и курса γ относительно направления истинного ветра $V_{\text{и}}$, т. е.:

$$V_{\text{нв}} = V \cdot \cos \gamma.$$

Иными словами, скорость $V_{\text{нв}}$ — это проекция скорости V на направление истинного ветра.

Достижимая скорость $V_{\text{нв}}$ является важнейшим качественным критерием яхты как с точки зрения конструктора, так и рулевого. Несомненно, что скорость $V_{\text{нв}}$ особое значение имеет в гонках, когда лавировочные курсы занимают значительную часть дистанции.

Треугольная олимпийская дистанция распределяется между курсами так, что на лавировку приходится около 55% всей ее длины, на полные курсы — около 26%, на фордевинд — около 19%.

Не только олимпийская, но и другие гонки проводятся на дистанциях с большим удельным весом лавировки, что требует от рулевого и команды большого мастерства.

На рис. 175, б показано типичное расположение векторов скоростей для лавирующей яхты. Рулевой не может изменить скорости и направления истинного ветра $V_{\text{и}}$, но так или иначе он может влиять на геометрические соотношения между:

скоростью яхты	— V
вымпельным ветром	— $V_{\text{к}}$
истинным курсом	— γ
курсом относительно вымпельного ветра	— β

Таким образом, рулевой может влиять на скорость V , но, безусловно, только в пределах, которые заложены в потенциальных возможностях самой яхты. Задача рулевого — получить от яхты все, на что она способна.

Непосредственные измерения скорости истинного ветра и скорости яхты «прямо на ветер» выполнить на самой яхте невозможно. Однако на идущей яхте можно измерять скорость вымпельного ветра $V_{\text{к}}$, скорость яхты V , угол дрейфа δ и угол $(\beta - \delta)$ между направлением вымпельного ветра $V_{\text{к}}$ и продольной осью корпуса. По этим данным сравнительно не трудно вычислить $V_{\text{и}}$, γ и $V_{\text{нв}}$.

Именно таким образом были сделаны замеры для оценки ходовых качеств яхты класса « $R=5,5 M$ », «Иомен»

(Англия). Заслуживают внимания применявшиеся для этого методика измерения и приборы (рис. 176).

Скорость вымпельного ветра V_k и одновременно угол $(\beta - \delta)$ замерялись ротационным анемометром, установленным на носу яхты, как показано на рисунке. Расстояние от паруса было достаточно большим, чтобы избежать его влияния на показания анемометра, поставленного на высоте центра парусности. Специальный лаг давал показания средней скорости яхты V и был прикреплен к профилированному плавнику, свободно вращающемуся вокруг оси, перпендикулярной к палубе. Плавник автоматически устанавливался по курсу. Ниже этого плавника помещался другой плавник меньших размеров с электродатчиком величины угла дрейфа.

Во время испытаний экипаж старался вести яхту наиболее выгодным лавировочным курсом. Каждый эксперимент длился 30 сек., во время которых фиксировались величины V , V_k , $(\beta - \delta)$ и δ .

Посредством геометрических построений (см. рис. 175, б) для каждого замера можно определить $V_{п.}$ и γ и, конечно, более всего интересующую нас $V_{нв.}$

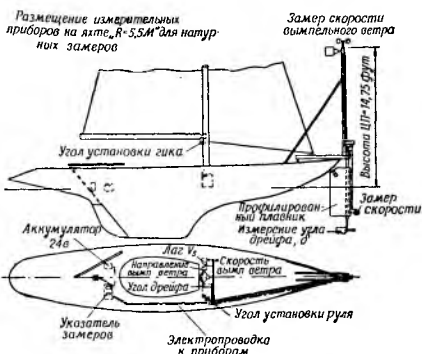


Рис. 176

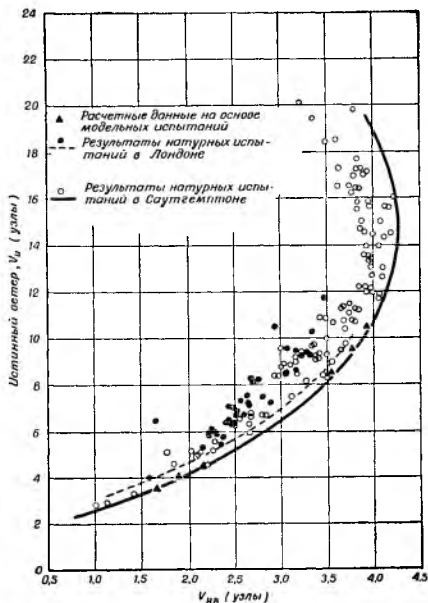


Рис. 177

На рис. 177 даны результаты таких вычислений. Здесь показана кривая скоростей $V_{\text{нв}}$, достигнутых яхтой «Иомен» в зависимости от скорости истинного ветра $V_{\text{и}}$. Как видим, все вычисленные значения скорости $V_{\text{нв}}$ располагаются левее соответствующей кривой, характеризующей максимум, на который способна яхта. На кривой нанесены значения $V_{\text{нв}}$, полученные в результате модельных испытаний в специальном бассейне для опытов.

Во время испытаний, проводившихся около Саутгемптона в заливе Солент, яхтой управлял Чарльз Курри, более известный как рулевой швертботов, чем килевых яхт.

Нельзя не отметить близости результатов, полученных в бассейне и при натуральных испытаниях, когда скорость ветра достигала 9—10 узлов. При более сильном ветре наблюдалась некоторая несогласованность между полученными результатами и предполагаемыми. Это объясняется ростом сопротивления при плавании на волнении, что невозможно смоделировать при испытаниях в бассейне.

Пунктирная кривая, изображенная на рис. 177, показывает наилучшие результаты, полученные при испытаниях, проведенных на большом водохранилище под Лондоном. Ветер и волнение были аналогичными, как при испытании около Саутгемптона, но управлял яхтой не менее известный рулевой Стэнли Бишоп — специалист по управлению тяжелыми килевыми яхтами.

Сравнивая результаты, полученные Ч. Курри и С. Бишопом, можно отметить, что у первого они несколько лучше, чем у второго. Это объясняется тем, что средние скорости V на водоеме были примерно на 0,5 узла больше, чем при саутгемптонских испытаниях (рис. 178), причем курс относительно вымпельного ветра β был также несколько больше (рис. 179), т. е. яхта двигалась слишком полно.

Испытания яхты «Иомен» подтвердили существование оптимального угла крена при каждом условии ветра. Этот угол не следует переступать не только на швертботе, но и на килевой яхте.

На рис. 180 приводятся оптимальные углы крена в области скоростей вымпельного ветра $V_{\text{к}}$ от 0 до 20 узлов. Например, при скорости вымпельного ветра $V_{\text{к}}=20$ узлам, что соответствует скорости истинного ветра $V_{\text{и}}=14—15$ узлам, критический угол крена будет около 35° .

При увеличении крена ухудшаются аэро- и гидродинамические характеристики яхты — она будет идти хуже. Этот вывод подтверждается, если мы посмотрим на рис. 177: кривая наилучших скоростей $V_{\text{нв}}$ с максимальной скоростью $V_{\text{нв}}=4,25$ узла расположена в районе скорости ветра $V_{\text{и}}=15$ узлам.

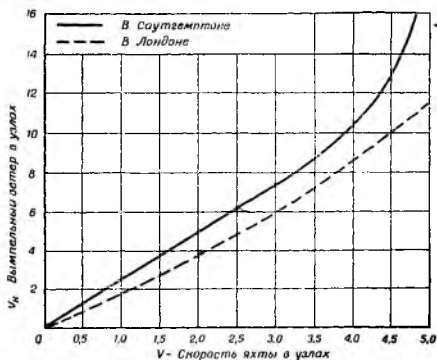


Рис. 178

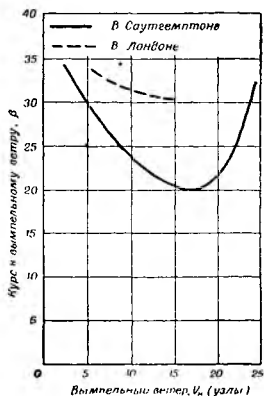


Рис. 179

При многократном движении яхты при ветре больше 15 узлов всегда получалось одно и то же: скорость $V_{\text{нв}}$ понижалась до 4 узлов и даже ниже. При очень сильном ветре и при порывах крен доходил до 40° и более, яхта сильно приводилась и сильно ложилась на руль.

Из опытов, проведенных на водохранилищах, можно сделать некоторые интересные выводы.

Во-первых, даже самой опытной команде не удастся использовать полностью потенциальные технические возможности своей яхты более чем в 10% случаев (тактическая сторона гонок во внимание здесь не принимается). Заметим, что число точек, лежащих на кривой, характеризующей наивысшие ходовые качества яхты, менее 10% всех точек замеров. Такой неожиданный вывод (что

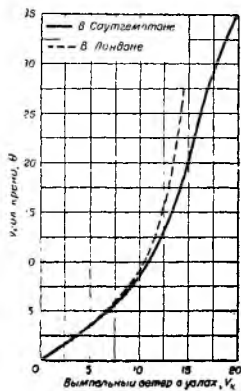


Рис. 180

даже самые лучшие рулевые на лавировке только один раз из десяти ходят наилучшим образом) говорит о больших трудностях использования 100% действительного ветра, который почти никогда не сохраняется строго постоянным ни по силе, ни по направлению. Например, во время опытов, когда замеры брались каждые 30 сек., было установлено, что только в редкие полминутные интервалы сила и направление ветра не менялись. Но и то только на свежих ветрах.

Во-вторых, на одной и той же яхте у одного рулевого результаты были постоянно лучше, чем у другого, что говорит, главным образом, о разнице опыта управления легкими швертботами и тяжелыми килевыми яхтами. У рулевых швертботов лучше выработаны чутье и реакция на незначительные изменения ветра, чем у рулевых килевых яхт. По-видимому, вполне целесообразно рулевым килевых яхт тренироваться и на швертботах.

Оба рулевых, участвовавших в этих испытаниях, пришли к выводу, что было бы весьма полезно оборудовать яхты прибором, посредством которого можно было бы оценить курс яхты — слишком ли он острый или, наоборот, полнее оптимального. Такой прибор особенно желателен в гонках с сильными или равными по мастерству участниками. Например, может быть полезным простой прибор, состоящий из двух указателей, один из которых устанавливается на оптимальный курсовой угол (заранее известный из опытов для разных скоростей ветра), а второй, свободный, совмещается с первым на ходу яхты.

Возможно также создание сравнительно простого электронного прибора для измерения скорости $V_{\text{нв}}$. В качестве датчиков можно применить приборы, используемые для измерения $V_{\text{к}}$, $V(\beta-\delta)$ и δ , с автоматической обработкой данных. Несомненно, такой прибор вскоре появится и будет на яхте таким же обычным, как компас или эхолот.

Может показаться, что, если парусный спорт будет развиваться таким путем, в конце концов, он превратится в соревнование механизмов и приборов. Для такого пессимизма автор не видит оснований. Несомненно, парусный спорт будет развиваться соответственно духу времени, хотя бы этого или нет. Одновременно станет изменяться и мышление яхтсменов — они будут более осведомленными в тонкостях своего искусства.

в) Способы предвидения возможностей яхты

В предыдущей главе рассматривались способы определения ходовых качеств уже построенной яхты. В этой главе попытаемся ответить на вопрос, что надо знать яхт-

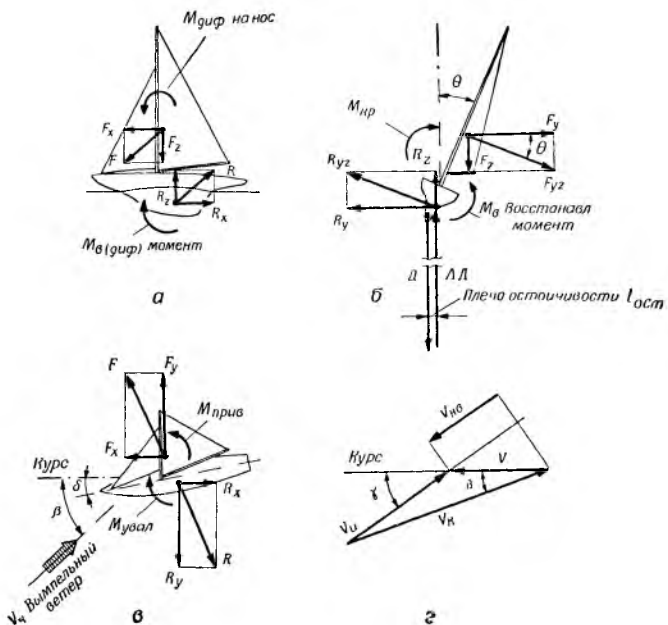


Рис. 181

смену, чтобы предвидеть поведение яхты еще до спуска ее на воду?

Нам известно, что яхта движется в результате действия системы сил. При равномерном движении силы и моменты, вызванные действием ветра на паруса, должны быть уравновешены комбинацией гидродинамических и гравитационных сил и моментов, действующих на корпус. На рис. 181, а, б и в показана простейшая схема сил и моментов, действующих на лавирующую яхту. Действие равнодействующей аэродинамической силы F будет проявляться разнообразно:

1) первая сила — сила тяги F_x (см. рис. 181, а и в) — вызывает движение яхты по курсу и одновременно мо-

мент $M_{\text{диф}}$, увеличивающий дифферент на нос. Сила F_x и момент $M_{\text{диф}}$ должны быть уравновешены соответствующей гидродинамической системой сил и моментов, а именно: сопротивлением R_x и моментом $M_{\text{в диф}}$, равным ей по величине и обратным по направлению;

2) вторая — слагаемая аэродинамическая сила — сила крена F_{yz} (рис. 181, б и в), в свою очередь, разложена на две силы:

$$F_y = F_{yz} \cdot \cos \theta \text{ и } F_z = F_{yz} \cdot \sin \theta.$$

Действие этой силы вызывает: дрейф — δ , крен — Θ и прирост веса яхты на величину $F_{yz} \cdot \sin \Theta$.

Слагаемые силы F_y и F_z уравновешиваются гидромеханическими силами R_y и R_z , возникающими на подводной части корпуса. Одновременно кренящий момент $M_{\text{кр}}$ должен быть уравновешен восстанавливающим моментом $M_{\text{в}}$, возникающим в результате перемещения равнодействующей сил поддержания относительно равнодействующей сил веса в сторону подветренного борта на плечо, называемое плечом остойчивости. Векторы сил из-за недостатка места на рисунке сильно уменьшены по сравнению с векторами аэродинамических сил. Для килевых яхт даже на сильном ветре они в 15—20 раз больше силы крена F_{yz} ;

3) на рис. 181, в показаны проекции аэро- и гидродинамических сил на горизонтальную плоскость (поверхность воды). Необходимым условием равномерного движения яхты по курсу β является равновесие моментов: $M_{\text{прив}}$, вызывающего приведение к ветру, и момента $M_{\text{увавл}}$, вызывающего уваливание под ветер. В конечном счете такое равновесие достигается с помощью руля.

Итак, чтобы яхта могла плыть в бейдевинд с равномерной скоростью, должны быть выполнены следующие условия:

Силы	Моменты
1. $F_x = R_x$	4. $M_{\text{диф}} = M_{\text{в диф}}$
2. $F_y = R_y$	5. $M_{\text{кр}} = M_{\text{в}}$
3. $F_z = R_z$	6. $M_{\text{прив}} = M_{\text{увавл}}$

В разделе аэродинамики было установлено, что силы, возникающие на парусах, зависят от ряда факторов, которые можно сгруппировать таким образом:

А $\left\{ \begin{array}{l} \text{Скорость вымпельного ветра } V_k, \\ \text{курс плавания } \beta, \\ \text{угол установки парусов относительно д. п. } \delta_2 \text{ и } \delta_c \\ \text{(угла атаки паруса } \alpha), \\ \text{угол крена } \theta \text{ и т. п.} \end{array} \right.$

Аналогично гидродинамические силы, образующиеся на корпусе, зависят от:

Г $\left\{ \begin{array}{l} \text{Скорости хода яхты } V, \\ \text{угла дрейфа } \delta, \\ \text{угла крена } \theta \text{ и т. п.} \end{array} \right.$

Любой способ определения ходовых качеств яхты сводится к отысканию условий, перечисленных в группах А и Г, при которых наступит равновесие сил и моментов, указанных в уравнениях 1—6.

Для начала постараемся упростить задачу. Возьмем наиболее простой случай: швертбот движется с минимальным креном или без крена, что позволит нам исключить некоторые уравнения, а именно 3-е. Так как при малом крене Θ сила F_z мала, ею можно пренебречь (рис. 181, б). Можно также пренебречь несущественным дифферентом на нос и связанным с ним дополнительным гидродинамическим сопротивлением и незначительным увеличением водоизмещения;

4) аэродинамический дифференцирующий момент $M_{\text{диф}}$ можно уравновесить перемещением команды ближе к корме. Следовательно, сохранится исходный дифферент яхты;

5) кренящий момент $M_{\text{кр}}$ может быть уравновешен командой таким образом, что крена или не будет, или он будет весьма незначительный. Отсюда возможность не считаться с влиянием крена на аэро- и гидродинамику яхты;

6) если яхта хорошо уцентрирована, можно пренебречь дополнительным сопротивлением за счет отклонения руля.

При таких допущениях вопрос сводится к рассмотрению системы проекций аэро- и гидродинамических сил на горизонтальную плоскость. Если $F_x = R_x$, $F_{yz} = R_{yz}$ или $F_y = R_y$ (см. рис. 181, в), то система сил, действующих на яхту, эквивалентна той, которая рассматривалась на

рис. 54. Она удовлетворяет основному условию равномерного движения, которое можно выразить так:

$$F = R,$$

$$\beta = \epsilon_a + \epsilon_r.$$

Для определения ходовых качеств яхты, плывущей без крена, надо на основании модельных испытаний в аэродинамической трубе и бассейне иметь следующие данные:

1) аэродинамические данные парусности (для данного профиля), т. е. знать, как меняется равнодействующая аэродинамическая сила F в зависимости от силы ветра V_k и угла атаки α ;

2) гидродинамическую характеристику корпуса, т. е. знать, как меняется равнодействующая гидродинамическая сила R в зависимости от скорости V и угла дрейфа δ .

Получив характеристики паруса и корпуса, не столь трудно решить такую задачу: при каких значениях скоростей вымпельного ветра V_k , яхты V и курса β равнодействующая аэродинамическая сила F будет уравновешена гидродинамической силой R . Получив эти данные, можно построить треугольник скоростей, показанный на рис. 181, з, и определить $V_{и}$, γ и $V_{и\beta}$, а следовательно, оптимальные возможности яхты на курсе бейдевинд.

Для примера проведем простейшие графические построения. В сущности, это не столь сложное дело, но весьма полезное для понимания основ поведения парусных судов. Предлагаемый метод может стать тренировочной «игрой» для яхтсменов, желающих ближе познакомиться с влиянием различных факторов на гоночные качества яхты (пузатость паруса, скручивание, проводка шкотов, балластировка и т. п.).

Гидродинамическую характеристику корпуса возьмем по данным замеров яхты класса «Каное», полученную в исследовательском бассейне. Примем, что яхта вооружена кэтом с площадью парусности $S = 10 \text{ м}^2$. Правда, это не совсем правильно отражает действительность, так как яхта «Каное» вооружена шлюпом. Но наша задача дать пример графического использования метода, а не вычисление достоверных количественных данных.

Вначале рассмотрим плавание без крена (или с малым креном), т. е. в условиях, пригодных и для катама-

ранов. Потом условия можно расширить дополнением, например анализом влияния крена, дифферента, веса рулевого и т. д. Некоторые из названных факторов будут рассмотрены позже.

Аэродинамическую характеристику паруса удобнее всего взять в виде поляры, показывающей, как меняется по величине и направлению аэродинамическая сила F в зависимости от скорости ветра V_K и угла установки паруса α .

Допустим, что на «Каноз» поставлен парус от яхты класса «Финн» площадью $S = 10 \text{ м}^2$, а так как для построения поляр нам надо знать действительную аэродинамическую силу этого паруса, определим ее, умножив коэффициенты C_y и C_x (см. рис. 20) на $0,0625 \cdot V_K^2 \cdot S$.

Для разных скоростей выппельного ветра V_K с помощью такого метода получим ряд поляр подобных по форме, но разных по величине.

На рис. 182 показаны только две кривые: для ветра со скоростью $V_K = 6$ узлам и $V_K = 14$ узлам.

Аналогичным способом можно изобразить гидродинамические характеристики корпуса, т. е. в форме группы кривых изменения гидродинамической силы R в зависимости от скорости хода V и угла дрейфа δ . На рис. 183 нанесен ряд поляр для скорости яхты V в пределах 2,0—6,0 узлов через каждые 0,5 узла. Оба графика, помещенные на рис. 182 и 183, следует сделать в одном масштабе, приготовив также несколько экземпляров поляр корпуса на прозрачной кальке.

На рис. 184, а приводится случай равновесия сил на парусе и корпусе: на листе Z (это уменьшенный рис. 182) начерчена единственная поляра паруса для определенной

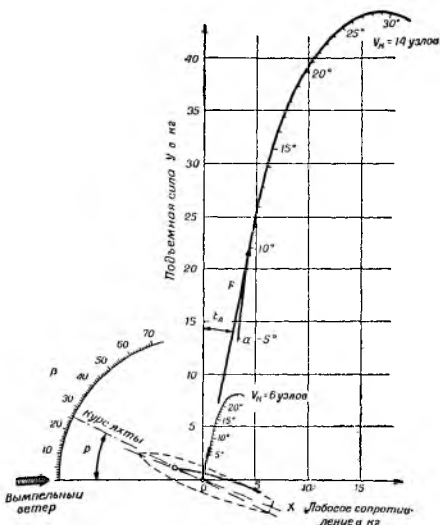


Рис. 182

силы ветра V_K . Под этим листом булавкой приколота в точке O (начале координат) калька K с начерченными

на ней полями корпуса. Заметим, что вектор аэродинамической силы F (при угле атаки α и скорости ветра V_K) равен по величине и противоположен по направлению вектору гидродинамической силы R (при угле дрейфа δ и скорости хода V).

Обе силы F и R действуют по одной и той же прямой; яхта идет с равномерной скоростью по курсу $\beta = \epsilon_a + \epsilon_r$.

Удобнее определять условия равновесия аэро- и гидродинамических сил, т. е. $V_K, V, \alpha, \delta, \beta$, методом, показанным на рис. 184, б. Для этого надо повернуть каль-

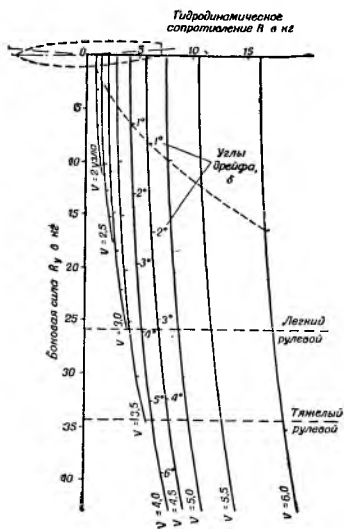
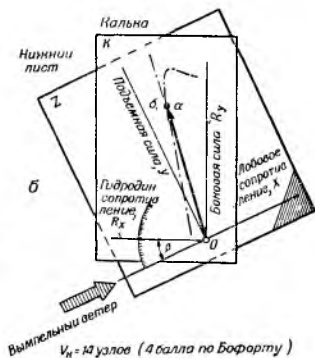
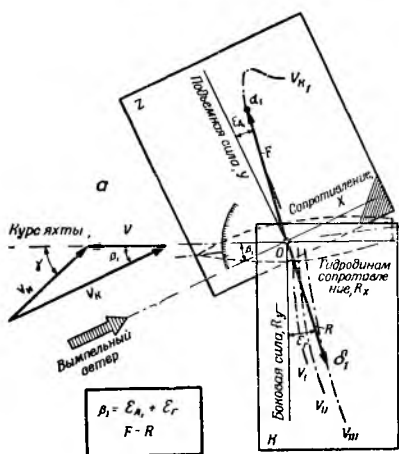


Рис. 183



$V_N = 12$ узлов (4 балла по Бофорту)

V	β	α	δ	γ	$\cos \delta$	V_{NG}	V_N
3.5	21,2	11,9	5,3	28,8	0,877	3,67	10,84
4,0	23,7	12,1	4,0	33,0	0,838	3,35	10,47
4,5	27,0	12,3	3,2	39,0	0,777	3,49	10,20
5,0	31,0	12,5	2,5	46,0	0,693	3,47	10,05
5,5	37,0	13,2	1,9	56,5	0,552	3,04	10,18
6,0	47,0	14,6	1,5	71,0	0,326	1,96	10,66

Рис. 184

ку K вокруг начала координат O направо. В точке касания полярны корпуса (для определенной скорости V) с полярной паруса наступает равновесие аэро- и гидродинамических сил. Угол β , под которым движется яхта, можно найти по шкале на листе Z между направлением выпельного ветра и линией движения яхты (курсом). Этот угол является наименьшим на лавировке для данных скоростей выпельного ветра V_K и скорости яхты V . В точке касания обеих кривых можно также определить угол атаки α и угол дрейфа δ .

Взяв для примера полярну паруса при скорости выпельного ветра $V_K = 14$ узлам (4 балла, по Бофорту) и проделав описанные выше построения для всех полярн корпуса (для скоростей $V = 2$ узлам; 2,5; 3 и т. д.), можем записать полученные величины β , α и δ в таблицу, которая помещена справа внизу (рис. 184). Затем таблицу следует пополнить данными величин γ , V_{HV} и V_H , которые можно найти с помощью построения треугольников скоростей, как показано на рис. 185.

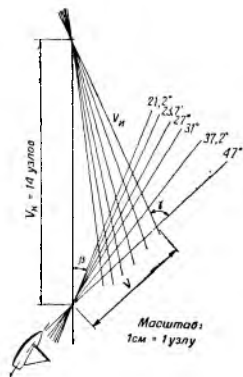


Рис. 185

Для построения этого рисунка нужны только линейка и транспортир. По известным уже величинам V_K , углу β и скорости V после построения треугольника определим V_H и угол дрейфа δ . Векторы скоростей V_K и V надо брать для построения треугольника в одном масштабе, например 1 см равен 1 узлу. Теперь, зная угол γ , можно вычислить скорость V_{HV} (прямо на ветер) по формуле $V_{HV} = V \cdot \cos \gamma$. Величина косинуса γ берется из таблицы.

Скорость V_{HV} можно определить также и графически (без применения тригонометрии), так, как показано на рис. 181, г, т. е. посредством измерения соответствующего отрезка прямой.

После определения величин V_H и V_{HV} при скорости ветра $V_K = 14$ узлам и для разных скоростей хода V можно построить график V_{HV} в функции V_H , который показан на рис. 186.

Толстая стрелка сбоку таблицы (здесь повторена таблица, помещенная на рис. 184) указывает максимальную

скорость «прямо на ветер» $V_{\text{нв}}$, которую теоретически можно ожидать от яхты.

Вышеописанным способом определяют величины γ , $V_{\text{нв}}$ и $V_{\text{и}}$ для других скоростей вымпельного ветра $V_{\text{к}}=6, 10, 18$ и 22 узлам, а потом вычерчивают соответствующую кривую, как на рис. 186. Она показывает, что можно ожи-

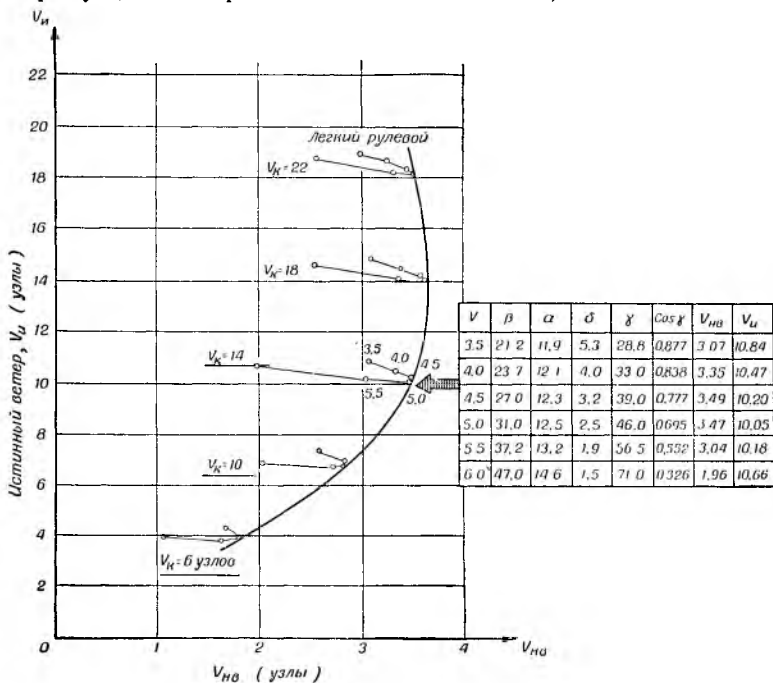


Рис. 186

дать от яхты на лавировке при безукоризненном управлении. В графическом построении этой кривой было сделано допущение, что яхта откренивается рулевым, имеющим собственный вес 60 кг. Считалось, что центр тяжести его тела находится на расстоянии 1,1 м от диаметральной плоскости (рис. 187). Восстанавливающий момент увеличивается на $P \cdot l = 60 \cdot 1,1 = 66$ м/кг. Таким образом, собственный вес рулевого имеет немаловажное значение, так как позволяет увеличить силу $F_{\text{уз}}$, а вместе с нею и силу тяги $F_{\text{х}}$. Рулевой, имеющий легкий вес, может проти-

водействовать кренящей силе F_{yz} порядка 26 кг (рис. 183, см. шкалу силы R_y).

