

К чему приводит наклон паруса?

А. Р. Бесядовский, М. Ч. Наумова



Foto: Helena Darvelid/VestasSailRocket2

Стремление человека двигаться быстрее преодолеть невозможно – это в полной мере касается и яхтсменов. Наиболее простой способ увеличения скорости – увеличить мощность двигателя и эффективность движителя. Но на ветер нам влиять трудно. Поэтому приходится экспериментировать с движителем – парусом.

И тут возникает одна проблема. Чтобы увеличить скорость, надо увеличить силу тяги F_T . Но тяга – это проекция аэродинамической силы F , возникающей на парусе, т.е. надо увеличить ее. Пути, позволяющие этого добиться, известны. Беда в том, что у этой силы есть еще одна проекция – поперечная F_d . Она у нас называется силой дрейфа. Особенность работы паруса на острых курсах заключается в том, что сила дрейфа превышает, иногда значительно, силу тяги. Но поперечная проекция не только пытается сдвинуть яхту вбок, но еще и кренит ее, т.к. точка приложения аэродинамической силы – центр давления (ЦД) – находится (условно) в

центре площади нашего паруса, т.е. достаточно высоко над палубой.

Получаем следующую схему (рис. 1). Увеличиваем полную силу на парусе F – увеличиваем силу тяги F_T и силу дрейфа F_d – крен растет. Но с ростом крена ухудшаются условия работы паруса и сила на нем падает. Это происходит до тех пор, пока кренящий момент не сравняется с восстанавливающим. Сила F на яхте с креном становится меньше по сравнению с яхтой, идущей без крена, а значит, уменьшается тяга. В результате эффект от улучшения характеристик паруса оказывается меньше, чем мы ожидали.

Напрашивающийся выход – использовать вместо высокого и узкого паруса низкий и широкий, чтобы понизить ЦД – не перспективен. Из теории крыла известно, что низкие и широкие паруса создают значительно меньшую силу в сравнении с высокими и узкими.

Поэтому у конструкторов появилась идея увеличить силу F , но использовать часть ее для уменьшения кренящего момента. Если развернуть плоскость паруса относительно горизонта, то появится вертикальная проекция полной силы. Если ее направить вверх, то она будет, с одной стороны, приподнимать корпус из воды, с другой – при

крене будет создавать восстанавливающий момент. Такая идея была реализована в ряде проектов, в частности на SailRocket (рис. 5). Это судно недавно обновило рекорд скорости под парусами. Но наклоняя парус мы, как было указано раньше, уменьшаем полную силу, которая на нем возникает. Кроме того можно предположить, что и сила тяги будет меняться в зависимости от угла наклона паруса к горизонту.

Чтобы выяснить, что же происходит при использовании подобных конструкций, на кафедре Гидроаэромеханики и морской акустики Санкт-Петербургского Государственного морского технического университета одним из авторов статьи выполнена дипломная работа, в рамках которой был проведен численный эксперимент. В нем анализировалось влияние угла наклона паруса на величину аэродинамических сил и моментов. Поскольку любая численная модель содержит достаточно много допущений и упрощений, параллельно были выполнены продувки крыла в аэродинамической трубе. Сравнение результатов численного и физического эксперимента позволило внести поправки в данные, полученные расчетом.

Нужно уточнить, что в расчетах предполагалось безотрывное обтекание крыла. При продувках в трубе это предположение подтвердилось. Было использовано прямоугольное в плане

Рис. 1



крыло удлинением 3 (рис. 6). В эксперименте анализировались три угла атаки α : 10° , 15° и 20° . Угол наклона крыла к вертикали изменялся от 0° до 90° с шагом 15° в диапазоне от 30° до 90° и с шагом 5° от 0° до 30° . За нулевой угол было принято вертикальное положение крыла.

Для примера в таблице 1 и на рисунке 7 приведены экспериментальные и расчетные данные, полученные для угла атаки 10° . Коэффициент боковой силы приведен в поточной системе координат. Ось Y направлена на правый борт, ось Z – вверх.