Читатель, освоивший рекомендуемый здесь метод оценки возможностей яхты, придет к выводу, что ограничение допустимой величины кренящей силы $F_{yz} = R_{yz}$ имеет непосредственное влияние на лавировочные ходовые качества яхты. Как только кренящая сила превысит оп-

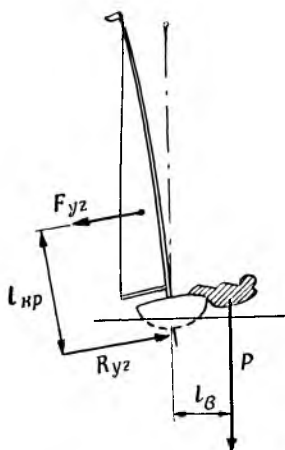


Рис. 187

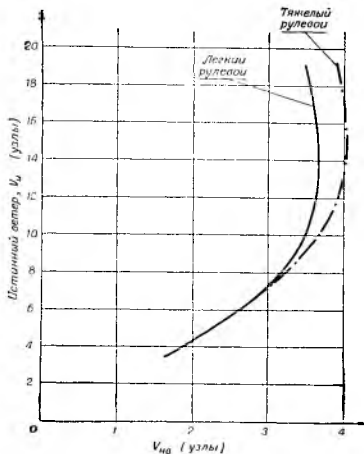


Рис. 188

ределенный предел, работа паруса ухудшается, и яхта пойдет хуже.

Как влияет вес рулевого на лавировочные качества яхты, показано на рис. 188. Две кривые, одна для рулевого весом 60 кг, а другая — 90 кг, сначала идут, сливаясь вместе до точки, примерно соответствующей скорости ветра 7 узлов. После этого рулевой, у которого бóльший вес, имеет преимущество в скорости «прямо на ветер» $V_{нв}$, так как его коллега более легкого веса не в состоянии далее бороться с креном. При ветре около 16 узлов более тяжелый рулевой отыграет около 90 сек. на милю у своего противника на лавировке. Чтобы увеличить собственный вес, рулевые часто надевают толстые шерстяные свитеры, которые в намокшем состоянии прибавляют несколько килограммов веса. При легком ветре тяжелый рулевой может компенсировать лишний вес за счет опы-

та и т. п., рулевому же более легкого веса при сильном ветре недостаток своего веса компенсировать нечем.

Рассмотрим влияние формы паруса на лавировочные качества яхты: полноту пуза, скручивание и т. п., т. е. свойства паруса, которые можно менять изгибанием рангоута, натяжением шкотов и т. д.

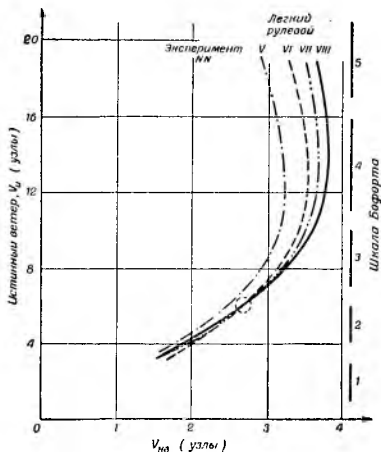


Рис. 189

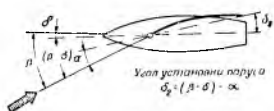
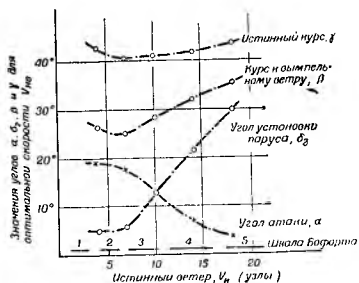


Рис. 190

Для этой цели за исходные данные возьмем аэродинамические характеристики паруса на яхте класса «Финн» (рис. 62, 63, 65 с формой паруса, изображенного на рис. 18 и 64, опыты V, VI, VII и VIII).

На рис. 189 нанесены четыре кривых изменения скорости «прямо на ветер» в зависимости от скорости истинного ветра $V_{и}$ для этих четырех парусов, отличающихся только формой. Построение проводилось вышеописанным графическим методом, вес рулевого взят равным 60 кг.

Четыре кривые характеризуют оптимальные ходовые возможности яхты на лавировке при условии, что рулевой держал правильный курс и что угол установки паруса δ_2 (рис. 190) был оптимальным для каждого из четырех парусов. Натяжение шкотов не менялось, а

угол установки паруса δ_2 изменялся с помощью перемещения подвижного блока гикашкотов по длинному погону, проходящему по всей ширине яхты (см. рис. 61).

При достаточно сильном ветре (4 балла, по Бофорту) разница в скорости «прямо на ветер», зависящая только от формы паруса (полнота пуза и скручивание), между моделями *V* и *VIII* и будет порядка 18—20%. На парусе *V* вообще худшие результаты, а парус *VIII* имеет преимущества перед остальными, начиная с силы ветра около 6 узлов (2—3 балла, по Бофорту), т. е. с момента, когда рулевому приходится откренивать.

Сравнение кривых, помещенных на рис. 191, с данными рис. 65 подтверждает высказанное прежде положение о большом влиянии отношения $\frac{Y}{X}$ (или эквивалентной ему величины аэродинамического угла ϵ_a) на лавировочные способности яхты, особенно при свежих ветрах. Неудовлетворительные результаты, полученные на парусе *V*, объясняются прежде всего его большим скручиванием и слишком большим пузом. Эти факторы, действуя вместе, приводят к очень низкому отношению $\frac{Y}{X}$ (см. рис. 65).

Продолжая анализ кривых, приведенных на рис. 189, заметим, что парус *VIII* теряет свои преимущества над парусом *VI*, если скорость ветра падает ниже 6 узлов. Объясняется это тем, что при слабых ветрах, когда вопрос с открениванием решается легко, важнейшим критерием качества паруса становится максимально возможная сила тяги F_x , а не минимальное отношение силы крена к силе тяги $\frac{F_{yz}}{F_x}$. Это отношение может быть выражено иначе, через максимальное отношение $\frac{Y}{X}$. Парус *VI* имеет действительно небольшое отношение $\frac{Y}{X}$ по сравнению с парусом *VIII*, но на нем можно получить большую аэродинамическую силу (у него больше аэродинамический коэффициент C_y , как это видно на рис. 63), а в результате и большую силу тяги. Этот результат может быть приписан тому, что парус *VI* имеет большую полноту пуза. Средняя полнота пуза паруса *VIII* равна 7,1%, а паруса *VI* — 12%.

Теперь рассмотрим такой вопрос, как следует держать оптимальный угол установки паруса δ_2 , а также курсовой угол β , чтобы лавировка была наивыгоднейшей. Проанализируем рис. 190, составленный для паруса *VII*:

при слабых ветрах 1—2 балла, по шкале Бофорта, оптимальный угол установки паруса сравнительно невелик, около 5° , и остается постоянным в этих условиях ветра. Установивши этот угол, рулевой может заложить шкоты и все свое внимание направить на поддержание правильного курса относительно ветра β , так как курсовой угол в зависимости от изменений ветра может меняться в пределах нескольких градусов. Когда сила ветра становится более 2—3 баллов, угол установки паруса δ_2 приобретает гораздо большее значение, чем на слабом ветре. Угол установки δ_2 с увеличением скорости ветра растет довольно быстро. Увеличивается, хотя и в меньшей степени, и оптимальный курсовой угол β .

Угол установки паруса δ_2 надо постоянно корректировать применительно к порывам ветра. Обычное потравливание или обратное подбирание шкотов с аэродинамической точки зрения для этой цели не подходит. Надо менять положение ползуна на длинном погоне. При таком способе регулирования угла δ удастся избежать скручивания поверхности паруса и увеличения его пузатости, неизбежных при травлении шкотов. Это обстоятельство тем важнее, чем сильнее ветер, когда надо получить большой угол δ_2 и вместе с тем сохранить парус плоским. Рулевой должен понимать, насколько ухудшается форма плоского паруса VIII от потравливания шкотов при сильном, порывистом ветре (см. рис. 189). Результат такого ухудшения формы (увеличение пуза и степени скручивания) показывают кривые VII, VI и V (сравните еще раз рис. 18 и 64).

На рис. 190 помимо кривых оптимального угла установки паруса δ_2 и курсового угла β нанесены еще две кривые: одна кривая показывает изменения оптимального угла атаки α , а вторая — изменение оптимального курсового угла γ относительно истинного ветра. Обе эти кривые тесно связаны с рассмотренными углами δ_2 и β .

Количественное значение оптимального угла установки паруса δ_2 показано на рис. 191. Жирной линией нанесена кривая оптимальной работы паруса VII, когда рулевой неустанно поддерживает правильную установку паруса в соответствии с силой ветра. Эта кривая повторена с рис. 188 для рулевого легкого веса. Две другие кривые построены для случаев, когда рулевой независимо от силы ветра сохраняет установку паруса без изменений с

углом $\delta = 10^\circ$ и $\delta = 18^\circ$. Не трудно видеть, что в обоих случаях потенциальные возможности яхты могут быть использованы только в узкой области скоростей ветра. Например, при ветре $V_H = 12$ узлам рулевой, поставивший парус под углом $\delta = 10^\circ$ вместо 18° , потеряет в скорости V_{HB} около 0,25 узла, т. е. его яхта пойдет со скоростью $V_{HB} = 3,38$ узла вместо 3,63 узла.

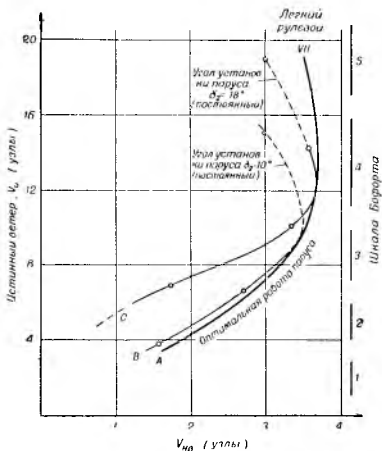


Рис. 191

Только что рассмотренный пример зависимости оптимального угла установки паруса от силы ветра, приведенный для паруса VII, в качествен-

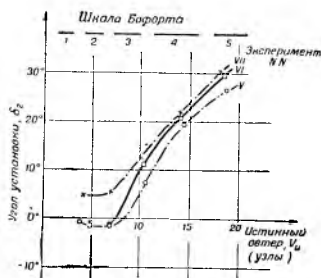


Рис. 192

ном смысле касается и парусов V, VI и VII. На рис. 192 даны кривые этой зависимости для трех перечисленных парусов, причем характер кривых объясняется различной степенью полноты пуза и различной степенью скручивания каждого паруса. В качестве общего положения можно установить следующее: чем полнее пузо и чем более парус подвергнут скручиванию, тем ближе к диаметральной плоскости корпуса должен быть выбран гик. В крайних случаях при большом пузе и большом скручивании на слабом ветре оправдано подтягивание гика даже несколько к наветренному борту от диаметральной плоскости, иначе говоря угол установки паруса тогда получится отрицательный.

Следует обратить внимание на оптимальный курс на лавировке. Из рис. 190 и 193 не трудно убедиться, что существует некоторый определенный район скоростей ветра $V_H =$ около 6—7 узлов, в котором оправдано пла-

вание самыми острыми курсами. Это относится как к истинному курсу γ , взятому относительно действительного ветра $V_{И}$, так и к курсу β , взятому относительно вымпельного ветра $V_{К}$. Когда скорость истинного ветра $V_{И}$ больше или меньше 6—7 узлов, слишком круто идти не следует — более выгодными курсами будут более полные.

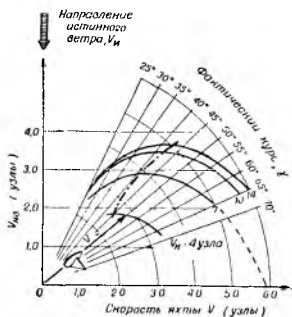


Рис. 193

На рис. 194 дана общая картина всех упоминавшихся прежде факторов по отношению к скорости $V_{НВ}$, построенная по функциональному признаку. Вспомним, что скорость $V_{НВ}$ является критерием лавирировочных качеств яхты. На большинство этих факторов влияют конструк-

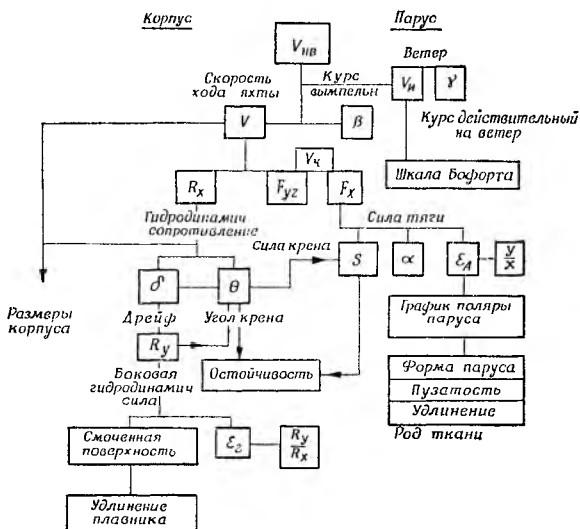


Рис. 194

тивные решения, многие зависят от команды, однако далеко не все достаточно изучены и известны. Количество факторов, влияющих на поведение яхты, растет по мере углубления наших знаний в области парусного спорта. Следовательно, какое-то время проектирование яхт будет основываться на комбинации искусства и науки. Трудности, с которыми встречается яхтенный конструктор, хорошо и оригинально оценил проф. Е. И. Ричардс — руководитель аэродинамического отдела Саутгемптонского университета. Открывая международную конференцию, посвященную проблемам парусного спорта, он сказал: «Проектирование яхт сегодня больше всего похоже на роман с женщиной. Поскольку теория не разработана, остается только эмпирический подход. В конце концов, даже если мужчина может похвастать успехом на этом поприще, то чаще всего он не имеет никакого понятия о причинах его успеха».

3. Остойчивость и «уравновешенность» яхты

Под воздействием комбинации аэро- и гидродинамических сил положение корпуса во время движения яхты может меняться в трех направлениях (рис. 195):

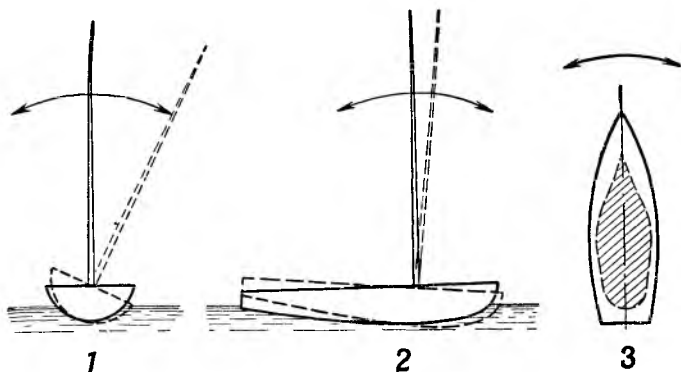


Рис. 195

- а) в плоскости шпангоутов (крен, бортовая качка);
- б) в диаметральной плоскости (изменение дифферента, килевая качка);

в) в плоскости ватерлинии (приведение и уваливание).

В соответствии с этим различают поперечную, продольную остойчивость и устойчивость на курсе (устойчивость — направление движения).

Остойчивостью называется способность плавающей яхты возвращаться в исходное положение, из которого она была выведена действием внешних сил — ветра и волны. Остойчивость является одной из самых важных характеристик яхты и зависит от:

1) формы корпуса, 2) размещения балласта относительно корпуса (взаимного положения центра тяжести — ц. т. и центра величины — ц. в.), 3) величины аэродинамических сил на парусе, 4) курса яхты относительно ветра, а также условий плавания, состояния моря и т. п.

а) Поперечная остойчивость

С точки зрения безопасности поперечная остойчивость является важнейшим свойством, и потому желательно, чтобы яхта обладала наилучшей остойчивостью. Кроме того, поперечная остойчивость, так же как продольная и курсовая, влияет на скоростные возможности яхты. Рассмотрим это на примере яхт класса «Дракон» и «Нью-Йорк-32» (рис. 136).

Но раньше разберем в общих чертах, от каких факторов зависит поперечная остойчивость и как эту зависимость можно изобразить графически. Займемся вопросом так называемой остойчивости формы, т. е. остойчивости корпуса, связанной с его формой.

Представим себе, что на швертбот начинает действовать некоторый кренящий момент $M_{кр}$, возникающий в результате давления ветра на паруса (рис. 196). При положении *a* равновесие не сохранится, так как кренящему моменту $M_{кр}$ не противодействует никакой восстанавливающий момент. Яхта начнет поворачиваться в плоскости шпангоутов. Появляется восстанавливающий момент $M_{в}$ (рис. 196, б). С креном яхты на угол θ центр величины перемещается в сторону крена вследствие изменения формы погруженной части корпуса (он всегда находится в центре тяжести объема, ограниченного новой ватерлинией).

Благодаря этому появляется восстанавливающий момент M_B , составленный из пары сил D и γV с плечом l_B (D — вес яхты; γV — силы поддержания воды, образуемые за счет гидростатического давления воды на погруженную в воду часть яхты; V — объемное водоизмещение

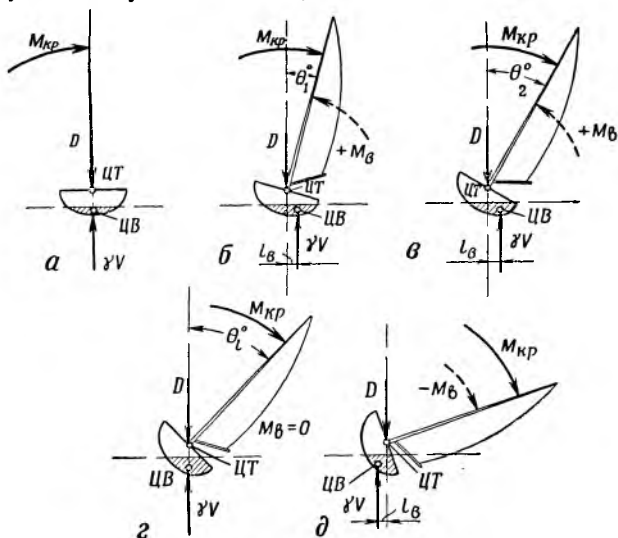


Рис. 196

ние; γ — объемный вес воды). Момент M_B можно вычислить по формуле:

$$M_B = D l_B.$$

Величина восстанавливающего момента зависит от сил поддержания воды γV , равных весу яхты D , и от плеча остойчивости l_B . Будем считать восстанавливающий момент положительным, когда он противодействует кренящему моменту.

Если кренящий момент действует статически, крен будет расти постепенно, и его рост прекратится, когда оба момента — кренящий и восстанавливающий — уравновесятся. Яхта в состоянии такого равновесия будет двигаться с углом крена Θ .

Если кренящий момент будет увеличиваться, яхта последовательно пройдет через положения $в$, $г$ и $д$ и, наконец, опрокинется.

В положении z силы γV и D опять, как и в положении a , действуют по одной прямой и не имеют никакого плеча l_B (оно равно нулю).

Равновесие в этом положении называется безразличным, или неустойчивым. При последующем росте угла Θ действие пары сил γV и D становится отрицательным,

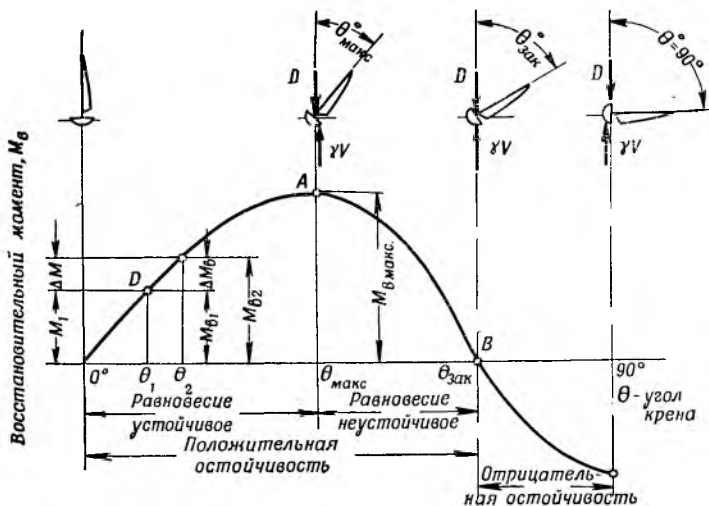


Рис. 197

т. е. одинаковым с действием кренящего момента $M_{кр}$. Все сказанное можно наглядно представить графически в виде так называемой кривой остойчивости, как показано на рис. 197.

На оси ординат отложены значения величины восстанавливающего момента M_B , а на оси абсцисс — углы крена Θ . Не трудно видеть, что с увеличением угла крена растет величина восстанавливающего момента, достигая максимума $M_{B \max}$ при угле Θ_{\max} . При этом плечо l_B пары сил γV и D будет наибольшим.

Участок кривой остойчивости OA характеризует устойчивое равновесие яхты. Под действием кренящего момента M_B яхта накренится на угол Θ_1 , и наступит равновесие M_1 и M_{B1} (в точке D). Если ветер усилится, момент M тоже увеличится на ΔM , яхта накренится на угол Θ_2 , при котором условие $\Delta M = \Delta M_B$ будет сохранено.

Прирост кренящего момента $\Delta M_{кр}$ постоянно уравновешивается приращением восстанавливающего момента $\Delta M_{в}$. Когда кренящий момент уменьшается, яхта автоматически возвращается к положению, соответствующему новому кренящему моменту. Такая картина наблюдается только на участке кривой ОА. Угол Θ_{max} будет предельным углом крена для сохранения яхтой устойчивого равновесия.

Участок кривой АВ характерен для неустойчивого равновесия яхты. Когда угол крена больше угла $\Theta_{зак}$, называемого углом заката диаграммы статической остойчивости, восстанавливающий момент $M_{в}$ становится отрицательным. При таком крене яхта опрокинется даже после прекращения действия кренящей силы.

Отсюда следует, что на швертботах безопасность плавания обеспечивается только при крене меньше Θ_{max} . В области углов $\Theta=0$ и до Θ_{max} остойчивость швертбота поддерживается автоматически. За пределами угла Θ_{max} , если команда не сумеет во-время откренить яхту, опрокидывание неминуемо. Единственным надежным средством избежать купания в таком положении — это потравливание шкотов для ослабления действия ветра, что связано с потерей скорости. Для швертботов характерными углами крена примерно будут: $\Theta_{max}=30^{\circ}-45^{\circ}$; $\Theta_{зак}=60^{\circ}-80^{\circ}$.

Только что разобранный случай остойчивости швертботов является типичным примером остойчивости формы, поскольку форма корпуса имеет здесь решающее значение. От формы корпуса зависит величина восстанавливающего момента $M_{в}$, а следовательно, и величина угла крена Θ_{max} *.

Рассмотрим теперь, какое влияние на кривую остойчивости имеют высота надводного борта F и ширина корпуса B . Возьмем для рассмотрения два корпуса одинаковой формы и водоизмещения. Положение центра величины (ц. в.) и центра тяжести (ц. т.) — одно и то же.

* Автор ошибается в определении остойчивости формы. На примере рис. 196 рассмотрена полная остойчивость швертбота. Остойчивость только за счет формы возможна при условии, если центры тяжести и величины будут расположены в одной точке. Только при этом условии момент остойчивости веса будет равен нулю (прим. ред.).

Яхты отличаются только высотой надводного борта F_1 и F_2 (рис. 198, а).

В нижней части рисунка помещены кривые устойчивости. У яхты с более высоким бортом F_2 восстанавливающий момент $M_{в2}$ и предельный угол крена θ_{2max} больше, чем у второй яхты, и, следовательно, она устойчивее. Начальная устойчивость у обеих яхт на малых углах крена одинаковая, но сильно отличается при большом крене. Очевидно, что гораздо безопаснее в плавании будет яхта с высоким бортом.

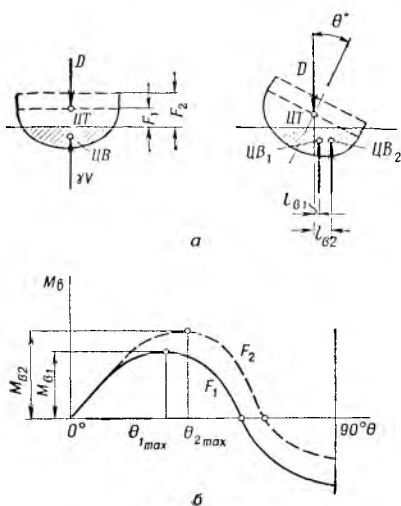


Рис. 198

Сравним теперь устойчивость яхт с разной шириной корпуса B_1 и B_2 (рис. 199). И начальная и конечная устойчивость этих яхт различны. Широкая яхта устойчивее, поскольку имеет большее плечо устойчивости: $l_{в2}$ больше $l_{в1}$. Величина плеча зависит от положения центра величины, находящегося в центре объема вытесненной корпусом воды.

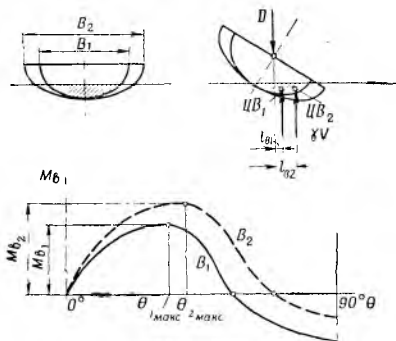


Рис. 199

В последние двадцать лет в конструкциях швертботов замечается тенденция увеличения ширины корпуса, что, в свою очередь, позволяет увеличивать площадь парусности. Однако увеличение ширины корпуса оправдывается и соображениями глиссирования, так как легче образовать достаточную площадь для действия гидродинамических сил.

У больших килевых яхт большая начальная устойчи-

вость за счет ширины корпуса может иногда вызывать стремительные бортовые раскачивания яхты, нервирующие команду и небезопасные для такелажа. С этим фактом приходится считаться при проектировании крейсерских яхт, когда на первом месте стоят заботы об удобствах команды, а не скорость.

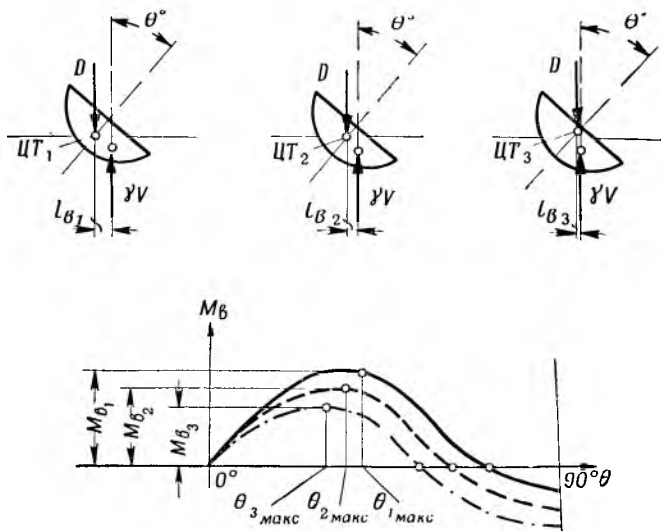


Рис. 200

Остойчивость зависит не только от формы корпуса, но и от взаимного положения центра тяжести яхты и центра величины. Рассмотрим пример, когда три одинаковые по корпусу яхты отличаются расположением центра тяжести — ц. т.₁, ц. т.₂, ц. т.₃ (рис. 200).

Анализируя рисунки, не трудно убедиться, что чем ниже расположен центр тяжести, тем яхта остойчивее. Чем ниже находится центр тяжести, тем больше плечо восстанавливающего момента l_B . Низкое расположение центра тяжести используется в конструкциях килевых яхт, где балластный киль посредством плавника опускают до желательной глубины. Вес балласта составляет 30—80% общего веса яхты.

Остойчивость килевой яхты является комбинацией остойчивости формы и веса, а кривая остойчивости отли-

чается от кривой остойчивости швертбота (рис. 201). Вместе с увеличением крена плечо восстанавливающего момента M_B увеличивается, момент все время остается положительным и яхта не может опрокинуться. Поэтому килевая яхта может безопасно плавать в гораздо более трудных условиях погоды, чем швертбот, остойчивость которого обеспечивается только формой корпуса.

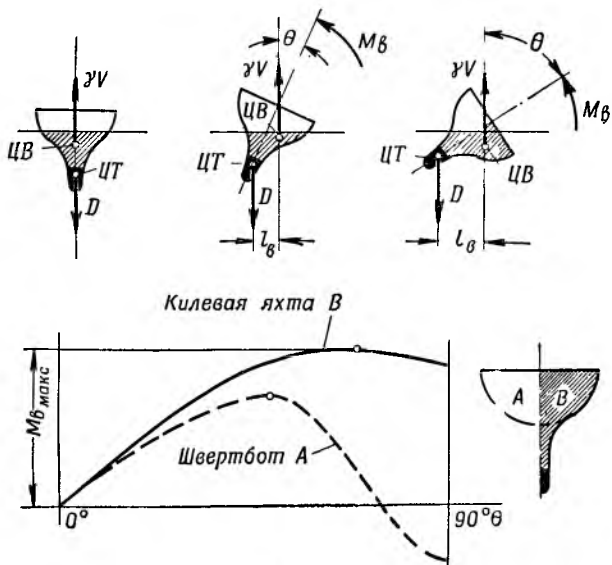


Рис. 201

Остойчивость швертбота и килевой яхты в большей или меньшей степени зависит также и от волнения и шквалистости ветра. Когда эти факторы действуют одновременно, яхта может получить очень большой крен, а швертбот — неожиданно опрокинуться.

Особенно опасны неожиданные порывы ветра, ударное действие которых значительно сильнее действия ровного ветра той же скорости.

Большая разница в поперечной остойчивости существует между килевой яхтой и безбалластным катамараном, у которого остойчивость обеспечивается за счет широко расставленных корпусов. У катамарана наблюдается большая начальная остойчивость в области небольших

углов крена (рис. 202, а), а потом, так же как у швертботов, эта остойчивость падает и в районе углов крена 70° — 80° становится отрицательной. Это — весьма нежелательное свойство, особенно для катамаранов, предназначенных для туризма. С точки зрения безопасности целесообразно увеличить остойчивость катамаранов добавочным балластом, если им предназначено плавать далеко от берегов, и особенно в открытом море.

На рис. 202, б показано, как этот вопрос был разрешен конструктором Михаэлем Гендерсоном. На рисунке приведена кривая остойчивости катамарана «Голден Миллер» (см. рис. 169). Область положительной остойчивости без добавочной емкости поплавка на топе мачты доходит примерно до 140° крена, что уже вполне достаточно. Такая остойчивость получена за счет балласта, расположенного на

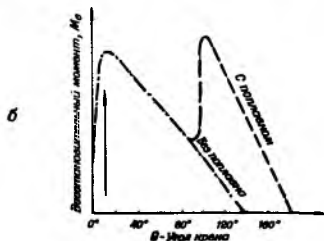
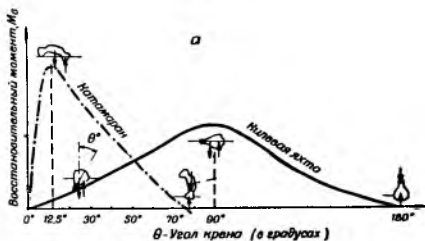


Рис. 202

нижних частях швертов. Для еще большей остойчивости на топе мачты помещен поплавок, поддерживающий мачту в положении, при котором балласт дает максимальный восстанавливающий момент. Как влияет это приспособление на остойчивость, можно понять из рис. 202, б.

Величина максимального восстанавливающего момента M_B ограничивает возможность несения определенной площади парусности. Рассмотрим пример на рис. 203, а: восстанавливающий момент швертбота $M_B = D l_{B1} + p \cdot l_{B2}$, где D — вес швертбота без команды, p — вес команды. Ясно, что «живой» балласт p имеет сильное влияние на остойчивость, а следовательно, и на возможность яхты нести ту или иную площадь парусов. Это влияние тем больше, чем больше отношение веса команды к собственному весу яхты.

У современных гоночных швертботов это отношение около 50%. Применение трапеций и других средств вынесения веса команды за пределы борта широко практикуется для увеличения остойчивости и достижения больших скоростей.

Возвращаясь к рис. 203, а, отметим, что в условиях плавания с равномерной скоростью, с более или менее по-

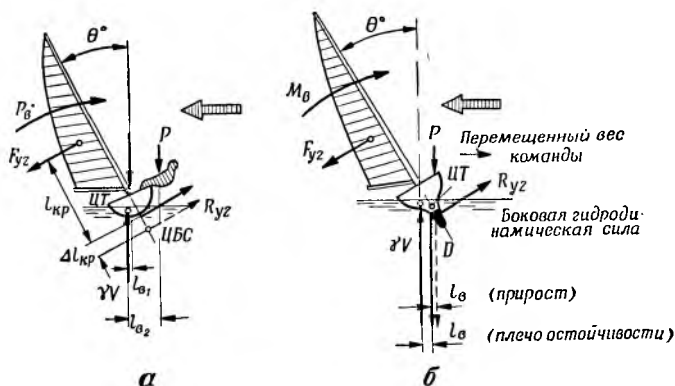


Рис. 203

стоянным креном, восстанавливающий момент уравновешивает действие кренящего момента:

$$M_{кр} = M_{в} = F_{yz} (l_{кр} + \Delta l_{кр}),$$

где F_{yz} — аэродинамическая сила крена; $l_{кр}$ — высота ц. п. над ц. б. с., когда шверт частично поднят; $(l_{кр} + \Delta l_{кр})$ — высота ц. п. над ц. б. с., когда шверт полностью опущен.

Величина кренящего момента $M_{кр}$ зависит от плеча $(l_{кр} + \Delta l_{кр})$ пары сил F_{yz} и R_{yz} . Отсюда напрашивается практический вывод, что, делая поворот фордевинд на легкой яхте при сильном ветре, безопаснее подобрать шверт, так как это уменьшит величину кренящего момента. Целесообразно несколько подбирать шверт (на $1/2$ или $1/3$) и на полном бейдевинде при очень сильном ветре. При этом легче бороться с креном, лучше будут работать паруса и яхта станет меньше приводиться.

Насколько это важно для скорости хода, не приходится говорить. Таким образом, чем больше скорость хода и полнее курс, тем меньше потребность в опускании всего

шверта. Единственное исключение — это когда яхту сильно раскачивают с борта на борт. В таких условиях полностью опущенный шверт может уменьшить стремительность качки или предотвратить ее совсем.

Обратим внимание, что на лавировке (рис. 203, а) кренящий момент $M_{кр}$ может стремительно увеличиться, если шверт наткнется на мель или другое препятствие. Плечо действия кренящей силы $F_{уз}$ в это время увеличивается на дополнительную величину $\Delta L_{кр}$, примерно на половину длины шверта. Если швертбот был на границе безопасного крена, то опрокидывание неизбежно, так как посадка на мель всегда неожиданна.

Вес команды килевой яхты не влияет так сильно на остойчивость, как у швертбота (рис. 203, а и б). Но все же в сильный ветер, когда крен может достигать до 30° , полезно и на килевой яхте команде лежать на борту или даже висеть за бортом, как это делала команда яхты «Везерли» во время гонок на Кубок Америки.

Влияние положения центра тяжести яхты, как и влияние площади парусности на достижение оптимальной скорости «прямо на ветер» $V_{нв}$ лавирующей яхты, изображено графически на рис. 204. Эти диаграммы построены на основании экспериментов и расчетов, проведенных в Институте Стивенса в США, относящихся к яхте «Нью-Йорк-32» (см. рис. 136).

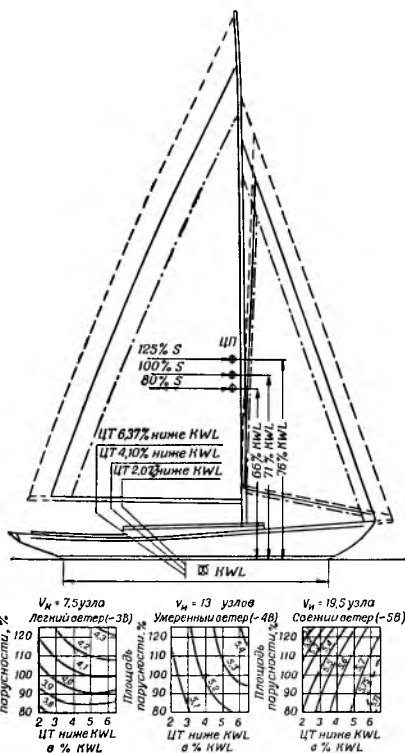


Рис. 204

Эксперименты велись с целью установить влияние на скорость хода трех вариантов площади парусности S и трех различных положений центра тяжести. Таким образом, получалось всего девять возможных комбинаций для определения $V_{\text{нв}}$. Результаты показаны на трех диаграммах, помещенных внизу рисунка. Изменение скорости $V_{\text{нв}}$ дано в зависимости от площади парусности, выраженной в % от стандартной площади, принятой за 100%, и от положения центра тяжести по отношению к ватерлинии KWL (в % длины корпуса по ватерлинии). Диаграммы вычерчены для трех скоростей ветра $V_{\text{и}}$: 3, 4 и 5 баллов, по Бофорту.

Легче всего будет разобраться в полученных результатах на конкретном примере. В районе центра каждой диаграммы нанесена черная точка, указывающая оптимальную скорость «прямо на ветер» $V_{\text{нв}}$ яхты «Нью-Йорк-32» с ее проектными данными. Эта точка лежит на уровне 100% площади парусности (смотри шкалу на вертикальной оси) и на линии около 4,1% по горизонтальной шкале, определяющей стояние центра тяжести яхты от KWL в %.

На крайней левой диаграмме видно, что точка оптимальной скорости $V_{\text{нв}}$ лежит между кривыми, обозначенными цифрами 4,0 и 4,1. Можно сказать, что при ветре $V_{\text{и}}=7,5$ узла оптимальная скорость $V_{\text{нв}}$ для яхты «Нью-Йорк-32» будет около 4,09 узла.

По средней диаграмме, относящейся к скорости ветра $V_{\text{и}}=13$ узлам, найдем, что оптимальная скорость $V_{\text{нв}}=5,23$ узла, а для ветра $V_{\text{и}}=19,5$ узла, скорость $V_{\text{нв}}$ соответственно будет равна около 5,6 узла.

Более подробный анализ диаграмм позволит вывести несколько практических правил, полезных для любых килевых яхт при различных условиях погоды.

Легкий ветер ($V_{\text{и}}=7,5$ узла)

Решающим фактором в достижении наибольшей оптимальной скорости $V_{\text{нв}}$ является площадь парусности, особенно если центр тяжести яхты к тому же расположен достаточно низко. Чем больше площадь парусности и чем ниже расположен центр тяжести, тем больше скорость $V_{\text{нв}}$. Однако заметим, что понижение центра тяжести должно быть в определенных границах, чтобы яхта пошла с оптимальной скоростью. Например, при площади парусности, равной 90% исходной площади, яхта может идти

со скоростью $V_{\text{нв}}=3,99$ узла, если положение центра тяжести находится на глубине 5% длины конструктивной ватерлинии.

Перемещение центра тяжести еще глубже поведет к уменьшению скорости $V_{\text{нв}}$, так как крен будет слишком малым для того, чтобы яхта повысила скорость. Отсюда практическое правило: при слабых ветрах бывает полезно закрепивать яхту, посадив команду на подветренный борт.

Умеренный ветер ($V_{\text{и}}=13$ узлам)

Поперечная остойчивость становится решающим фактором, особенно при большой площади парусности. Пределы возможных изменений скоростей $V_{\text{нв}}$ при крайних значениях в комбинации площадь парусности — положение центра тяжести яхты значительно уже пределов скорости $V_{\text{нв}}$, которые были при слабом ветре.

Оптимальное значение скорости $V_{\text{нв}}$ колеблется в пределах 3,6—3,7% в ту или другую сторону и зависит от скорости яхты «Нью-Йорк-32». Поэтому на умеренных ветрах очень трудно заметно улучшить скорость $V_{\text{нв}}$ за счет изменений только площади парусности или положений центра тяжести яхты.

Свежий ветер ($V_{\text{и}}=19,5$ узла)

При сильном ветре роль остойчивости особенно возрастает. Чрезмерная площадь парусности теперь становится уже вредной, так как требует слишком большой остойчивости. Наибольшая скорость $V_{\text{нв}}$ достигается при площади парусности, равной только 89% от исходной площади, когда положение ц. т. = 6,2% от длины ватерлинии.

Взяв рифы и уменьшив площадь парусов до 80% нормальной и не меняя положения центра тяжести, можно увеличить скорость $V_{\text{нв}}$ на 0,1 узла. Возможности изменения скорости $V_{\text{нв}}$, как показывает диаграмма, находятся в границах от 3,5% выше и до 10,5% ниже скорости $V_{\text{нв}}$, исходной для яхты «Нью-Йорк-32». Отсюда можно сделать вывод, что при сильных ветрах скорость $V_{\text{нв}}$ может резко меняться, если площадь парусности не соответствует остойчивости или когда эти два фактора не находятся в должном отношении.

На слабом ветре ($V_{\text{и}}=7,5$ узла) смещение команды (вес около 450 кг) на расстояние около 1,2 м от диамет-

ральной плоскости на яхте «Нью-Йорк-32» не влияет на скорость $V_{\text{нв}}$. При среднем и сильном ветре такое перемещение команды вызывает прирост скорости $V_{\text{нв}}$ на 1,3—1,6%. Заметим, что вес команды едва достигает 4% водоизмещения яхты.

В олимпийском классе «Дракон» вес команды составляет около 10% общего веса яхты. Здесь смещение команды может дать приращение скорости $V_{\text{нв}}$ примерно на 0,2 узла, или около 5%. Для этого расчета вес команды принимался равным 190 кг, а смещение от диаметральной плоскости допускалось на 0,76 м.

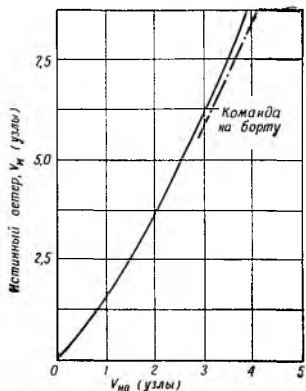


Рис. 205

На рис. 205 даны две кривые скоростей $V_{\text{нв}}$ для двух положений команды. Сплошная кривая показывает скорость при положении команды вблизи оси яхты, а пунктирная — при смещении команды. Лучших результатов можно ожидать от яхты класса «Дракон», имеющей наименьший собственный вес и тяжелую по весу команду, при условии, что экипаж отлично работает на откренивании, а ветер достаточно свежий.

лучших результатов можно ожидать от яхты класса «Дракон», имеющей наименьший собственный вес и тяжелую по весу команду, при условии, что экипаж отлично работает на откренивании, а ветер достаточно свежий.

б) Продольная остойчивость

Остойчивость яхт в диаметральной плоскости значительно больше, чем в плоскости шпангоутов. Поэтому изменения в дифференте корпуса во время движения невелики, а их влияние на гидродинамическое сопротивление по сравнению с креном незначительно (особенно у килевых яхт). Тем не менее с этим приходится считаться, когда желают получить от яхты максимум, на что она способна.

Принимая во внимание силу F_x на парусе (на рис. 206), увидим, что действие этой силы на продольную остойчивость будет зависеть от курса и скорости яхты. Сила F_x , действуя на плечо $l_{\text{диф}}$, образует момент, углуб-

ляющий нос и перемещающий ц. в. вперед. Равновесие яхты установится, когда будут равны моменты:

$$F_x \cdot l_{\text{диф}} = \gamma V \cdot l_{\text{в(диф)}}.$$

Перемещение ц. в. вперед относительно ц. т. будет тем больше, чем больше сила F_x и чем меньше полнота обводов носовой части корпуса. Желая сохранить прежнее

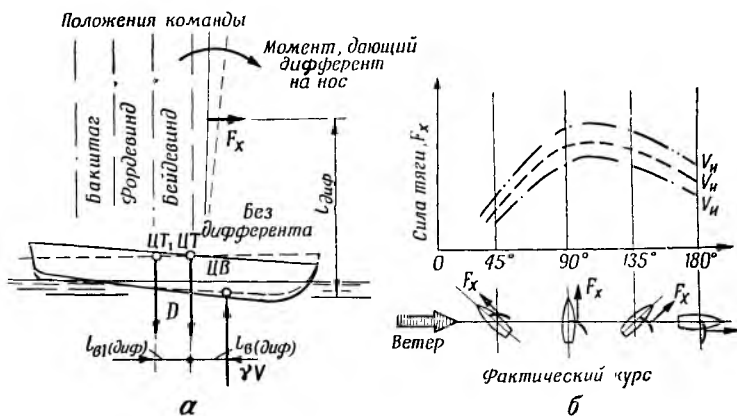


Рис. 206

положение корпуса относительно поверхности воды, следовало бы переместить команду к корме настолько, чтобы центр тяжести сместился в точку ц.т.₁, а плечо силы тяжести D увеличилось бы на отрезок $l_{\text{в1 диф}}$. Если $l_{\text{в1 диф}} = l_{\text{в1 диф}}$, то корпус возвратится в положение, которое было до начала действия силы F_x .

Сравнивая рис. 206, а с графиком, помещенным на рис. 206, б, можно убедиться, что величина момента, дифференцирующего яхту на нос, зависит от силы ветра. Чтобы противодействовать этому, требуется использовать вес команды. Чем сильнее ветер, тем дальше к корме надо сажать команду.

При размещении команды можно руководствоваться следующими соображениями: на острых курсах команда должна находиться в самом переднем положении, а по мере уваливания на более полные курсы — смещаться по направлению к корме. Вероятно, ближе всего к корме команда должна находиться на курсах бакштаг, т. е.

когда на парусе образуется наибольшая аэродинамическая сила тяги. На курсе фордевинд команда может сидеть немного дальше от кормы, чем на бакштаге.

Однако известно, что на больших скоростях на корпус действуют гидродинамические подъемные силы, вызывающие поднятие носа, т. е. действующие противоположно аэродинамическим силам. Следовательно, при откренивании яхты команда должна компенсировать лишь разницу действия этих сил.

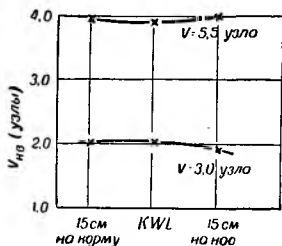


Рис. 207

Для легких швертботов необходимо в основном сохранить желательный угол дифферента корпуса ψ , о котором шла речь в разделе основ движения яхты.

Перемещение команды вдоль корпуса вперед или назад влияет и на курсовую устойчивость. Чтобы в этом убедиться, можно проделать следующий опыт: если пересадить команду вперед на урав-

новешенной яхте, идущей в лавировку, то яхта станет приводиться; если же команда пересядет ближе к корме, то яхта станет уваливаться.

Чтобы установить влияние продольного наклона корпуса на лавировочные свойства яхты класса «Дракон», были проведены эксперименты, результаты которых даны на рис. 207.

На слабом ветре при скорости яхты $V = 3$ узлам, удалось увеличить максимальную скорость $V_{нв}$, когда посадка корпуса была без дифферента (прямо по ватерлинии) или при дифференте примерно до 15 см на корму. При более сильном ветре и при скорости, равной около 5,5 узла, оказалось выгодным дать небольшой дифферент на нос. При плавании попутными курсами и без крена лучшие результаты были получены, когда корпус имел посадку прямо по ватерлинии, т. е. без дифферента.

в) Устойчивость на курсе

Устойчивость на курсе, или равновесие направления,— это свойство яхты сохранять прямой курс с очень небольшой помощью руля независимо от того, в лавировку или с попутным ветром плывет яхта, а также независимо от

метеорологических условий. Устойчивость на курсе — важное свойство яхты, имеющее большое практическое значение. Яхты, не обладающие этим свойством, трудны в управлении и небезопасны.

Прежде всего следует выяснить поведение яхты при том или ином отклонении руля и какой чувствительностью следует обладать рулевому относительно положения руля к диаметральной плоскости яхты (д. п.). Мнения в этих вопросах часто расходятся. Рассмотрим этот вопрос на примере швертбота (рис. 208). Из рисунка видно,

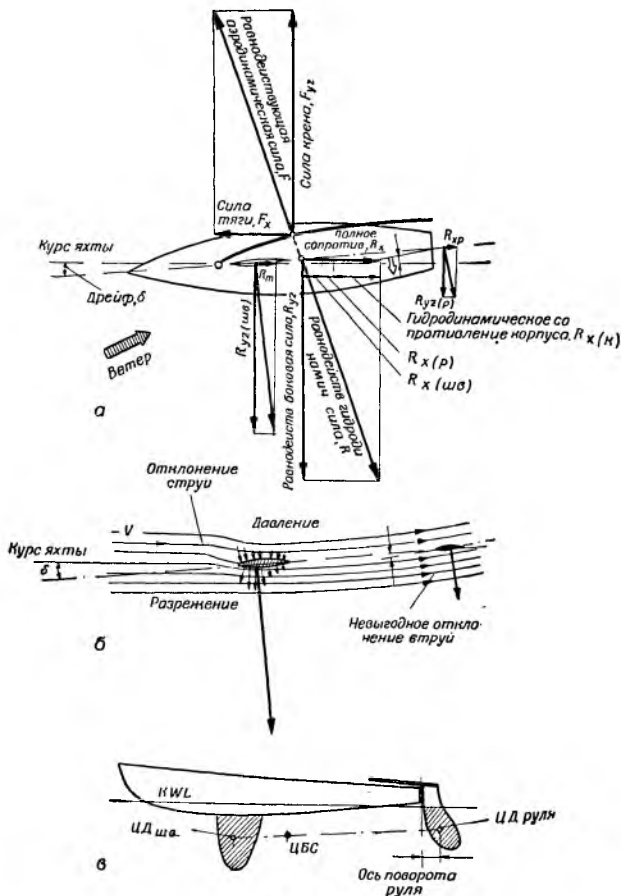


Рис. 208

что отклоненный на некоторый угол руль действует аналогично шверту: на плоскости руля возникает боковая сила R_y , противостоящая кренящей силе F_{yz} . Таким образом, руль помогает бороться с дрейфом и тем самым помогает в этом шверту. При этом рулевой должен:

а) отклонять руль на несколько градусов от диаметральной плоскости (румпель на себя);

б) тянуть румпель с некоторой силой на ветер.

Эта сила будет зависеть от величины гидродинамической силы R_y руля и от удаления центра давлений на перо руля от его оси вращения. Когда перо руля подобрано в крайнее верхнее положение, то расстояние между его осью вращения и центром давления воды будет наибольшим, причем момент, стремящийся повернуть перо, тоже будет наибольшим.

Рулевой может оценить происходящее, неправильно объяснив этот частный случай как склонность яхты приводиться вообще, хотя этим свойством яхта, очевидно, не обладает.

Можно также, естественно, предположить, что, когда руль направлен строго по диаметральной плоскости судна, на нем должна возникать боковая сила $R_{y(p)}$, как и на шверте. Это предположение справедливо при условии, что угол дрейфа, с которым движется яхта, будет сохраняться одним и тем же и на корпусе, и на шверте, и на перо руля. Однако характер обтекания передней части корпуса и шверта отличается от потока в кормовой части корпуса и руля, где вследствие отклонения струй воды угол дрейфа заметно меньше (см. рис. 208, б). Это происходит из-за отклонения, а может быть, отбрасывания струй воды в противоположном направлении. Когда перо руля установлено строго в диаметральной плоскости с учетом отклонения потока, угол дрейфа руля может стать отрицательным, если угол дрейфа корпуса будет положительным. Отсюда напрашивается важный вывод: отклонение руля (румпель на ветер) на несколько градусов является обязательным условием для того, чтобы руль участвовал и помогал работе шверта в образовании силы бокового сопротивления R_y . Безукоризненно уцентрированная яхта (когда рулевой совсем не ощущает на румпеле поворотного действия пера) с гидродинамической точки зрения не идеал, так как перо руля никак не участвует в важной работе, производимой швертом.

Хорошо уцентрированная яхта при свободном румпеле должна слабо приводиться и никогда не уваливаться. Уваливание показывает, что шверт и перо руля работают против друг друга, что, безусловно, вредно.

Сравнивая величину гидродинамических сопротивлений $R_{x(к)}$, $R_{x(р)}$, $R_{x(шв)}$, образующих в сумме общее сопротивление R_x (рис. 208, а), можем заметить, что сопротивление руля $R_{x(р)}$ сравнительно невелико, когда руль отклоняется на небольшой угол i (угол атаки руля i).

А как можно судить о величине этого сопротивления? Ответ можно найти, если проанализировать рис. 151, где даны гидродинамические коэффициенты для плоского и профилированного шверта. Заметим, что существует некий наиболее эффективный угол атаки шверта δ , при котором получается наибольшая сила бокового сопротивления R_y (ζ_y) в сочетании с наименьшим сопротивлением R_x (ζ_x). Для руля тоже существует определенный критический угол $\delta_{кр}$ (рис. 209), за которым боковая сила $R_{y(р)}$ уменьшается, а гидродинамическое сопротивление пера $R_{x(р)}$ заметно возрастает. На парусной яхте руль выполняет две обязанности:

а) участвует в образовании боковой силы R_y , противодействуя дрейфу яхты;

б) служит для управления яхтой, т. е. помогает сохранять курс яхты или выполнять тот или иной маневр.

В обоих случаях критерием качества руля является величина боковой силы $R_{y(р)}$ при отклонении руля на сравнительно небольшой угол — порядка $10\text{--}12^\circ$, когда дополнительное сопротивление $R_{y(р)}$ еще невелико. Чем больше сила $R_{y(р)}$ и меньше сопротивление $R_{x(р)}$, тем эффективнее работает руль. Две отмеченные обязанности руля не находятся в гармоническом согласии. Перо руля, вполне достаточное для выполнения первой обязанности, особенно при слабом ветре, будет недостаточным для выполнения других обязанностей в свежую погоду. Вероятно, придется увеличить площадь пера.

Возвращаясь к рис. 208, в, заметим, что положение

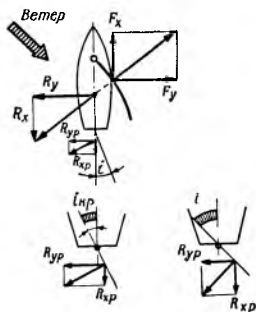


Рис. 209

центра бокового сопротивления (ц. б. с.) зависит от отношения площадей шверта и пера руля и от степени использования руля в образовании боковой силы R_y .

Вспомним, что у плоского шверта центр давлений находится примерно на расстоянии 20—25% ширины, считая от передней кромки, если угол атаки шверта, или эффективный угол дрейфа, лежит в пределах 3—5°. В этих практических пределах обычно находится угол дрейфа у хорошо спроектированных яхт во время лавировки. У профилированного шверта с толщиной профиля около 10%

центр давлений находится примерно на 25—28% ширины профиля в границах углов атаки до 25°.

В предшествующем изложении упоминалось, что на приводимость яхты влияют многие факторы, в том числе и крен яхты. Отсюда не трудно понять, что отцентровать яхту одинаково хорошо для любых условий невозможно. Приходится идти на некий компромисс, который отвечал бы наиболее часто встречающимся

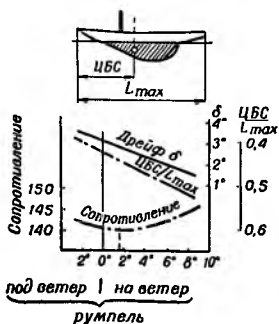


Рис. 210

метеорологическим условиям, в основном величине крена, под которым чаще всего приходится плавать. Эти соображения не столь существенны для швертботов, которые легче поддаются открениванию и потому могут, как правило, плавать на ровном киле.

Модельные испытания, проводившиеся в Институте Стивенса в США на модели яхты «R-6М», показали, что отклонение румпеля на пару градусов с подветренной стороны на наветренную (рис. 210) вызывает значительное смещение ц. б. с. к корме, с одновременным уменьшением угла дрейфа δ . Гидродинамическое сопротивление оказывается минимальным, когда руль находится примерно под углом 2° от диаметральной плоскости под ветер.

Диаграмма построена для условий, когда яхта идет со скоростью $V=5,9$ узла с креном около 20°. В верхней части рисунка видно, что ц. б. с. лежит примерно на расстоянии 45% длины корпуса от штевня и в действительности далеко впереди геометрического ц. б. с. погруженной части корпуса.

г) Маневрирование

Допустим, что на прямом курсе мы отклоним руль на угол i . Тотчас изменится направление движения, и яхта пойдет по кривой с радиусом r . В любое мгновение своего движения по окружности направление движения можно представить в виде касательной к окружности в точке,

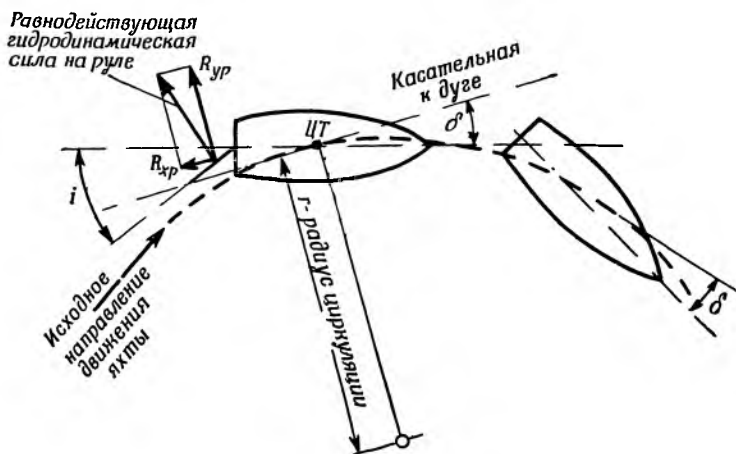


Рис. 211

проходящей через центр тяжести яхты. Разлагая гидродинамическую силу руля на две составляющие — перпендикулярную и параллельную движению $R_{y(p)}$ и $R_{x(p)}$ (рис. 211), движение яхты можно рассматривать как следствие: поступательного движения, дрейфа и поворота вокруг оси, проходящей вблизи от центра тяжести яхты. Нос яхты будет находиться на внутренней стороне траектории движения, а корма — на ее наружной стороне. Характерный вынос кормы наружу при поворотах часто бывает причиной различных протестовых ситуаций в гонках, а также аварий при поворачивании слишком близко от стенок и т. д.

Точно по траектории движется только центр тяжести яхты, а управляется яхта с кормы.

В предыдущем изложении обращалось внимание на то, что отклонение руля сопровождается увеличением гидродинамического сопротивления, а следовательно, и снижением скорости. Кроме того, на поворотах оверштаг какое-то время паруса не работают. В гонках приходится часто делать поворот оверштаг и, следовательно, потери могут быть значительными.

Во время тренировочных занятий автор заметил, что разница по времени, затраченному на поворот оверштаг, у команд, отличающихся по опыту, достигает 3—5 секунд.

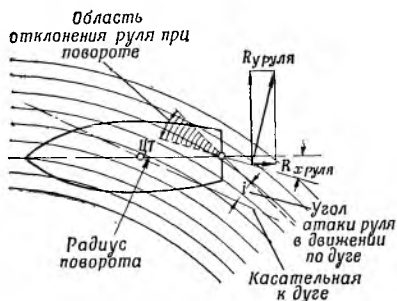


Рис. 212

На десяти поворотах более опытная команда может выиграть 40—50 секунд. Следовательно, повороты оверштаг следует научиться делать с отклонением руля на оптимальный угол и с наименьшей потерей времени.

Помня, что у каждого руля есть свой оптимальный угол отклонения, при котором отношение гидродинамической силы $R_{y(p)}$

к сопротивлению $R_{x(p)}$ наибольшее, поворот следует делать отклонив руль на этот угол (рис. 209 и 212). Как только яхта начнет двигаться по окружности, отклонение руля надо увеличивать соответственно радиусу окружности, по которой движется яхта, чтобы сохранить оптимальный угол атаки пера руля. Таким образом, угол установки руля на повороте будет зависеть от радиуса окружности.

На килевых яхтах угол отклонения руля относительно небольшой — около 30° , поскольку радиус поворота достаточно большой. На швертботах, поворачивающихся почти на месте, угол отклонения руля может быть гораздо больше и доходить до 60° .

Поворот оверштаг возможно значительно улучшить, сократив время его проведения, если действием руля помочь парусами. На рис. 213 показан поворот оверштаг с левого на правый галс. Путь поворота разделен на три участка, которые яхта проходит с затратой времени t_1 , t_2 , t_3 . На участке t_1 одновременно с отклонением руля

энергично выбирается грот до диаметральной плоскости при полощущем стакселе. Момент аэродинамической силы F относительно ц. б. с. будет помогать действию руля. Отрезок t_2 сокращается до минимума. Когда нос яхты пройдет линию ветра, возникает момент, противодействующий повороту, который надо уравновесить действием руля. На участке t_3 травятся шкоты грота до установки паруса на новом курсе и подбираются шкоты стакселя. На тяжелых, недостаточно поворотливых яхтах иногда приходится выносить стаксель на ветер, чтобы ускорить поворот оверштаг.

Насколько поворот оверштаг делается без труда и безопасно, настолько же поворот фордевинд бывает трудным и опасным, особенно на свежем ветре. Даже опытные рулевые в свежий ветер не всегда решаются применить фордевинд на швертботе. В чем же заключаются эти трудности и опасность?

Представим (рис. 214), что в положении O , когда яхта идет курсом фордевинд правого галса, нам надо сделать поворот. Причем ветер сильный. Выбираем грот до диаметральной плоскости и постепенно меняем курс. Подходя к линии ветра, заметим, что скорость яхты падает и ее начинает сильно приводить (см. рис. 214, 1).

Приходится сильно одерживать рулем и откренивать на правом борту. В положении 2 парус стремительно переходит на правый борт. Несмотря на быстрое растравливание шкотов, на парусе возникает большая аэродинамическая сила, вызывающая:

- а) стремительное изменение направления наветренного момента, теперь уже совпадающего с действием руля;
- б) сильный крен яхты динамического происхождения в результате изменения действия силы с $+F_{yz}$ на $-F_{yz}$.

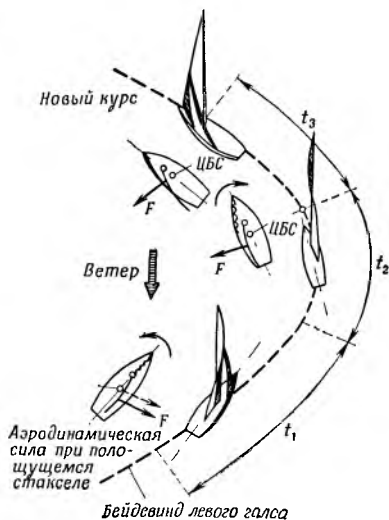


Рис. 213

Заметим, что во время поворота скорость уменьшается, давление вымпельного ветра растет, а эффективность действия руля уменьшается. Если в положении 3 действие

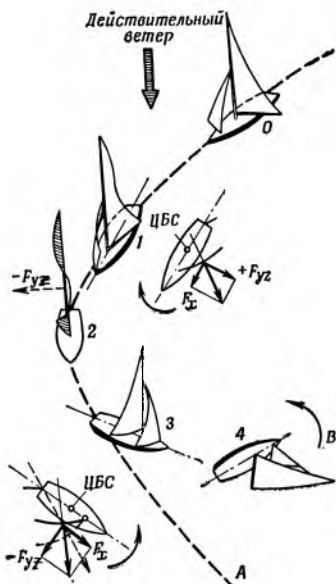


Рис. 214

руля и отклонение команды на левом борте окажутся недостаточными для удержания яхты на курсе А, яхта приведется до курса В. Крен может стать чрезмерным, и тогда возможно опрокидывание яхты на правый борт.

Наибольшие трудности возникают в положении 2 и во время перехода в положение 3. Здесь от команды требуется максимум внимания, быстрота и ловкость.

Поворот фордевинд облегчается на малых судах, когда гроташкоты выбирают только примерно до положения гика под углом 45° к диаметральной плоскости, а затем рукой перебрасывают грот на новый галс*.

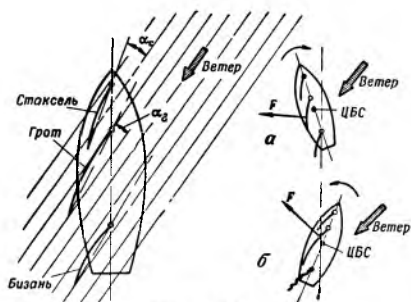


Рис. 215

Специфические приемы управления яхтой применяются в дальних плаваниях. Например, на яхте, вооруженной кэчем (рис. 215), грот ставится под наиболее выгодным углом для заданного курса. Стаксель выбирается несколько сильнее, а бизань недобирается. Если яхта станет приво-

* Рекомендации по выполнению поворота фордевинд не совсем приемлемы для больших килевых яхт, на которых свободное растравливание шкотов после переброски грота опасно и шкоты следует тревить постепенно (прим. ред.).

даться, перестанет работать бизань (положение б), и яхта снова увалится.

При слишком сильном уваливании аэродинамическая сила F смещается ближе к корме относительно ц. б. с., заставляя яхту приводиться. Таким образом, яхта может менять курс в границах положений от a до b . С хорошо поставленными парусами разница в курсах между положениями a и b будет очень незначительной. На яхте с вооружением кэч эта разница сохранится в пределах 2° .

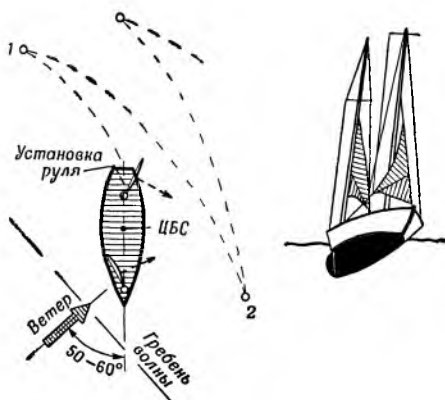


Рис. 216

На яхтах с вооружением шлюп или тендер добиться самоуправления хотя и трудно, но вполне возможно (используя прием взаимного перемещения центра парусности с центром бокового сопротивления).

Очевидно, самоуправляющаяся яхта будет уступать в скорости плавания яхте, управляемой хорошим рулевым, так как ее паруса не будут работать с наилучшей отдачей. На полных курсах необходимо использовать спинакер.

Особым видом самоуправляемости яхты является лежание в дрейфе, применяемое главным образом для пережидания штормовой погоды в море. Задача состоит в сохранении наиболее безопасного положения яхты относительно тяжелого волнения, при незначительном продвижении против волн.

Яхта может дрейфовать по ветру со скоростью 1,5—2 узла, вследствие чего разрушительное действие встречных волн сильно уменьшается. Для постановки яхты в

дрейф паруса располагают так, чтобы стаксель работал на задний ход, а бизань двигала яхту вперед и приводила на ветер (рис. 216). Стаксель не только толкает яхту назад, но и уваливает под ветер. В положении 1 начинает работать бизань, двигая корпус вперед и на ветер. В положении 2 все повторяется сначала. В зависимости от соотношения площадей переднего и заднего парусов можно добиться хода яхты вперед или только дрейфа.

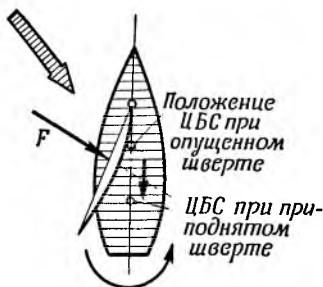


Рис. 217

Для движения яхты вперед надо, чтобы задний парус был больше переднего. Во время дрейфа угол между диаметральной плоскостью яхты и направлением ветра будет около $50-60^\circ$. Он зависит от взаимного положения и площадей обоих парусов. Бывает, что при неудавшемся повороте оверштаг швертбот начинает забирать задний ход. Борясь с этим, рулевые часто начинают

бурно работать рулем и выносят грот на ветер. Эффективность таких маневров не всегда достаточна вследствие действия различных сил (рис. 217). Радикальным выходом из такого положения будет некоторый подъем шверта, с помощью которого центр бокового сопротивления корпуса переместится назад. Получится момент сил, заставляющий корпус уваливаться. На яхтах с передними парусами (многопарусных) для помощи повороту полезно выносить на ветер один из передних парусов.

Часть III

ВЕТЕР И ВОДА

1. Ветер

Собираясь в плавание или на гонки, каждого яхтсмена интересуют вопросы: какая в ближайшее время будет погода, как будет меняться сила и направление ветра? Верное предвидение погоды может сыграть решающую роль в достижении поставленных перед собой задач. Во время длительных гонок на большие дистанции надо изучить состояние и прогноз погоды обширного района предстоящего плавания. В соревнованиях, проводимых на ограниченной акватории, больше внимания следует уделить изучению местных ветровых условий и особенностей данной акватории.

а) Использование областей низкого давления

На значительных пространствах морей и океанов погода, а следовательно, и ветер находятся под преимущественным влиянием постоянно перемещающихся с запада на восток областей низкого барометрического давления. Из метеорологии известно, что область низкого давления представляет собой огромный вихрь, в котором массы воздуха движутся по спирали внутрь к центру области, где наблюдается самое низкое барометрическое давление.

Циклоны перемещаются со средней скоростью 20—30 узлов, но внутри циклона скорость ветра может достигать 120 узлов и более. Такие большие скорости ветра бывают не столь часто. Вообще же характерной чертой для областей с низким барометрическим давлением являются сильные ветры. В свое время капитаны старинных парусников умели искусно использовать эту особенность областей низкого давления. Они прокладывали путь таким образом, чтобы плыть на границе движущегося цик-

лона, используя попутный ветер, и благодаря этому достигали больших скоростей.

В начале XIX века путешествие на паруснике из Англии в Австралию длилось около 130 дней. После того как американский моряк Ф. Маури определил наиболее выгодные пути между различными портами земного шара с учетом метеорологических условий, рейс парусного судна из Европы в Австралию сократился до 100 дней.

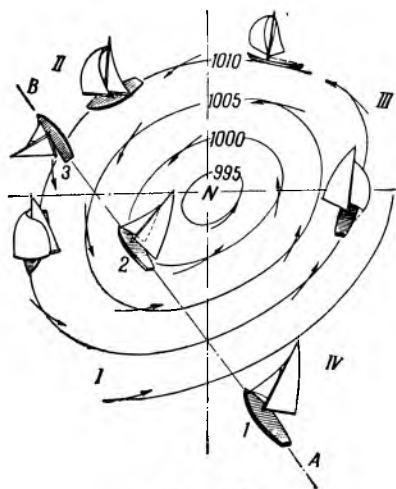


Рис. 218

Известно, что в северном полушарии воздушные массы в области циклона движутся спирально к его центру, против часовой стрелки. На рис. 218 показано, как в зависимости от положения яхты в той или иной части циклона ветер может быть благоприятным или неблагоприятным для плавания.

Рассмотрим курс $A-B$, пересекающий область циклона через его IV, I, II и III четверти. В положении 1 яхта плывет курсом почти галфвинд левого галса. В положении 2, чтобы плыть по прежнему курсу $A-B$, яхта должна перейти на более острый курс — бейдевинд левого галса. Чем ближе к II четверти циклона, тем острее становится курс и, наконец, наступит момент, когда надо будет сменить галс.

Приведенный пример убедительно показывает, что искусство парусного плавания состоит не только в умелом использовании аэродинамических и гидродинамических свойств яхты, но также в умелом учете метеорологических факторов. Их действие особенно сильно может проявиться в длительных морских рейсах или океанских гонках.

Для примера рассмотрим трансатлантические гонки, проводимые в Атлантическом океане. Успех гонки в значительной мере предопределен, если яхтсмен сумеет ис-

пользовать попутные циклоны, постоянно движущиеся вдоль северной трассы. Среди моряков эти циклоны получили название «экспрессов» (рис. 219). Яхтсмен, поймавший такой циклон и сумевший, управляя парусами, как можно дольше удержаться в нем, может прибыть в конечный пункт Марстранд (Швеция) на пять дней раньше своих соперников, которым не удалось воспользоваться циклоном.

Удержаться на краю циклона легче, если яхта будет быстроходная, с большой длиной ватерлинии, а следовательно, имеющей большую относительную скорость, максимум которой, как известно, в наиболее благоприятных условиях плавания не превышает: $V_{max} = 1,4\sqrt{L}$, где L — длина корпуса по ватерлинии в футах.

В одинаковых условиях погоды 40-футовая яхта может развить скорость порядка $1,4\sqrt{40} = 8,8$ узла, в то время как 30-футовая яхта сможет показать скорость до 7,7 узла. Никакая формула или правила гандикапа не смогут компенсировать такой разницы скоростей, поскольку эти формулы не учитывают метеорологических условий.

Несомненно, что высококвалифицированный экипаж сумеет выиграть гонку и на меньшей яхте, но он не будет в состоянии полностью использовать циклон, если относительная скорость яхты $V = 1,4\sqrt{L}$ недостаточна. Опытным путем найдено, что оптимальная длина яхты для атлантических гонок должна быть около 37—40 футов (11—12 м).

В приведенном примере перемещение циклона совпало с направлением гоночной трассы. Теперь рассмотрим случай, когда область барометрического давления перемещается по отношению к курсу плавания под некоторым углом, обозначенным стрелкой (рис. 220). Старт дается в Хеле, а поворотный буй расположен на высоте Хоборга (Швеция). Если учитывать только ветер, дуо-

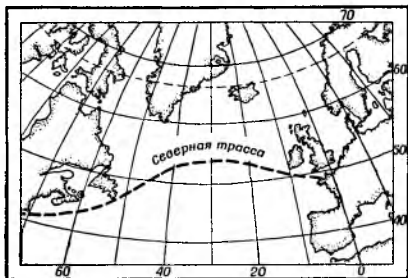


Рис. 219

щий в Хеле, можно предположить, что самым выгодным курсом будет курс $A-B$, проходящий по наиболее короткому пути. Однако, учитывая перемещение циклона, мож-

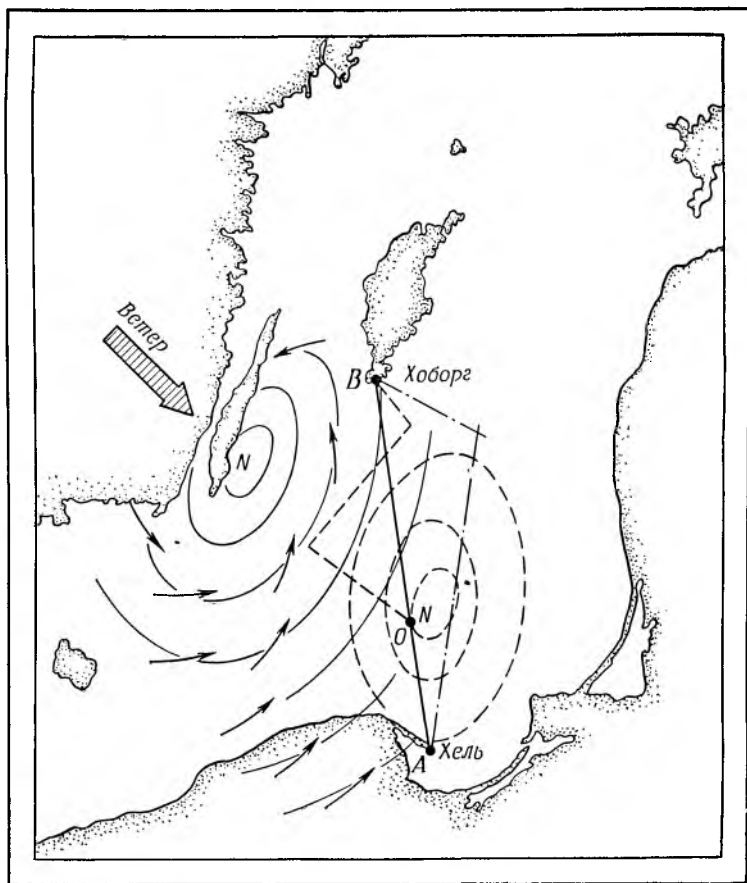


Рис. 220

но предвидеть, что начиная где-то в районе O яхту следует вести в лавировку при усилении ветра и волнения. Ветер, дувший во время старта с юга, в пути изменит направление на запад, северо-запад и, наконец, на север. Учитывая возможные перемены в направлении ветра, бо-

лее выгодным будет плавание курсом *A—C—B*, гарантирующим попутный ветер по всей трассе.

Для областей высоких барометрических давлений также характерна изменчивость ветров, направленных здесь по спирали от центра области (антициклона) к периферии, т. е. обратно тому, что наблюдается в области циклона.

Перемещение воздушных масс в антициклонических областях происходит далеко не так интенсивно, как в областях с низким барометрическим давлением, поэтому возможности использования антициклонов в парусном плавании в открытых морях значительно меньше.

Перед любым более или менее длительным плаванием, чтобы оно было успешным, необходимо тщательно ознакомиться с метеорологической обстановкой в районе предстоящего плавания.

Для этого можно воспользоваться синоптическими картами, выпускаемыми метеослужбой, или синоптическими картами, составленными самостоятельно по метеосводкам, передаваемым по радио и т. п.

В основном задача сводится к тому, чтобы нанести на карту изобары в интересующем нас районе. Затем во время плавания, наблюдая за давлением и ветром, можно установить, в какой четверти циклона или антициклона находится яхта в данный момент. Все это позволит, конечно приблизительно, определить направление перемещения циклона или антициклона, скорость перемещения и ожидаемые изменения ветра. Заметим, что быстрое изменение направления ветра свидетельствует о небольшом радиусе кривизны изобар над данной местностью. Это будет признаком того, что циклон относительно обширный, а яхта находится в его средней части.

Известно, что ветры передвигаются не случайно, а проходят по определенным путям. На рис. 221 показаны преимущественные пути циклонов для районов Северного и Балтийского морей. Надо подчеркнуть, что характер дующих в области циклона ветров зависит от того, по какому пути перемещается центр циклона. Подробные сведения по этому вопросу приводятся в логиях, составленных для данного района.

Прогнозы погоды, сделанные на основании наблюдений за изменением ветра и давления, можно корректировать, пользуясь различными приметам, основанными на

многoletних наблюдениях явлений природы, например по цвету неба, по утренней и вечерней зоре, форме, виду и движению облаков, поведению птиц и животных и др.

У всех народов, жизнь которых связана с морем, су-

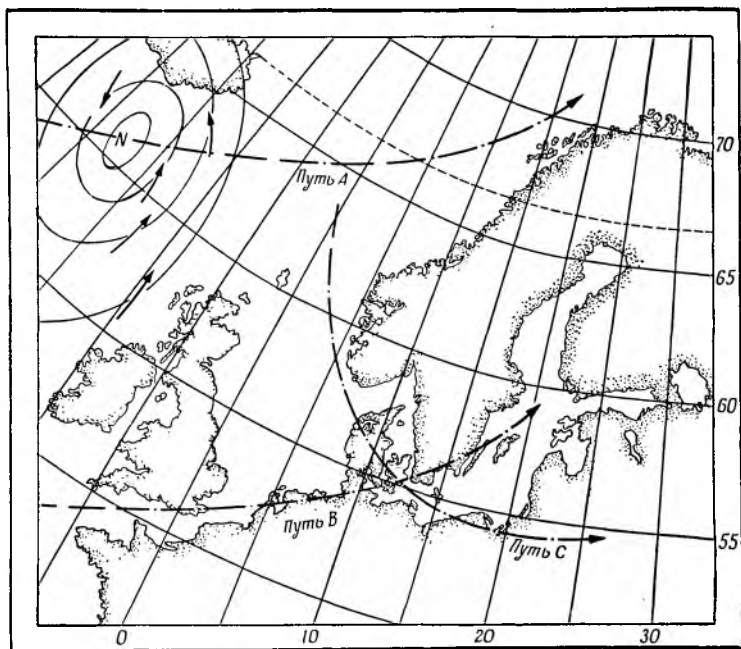


Рис. 221

ществует много остроумных, рифмованных предсказаний погоды, основанных на многолетнем опыте поколений моряков. В основном все такие предсказания касаются изменений ветра на ближайшее время, так как для моряка погода — это прежде всего ветер.

б) Структура ветра

Наземный ветер, дующий в пределах от 0 до 30 м над поверхностью земли, значительно отличается от ветра в верхних слоях атмосферы, который можно наблюдать по движению облаков.

Факторами, определяющими силу и направление наземного ветра, являются:

а) перепад атмосферного давления, б) солнечное нагревание, в) высота над уровнем моря, г) разнообразие тепловых условий прибрежных районов, д) топография прибрежных районов.

Факторы, приведенные в пунктах б — д, постоянно в той или иной степени изменяют характер барического ветра и являются причиной появления ветров чисто местного значения. Поэтому наземный барический ветер, которым больше всего интересуются яхтсмены, почти никогда не бывает постоянным как по направлению, так и по скорости.

При описании рис. 46 и 47 упоминалось, что скорость ветра в результате трения о поверхность земли меньше, чем в атмосфере. С высотой скорость ветра растет в соответствии с вертикальным градиентом в определенной степени. Это влияет на направление вымпельного ветра, а следовательно, и на работу паруса. Метеорологическими измерениями установлено, что вертикальный перепад скоростей наземного ветра зависит, помимо иных причин, от состояния неба, от исходной, основной, скорости ветра и от его турбулентности. Например, из рис. 222 видно, что при слабом ветре и спокойном море, а также при покрытом тучами небе вертикальный перепад скорости ветра сравнительно большой. В таких условиях можно вполне обоснованно допустить некоторое скручивание паруса, так как вымпельный ветер тоже будет больше отклонен. При сильных и порывистых ветрах вертикальный градиент скоростей ветра невелик, следовательно, скручивание паруса будет нежелательным. Разницу в характере кривых, помещенных на рис. 222, можно объяснить ха-

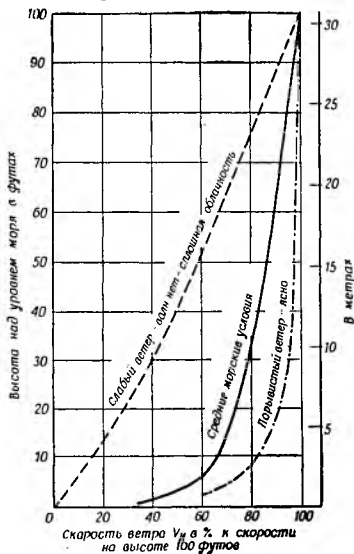


Рис. 222

рактором воздушных потоков. При легком ветре и покрытом тучами небе отсутствуют интенсивные вертикальные тепловые течения, ветер сохраняет ламинарный характер движения. При сильном и порывистом ветре

движение воздушных масс становится турбулентным, происходит обмен энергии между соседними слоями воздуха, что приводит к некоторому выравниванию энергии, которая проявляется в более пологом ходе кривой в ее начале.

Наличие между поверхностью воды и парусом корпуса яхты уменьшает перепад скоростей ветра, который указан на рис. 222.

Корпус уменьшает свободное сечение для прохода ветра, скорость ветра увеличивается непосредственно над палубой, а следовательно, вертикальный перепад уменьшается. Вследствие этого несколько выравнивается скорость вымпельного ветра по всей высоте паруса.

Изменения в топографии местности, над которой дует

ветер, может быть причиной поворота ветра в горизонтальной плоскости. Хорошо видно, как меняется направление ветра вблизи береговой линии. Независимо от того, с моря дует ветер или с берега, его направление меняется перпендикулярно к береговой линии (рис. 223, а). Это свойство ветра менять направление около берега следует использовать, если дистанция гонки проходит вблизи берегов. На рис. 223, б показано, как можно выгодно использовать в гонках прибрежный ветер. Допустим, что яхты *A* и *B* стартовали одновременно, но рулевой яхты *A*, выбрав наиболее выгодный относительно берегового ветра путь, придет к знаку *I* раньше, чем рулевой яхты *B*, и, очевидно, будет впереди при огибании буя *II*.

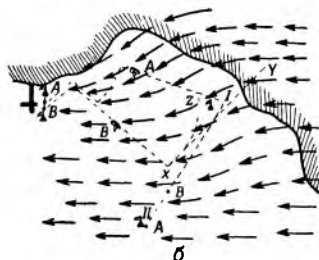
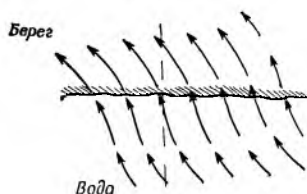
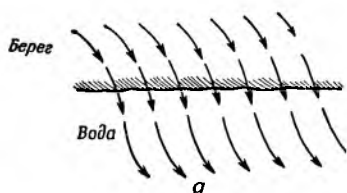


Рис. 223

Влияние берега на направление ветра особенно ярко проявляется, когда яхта приближается к берегу курсом бейдевинд.

Допустим, что, находясь в точке X , мы делаем поворот, чтобы подойти к бую I правым галсом. Судя по направлению ветра в точке $X—Y$, мы подойдем к бую I левым бортом. Однако по мере приближения к берегу мы убеждаемся, что курс становится все острее, вследствие чего приходится уваливать до курса $X—Z$ во избежание полоскания парусов. Вот типичный пример значительных потерь, которые возможны, когда не учитывается изменение ветра вблизи берегов.

Другим проявлением влияния поверхности земли на характер движения воздушных масс будет изменение порывистости ветра. Подобно потоку воды, воздушный поток сохраняет спокойное, ламинарное, течение только при небольших скоростях и спокойной, ровной поверхности воды или земли. Наоборот, всякие неровности земной поверхности, а также вертикальные перемещения воздушных масс, возникающие вследствие нагрева земли, вызывают постоянные изменения скорости и направления ветра.

Любопытные выводы о колебании скорости ветра можно сделать, познакомясь с результатами измерений, сделанных Шерлоком и Строутом (рис. 224). Измерения велись с помощью анемометров, регистрирующих скорость. Анемометры были расположены на линии, перпендикулярной к направлению ветра на высоте 15 м над уровнем земли, а затем через каждые 15 м — до высоты 75 м. На графиках показаны кривые, соединяющие точки равных скоростей; верхний график в горизонтальной, а нижний в вертикальной плоскостях. Цифры около линий указывают среднюю скорость ветра в узлах. Преобладающим был ветер западного направления. Наблюдалось внезапное резкое увеличение скорости с постепенным падением. Найти объяснение этому явлению не удалось.

Большое влияние на порывистость ветра оказывает температура земной поверхности. Когда поверхность земли холоднее воздушных масс, направление ветра стабилизируется, а скорость снижается. Если же земля нагрета сильнее воздуха, — это приведет к усилению скорости и порывистости ветра. Охлаждение земли в вечерние часы является основной причиной ослабления ветра вече-

Время в секундах

340 секунд после старта

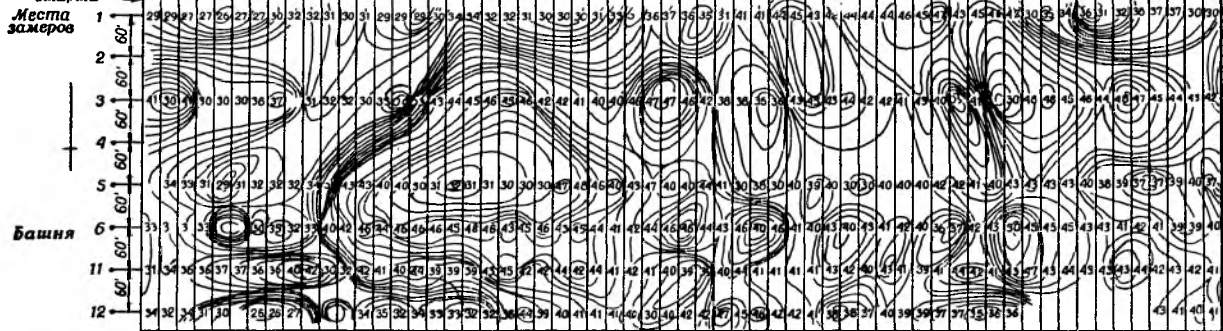


Рис. 224

ром. Яхтсменам хорошо известно, что весной, когда температура воды низкая, ветер на море обычно спокойный и мало порывистый. В это время года вопреки сильному ветру волнение остается очень незначительным, так как образование волн зависит не только от силы, но и от характера ветра.

Порывистый, непостоянный ветер вызывает значительно более сильное волнение, чем спокойный, ровный, хотя и сильный, ветер. Именно этой особенностью объясняется то обстоятельство, что в океанах в районе пассатов, отличающихся своей стабильностью, при силе ветра примерно 6 баллов, по шкале Бофорта, волнение не сильнее, чем на закрытых морях при ветре 4 балла. Чем дальше от берегов, тем стабильнее ветер в море.

Периодические изменения скорости истинного ветра вызывают изменения скорости и, что еще важнее, направления вымпельного ветра. Остановимся на том, как может быть использован порыв ветра во время соревнований. Допустим, что мы плывем курсом бейдевинд (рис. 225). В положении *I* парус яхты по отношению к вымпельному ветру OB установлен под углом α . Отрезок AB обозначает скорость яхты, а отрезок OA — скорость истинного ветра. Если скорость истинного ветра возрастет до величины O_1A (положение *II*), то в первые мгновения яхта вследствие инерции не изменит своей скорости. Однако направление вымпельного ветра изменится с OB на O_1B , что вызовет увеличение угла установки паруса α на величину $\Delta\alpha$ (это показано в увеличенном масштабе на рис. 225, *a*).

Если прежде парус стоял под оптимальным углом α , при котором достигалась наивысшая аэродинамическая сила, то теперь, желая сохранить высокий аэродинамический коэффициент полезного действия паруса, надо или

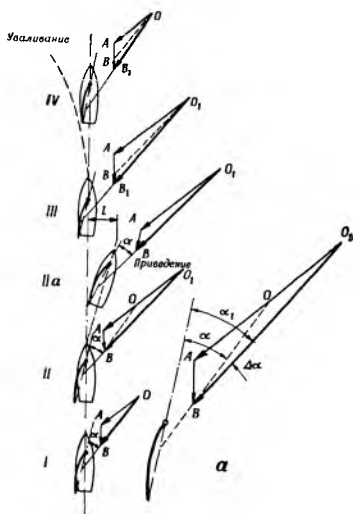


Рис. 225

оставить таким же прежний угол, или даже уменьшить его, сообразно усилившемуся ветру. Сделать это можно двумя способами: потравив шкоты, стараться сохранить прежний курс (положение *II*) или привести на более острый курс, не меняя положения парусов (положение *II, а*).

В период действия порыва ветра скорость яхты увеличится (положение *III*), что вызовет изменение направления вымпельного ветра от O_1B на O_1B_1 , т. е. вымпельный ветер станет острее. Теперь, чтобы парус не заполаскивал, придется выбирать шкоты до того момента, пока опять не будет получен желаемый угол атаки α . Для яхты, находящейся в положении *II, а*, такой маневр с парусами (выбирание шкотов) был бы невыгодным.

Следовательно, надо вернуться на прежний курс, а приобретенная выгода будет состоять в набранной высоте l . Наконец, порыв ветра прекратился. Яхта, набрав скорость по инерции, пойдет хорошим ходом. Направление вымпельного ветра стало OB_1 , т. е. еще острее по сравнению с прежними направлениями OB и O_1B_1 .

Теперь, если рулевой уже не сможет больше выбирать шкоты (это не позволит ему сделать оптимальное положение гика относительно диаметральной плоскости яхты), он должен будет несколько увалиться от прежнего курса. Когда вновь восстановятся условия плавания, которые были в положении *I*, яхта сможет вернуться на прежний курс. Следовательно, порывы ветра можно использовать двояко: 1 — сохранив неизменным курс яхты, увеличить скорость хода, или 2 — приводясь к ветру, выиграть в высоте положения. Что выгоднее, надо решать в конкретной обстановке каждой гонки. Выбор того или иного решения зависит также от силы ветра и типа яхты. При сильных порывах, пожалуй, выгоднее привести на более острый курс.

Одновременно с колебаниями скорости обычно несколько меняется и направление истинного ветра. В общем, можно сказать, что тенденция в изменении направления ветра на данный день более или менее сохраняется постоянной. Например, если ветер усиливается, он, как правило, поворачивает вправо.

Умелое использование заходов ветра в гонках исключительно важно и дает немедленно видимый эффект на лавировке.

использовать заходы ветра в пределах 5° , проведет свою яхту от буя к бую по пути, длина которого равна только 130% расстояния между ними по прямой. Если бы удалось использовать заходы ветра до 15° , путь яхты сократился бы на 26% по сравнению с яхтой, ведомой без учета заходов ветра.

Если расстояние между буями 2 мили, плохой рулевой может проиграть хорошему на этом участке несколько сот метров. Однако своевременная и правильная реакция на заходы ветра — задача трудная. Рулевой во время гонки должен держать под неослабным наблюдением кроме ветра еще много других важных факторов. Большое облегчение в «поимке» заходов ветра и их выгодном использовании может дать постоянное наблюдение за предметами, удаленными на значительные расстояния, например далекими буями, береговыми предметами, другими яхтами и т. п.

Добавим, когда скорость ветра увеличится, на яхте кажется, что несколько изменилось и направление ветра. Вымпельный ветер становится полнее. Но, очевидно, при этом не может быть и речи о перемене галса, что было бы ошибкой.

Отсюда следует важный вывод: надо всегда отчетливо различать, что же изменилось — сила или направление ветра.

Надо помнить, что каждый ненужный поворот — это большая или меньшая потеря. Современные швертботы поворачиваются в течение нескольких секунд, а потери на поворотах настолько малы, что покрываются выгодами, получаемыми в результате использования каждого захода ветра. Тяжелые килевые яхты с большой инерцией заметно теряют в скорости на поворотах и при наборе скорости на новом галсе. Поэтому только более или менее значительное изменение направления ветра будет выгодно использовать на килевых яхтах, но при этом выгоды столь значительны, что ими не стоит пренебрегать.

В ночных гонках особое значение приобретает наблюдение за правильной постановкой парусов относительно ветра непостоянного направления. В некоторых странах стали применять специальные электрические указатели направления ветра, показания которых передаются в кокпит и очень облегчают задачу рулевого.

в) Местные ветры. Бризы

Разница в нагреве различных частей земной поверхности является основной причиной возникновения циркуляционных течений в атмосфере, в том числе и ветра, т. е. горизонтального перемещения воздушных масс. Примером легко наблюдаемого явления циркуляции воздушных масс может быть ночной и дневной бризы.

Для поддержания циркуляционного движения необходимо затратить некоторое количество тепловой энергии. Поскольку наибольшее количество тепловой энергии земля получает в полуденные часы, в это время увеличивается интенсивность циркуляции, а следовательно, и скорость ветра.

Многочисленные измерения показали, что скорость ветра теплового происхождения, например бриза, тем больше, чем выше перепад температур на поверхности, где данный бриз возникает. Следовательно, наибольшей скоростью будут обладать бризы вблизи береговой линии, поскольку именно там разница температур соседних воздушных масс над землей и над водой будет наибольшей.

Подобно скорости, и радиус действия бриза будет тем больше, чем больше разница в нагреве поверхности земли и воды. Например, обширный песчаный берег, сильно нагревающийся на солнце, в соседстве с холодной поверхностью воды будет способствовать возникновению сильного бриза. Наоборот, заболоченный, покрытый лесом берег будет препятствовать образованию заметных бризов.

Дневной морской бриз начинается примерно в 9—10 часов и заканчивается с заходом солнца. Скорость ветра постепенно возрастает и доходит до 4—7 м/сек, или составляет около 4 баллов, по Бофорту, в полуденные часы.

Бризы не вызывают заметного волнения на море, так как имеют довольно ограниченный радиус действия. Они редко заходят в море далее нескольких миль. При некоторых обстоятельствах, принимая во внимание, что море почти спокойное, на сильном бризе яхта может развить максимальную скорость.

Признаком существования в атмосфере вертикальных циркуляционных течений являются кучевые облака, которые можно наблюдать в солнечные дни над острова-

ми и полуостровами, несмотря на то, что над морем небо может быть безоблачным. Они являются наглядным свидетельством существования развивающегося морского бриза.

Полнее всего действие бриза может проявляться, когда нет сильного барического ветра. Барический ветер, в свою очередь, может усилить или ослабить действие бриза в зависимости от того, совпадают их направления или нет.

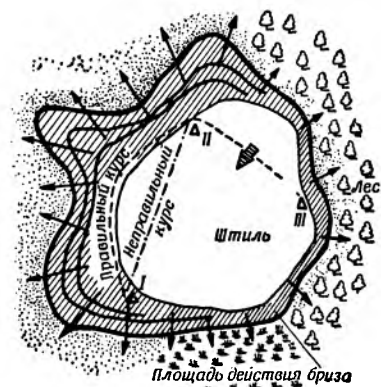


Рис. 228

В определенных географических широтах, куда не заходят циклоны и преобладает погода, свойственная областям высокого давления, например в Италии, бризовые ветры довольно сильные и дуют с регулярностью часового механизма.

Местные бризы с суточным ритмом, так называемые озерные бризы, возникают также на больших озерах.

Они значительно слабее морских, но в штилевую погоду или в период слабых барических ветров могут иметь большое значение для соревнующихся яхт. Подобно морскому, озерный бриз дует перпендикулярно берегу, а сила и радиус его действия зависят от характера и степени нагревания поверхности земли данного района.

На рис. 228 показана картина действующих на озере бризовых ветров. В солнечный безветренный день радиус действия бриза можно определить по мельчайшей ряби, поднимаемой им на поверхности воды. Поверхность остальной части озера в это время остается зеркально гладкой. Необходимо использовать такие местные, хотя и не сильные, бризы. В этом случае выгоднее несколько удлинить путь и идти от буя I до буя II вдоль берега, а не прямым курсом. Находясь в радиусе действия бриза, можно без единого поворота, не трогая шкотов, обойти вокруг все озеро, при мертвом штиле на его середине. Отсюда можно сделать вывод, что боязнь некоторых руле-

вых отклониться от прямого пути, самого короткого, для поисков более выгодных ветровых условий не может быть оправдана. Некоторое отклонение от прямого пути не всегда связано с риском, из-за которого надо было бы отказываться от поисков самостоятельных путей.

На больших реках, так же как и на озерах, в жаркие дни ветер дует в районе берегов. Вечерами, после захода солнца, скорее всего ветер будет вблизи сухих, лесных берегов.

Местные ветры, возникающие в результате неодинакового нагревания земной поверхности, наибольшей силы достигают в летнее время. Весной и осенью, когда разница температур поверхностей земли и воды уменьшается, интенсивность местных ветров ослабевает.

Одной из наиболее важных причин, вызывающих порывистость ветра, является образование восходящих и нисходящих тепловых течений в атмосфере. Рассмотрим один из видов тепловой циркуляции воздуха, имеющий большое значение для техники спортивного плавания. В отличие от круговорота воздушных масс при бризе этот вид циркуляции воздуха назовем подоблачным. Кучевые облака, служащие признаком определенной пого-

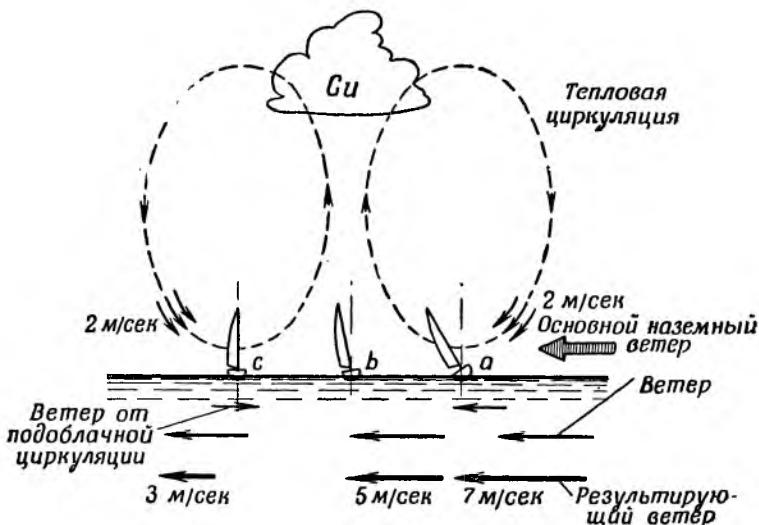


Рис. 229

ды, одновременно являются показателем существования вертикальной циркуляции воздушных масс, благодаря которой они и возникают. Как влияет вертикальная циркуляция на скорость барического наземного ветра, наглядно показано на рис. 229.

На рисунке видно, что горизонтальная составляющая циркуляционного течения меняет свое направление на

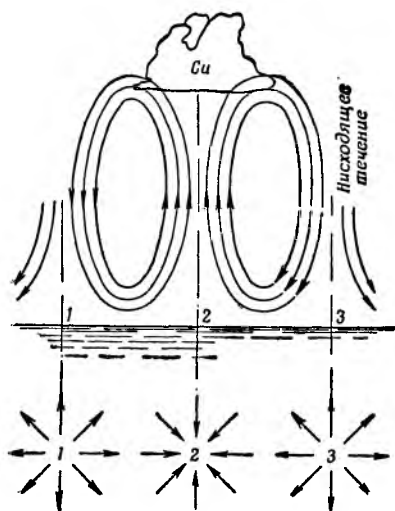


Рис. 230

Действие порывов ветра на группу яхт, находящихся совсем недалеко друг от друга, может быть совершенно разное. На рис. 229 видно, что яхта *a*, получившая ветер, равный 7 м/сек, может сильно улучшить свое гоночное положение по сравнению с яхтой *c*, находящейся в полосе ветра, дующего со скоростью только 3 м/сек.

Обратимся к рис. 230, на котором показано действие поднимающихся и опускающихся потоков воздуха непосредственно у поверхности воды. При косом ударе опускающихся воздушных масс о поверхность воды новый ветер, образующийся в результате воздействия удара на наземный ветер, будет иметь склонность распространяться во все стороны, причем его скорость и направление будут самыми различными.

180° в зависимости от того, в какой ветви этого потока мы ее наблюдаем. Принимая скорость циркуляционного движения равной 2 м/сек, а скорость основного ветра—5 м/сек, нетрудно установить, что в районе действия циркуляционного течения скорость ветра может изменяться от 3 до 7 м/сек.

Особенно резко влияние циркуляции воздушных масс проявляется при слабых ветрах. Эти ветры могут возникать неожиданно в разных местах акватории, путать все расчеты яхтсменов и полностью изменять шансы участвующих в гонках яхт.

На рис. 231, *а* можно видеть, как в результате действия ветра, образовавшегося от сложения ниспадающего воздушного потока и слабого наземного ветра, две яхты могут плыть в противоположных направлениях одним и тем же курсом — фордевинд. Порывы ветра такого характера, как правило, встречаются в районах, объятых антициклоном, где состояние атмосферы благоприятствует образованию вертикальных течений, о которых сигнализирует появление кучевых облаков.

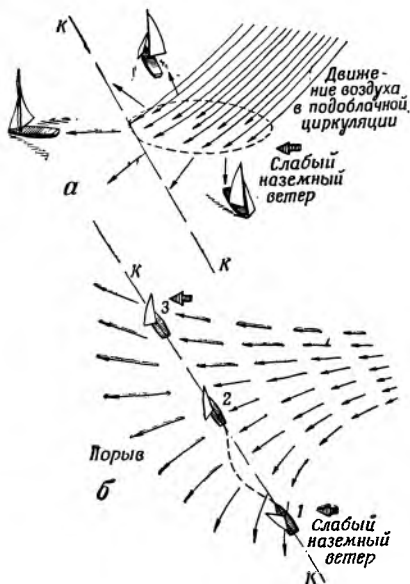


Рис. 231

На поверхности воды порывы ветра оставляют полосы ряби, движущейся вместе с порывом. Они появляются неожиданно, подхватывают одну или несколько яхт, которым повезло, и несут их вперед на зависть неудачникам, оставшимся в полосе безветрия в беспомощном состоянии.

Когда яхта приближается к видимому на воде порыву ветра под углом, близким к прямому (см. рис. 231), то, как правило, надо ожидать следующих изменений ветра: в первое время в положении 1 ветер усиливается и заходит, курс яхты становится острее. Паруса, стоявшие перед тем хорошо, начинают заполаскивать. Нужно энергично выбирать шкоты, а если этого недостаточно, то несколько увалиться от курса К—К. Продолжая плавание курсом К—К, мы убедимся, что в положении 2 ветер отойдет и курс станет более полным. Можно потравить шкоты и пойти с большей скоростью. Чем ближе яхта находится к точке 3, тем полнее ветер. После выхода из района, захваченного действием порыва, яхта снова попадает в область действия слабого наземного ветра. Его

направление будет более острым, и рулевому вновь придется подбирать шкоты.

Плавание при слабых ветрах с периодическими местными порывами требует от рулевого применения специфической тактики, которую можно назвать «погоней за ветром». В такую погоду нельзя держаться только кратчайших путей, т. е. от буя к бую. Как только появится возможность, надо стараться ловить порывы ветра. Подхватив порыв ветра, необходимо стремиться удержаться как можно дольше, двигаясь в направлении следующего знака.

Правильное и неправильное поведение яхт, находящихся в таких условиях, показано на рис. 232.



Рис. 232

Заканчивая вопрос о влиянии тепла на природу и характер наземного ветра, вспомним хорошо известную склонность ветра усиливаться в полуденные часы. Мы уже выяснили, что основной причиной возникновения ветров является солнечная радиация. Отсюда напрашивается вывод, что чем сильнее греет солнце, например, в ясный день, тем сильнее должен быть ветер к полудню. Однако с помощью метеорологических наблюдений установлено, что увеличение скорости ветра в течение дня зависит от распределения температур на различных уровнях атмосферы по высоте, т. е. от вертикального градиента температур. Прирост скорости ветра пропорционален вертикальному градиенту температур. Эта зависимость скорости ветра от температурного градиента приведена на рис. 233. Числа на кривых показывают величину вертикального градиента температур, который, как

известно, означает изменение температуры (в данном случае уменьшение) на каждые 100 м высоты над каким-то определенным исходным уровнем.

Кривая градиента $0,7-1,0^\circ$ на 100 м характеризует массы холодного воздуха, наплывающего на более теплый район. Крайняя, самая низкая кривая с градиентом менее $0,2$ характерна для сухих, теплых масс устойчивого антициклона.

Этот вопрос имеет практическое значение в гонках, когда старт дается утром, а гонка будет продолжаться несколько часов. Тогда рулевому надо угадать, какой поставить парус — плоский или пузатый, а для этого надо знать, усилится ли ветер и насколько.

Наверняка можно рассчитывать на усиление ветра к полудню, если находишься в районе, на который надвигаются новые холодные массы воздуха. И, наоборот, даже при ясной солнечной погоде в районе установившегося высокого барометрического давления усиление ветра в полдень маловероятно.

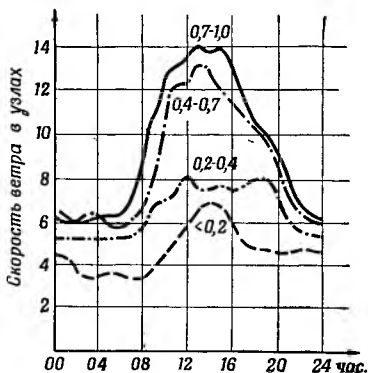


Рис. 233

Из рис. 233 видно, что с наибольшей силой ветер дует в период между 10 и 16 часами. Следовательно, если стартовать приходится утром, надо считаться с возможностью усиления ветра. Стартуя после полудня, можно, наоборот, ожидать ослабления ветра: следовательно, здесь больше подойдет пузатый парус. Эти рассуждения правильны для установившейся погоды, а не при прохождении, например, холодного фронта, когда приходится считаться с иными причинами изменения ветра и по направлению, и по силе.

Одновременно с усилением ветра в полуденные часы меняется и его направление.

Ветер поворачивает вправо (по солнцу) иногда до 60° . После полудня затихающий ветер повернет влево, т. е. в противоположном предыдущему случаю направлении.

г) Ветер в районе дистанции

Ветер, дующий в районе дистанции, может быть искажен двумя причинами:

- 1) местные береговые помехи и препятствия (обрывы, холмы, лес, высокие строения и т. д.);
- 2) присутствие и близость других соревнующихся яхт.

Влияние температурных факторов на ветер меняется в течение суток и почти не поддается предварительному учету; береговые же препятствия, действующие на ветер определенной направления, одинаковы и постоянны, и поэтому можно их предусмотреть.

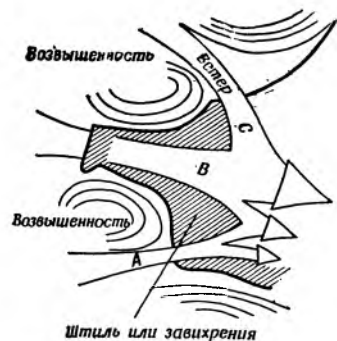


Рис. 234

Возьмем для примера влияние гор на ветры, дующие над горным озером. На рис. 234 приводятся типичные, вынужденные, ветровые трассы, несмотря на то что направление основного ветра западное. Мы видим, что трасса ветра А направлена почти под прямым углом к трассе ветра С. Кроме того, рядом с местами, в которых держится постоянный, устойчивый ветер, есть места со слабым, неустойчивым ветром, а также места вовсе без ветра или где ветер образует сильные завихрения. В приведенном примере воздушные массы перемещаются в основном между горами, играющими в данном случае роль ограничивающего сопла.

Яхтсмены, изучившие свою акваторию, хорошо знают, какое многообразие ветровых комбинаций возникает на ней в зависимости от направления основного ветра. Обычно знание местных ветров дает заметное преимущество хозяевам гонки над участниками, прибывшими из других мест.

Последним полезно понаблюдать за водой с какого-нибудь пригорка, откуда открывается широкий вид на акваторию. Волнение, рябь на поверхности воды и т. п. могут дать некоторое представление о местных ветрах. Свои наблюдения затем следует проверить во время тре-

нировки. Во всяком случае в первой пробной гонке нужно присматриваться и держаться ближе к местным рулевым, знающим свою воду, а не рисковать в поисках лучших путей.

Сильно изрезанные берега влияют на ветер, так же как перевалы. Несмотря на то что береговые препятствия оказывают серьезное и довольно сложное действие на ветер, они могут быть сведены к двум сравнительно простым типам:

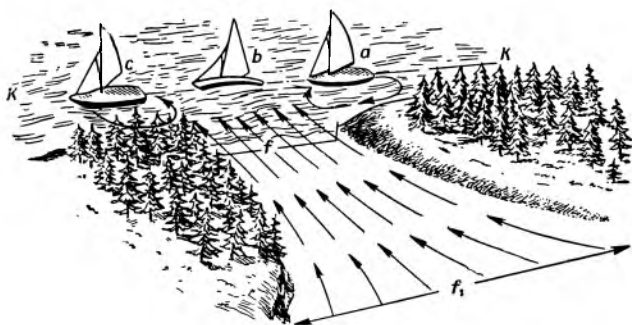


Рис. 235

1) препятствия, вызывающие сужение ветрового потока, отчего может значительно увеличиться скорость ветра, а направление его не изменится или изменится незначительно;

2) препятствия, вызывающие завихрения воздушного потока, отчего сильно меняется направление ветра и одновременно снижается скорость.

Первый случай схематически показан на рис. 235. Плывущая в тени высокого берега яхта (положение *a*) испытывает слабый ветер, используемый главным образом верхней частью паруса. Как только яхта выйдет на траверз низины (положение *b*), на нее обрушится сильный, внезапный порыв ветра. Ветровой удар будет тем сильнее, чем больше сужение потока между сечениями f и f_1 . Подобная топография берегов встречается довольно часто. В таких естественных соплах скорость ветра увеличивается в два раза по сравнению с его скоростью перед соплом. Вспомним, что, когда скорость ветра увели-

чивается в два раза, эффективность его действия на парус повышается в четыре раза. Если учесть, что внезапное, динамическое действие ветра гораздо опаснее постепенного нарастания его силы, не приходится удивляться, когда яхта, если рулевой не успел быстро потравить шкоты, опрокинется под действием такого удара. На рис. 236 показан иной случай изменений движения

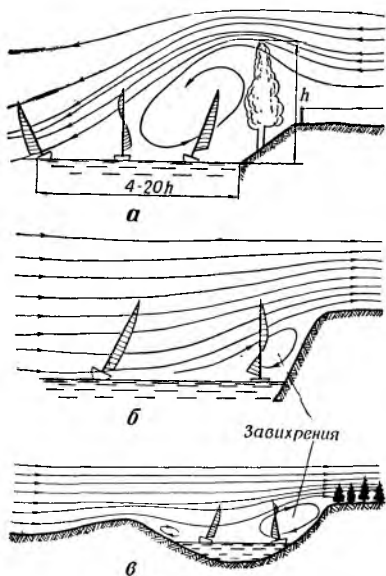


Рис. 236

воздушных масс, вызванных влиянием наземных препятствий. На рис. 236, а видны завихрения, возникающие из-за растущих на берегу высоких деревьев. Влияние подобного препятствия распространяется на подветренную сторону от 4 до 20 высот h самого препятствия и зависит от густоты посадки деревьев. Редко растущие деревья вызовут меньшие завихрения. В зависимости от расстояния, на котором яхта находится от препятствия, действие ветра может быть различным, вызывая, как иногда кажется со стороны, совершенно неожиданное поведение парусов.

С завихрением ветра приходится считаться не только во время нахождения на подветренной стороне препятствия, но и когда приходится проходить на небольшом расстоянии от препятствия с его наветренной стороны, например перед высоким обрывистым берегом, как показано на рис. 236, б и в.

В расчетах надо учитывать еще одно обстоятельство, вызывающее изменение скорости и направления ветра: это взаимодействие парусов яхт, находящихся на недалеком расстоянии друг от друга. Из практики и аэродинамических замеров известно, что, в силу взаимодействия паруса, находящиеся поблизости яхты, идущие одним галсом, работают в несколько различных ветровых усло-

виях (рис. 237). Парус яхты N на некотором расстоянии перед собой вызовет поворот ветра влево (если смотреть по ходу яхты). Если измерить скорость ветра перед парусами в точках 1 и 2, можно убедиться, что скорость ветра, действующего на парус подветренной яхты Z , несколько больше скорости ветра V_T , действующего на парус яхты N на величину ΔV . Кроме того, ветер, действующий на яхту Z , отклонен на дополнительный угол $\Delta\alpha$, что выгодно для яхты Z .

Таким образом, у подветренной яхты ветер будет полнее и сильнее, а следовательно, она будет идти быстрее. Можно сказать, что яхта N помогает своему сопернику плыть быстрее. Объяснение этого довольно известного гонщикам явления не представляет труда для тех, кто хорошо разбирается в основах аэродинамики парусов. Здесь следует только отметить широко распространенный, но все же ошибочный взгляд, что между парусами яхт N и Z образуется подобие сопла, действием которого и объясняются преимущества подветренной яхты. На самом деле никакого сопла не образуется, так как паруса обеих яхт параллельны и расстояние между ними сохраняется одинаковое. Существо явления объясняется увеличением скорости ветра на подветренной стороне паруса яхты N .

Положение яхты Z называется «безопасной подветренной позицией». Яхта Z может выгодно ею воспользоваться, выйдя вперед яхты N , а затем, будучи свободной, пойти более острым курсом. Этот маневр относится к классическим средствам гоночной тактики.

«Безопасная подветренная позиция», в принципе выгодная всегда, может дать наибольшие преимущества в гонках в умеренный ветер, когда команда без труда откренивает яхту. Если ветер настолько сильный, что команда с трудом борется с креном, то в «безопасной

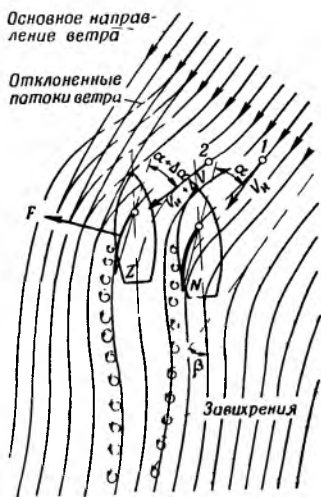


Рис. 237

подветренной позиции» эти трудности станут еще большими. Крен яхты увеличится. Рулевому придется скорее всего потравить шкоты и поставить парус в менее выгодное положение, или плыть с большим креном. И то и другое ухудшает аэро- и гидродинамические показатели

яхты, отчего все преимущества «безопасной подветренной позиции» могут быть утрачены.

Предположим, что рулевой яхты *Z* не сделает никакой ошибки, обе яхты моноטיפы одного и того же класса, тогда яхта *Z* выйдет вперед яхты *N*. Последняя окажется в положении, которое М. Курри назвал «безнадежной позицией». Разберем почему такое положение заслуживает названия «безнадежного» (рис. 238). С точки зрения аэродинамики, с некоторым приближением можно принять, что аэродинамический эффект (сила *F*), воз-

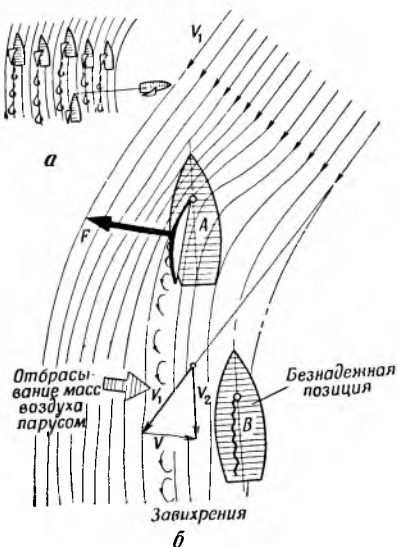


Рис. 238

никающий на парусе в единицу времени *t*, или аэродинамический импульс, равен скорости масс воздуха, отбрасываемых парусом в направлении, противоположном *F*. Обозначая массу воздуха, отбрасываемую парусом, буквой *m*, скорость, с которой она отбрасывается, буквой *V*, составим следующее уравнение:

$$F \cdot t = mV.$$

Из этого уравнения следует, что ветер будет отклоняться в сторону тем сильнее, чем больше сила *F*. Складывая скорость *V* со скоростью ветра перед парусом *V*₁, можно убедиться, что, пройдя парус, ветер будет отклонен настолько, что идущая сзади яхта попадет в полосу очень острого ветра *V*₂. Попавшая в такое положение яхта должна или увалиться, или сменить галс, так как идти

тем же курсом, как и передняя яхта, она не в состоянии. Уваливаясь, она попадет в область завихренного ветра, оставшегося после прохода передней яхты, и на этом потеряет еще больше.

Направление области завихрений, тянущейся за парусом, на острых курсах отклоняется несколько на ветер от направления вымпельного ветра. Протяженность завихренной полосы зависит от угла установки паруса относительно ветра. Она невелика на курсах от бейдевинда до острого бакштага, но по мере приближения к фордевинду — увеличивается. Протяженность и направление так называемого «конуса закрытия» показаны на рис. 239.

Влияние отклонений ветра, а также завихрений проявляется за яхтой на расстоянии от 2 до 20 и более длин ее корпуса. Это зависит от скорости ветра, курса и количества яхт, вызывающих изменение ветра. В особо невыгодном положении будет находиться яхта, идущая сзади нескольких яхт на лавировке (см. рис. 238, а). Единственный в этом случае совет — как можно скорее сменить галс, чтобы вырваться на чистый ветер даже за счет некоторого удлинения пути.

Интересные сведения о том, как велико взаимное влияние двух однотипных яхт на лавировке, может дать анализ рис. 240. На нем показаны результаты модельных испытаний, проведенных *M. S. Hoopera*. Моделировалось движение яхт, идущих бейдевиндом на курсе 40° с креном 15° . Кривые построены на сетке, основанной на длине корпуса L . Они показывают силу тяги на парусе одной яхты, находящейся в соседстве с другой, силуэт которой нанесен на рисунок. Вокруг показанного сплошной линией корпуса яхты нанесена пунктирная, очерчивающая ее корпус. У этой линии прерываются все кривые сил тяги.

Пунктирная линия обозначает границу, ближе которой не могут сблизиться яхты, принимая во внимание

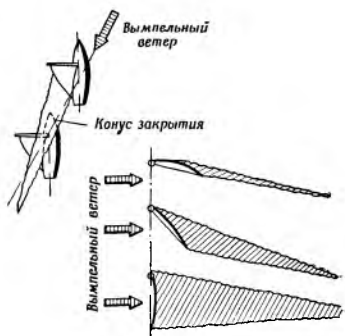


Рис. 239

размеры их корпусов. Числа, поставленные на кривых, показывают, насколько улучшается или ухудшается с точки зрения аэродинамики работа паруса в данном месте. Кривые получены в условиях, когда яхта находилась под действием ветра, неиспорченного присутствием дру-

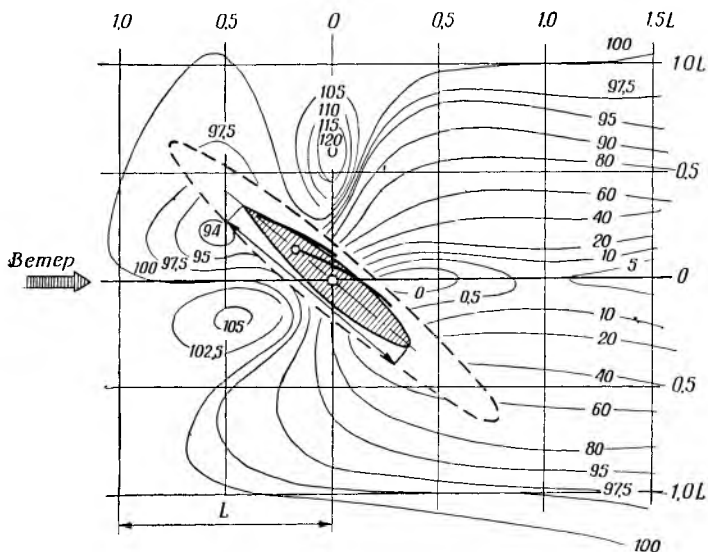


Рис. 240.

гой яхты. Обратим внимание, что самое выгодное положение оказалось на подветренной стороне именно в положении «безопасной подветренной позиции». Выгоды этого положения могут достигать 20% силы тяги по сравнению с плаванием в одиночку.

Заметим также, что существует обширное пространство под ветром, примерно на траверсе кормы лидирующей яхты, в котором потери в крайних случаях могут дойти до 95%.

«Безнадежная позиция», как и «безопасная подветренная позиция», относится к известным средствам тактической борьбы в гонках во время лавировки. На других курсах средством тактической борьбы является покрытие парусов противника аэродинамической тенью

своих парусов. Не будем останавливаться на отдельных случаях применения указанных средств тактической борьбы, поскольку об этом подробно сказано в руководстве по тактике соревнований.

Обратим внимание на взаимное влияние покрывающих парусов на курсе фордевинд. Интересные опыты в этой области были проведены Эйфелем. Он исследовал аэродинамические силы, возникающие на одинаковых по размерам пластинках, поставленных по одной оси друг за другом на разных расстояниях.

Результаты исследований показаны на рис. 241. На вертикальной оси отложены значения сил в кг, а на горизонтальной дано расстояние между пластинками, выраженное через ширину пластинок. Эти результаты можно отнести к случаям, встречающимся в практике.

Величину силы одиночного паруса, на который не влияют никакие другие паруса, примем равной F (см. рис. 241, а). В измерениях Эйфеля эта сила равнялась 6,8 кг. Если парус 1 находится на расстоянии 1,5 ширины паруса 2 (см. рис. 241, в), то на нем возникает сила, противодействующая движению вперед, равная примерно 30% величины силы F . В этом положении оказывается самое сильное влияние на работу парусов противника. По мере увеличения расстояния между яхтами на парусе 2 появляются аэродинамические силы, действующие в направлении движения яхты, которые все же по своим размерам меньше сил, образующихся на покрывающем парусе. Когда расстояние между яхтами достигнет примерно семикратной ширины паруса, практический эффект покрытия станет ничтожным. Передняя яхта вырвется из ветровой тени покрывающей яхты.

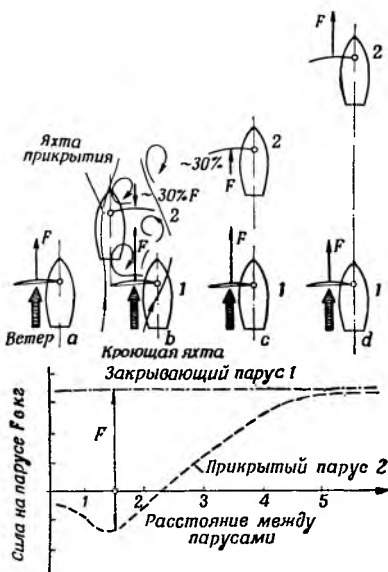


Рис. 241

2. Вода

Подвижность и изменчивость водной стихии имеют для парусного спорта такое же значение, как и непрерывные изменения, происходящие в атмосфере. Умение разобраться в течениях и правильно их учесть при выборе курса может быть очень полезным в соревнованиях. В океанах, морях и даже в заливах действуют течения, иногда едва заметные, иногда, наоборот, очень сильные. Рулевому необходимо их знать и учитывать, так же как он учитывает течения во время плавания по реке.

Волны, вызывающие ряд неприятных и опасных явлений, как, например, качку, удары, снос с курса и т. п., не всегда бывают врагами яхтсменов. Многие зависят от умения рулевого выбрать наиболее выгодный путь среди волн и бесчисленных изменений состояния моря. Энергия движения волн может быть использована для увеличения собственной скорости, особенно для легких яхт.

Чтобы понять природу волн, с которыми встречается моряк на практике, познакомимся с графическим методом изображения волны, называемой физиками гравитационной или трохoidalной, достаточно точно отображающим естественные волны.

а) Образование и поведение волн

Механика зарождения и перемещения волн еще полностью не установлена, однако несомненно, что основной причиной волнения является ветер, или, точнее, давление ветра на воду. Ветер смещает частицы воды из положения, которое они занимали в спокойном состоянии, находясь под действием гравитационных сил. Действие ветра на водной поверхности аналогично его действию в поле, на котором растет пшеница. От ветра колосья сгибаются и снова выпрямляются, и зрительно создается впечатление бегущей волны. Подобное явление происходит и на воде. Частицы воды не перемещаются вместе с волной, а только поднимаются и опускаются, двигаясь не просто по вертикали вверх и вниз, а по некоторым замкнутым орбитам, близким к окружности.

Принцип движения волны показан на рис. 242. Пунктирной линией обозначен профиль волны, а соответствующие точки на окружностях показывают положение час-

тиц воды в определенный момент. Если спустя некоторое время частицы воды, движущиеся по своим орбитам, взаимно изменят свое положение (в нашем случае они переместились на $1/12$ окружности), то гребень волны передвинется вместе с ветром на эквивалентное расстояние. Новое положение волны на рисунке показано сплошной линией. Необходимо подчеркнуть, что движение вол-

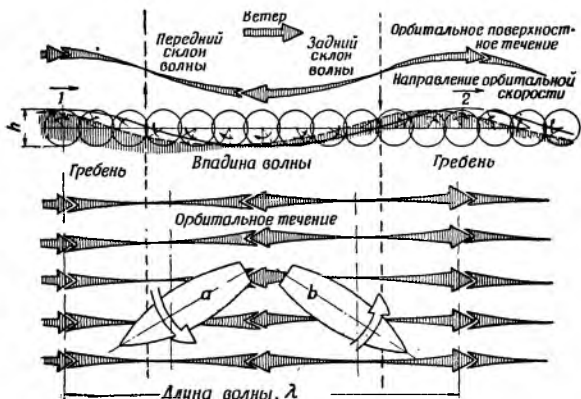


Рис. 242

ны в данном случае является следствием формы перемещения частиц воды, а не поступательного движения масс воды.

Фактическое перемещение масс воды при волнении совсем не велико. Когда частицы воды сделают полный оборот вокруг своего положения равновесия, гребень волны передвинется из положения 1 в положение 2, т. е. на целую длину волны λ . Время, за которое волна проходит путь, равный своей длине, иначе говоря, время между прохождением двух очередных гребней через одну и ту же точку, называется периодом волны τ .

Зная высоту волны h , равную диаметру орбиты крайних частиц, а также период волны τ , можно определить скорость движения частиц по орбите. Она вычисляется по формуле:

$$U_{\text{орб}} = \frac{\pi h}{\tau} \cdot$$

Следовательно, чем выше волна, тем больше орбитальная скорость частиц воды. Это имеет существенное значение для плавания, так как на поверхности волны возникают течения, скорость и направление которых неодинаковы на разных участках волны. На гребне течение совпадает с движением волны на впадине, оно направлено назад против движения волн. Интенсивность этого поверхностного течения показана в верхней части рис. 242 стрелкой переменной толщины. Толщина стрелки пропорциональна скорости поверхностного (орбитального) течения.

При рассмотрении рисунка не трудно убедиться, что действие поверхностного течения на яхту будет различным в зависимости от курса, отношения длины волны к длине корпуса и положения корпуса на волне. Например, яхту *a*, пересекающую волну курсом бейдевинд наискось, поверхностное течение будет разворачивать на более полный курс. Яхту *b*, плывущую курсом бакштаг, поверхностное течение будет разворачивать на курс фордевинд.

На других участках волны и при ином отношении $\frac{\lambda}{L_{KWL}}$ влияние поверхностного течения будет проявляться иначе — оно будет сбивать с курса яхту, вынуждая рулевого постоянно работать рулем.

Волнение захватывает только неглубокие, поверхностные слои воды. С увеличением глубины оно слабеет и, наконец, полностью затухает. Поэтому течения проявляются наиболее сильно на поверхности и быстро затухают на глубине. Следовательно, швертботы и малые килевые яхты более сильно подвержены влиянию поверхностного течения, чем глубоко сидящие крупные килевые яхты.

На полных курсах и сильном волнении, если яхта пересекает волны наискось, бывает очень трудно удержать ее на курсе. Анализируя рис. 242, приходим к выводу, что наихудший случай наступит тогда, когда длина волны λ будет приблизительно в два раза больше длины корпуса L , т. е. когда нос яхты находится на подошве, а корма — на гребне волны. В этом положении независимо от ранее рассмотренного действия орбитального течения добавляется еще одно. Дело в том, что поверхностное течение оказывает заметное влияние на скорость воды в районе кормы, в данном примере в сторону снижения.

Вспомним, что эффективность работы руля пропорциональна квадрату скорости, с которой руль обтекается водой. При сильном орбитальном течении руль может стать совершенно неэффективным, рулевой потеряет контроль над яхтой и в крайнем случае яхту может поставить бортом к гребню волны. В прошлом многие парусники терпели аварии из-за потери управления яхтой в подобной ситуации. Хуже всего управляются в таких положениях яхты, у которых нет носового свеса или он очень небольшой. При погружении носа в волну сильно перемещается вперед центр бокового сопротивления, яхта начинает сильно приводиться и при недостаточно эффективной работе руля контроль над яхтой может быть полностью потерян.

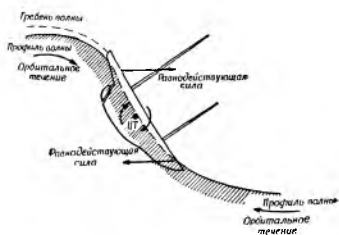


Рис. 243

Представление о мощи волн дает описание аварии с яхтой «Три-Нанг»: «Огибали мыс Горн в сильный шторм полным курсом, практически почти без парусов. Чтобы легче было держаться на курсе, с кормы был спущен длинный трос. Вдруг рулевой увидел за кормой крутую стену воды, и яхта вышла из повиновения. Затем он увидел корпус без мачт и надстроек, залитый водой». После осмотра повреждений было установлено, что яхта фактически перевернулась. На рис. 243 показано наиболее правдоподобное (вероятное) расположение сил и местоположение яхты за несколько минут перед аварией. Это случилось почти за 1000 миль к западу от берегов Чили.

Благодаря огромному мужеству и, безусловно, счастьем команде удалось добраться до берега.

С усилением ветра длина λ и высота h волн увеличиваются. В начальном периоде волнообразования высота волн растет быстрее, чем длина и крутизна. Отношение $h:\lambda$ вначале бывает около 1:7, а через некоторое время под действием ветра оно становится порядка 1:25—1:35.

Величина, форма волн и степень волнения зависят от размеров акватории. Под размерами понимается протяженность акватории по направлению дующего ветра.

Диаграммы, приведенные на рис. 244 (из работ норвежского океанолога Свердрупа), с некоторым приближением показывают, как изменяются длина и высота волны λ и h в зависимости от скорости ветра $V_{\text{н}}$ (в узлах), продолжительности его действия (времени волнения в часах) и протяженности захваченной волнением акватории. Заметим, что при скорости ветра $V_{\text{н}}=40$ узлам за пять часов образуется волна длиной до 150 футов

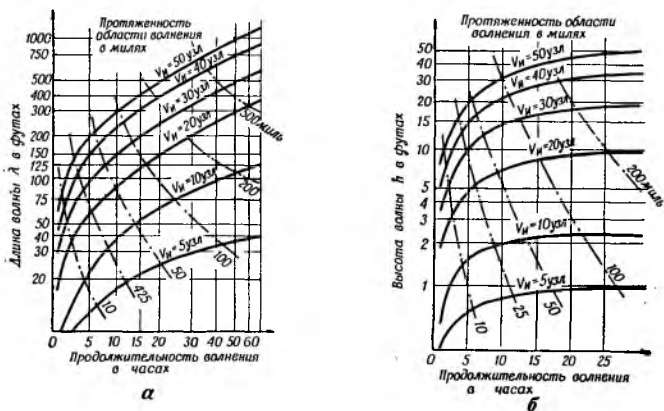


Рис. 244

(46 м). Через 35 часов длина волны может увеличиться до 600 футов (180 м), если размеры акватории достаточны — в данном случае около 500 миль. При этой же силе ветра $V_{\text{н}}=40$ узлам высота волны в течение первых 10—15 часов растет довольно быстро, примерно до 30 футов (9 м), после чего темп роста заметно замедляется.

На основании диаграмм можно заключить, что предвидеть величину волн, основываясь только на скорости ветра, невозможно. Так, например, штормовая волна в Северной Атлантике достигает высоты (h) 16 м и длины от 200 до 300 м. Для сравнения укажем, что на Балтийском море длина волн редко превышает 35 м, при высоте 2,5 м. Самая длинная волна, которую до сих пор наблюдали, была длиной около 850 м и перемещалась она со скоростью $c=38$ м/сек. Волны такой длины образуются на больших водных пространствах, находящихся под воз-

действием постоянного западного ветра между 40—50°-ными параллелями южного полушария.

Чем волна длиннее, тем с большей скоростью она движется. Между скоростью волны c , ее длиной λ и периодом τ существует строгая зависимость, определяемая формулой:

$$c = \frac{\lambda}{\tau},$$

где c — скорость в м/сек;

λ — длина волны в м;

τ — период волны в сек.

Зная длину волны, можно найти ее скорость по формуле:

$$c = 2,26\sqrt{\lambda} \text{ в футах/сек, если } \lambda \text{ в футах,}$$

$$c = 1,34\sqrt{\lambda} \text{ в узлах, если } \lambda \text{ в футах,}$$

$$c = 1,25\sqrt{\lambda} \text{ в м/сек, если } \lambda \text{ в метрах.}$$

Период τ волны можно определить по секундомеру, наблюдая прохождение двух последовательных гребней через одну и ту же точку.

Зная период τ в секундах, можно высчитать скорость по формулам:

$$c = 5,12 \tau \text{ в футах/сек,}$$

$$c = 3,03 \tau \text{ в узлах,}$$

$$c = 1,56 \tau \text{ в м/сек.}$$

Зависимость между величинами λ , c и τ , а также крутизной волны $\frac{h_b}{\lambda}$ и скоростью ветра V_H показана на рис. 245.

Диаграмма составлена на основании данных, полученных Циммерманом и другими исследователями, и собственных наблюдений автора. Единственная кривая этой диаграммы наиболее верно отражает размерные соотношения, характеризующие волны. Покажем на примере, как надо пользоваться диаграммой. Допустим, что длина волны в океане определена на глаз и равна пяти длинам корпуса яхты. Длина корпуса яхты = 40 футам

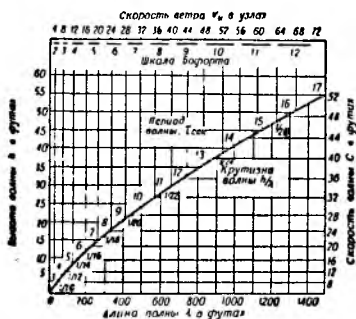


Рис. 245

(12 м). Следовательно, длина волны $\lambda = 40 \cdot 5 = 200$ футов, или около 60 м.

Выше точки $\lambda = 200$ (на нижней шкале диаграммы) на кривой найдем крутизну волны $\frac{h}{\lambda}$ около $\frac{1}{16}$ и период

волны $\tau = 6,3$ сек. Обращаясь к правой шкале, найдем скорость волны c , равную примерно 20 узлам, а на левой

шкале высоту $h = 12$ футов (3,6 м). На верхней шкале прочтем скорость ветра $V_{\text{н}} = 16$ узлам (4—5 баллов, по Бофорту).

Насколько скорость, длина и период волны связаны между собой строгой математической зависимостью, настолько высота волны с этими характеристиками почти не связана. Она зависит от силы ветра, продолжительности его действия и от глубины воды. В открытых глубоких морях в образовании волн участвуют не только поверхностные слои воды, но и слои, расположенные более глубоко. Поэтому энергия волнообразования распределяется на сравнительно большую массу воды и не проявляется так резко в поверхностных слоях. Крутизна волны, которую независимо от отношения $\frac{h}{\lambda}$ можно вы-

числить по углу α (рис. 246, а), на глубоких морях не превышает 20° . Профиль а и отношение $h:\lambda = 1:10$ соответствуют начальному периоду волнообразования, а более пологий профиль в — к уже установившемуся волнению. Длина волн а, б и в умышленно показана одинаковой, чтобы нагляднее была видна их крутизна. В действительности же «старая» волна в длиннее волны а.

Когда большая волна, идущая с моря, достигает прибрежных мелей, глубина которых меньше половины длины волны, профиль ее меняется и орбиты движения становятся эллиптическими. Форма волны на ее впадине принимает более плоскую форму, так как движение частиц воды ограничивается трением о дно. Гребни волн становятся более крутыми, а высота волн увеличивается (см. рис. 246, г). Энергия волн, распределяясь на меньшую массу воды, проявится в виде быстрого образова-

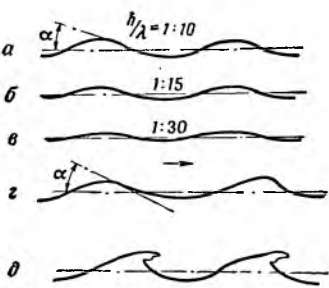


Рис. 246

ния высоких валов с завертывающимися гребнями. Это так называемые прибойные волны. На мелких местах прибой образует водовороты большой разрушительной силы. Иногда из-за прибоя высадиться или подойти на яхте к берегу становится невозможным (см. рис. 246, д).

Обратимся еще к одному свойству волн, важному для моряка — так называемому явлению рефракции волн. Наверно, каждый неоднократно наблюдал, что волны

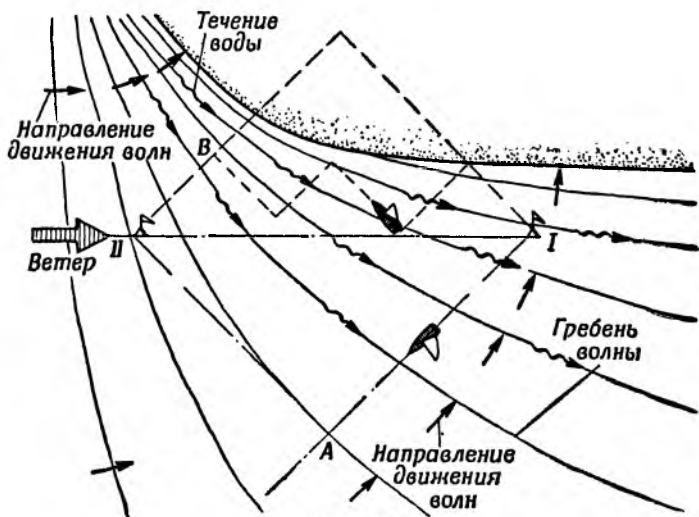


Рис. 247

ударяют в берег всегда фронтально, так что их гребни сближаются и оставляют на берегу параллельные следы. Интересно, что независимо от направления ветра, дует ли он вдоль или поперек берега, волны ведут себя одинаково (рис. 247). Такое изменение направления перемещения волн около берега напоминает отклонение светового луча, проходящего через вещества с различной плотностью. Непосредственная причина рефракции светового луча — разница в скорости прохождения через вещества с различной плотностью. Подобное явление происходит и с волной, скорость которой меняется в зависимости от глубины воды.

Волна, достигающая береговой мели раньше (левая сторона рисунка), становится короче, скорость ее движения

уменьшается, и она отстает от волн, еще не подошедших к мелкому месту (правая сторона рисунка). Вследствие этого направление движения волн ломается — на более глубоких местах они как бы догоняют прибойную волну на мелководье. К берегу волны подходят почти параллельными рядами. Рефракция волн может иметь некоторое значение в определении курса в гонках, особенно в сильный ветер и при большой прибойной волне (см. рис. 247). После огибания буя *I* можно идти на буй *II* или курсом *I—A*, или курсом *I—B*. Безусловно, выгоднее будет курс *I—A*, поскольку, уходя от берега, мы встретим более спокойную, пологую и длинную волну.

Дополнительное сопротивление, возникающее вследствие ударов яхты о волны, уменьшится, а после поворота в точке *A*, когда яхта пойдет курсом, параллельным волне, почти пропадет совсем. Если же выбрать курс *I—B*, яхте придется плыть в районе возникновения относительно сильной и крутой прибойной волны, в связи с чем гидродинамическое сопротивление корпуса будет больше, чем в первом случае. Из рисунка видно, что курс *I—B—II* в отличие от курса *I—A—II* проходит невыгодно — постоянно против короткой волны. Кроме того, плывя близко к берегу, яхта встречает противоток воды, обычно возникающий при рефракции волн. Этот противоток отводит излишки воды в направлении района с более низким уровнем волн. Противоток сильнее всего наблюдается около берега.

б) Плавание в лавировку против волн

Во время плавания на спокойной воде яхта преодолевает гидродинамическое сопротивление, которое при установившемся ветре остается почти постоянным. Поэтому движение яхты можно рассматривать как равномерное. Совсем иное положение наблюдается при плавании в лавировку против волнения. В этом случае в результате периодического изменения гидродинамического сопротивления яхта не будет двигаться равномерно и ее средняя скорость будет меньше, чем в первом случае. Движение против волн связано с появлением дополнительного сопротивления, которое может сильно ухудшить показатели плавания.

Хорошо известно, что, лавируя против волн, яхта испытывает в большей или меньшей степени изменения в

дифференте в результате ударов о волны. В некоторых случаях продольная качка становится настолько сильной, что заставляет рулевого удалиться на менее острый курс. В результате скорость $V_{\text{нв}}$ (чисто на ветер) уменьшается. Ее можно определить на основании уже известных зависимостей:

$$V_{\text{нв}} = V \cdot \cos \gamma \text{ при лавировке по спокойной воде,}$$

$$V_{\text{нв}} = V \cdot \cos(\gamma + \Delta\gamma) \text{ при движении против волн,}$$

где $\Delta\gamma$ — дополнительный угол, на который рулевой уваливает под ветер (рис. 248).

Учитывая, что гребни волн перпендикулярны к направлению ветра, можно найти скорость яхты относительно набегающей волны:

$$c + V_{\text{нв}} = 2,26 \sqrt{\lambda} + V \cdot \cos \gamma.$$

Отсюда период продольного колебания (качка или удары о волну), который вызывается набегающей волной, будет равен длине волны λ , деленной на относительную скорость яхты, идущей против волны, т. е.:

$$\tau_{\text{к}} = \frac{\lambda}{2,26 \sqrt{\lambda} + V \cdot \cos \gamma} = \frac{\lambda}{2,26 \sqrt{\lambda} + V}.$$

Дифферент яхты будет меняться в соответствии с найденным периодом; при встрече с вершиной волны нос яхты частично поднимется вверх, а частично благодаря инерции заглубится в волну выше KWL . При этом корпус также будет испытывать удары о волну, на что расходуется часть энергии движения яхты.

Отмечено, что иногда яхты начинают слишком сильно биться о волны, а некоторые яхты особенно склонны к продольной качке. Интересно, по каким причинам?



Рис. 248

Эта проблема подобна той, которую мы уже рассматривали в 1-й части, где говорилось о поперечной остойчивости. В обоих случаях причиной увеличения качки является резонанс. Как и при бортовой качке, каждая яхта имеет свой, характерный, период килевой качки T_{ψ} .

Когда длина волны и курс плавания складываются такими, что период килевой качки τ_k , вызванный волной, приближается к периоду собственных колебаний яхты T_{ψ} , амплитуда суммарного наклона яхты (наибольший дифферент) может резко увеличиться. При этом совсем не обязательно, чтобы волна была большой, достаточно возникновения синхронности между периодом волновых колебаний и периодом собственных колебаний яхты. Когда образуется такая синхронность, у рулевого есть два приема борьбы с ней: изменить период волновых колебаний τ_k или изменить период собственных колебаний яхты — T_{ψ} .

В первом случае можно, например, увеличить период τ_k , изменяя курс γ на угол $\Delta\gamma$. Очевидно, что на лавировке уваливание от оптимального курса, при котором яхта имеет оптимальную скорость $V_{нв}$, невыгодно (см. рис. 248). В другом случае изменить период собственных колебаний яхты T_{ψ} можно при уменьшении или увеличении момента инерции веса яхты, т. е. изменить расстояние между центрами тяжести отдельных весов яхты и осью ее продольных колебаний.

Перемещение команды ближе к носу или в сторону кормы дальше от оси колебаний лишь увеличит момент инерции и период собственных колебаний яхты T_{ψ} . Наоборот, сосредоточение команды в середине корпуса уменьшит как момент инерции, так и период собственных колебаний яхты. Оба эти способа можно применить в зависимости от периода вынужденных колебаний яхты τ_k для уменьшения интенсивности килевой качки.

Причем влияние веса команды сильнее на легких яхтах, на тяжелой килевой яхте это влияние может оказаться малоэффективным.

Вынужденные, вызываемые волнами, колебания могут быть эффективно снижены соответствующей формой корпуса. Решающее значение здесь имеет полнота носовой и кормовой частей корпуса. Практикой установлено, что популярные в Англии симметричные формы корпуса (с одинаковой полнотой носовой и кормовой частей для

сохранения устойчивого продольного равновесия) на самом деле весьма склонны к килевой качке и ударам о волну.

По мнению американских специалистов, такой взгляд на форму корпуса неправилен, что подтверждается практикой, а именно: в морских гонках яхты с симметричным корпусом систематически проигрывают яхтам с несимметричными корпусами. Несимметричным в данном случае считается корпус, отличающийся узкой носовой

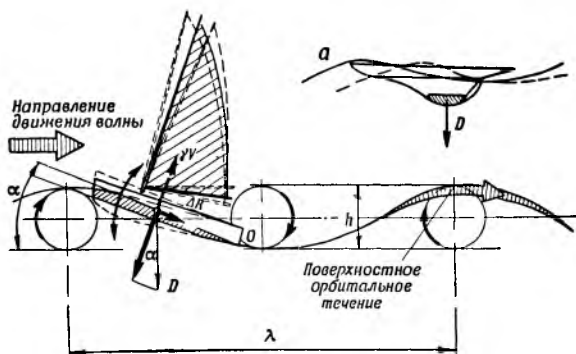


Рис. 249

частью, с полной плоской кормой и несколько сдвинутой к корме самой широкой частью корпуса.

Вероятнее всего, наибольшее значение в образовании и интенсивности вынужденных колебаний имеет форма носа корпуса. Отсюда представляется вполне обоснованным, что носовая часть корпуса должна делаться более острой для прорезания волны без заметного всплывания, т. е. с небольшим запасом водоизмещения (рис. 249, а).

На такой яхте гарантировано «мокрое» плавание, но, по-видимому, надо признать справедливым следующее популярное у яхтсменов мнение: «Быстрое и одновременно сухое плавание на волне так же невозможно, как невозможно приготовить омлет, не разбивая яиц».

Опыты *С. Е. Bowdena*, с разными моделями яхт, проведенные в Англии, показали, что асимметричные корпуса действительно обладают природной склонностью сопротивляться качке, вызываемой волнами.

Есть еще две причины, вызывающие рост гидродинамического сопротивления и периодические изменения скорости яхты, движущейся против волны, а именно: время от времени яхта должна взбираться на волну, подвергаясь действию орбитального течения (см. рис. 249). Совместное влияние этих факторов тем сильнее, чем больше высота волны h и чем она круче $\frac{h}{\lambda}$.

Поднимаясь вверх, как по наклонной плоскости, яхта преодолевает дополнительное сопротивление $\Delta R = D \cdot \sin \alpha$, и в это же время ее движение тормозится орбитальным течением, имеющимся на поверхности волны. Отрицательное действие этих двух причин только частично потом компенсируется попутным поверхностным течением на впадине волны.

Периодическое притормаживание скорости яхты при прохождении через вершины волн вызывает изменение скорости и направления вымпельного ветра и требует от рулевого освоения специфической техники плавания. Сравнивая на рис. 249 направление и скорость вымпельного ветра для разных положений яхты, не трудно убедиться, что на вершине волны вымпельный ветер будет полнее и слабее, а на впадине — острее и сильнее. Чтобы сохранить оптимальный угол установки паруса к вымпельному ветру, рулевой должен ритмично работать рулем, приводясь во время вхождения на волну и уваливаясь после прохода вершины. Фактический курс яхты будет напоминать серпантин.

К дополнительным причинам, оправдывающим постоянное приспособление курса к условиям плавания, относится форма водной поверхности. Как это следует понимать? Волны, которые походили бы на правильный волнистый лист железа, морякам встречаются крайне редко. Положение, при котором волны, одинаковые по длине и высоте, катятся на яхту ровными рядами, почти не встречается. В сущности, волны более сложны и чаще бывают в виде несимметричных водных возвышений с короткими гребнями. И по высоте и по форме волны различны, и тут и там могут появляться большие и более крутые волны. Типичная картина сложного волнения показана на топографической схеме (рис. 250). Контуры волн очерчены горизонталями с интервалом через каждые 0,3 м. Причиной этой сложной картины является ин-

терференция волн различного происхождения. Независимо от волн, поднятых ветром на данной акватории, сюда могут доходить волны, образовавшиеся в результате где-то проходящего шторма. Кроме того, неизменный поворот ветра в областях циклонов также будет изменять регулярное волнообразование. Следовательно, фактическая картина волнообразования будет результатом наложения нескольких систем волн, взаимно смешивающихся, пришедших с разных направлений, имеющих разную длину и высоту.

Интерференцию волн обычно можно наблюдать на соревнованиях, особенно перед стартом, когда яхты беспорядочно плавают в небольшом районе стартовой акватории.

Однако даже в этой, как будто бы совершенно беспорядочной, толчее волн разной длины и высоты имеется определенная ритмичность, которую можно заметить на рис. 250.

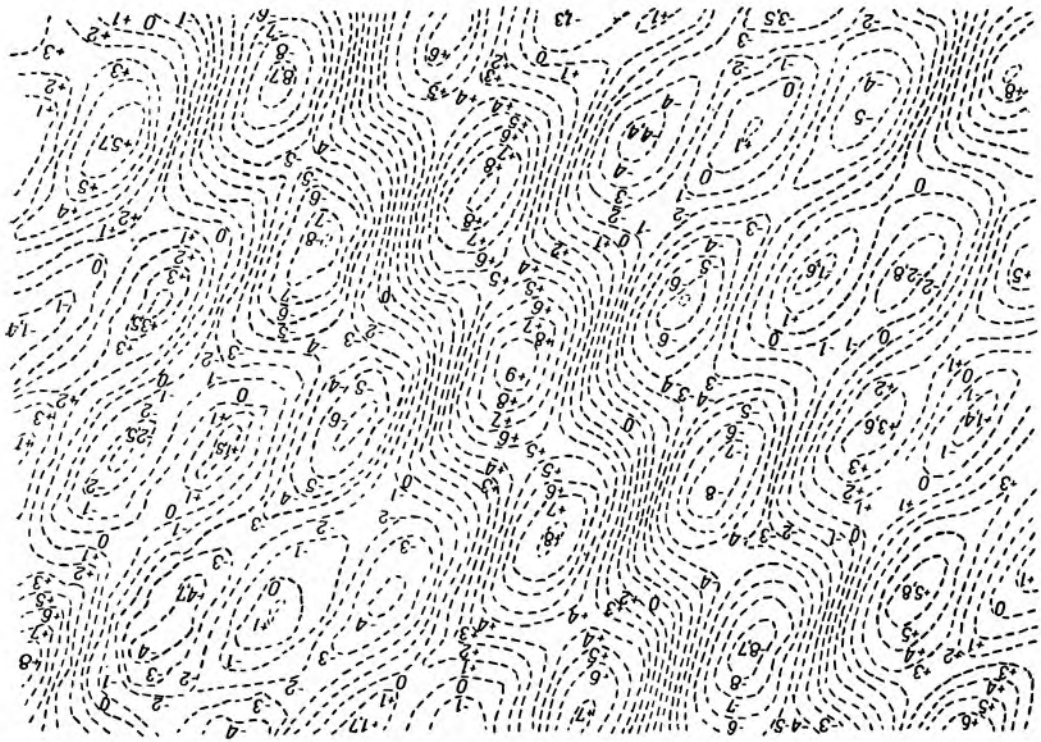
Из практики хорошо известно, что среди небольших волн достаточно регулярно появляются большие волны. Например, из морских рассказов известно о грозном девятом вале, отличающемся исключительной разрушающей силой.

Но не всегда девятая волна должна быть самой большой. С одинаковой вероятностью ею может быть седьмая или пятнадцатая, т. е. повторяющаяся, волна (таков закон интерференции волн).

Трудность техники плавания против волнения в лавировку состоит в отыскании среди бурного моря наиболее спокойных участков, где волны поменьше. Следовательно, курс яхты не обязательно будет прямым, важно его приспособить к топографии моря. Особенно перед поворотом оверштаг есть смысл выждать группу волн поменьше, чтобы меньше рисковать и не застрять в положении левентик.

Читатели могут заинтересоваться некоторыми сведениями о величине гидродинамического дополнительного сопротивления корпуса в зависимости от крутизны волн, отношения длины волны λ к длине корпуса L (по KWL).

Помещенные в таблице данные относятся к модельным испытаниям в Институте Стивенса в США с яхтой «Нью-Йорк-32» (см. рис. 136).



**Дополнительное сопротивление от действия волн в %
к сопротивлению на спокойной воде.**

$\frac{h_B}{\lambda}$	$\frac{\lambda}{L}$	0,2	0,4	0,6	0,8
$\frac{1}{10}$		3,0%	23,0%	48,0%	—
$\frac{1}{20}$		1,0%	6,0%	17,0%	27,0%

Из приведенных данных видно, что на коротких, но крутых волнах яхта может встретиться с довольно значительным дополнительным сопротивлением. Если предположить, например, что сопротивление при прохождении через волну возрастет на 10%, то для яхты «Нью-Йорк-32» это означает потерю в скорости $V_{нв}$ около 0,2 узла при скорости ветра $V_{и}=7,5$ узла. При ветре $V_{и}=13$ узлам потеря в скорости будет равна около 0,17 узла, а при ветре $V_{и}=19,5$ узла потеря скорости будет равна 0,12 узла.

в) Плавание с попутными ветром и волной

Когда яхты идут полным курсом, совпадающим с направлением движения волн, то, несмотря на ровный ветер, их скорость может неожиданно увеличиваться и падать — яхты передвигаются как бы скачками. Если сразу плывет группа яхт, то периодический прирост скорости может постоянно менять расстояние между ними даже в пределах нескольких длин корпуса. Но, несмотря на значительную разницу в скорости, возникающую временами между отдельными яхтами, оторваться от противников и уйти вперед бывает очень трудно.

Остановимся на том, что же является причиной периодического прироста скорости при плавании с попутной волной и какие условия должны быть соблюдены, чтобы продлить это время плавания с повышенной скоростью. Рассматривая рис. 251, заметим, что в положении *a* на яхту кроме аэродинамической силы F_x действуют иные силы, увеличивающие ее скорость. Соскальзывая с вершины волны, яхта получает дополнительное ускорение,

так как орбитальное течение направлено в сторону движения яхты. Кроме того, увеличению скорости способствует слагаемая сила F_α , приблизительно равная $D \sin \alpha$. Следовательно, фактическая скорость яхты будет складываться из собственной скорости V , с которой яхта идет под действием только ветра, без влияния волн, и прироста скорости от орбитального течения $U_{орб}$ и действия силы F_α . Вследствие суммарного действия этих трех факторов яхта может достичь значительной скорости, и тем большей, чем круче и выше волна.

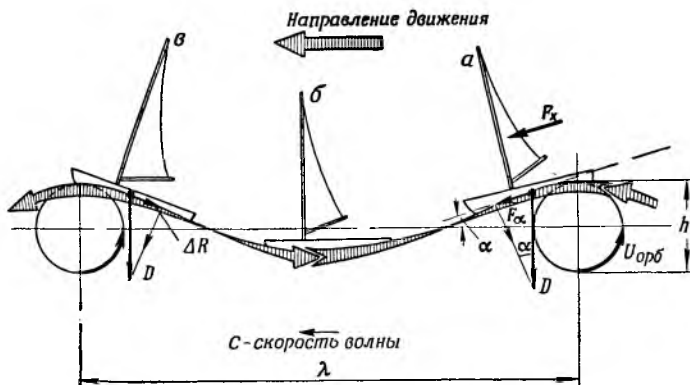


Рис. 251

На рис. 252 приводятся диаграммы орбитальной скорости $U_{орб}$ для различных размеров длины волн λ , их скорости c и крутизны $\frac{h}{\lambda}$. Эти зависимости можно считать

вполне правдоподобными для тяжелой морской погоды.

Если взять для примера, что длина волны $\lambda = 200$ футов, а крутизна $1/10$, то из диаграммы, помещенной вверху рисунка, узнаем, что максимальная орбитальная скорость (на гребне волны) будет равна 10 футам/сек, т. е. 5,9 узла. Скорость яхты с учетом действия орбитального течения будет равна $V_R = V + U_{орб}$. Такой прирост скорости может очень порадовать команду.

Из верхней диаграммы не трудно убедиться, что на больших крутых волнах орбитальная скорость может дойти до 40 футов/сек и даже больше. Это характерное свойство таких волн недавно стало использоваться в раз-

витии нового вида водного спорта — катания на гребне волны. Этот вид спорта получил наибольшее развитие на некоторых островах Тихого океана, где характер прибойных волн подходит для такого вида спорта. Спортсмен встает на специальную доску и на склоне мощной волны мчится к берегу, не затрачивая никакой энергии. Искусство заключается в том, чтобы удержаться на доске.

Чтобы можно было использовать энергию волны для увеличения скорости яхты, надо, чтобы ее результирующая, суммарная скорость V_R оказалась равной скорости волны c . Для волны длиной $\lambda = 200$ футов и $\frac{h_B}{\lambda} = \frac{1}{10}$ соответствующая скорость $c = 19$ узлов, или 32 фута/сек.

Гоночные яхты, например, такие, как «Летучий голландец», глиссирующие со скоростью около 15 узлов, имели бы возможность использовать волны указанной длины. Их собственная скорость (если еще добавить к этому влияние орбитального течения) достаточно велика, чтобы волна могла нести такое судно продолжительное время на своем гребне. Если крутизна волны длиной $\lambda = 200$ футов равна $\frac{1}{20}$, то орбитальная скорость будет около 5 футов/сек, т. е. около 2,9 узла. Теперь яхта типа «Летучий голландец» не удержится на гребне волны, которая будет уходить вперед.

Периодически попадая на подошву волн, яхта будет встречаться с орбитальным течением противоположного направления и ее скорость будет уменьшаться. Однако плыть яхта будет все-таки быстрее, чем она плыла бы на таком же ветре, но на спокойной воде. Используя периодические порывы ветра, меняющуюся волновую обстановку и большую скорость, внимательно маневрируя, рулевой может дольше удержаться на гребне волны. Дей-

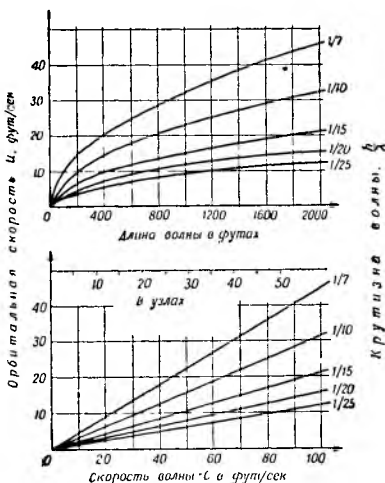


Рис. 252

ствуя неумело и не используя всех возможностей, он может потерять выгодное положение на вершине волны (см. рис. 251, *a*) даже тогда, когда поверхностное течение U достаточно для поддержания суммарной скорости яхты V_R на уровне скорости волны c .

Такое нежелательное положение может наступить в результате неправильного управления парусом, чрезмерного заглупления носа яхты и т. п. Если скорость яхты уменьшится на 0,5 узла, она может переместиться с положения *a* в положение *c*, а затем и в положение *b*. Надо обратить внимание, что в позиции *c* (см. рис. 251) эффект действия орбитального течения в большей или меньшей степени уничтожается добавочным сопротивлением ΔR , когда яхта окажется на тыльном склоне волны. В положении *b* на подошве волн действительная (результатирующая) скорость яхты будет равна $V - U$, что приблизительно на $2V$ меньше скорости, которую яхта имела в положении *a*.

Итак, возможности использования энергии волн для увеличения скорости яхты теснее всего связаны: с длиной λ и высотой h волны, со скоростью перемещения волны c и собственной скоростью яхты V на данном курсе. Чем длиннее волна, тем больше ее скорость и тем труднее удержаться на ее гребне. Наибольшие возможности использования волн имеют легкие, глиссирующие швертботы. Тем не менее существует некоторый предел порядка $\lambda = 200$ футам, в границах которого энергия волн используется. В средних условиях погоды благоприятная длина волны колеблется в пределах от 80 до 120 футов.

Анализируя диаграммы, помещенные на рис. 252, можно прийти к выводу, что относительно длинные океанские волны не могут быть полностью использованы однокорпусными швертботами и, тем более, килевыми тяжелыми яхтами. Другое дело катамараны, развивающие скорость до 30 узлов, они будут в состоянии использовать энергию волн длиной более 800 футов. Для катамаранов короткие волны прибрежных европейских акваторий или внутренних водоемов становятся скорее препятствием в достижении высоких скоростей.

Пересекая волны наискось курсом бакштаг (рис. 253), следует ясно представлять, что результирующая скорость яхты должна быть соответственно больше скорости волны c настолько, чтобы проекция скорости V_R на на-

обратить внимание на продольную балластировку корпуса, с учетом положения яхты на волне. Более наглядно суть дела показана на рис. 254. Во время перехода через вершину волны рулевому надо подобрать румпель на ветер и самому переместиться в сторону кормы. Яхта получает добавочный импульс, облегчающий достижение скорости глиссирования. Когда быстроходная яхта глиссирует вниз с вершины волны, она может зарыться носом в основание передней волны, особенно если волны короткие и крутые. Если рулевой не примет вовремя мер, яхта может зачерпнуть много воды и затонуть.

г) Течения и фарватеры

На поверхности моря происходит непрерывная циркуляция водных масс, проявляющаяся в виде течений различной, переменной силы. Наиболее частой причиной образования течений бывают постоянные, долго длящиеся ветры, а также приливы и отливы, вызываемые действием Луны и Солнца.

Течения, вызываемые ветрами, складываются в определенную систему, охватывающую почти все моря и океаны. Некоторые морские течения обладают значительной скоростью. Например, скорость Флоридского течения равна 5 узлам. Мозамбикское течение, движущееся вдоль восточных берегов Африки, имеет скорость около 3,7 узла.

Морские течения имеют особое значение при плавании в открытом море. Учитывая, например, Флоридское течение, можно пройти за сутки до 120 миль даже во время полного безветрия. обстоятельные сведения о морских течениях помещаются в лощиях каждого моря или океана.

Другой род морских течений наиболее сильно проявляется в прибрежных районах, в узкостях, каналах, заливах, связанных с открытым морем,— это приливно-отливные течения. Их периодичность связана с положением Луны и Солнца. Для навигации подробные сведения о приливах и отливах и вызываемых ими течениях даются в лощиях данного района и специальных ежегодных таблицах. В последних указывается время наибольшего прилива — «высокая вода» — и наибольшего отлива — «низкая вода».

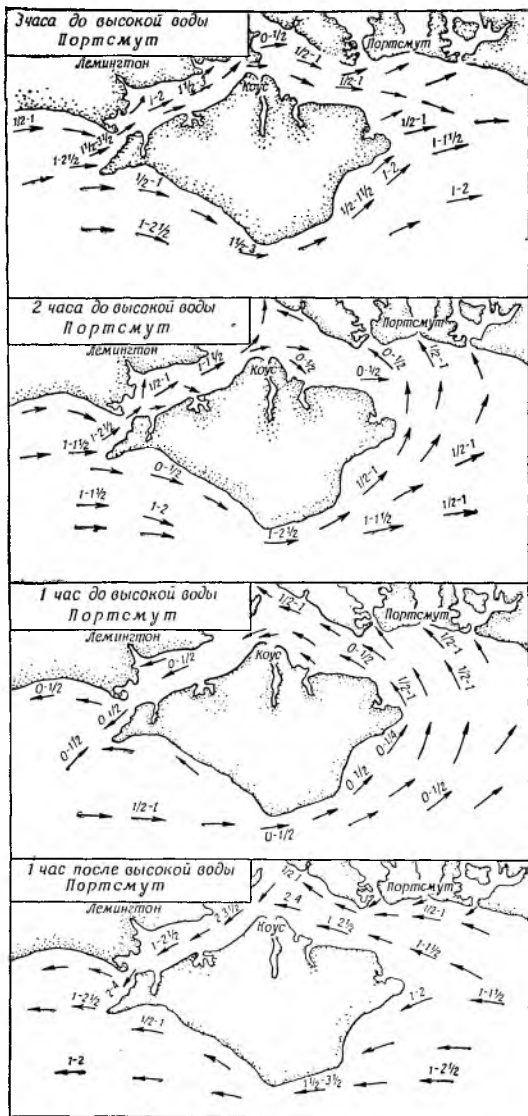


Рис. 255

час после старта начнется отлив и течение изменится с западного на восточное. Очевидно, это необходимо учитывать при выборе галса после прохождения стартовой линии. Из рис. 256 можно убедиться, что совсем не безразлично, каким галсом яхта пойдет после старта. Допуская, что яхты могут одинаково круто идти к ветру, а именно: под углом 40° относительно направления истинного ветра, легко увидеть, что правый галс выгоднее.

Через час после старта, когда течение с западного изменится на восточное, первая яхта, оказавшаяся в положении Y , может легко выйти на поворотный буй A одним галсом и даже с запасом высоты. Вторая яхта, которая через час после старта придет в позицию X , должна выбирать, как идти дальше — или курсом XS , или

XU . Оба они очень невыгодны по сравнению с курсом YA первой яхты. Рулевой первой яхты, предвидевший перемену направления течения, получит значительное преимущество перед рулевым второй яхты.

Скорость течения на реке, измеренная на поверхности в разных местах, будет неодинаковой: она изменяется в зависимости от глубины русла реки. Тормозящее влияние дна реки (в результате трения) сильнее проявляется на мелководье и ослабевает на больших глубинах. На рис. 257 показан примерный график распределения скоростей V_r воды в поверхностных слоях реки в поперечном разрезе. Обозначив буквой V наивысшую скорость течения, можно выделить в реке определенный поток, с наибольшей скоростью течения. Этот поток называется фарватером реки.

Очертания береговой линии и изменения глубины русла меняют направление фарватера, и даже на прямых участках реки он иногда переходит от одного берега к другому, как будто в большой широкой реке течет быстрый капризный поток (рис. 258).

Сложность речных условий гонок заключается в необходимости учитывать несколько одновременно действу-

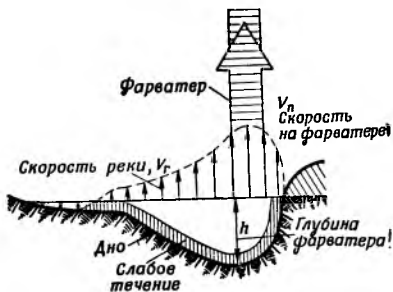


Рис. 257

ющих факторов: скорость течения реки на фарватере, скорость ветра, собственную скорость яхты и характер дистанции. Чем быстрее течение реки, особенно на фарватере, чем выше отношение скорости течения реки V_T к скорости яхты на спокойной воде V , тем сильнее его влияние на окончательную скорость яхты независимо от того, вверх или вниз по реке движется яхта. В этом легко убедиться, если учесть, что результирующая скорость яхты, плывущей по течению, увеличивается:

$$V_g = V + V_T.$$

Результирующая скорость яхты, плывущей против течения, будет соответственно:

$$V_g = V - V_T.$$

Как можно много выиграть при умелом использовании фарватера? Для определения скоростей течения реки воспользуемся данными таблицы. В ней даны скорости течения в верхних слоях реки в зависимости от глубины русла и от среднего гидравлического перепада, выраженного в промилле (например, средний гидравлический перепад на Висле около 20⁰/100).

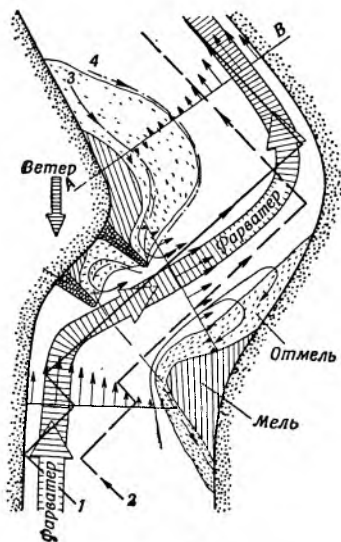


Рис. 258

Глубина русла реки, м	Перепад в ‰						
	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
0,15	0,15	0,28	0,46	0,61	0,74	0,99	1,21
0,20	0,17	0,32	0,52	0,69	0,82	1,12	1,37
0,25	0,19	0,36	0,58	0,77	0,90	1,26	1,57

Зададимся теперь следующими условиями: две яхты 1 и 2 лавируют по реке, причем один рулевой разбирается в течении и старается идти по фарватеру, а другой не обращает на это внимания и делает повороты, где придется. Скорость у обеих яхт на спокойной воде одинаковая — 1,5 м/сек. Соответствующие курсы обеих яхт показаны на рис. 258.

Допустим, что рулевой яхты 1 держится на фарватере, где скорость течения около 1 м/сек, что соответствует глубине русла около 3 м, тогда как рулевой яхты 2 плывет по мелкой воде с глубинами 0,5—1,0 м и течением со скоростью около 0,4 м/сек. Отсюда нетрудно вычислить, что результирующая скорость яхты 1 будет:

$$V_{g2} = V + V_{\tau} = 1,5 + 1,0 = 2,5 \text{ м/сек,}$$

а результирующая скорость яхты 2 будет:

$$V_{g2} = V + V_{\tau} = 1,5 + 0,4 = 1,9 \text{ м/сек.}$$

Следовательно, скорость яхты 1 на 30% больше, чем яхты 2. Если собственная скорость яхт вследствие слабого ветра была только 1 м/сек, то превосходство яхты 1 над яхтой 2 увеличилось бы до 43%, а при собственной скорости $V=0,5$ м/сек — до 67%. Приведенные примеры ясно показывают, что уход с фарватера с целью сокращения пути тем рискованнее, чем слабее ветер. В плавании вверх по реке надо стараться избегать фарватера и отыскивать места с наименьшей скоростью течения. Курсы следует располагать вблизи берегов, где течение заметно слабее и где иногда образуется обратное течение (см., например, курс 3) или вдоль отмелей (курс 4), где благодаря внезапному расширению реки скорость течения сильно падает.

Воспользоваться с выгодой отмелью можно только во время нормального уровня воды. При высокой воде фарватер иногда захватывает всю ширину реки, а скорость течения увеличивается почти вдвое. В таких условиях плавание против течения становится очень трудным. Плавание на течении требует постоянного контроля курса, которым яхта идет в данную минуту, и своего положения на дистанции. Такой контроль ведется с помощью пеленгования предметов, расположенных впереди по курсу.

Пеленгование позволяет определить дрейф яхты, ее скорость и, следовательно, снос яхты с выбранного кур-

са. Недостаточность или отсутствие таких наблюдений может быть причиной многих неожиданностей, например: сноса яхты вопреки расчетам рулевого за линию старта, навала на буй и т. п.

Трудность плавания по рекам и на течениях в основном заключается в определении фарватера. Распознавание его на поверхности реки требует определенного опыта

и наблюдательности. Посмотрим, какие же существуют приметы для определения фарватера? Каждый рулевой, плававший по рекам, знает, что водное зеркало реки далеко не везде одинаково. На некоторых участках водной поверхности вода постоянно покрыта рябью, в то время как в других местах вода остается зеркальной. В одном месте образуются высокие волны, а в другом их нет совсем.

По виду водной поверхности часто можно предположить, какое в этом месте течение — сильное или, наоборот, слабое.

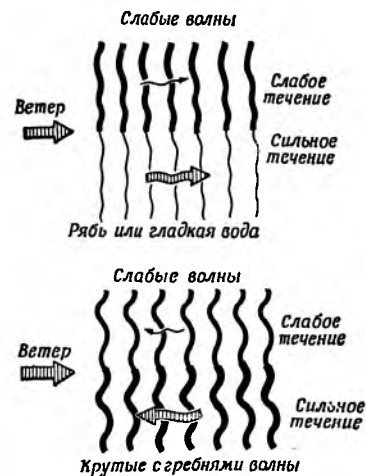


Рис. 259

но опытные люди могут при этом грубо ошибаться.

Чтобы правильно судить о скорости течения реки по виду ее поверхности, надо всегда учитывать влияние ветра на водное зеркало. Рассмотрим два крайних случая:

а) направление установившегося ветра совпадает с течением,

б) направление ветра противоположно течению.

В первом случае (рис. 259, а) скорость ветра относительно воды над фарватером ($V_{\text{в}} - V_{\text{т}}$) будет меньше, чем в местах с более слабым течением ($V_{\text{в}} - V_{\text{т}}$). Поэтому более отчетливо выраженные волны будут образовываться на участках с относительно малой скоростью течения. В то же время на фарватере могут быть лишь едва заметные волны или совсем гладкая поверхность воды. Следовательно, поднимаясь навстречу ветру вверх по реке, надо выбирать участки с более отчетливо выражен-

ными волнами. Именно в этих местах течение наиболее слабое. Наоборот, спускаясь по течению с попутным ветром, надо выбирать места спокойные, без волн, так как там будет проходить фарватер.

Когда ветер устойчиво дует против течения реки, крутые с гребнями волны обычно образуются на фарватере. Здесь скорость ветра относительно воды будет наибольшей ($V_{\text{в}} + V_{\text{т}}$). Участки со слабым течением обозначаются сравнительно небольшими волнами, вода тем спокойнее, чем слабее течение ($V_{\text{в}} + V_{\text{т}}$). Плывая в этих условиях против ветра вниз по течению, следует держаться участков с крутыми волнами, а плывя против течения по ветру, надо выбирать места, наиболее спокойные, без волны.

Изменение глубины русла реки, различные очертания берегов или острова на реке могут сильно усложнить описанные прежде зависимости. Надо всегда помнить, что при одних и тех же ветровых условиях волны на мелких местах будут всегда более крутыми, чем на глубоких местах. Следует различать чисто ветровые волны и волны, образуемые совокупным действием ветра и течения.

Препятствия в виде островов или дамб, вызывая сужение свободного течения русла реки, могут сильно повысить скорость течения на фарватере.

д) Плавание по мелководью

Ограниченная глубина воды оказывает достаточно основательное влияние на характер волнообразования, а следовательно, и на испытываемое яхтой волновое сопротивление. В определенных условиях плавания на мелкой воде сопротивление (волновое) может настолько увеличиться, что поглотит все выгоды от ухода с глубокого места на фарватере на более спокойную, мелкую воду.

Сравним две кривые, помещенные на рис. 260, которые качественно иллюстрируют изменения гидродинамического сопротивления яхты *B*, плывущей по мелкой воде, и яхты *A*, плывущей по очень глубокой воде. Обе яхты одинаковы. На малых скоростях плавания, когда не сказывается еще волновое сопротивление и яхты преодолевают преимущественно сопротивление трения, гидродинамическое сопротивление корпуса яхты *A* не отличается

от сопротивления корпуса яхты *B*. Однако после скорости V_1 , когда все большую роль начинает играть волновое сопротивление, условия плавания на мелкой воде все сильнее сказываются на яхте *B*, увеличивая общее гидродинамическое сопротивление.

Возникает вопрос: как влияет глубина воды, например по отношению к осадке корпуса, на гидродинамическое сопротивление яхты и в каких условиях выгоднее плыть по фарватеру или, наоборот, выгоднее уйти на более мелкую воду?

Надо вспомнить, что распространение волн является результатом орбитального движения частиц воды. На достаточно глубокой воде орбиты, по которым обращаются частицы воды, представляют собой почти правильные окружности. Если глубина воды ограничена, например, половиной длины волны, то дно будет деформировать волнение, тормозя орбитальную скорость частиц воды. Вследствие этого уменьшится нормальная скорость волны c .

Существует некоторая, назовем ее критическая, скорость волн для данной глубины воды h , которая является максимальной скоростью распространения волн для данной глубины. Эта скорость выражается следующей простой формулой:

$$c_{кр} = \sqrt{g \cdot h} = 3,13 \sqrt{h},$$

где $c_{кр}$ — скорость волны в м/сек;

g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/сек²;

h — глубина воды в м.

Это означает, что поднятые яхтой волны не могут двигаться быстрее, чем позволяет критическая скорость $c_{кр}$, отвечающая данной глубине воды. Иными словами, скорость распространения волн на мелкой воде целиком зависит от глубины, а не от собственной скорости яхты V , как это имеет место на глубокой воде.

Когда скорость яхты V приближается к критической скорости волн $c_{кр}$, то радикально меняется расположение

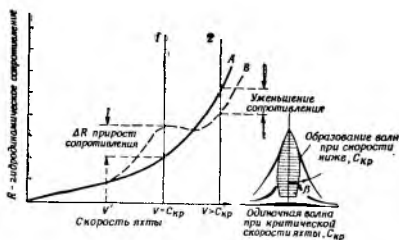


Рис. 260

вызываемых корпусом волн сравнительно с их нормальным расположением, которое было рассмотрено в связи с рис. 134. Главное изменение в расположении — это увеличение угла между расходящимися волнами, который обычно равен примерно 20° относительно направления хода яхты (см. рис. 260). Когда $V = c_{кр}$, угол между гребнями расходящихся волн становится равным почти 90° и происходит интерференция расходящихся и поперечных волн. В результате наложений этих волн образуется время от времени единичная высокая и крутая волна. По мере изменения характера волнообразования и расположения волн около корпуса начинает быстро расти гидродинамическое сопротивление, которое становится значительно больше, чем при плавании на глубокой воде.

Максимум роста гидродинамического сопротивления ΔR наступает, когда размеры единичной волны достигают максимума, т. е. если будут равны скорости $V = c_{кр}$. Это положение относится к линии 1 на рис. 260. Схема справа дает картину образования единичной волны, образующейся при равенстве скоростей $V = c_{кр} = 3,13\sqrt{h}$.

Когда скорость яхты V превышает критическую скорость $c_{кр}$, сопротивление яхты B уменьшается и может стать меньше сопротивления яхты A , плывущей по неограниченной по глубине акватории. Это относится и к сечению 2 (см. рис. 260).

Момент быстрого нарастания гидродинамического сопротивления вследствие интерференции волн и образования единичной волны отчетливо ощущается экипажем яхты. В этот момент скорость яхты так неожиданно и резко затормаживается, что кажется, что яхта села на мель. На скоростных яхтах, когда на большой скорости входят на мелководье, от резкого торможения команда с трудом удерживается на своих местах. Такие ощущения инерции тела могут служить признаком мелководья, если вода слишком мутная и дна не видно.

Уменьшение гидродинамического сопротивления, когда скорость V становится больше критической скорости $c_{кр} = 3,13\sqrt{h}$, объясняется тем, что единичная волна движется с меньшей, чем яхта, скоростью и отстает. Поверхность воды вокруг корпуса становится гладкой, а гидродинамическое (волновое) сопротивление резко уменьша-

ется. Энергия, прежде расходовавшаяся на волнообразование, теперь используется на движение яхты вперед.

Небольшие, перегруженные парусами, швертботы, если скорость глиссирования V становится больше критической скорости $c_{кр} = 3,13\sqrt{h}$, могут оторваться от волны, что не возможно сделать на килевых яхтах. Поэтому, избегая сильного течения на фарватере, надо быть очень осторожным, чтобы не оказаться в еще более невыгодном положении, выбрав курс ближе к берегу на более мелкой воде. Дополнительное сопротивление, на которое можно натолкнуться на мелководье, определяют по диаграмме, приведенной на рис. 261. Помещенная ниже таблица содержит соответствующие критические скорости для разных глубин.

Глубина воды, м	Критическая скорость	
	в м/сек	в узлах
1,0	3,13	6,07
1,5	3,84	7,45
2,0	4,42	8,57
2,5	4,95	9,60
3,0	5,43	10,55
4,0	6,26	12,15
5,0	7,01	13,60
6,0	7,67	15,06
8,0	8,86	17,17
16,0	9,90	19,20

Как пользоваться диаграммой и данными таблицы, лучше всего показать на примере, не относящемся к определенному типу яхт и имеющем только качественное значение.

Предположим, что средняя осадка корпуса $T = 1,5$ м. Идя со скоростью $V = 7$ узлам, рулевой приводит яхту на мелководье с глубиной $h = 4,5$ м. Отношение $\frac{h}{T} = \frac{4,5}{1,5} = 3$. Критическая скорость волны для глубины 4,5 м равна 13 узлам, и, следовательно, отношение $\frac{V}{c_{кр}} = \frac{7}{13} = 0,55$. На диаграмме, приведенной на рис. 261. находим соответствующее увеличение гидродинамического сопротивления. Оно примерно на 30% больше сопротивления на

глубокой воде. Если бы скорость яхты была не 7, а 9 узлов, то отношение $\frac{V}{c_{кр}} = \frac{9}{13} = 0,7$ и дополнительное сопротивление, вызванное плаванием на мелководье, составило бы 120% сопротивления на глубокой воде.

Рассматривая кривые на рис. 261, можно прийти к выводу, что потери в скорости при плавании на мелководье будут тем больше, чем меньше отношение $\frac{h}{T}$.

В случае если под килем яхты окажется только несколько сантиметров воды, сопротивление может увеличиться в несколько раз по сравнению с сопротивлением на глубокой воде.

Возьмем еще раз кривую, где $\frac{h}{T} = 3$, глубина

воды 4,5 м, а осадка корпуса 1,5 м. Оказывается,

что сопротивление может стать меньше нормального на глубокой воде, если скорость яхты станет больше 1,9 $c_{кр}$, т. е. $1,9 \cdot 13 = 24,7$ узла. На диаграмме это произойдет в точке А.

Малые глубины не будут влиять на волновое сопротивление, если скорость плавания V будет меньше 0,3 $c_{кр}$, т. е. $0,3 \cdot 13 = 3,9$ узла. Это соответствует точке В на диаграмме. Отсюда можно сделать вывод, что плавать на мелководье при слабых ветрах, не боясь проигрыша, можно, когда скорость яхты невелика. При сильном ветре и хорошей скорости уход на мелководье может привести к проигрышу. Хорошим признаком в данном случае служит характер волн, образующихся вокруг корпуса яхты.

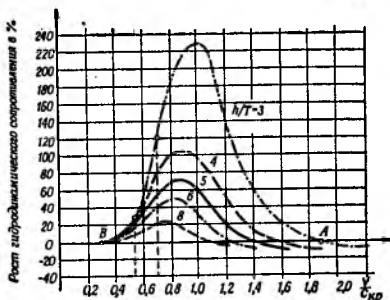


Рис. 261

Условные обозначения, принятые в переводе книги
Ч. Мархая «Теория плавания под парусами»

Принятое обозначение	Что обозначено	Обозначение в польском оригинале
Координатные оси и плоскости, подстрочные индексы		
x, y, z	Координатные оси, направленные соответственно по курсу, перпендикулярно к курсу и вертикально. Подстрочные индексы проекций сил на эти оси	
xy, xz, yz	Координатные плоскости. Подстрочные индексы проекций сил на эти плоскости	
a	Подстрочный индекс для аэродинамических условных знаков (воздуха)	A
z	Подстрочный индекс для гидродинамических условных знаков	H
Силы и их коэффициенты		
F	Равнодействующая аэродинамических сил	T_A
C	Коэффициент равнодействующей	$C_1 C_T$
F_x	Сила тяги парусного вооружения	F_C
K_x	Коэффициент силы тяги	C_C
F_y	Сила дрейфа	F_{poz}
F_z	Вертикальная составляющая аэродинамических сил	F_v
F_{yz}	Кренящая сила	F_p
K_{yz}	Коэффициент кренящей силы	C_p
R	Равнодействующая гидродинамических сил	T_H
R_x	Сопротивление воды при движении по курсу	R
R_y	Поперечная сила на корпусе (сила бокового сопротивления)	F_B
ζ_y	Коэффициент силы бокового сопротивления	C_B
R_z	Вертикальная составляющая гидродинамических сил	R_v

Принятое обозначение	Что обозначено	Обозначение в польском оригинале
ζ_z	Коэффициент вертикальной составляющей	C_z
Y	Подъемная сила парусного вооружения	L
C_y	Коэффициент подъемной силы	C_L
X	Лобовое сопротивление парусного вооружения	D
C_x	Коэффициент лобового сопротивления	C_D
D	Весовое водоизмещение яхты, равное ее весу	W
γV	Сила поддержания воды (V — объемное водоизмещение; γ — объемный вес воды): $\gamma V = D$	Δ
P	Вес рулевого	W_z
R_T	Сопротивление трения корпуса	R_f
ζ_T	Коэффициент сопротивления трения	C_f
R_B	Волновое сопротивление корпуса	R_w
R_H	Индуктивное сопротивление корпуса	R_i
R_K	Добавочное сопротивление корпуса от крена	R_h
ζ_K	Коэффициент кренового сопротивления	C_h
Моменты и их коэффициенты		
$M_{кр}$	Кренящий момент	M
M_B	Восстанавливающий момент при поперечном наклонении (крене)	M_{dz}
$M_{диф}$	Дифференцирующий момент	M_z
$Mb_{диф}$	Восстанавливающий момент при дифференте	M_z
$M_{прив}$	Приводящий к ветру момент	M_n
$M_{увал}$	Уваливающий под ветер момент	M_z
C_M	Коэффициент момента	C_m
Линейные размеры, площади и их соотношения		
L, B, T	Длина, ширина и осадка яхты	L, B, D
F	Высота надводного борта	F
λ	Длина волны	L_f

Принятое обозначение	Что обозначено	Обозначение в польском оригинале
h	Высота волны	H_f
S	Площадь парусов	S_A
A	Площадь проекции подводной части яхты (плавника, шверта) на ДП	A
Ω	Площадь смоченной поверхности	A
λ_a	Относительное удлинение парусов	$S_{mOz}; S_{mz}$
λ_z	Относительное удлинение площади подводной части яхты (плавника, шверта)	S_m
$l_{кр}$	Плечо кренящего момента	h
l_B	Плечо восстанавливающего момента	R_{st}, RS_t
Углы		
β	Угол между курсом и кажущимся (вымпельным) ветром	β
ν	Угол между курсом и истинным ветром	ν
δ	Угол дрейфа	λ
α	Угол атаки паруса	α
ϵ_a	Угол аэродинамического сопротивления $\left(\text{tg } \epsilon_a = \frac{x}{y} \right)$	ϵ_a
ϵ_z	Угол гидродинамического сопротивления $\left(\text{tg } \epsilon_r = \frac{R_r}{R_y} \right)$	ϵ_H
δ_2, δ_c	Угол установки грота и стакселя по отношению к ДП (измеряется по нижним шкаторинам)	δ_G, δ_F
θ	Угол крена	θ
ψ	Угол дифферента	τ
Скорости, периоды		
V	Скорость яхты относительно воды	V_T
V_H	Скорость истинного ветра	V_T
V_K	Скорость кажущегося ветра (вымпельного)	V_A
V_{HB}	Скорость движения яхты прямо на ветре	V_{mg}

Принятое обозначение	Что обозначено	Обозначение в польском оригинале
T_{θ}	Период свободных бортовых колебаний	T_z
T_{ψ}	Период свободных продольных колебаний	T_2
τ	Период волны	T
τ _к	Кажущийся период волны	T_1
с	Скорость движения волн	с
V_g	Действительная скорость яхты на течении	
V_T	Скорость течения	
Условные обозначения точек и плоскостей		
ц. п.	Центр парусности	SOZ
ц. б. с.	Центр бокового сопротивления	SBO
ц. т.	Центр тяжести	SC
KWL	Конструктивная ватерлиния	KLW
ц. в.	Центр величины	SW
д. п.	Диаметральная плоскость	
Числа		
Re	Число Рейнольдса	R_l
F_z	Число Фруда	F_z

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование яхт класса «Дракон». Реферат № 2 за 1956 г. Y.R.C.
2. Аллан, Дуст и Вэйр. Испытания яхт R.I.N.A. 1956 г.
3. Ата Нутку. Испытание моделей корпусов парусных судов. Труды исследовательского института Стамбульского университета. 1957 г.
4. Баркл Х. М. Поведение парусной яхты R.L.N.A. 1960 г.
5. Баркл Х. М. Плавание с высокими скоростями. Реферат R.I.N.A. 1951 г.
6. Барнаби К. С. Основы морской архитектуры, 1954 г.
7. Бевиер Роберт. Быстрое плавание, 1954 г.
8. Бевиер Роберт. Плавайте, чтобы победить, 1956 г.
9. Кан дю Петер. Высокоскоростные малые суда, 1956 г.
10. Кан дю Петер, Гудрич Г. И. Плавание на волне, скольжение. R.I.N.A. 1962 г.
11. Краго В. А. Результаты и анализ бассейновых испытаний модели яхты «Дракон». Реферат 1960 г. (Saunders — Roe).
12. Кросек Х. К теории паруса, Шпрингер, Берлин, 1925 г.
13. Курри М. Парусные соревнования. Аэродинамика парусов, 1949 г.
14. Давидсон К. С. М. Обзорная работа изд. Batchelor and Deeis, Cambridge, 1936 г.
15. Давидсон К. С. М. Экспериментальное изучение парусных яхт. Реферат S.N.A.M.E. 1936 г.
16. Дэвис П. О. А. Л., Дик Р. В., Мархай Ч. А. Исследования, проведенные в большом тоннеле Саутгемптонского университета с малыми скоростями. Реферат № 208 A.A.S.U. 1962 г.
17. Дюкер Ф. Е. М. Серия статей, опубликованных в журнале *Jachting Monthly* в 1943—1944 гг.
18. Флюит И. Р., Бромфильд Н., Краго В. Исследования яхт класса Дракон. Реферат (Saunders — Roe) 1960 г.
19. Гаррисон Т., Батлер. Крейсерские яхты, 1958 г.
20. Хоернер С. Ф. Соппротивление движению в жидкостях. 1958 г.
21. Хупер М. С. Некоторые неопубликованные работы, проведенные в тоннеле — Hayes, Maddx. gr. Britain.
22. Иллингворс И. Х. Морские плавания. 1955 г.
23. Мархай Ч. А. Аэродинамическая характеристика модели паруса яхты «Финн» в масштабе 2 : 5 и его эффективность на лавировке. A.C.J.R. 1964 г.
24. Мархай Ч. А. Модельные испытания парусов класса монотипов X. A.C.J.R. 1962 г.
25. Мархай Ч. А. Теория плавания под парусами. M.O.N. 1957 г.
26. Мархай Ч. А. Статьи, опубликованные в журнале «Яхтенный мир» (Англия).

27. Мархай Ч. А., Чаплео А. К. Предварительные результаты испытаний парусов на рангоуте в положении без крена. А.С.Ж.Р. 1961 г.
28. Мархай Ч. А., Чаплео А. К. Наблюдения за потоком воздуха, обтекающим парус на модели. А.С.Ж.Р. 1962 г.
29. Материалы, представленные на конференцию по вопросам научного обоснования форм яхт. А.С.Ж.Р. 1962 г.
30. Морвуд И. Аэродинамика парусов. 1954 г.
31. Испытания яхты 5,5 м класса «Иомен». Ж.Р.С. Реферат № 1.
32. Филипс-Берс Д. Взгляд на яхту. 1955 г.
33. Филипс-Берс Д. Некоторые вопросы обмера яхт. R.I.N.A. 1958 г.
34. Проктор Ян. Ветер и течения. 1953 г.
35. Парусные суда, Уффа ФОКС, 1959 г.
36. Сеинсбури И. С. Серия статей под общим заглавием: Гоночные качества парусных яхт. Издание Ship — Boatbuilders 1961—1962 гг.
37. Саундерс Гарольд Е. Гидродинамика в проектировании судов. 1958 г.
38. Сомервиль Х. Sceptre 1958 г.
39. Таннер Т. А. Предварительный доклад о сравнении теоретических и экспериментальных данных. А.С.Ж.Р. 1960 г.
40. Таннер Т. Натурные испытания в бассейне Международного каное с парусностью 10 кв. м. Реферат R.I.N.A. 1960 г.
41. Таннер Т. Сила на яхтенных парусах. Журнал королевского авиационного общества. 1930 г.
42. Таннер Т. Геометрия плавания на ветер. Реферат R.I.N.A. 1960 г.
43. Таннер Т., Чаплео А., Мархай Ч. А., Твайтс. Заметки по вопросам, связанным с измерением сил на парусах. А.С.Ж.Р. 1961 г.
44. Технические выпуски издания Технологического института Стивенса — Хобокен в Нью-Джерси, США. № 10, 16, 17, 55, 67, 85, 108, 129, 133.
45. Работы, опубликованные Любительским обществом по испытанию яхт.
46. Варнер Е. П., Обер С. Аэродинамика парусов. Реферат N.A.M.E. 1925 г.
47. Вэллс Тэд. Научные обоснования парусных гонок. 1950 г.
48. Килевая качка парусных яхт во время лавировки на волне. А.С.Ж.Р. 1960 г.
49. Иллингворс И. Х. Счет на секунды. 1958 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Общие принципы движения яхты	—
Часть I. Аэродинамика парусного вооружения	9
1. Понятие аэродинамической силы	—
2. Расположение давлений на парусе	20
3. Результаты действия аэродинамической силы	28
4. Измерение аэродинамических сил	30
а) Медленное изменение угла атаки паруса	43
б) Быстрые и повторные изменения угла атаки (пампинг)	44
5. Аэродинамическое сопротивление парусного вооружения	46
а) Индуктивное сопротивление	49
б) Сопротивление трения	52
в) Сопротивление формы	60
г) Добавочное аэродинамическое сопротивление яхты	71
6. Структура вымпельного ветра	74
7. Значение угла атаки	81
8. Зависимость угла атаки от силы ветра и курса относительно ветра	86
9. Значение «пузатости» паруса	100
а) Выбор полноты паруса	101
б) Регулирование полноты паруса, взятие рифов	109
в) Влияние положения максимальной полноты (пуза) паруса	117
10. Плавание на полных курсах	120
11. Форма паруса	130
12. Взаимодействие парусов	137
а) Влияние переднего паруса на грот	139
б) Влияние угла установки переднего паруса	144
в) Настройка парусов	147
г) Перекрытие грота передним парусом	158
д) Спинакер	166
13. Центр парусности	176
а) Центр парусности и уравновешенность яхты на курсе	177
б) «Блуждание» центра приложения аэродинамических сил	180
в) Центр парусности для системы вооружения: грот, стаксель и бизань	183
14. Несколько замечаний по раскрою, уходу и дефектам парусов	185

а) Физические свойства парусных тканей	186
б) Основы кроя грота	191
в) Проблема гибкого рангоута	200
г) Раскрой передних парусов	207
д) Настройка такелажа	210
Часть II. Гидромеханика парусной яхты	213
1. Гидродинамическое сопротивление корпуса	—
а) Сопротивление трения	215
б) Волновое сопротивление	229
в) Основы движения яхты	242
г) Индуктивное сопротивление, вызываемое дрейфом	254
д) Сопротивление, вызванное креном	269
2. Гоночные качества яхты	276
а) Общая оценка яхты	—
б) Ходовые качества яхты на лавировке	293
в) Способы предвидения возможностей яхты	299
3. Остойчивость и «уравновешенность» яхты	313
а) Поперечная остойчивость	314
б) Продольная остойчивость	326
в) Устойчивость на курсе	328
г) Маневрирование	333
Часть III. Ветер и вода	339
1. Ветер	—
а) Использование областей низкого давления	—
б) Структура ветра	344
в) Местные ветры. Бризы	353
г) Ветер в районе дистанции	360
2. Вода	368
а) Образование и поведение волн	—
б) Плавание в лавировку против волн	376
в) Плавание с попутными ветром и волной	383
г) Течения и фарватеры	388
д) Плавание по мелководью	395
Приложение	400
Список литературы	404

Чеслав Мархай

Теория плавания под парусами

Редактор А. И. Шавердова

Художник Е. К. Золотарев

Художественный редактор В. К. Сафронов

Технические редакторы Л. И. Серякова,

М. А. Полуян

Корректор А. Д. Полосова

Сдано в производство 2/VII—69 г.

Подписано к печати 24/X—69 г. Формат 84×108^{1/32}.

Бумага типографская № 2. Печ. л. 12,75 Усл. п. л.

21,42. Уч.-изд. л. 20,45. Бум. л. 6,375. Тираж

10 000 экз. Цена 1 руб. 51 коп. Зак. 212.

Издательство «Физкультура и спорт»

Комитета по печати при Совете Министров СССР

Москва, К-6. Каляевская ул., 27

Ярославский полиграфкомбинат Главполиграф-

прома Комитета по печати при Совете Министров

СССР. Ярославль, ул. Свободы, 97.