Из приведенного графика видно, что на малых углах наклона паруса, примерно до 20° , подъемная сила быстро растет, а боковая уменьшается, но гораздо медленнее.

Наклон паруса приводит к тому, что кренящий момент сохраняется, хотя и несколько уменьшается, но появляется вертикальная сила, стремящаяся приподнять корпус из воды. Для подавляющего большинства яхт ее величина пренебрежимо мала, по сравнению с весом корпуса. Но для виндсерфингистов она уже вполне ощутима. И на досках давно используют поперечный наклон паруса для ускорения выхода на глиссирование. А иногда и для подлетов и кульбитов на различных шоу.

А к чему это приводит на обычных яхтах? Рассмотрим несколько вариантов возможного наклона паруса (рис. 8).

Для нас представляет интерес, можно ли и при каких условиях, наклоняя парус (по сути – наклоняя мачту в плоскости мидель-шпангоута), уменьшить или сделать нулевым кренящий момент от паруса на судне. Понятно, что простого наклона паруса недостаточно. Для обычного треугольного паруса (рис. 8а) вертикальная сила, приложенная в центре давления, создаст ничтожный момент относительно точки вращения судна. Более того, увеличивая наклон, мы получим дополнительный кренящий момент от вертикальной силы при незначительном уменьшении момента от силы дрейфа.

На катамаране, в зависимости от конструкции, мы можем получить разные результаты. Для случая, изо-

браженного на рис. 2, и для симметричного прямоугольного паруса, использованного в эксперименте, момента от вертикальной силы не будет вообще. Для таких судов, как на рис. 3–5, эффект уменьшения кренящего момента от паруса будет иметь место (см. рис. 8б). Но полностью ликвидировать его не удастся из-за неблагоприятного соотношения вертикальной и горизонтальной проекций. Еще один вариант, позволяющий достигнуть поставленной цели, приведен на рис. 8в. В данной конструкции одновременно с наклоном паруса мы наклоняем мачту на подветер. Судов такой конструкции в реальности не встречалось. Что-то подобное можно представить лишь для судна с кайтом в качестве движителя.

Для такого случая были проведены расчеты углов наклона мачты γ (*gamma*) и паруса δ (*delta*), при которых момент равен нулю. Нужно учитывать, что увеличивая наклон паруса, мы уменьшаем силу тяги, которая является проекцией полной аэродинамической силы F на направление движения яхты.

В таблице 2 приведены значения углов наклона мачты и паруса, при которых выполняется условие равенства нулю кренящего момента от паруса. Там же показана величина коэффициента силы тяги для каждого случая и отношение этого коэффициента к базовому, имеющему место при вертикальном положении паруса. Т.е. величина потери тяги в процентах. Эти данные приведены для угла атаки паруса 10° . Расчеты показали, что для получения нулевого момента, изменение угла атаки паруса от 10° до 20° приводит к изменению углов наклона мачты и паруса в пределах $2-3^\circ$.

На рисунках 9 и 10 приведены зависимости изменения коэффициента силы тяги от угла наклона паруса для случаев, соответствующих нулевому моменту. И величина потери тяги для этих вариантов.

Из графиков видно, что наклоняя парус на 30° , мы теряем около 20% тяги.

Нужно не забывать, что наклон паруса требует соответствующего наклона мачты. При этом

Рис. 2



Рис. 3



Рис. 4



Рис. 5





Рис. 6. Модель в аэродинамической трубе

возникает мощный приводящий момент, который тоже надо чем-то компенсировать.

Казалось бы, на основании полученных результатов можно предположить, что, установив парус и мачту в положение нулевого момента, можно увеличивать площадь паруса, чтобы компенсировать потерю тяги. Это не совсем так. В данной постановке задачи мы рассматриваем момент, создаваемый парусом, относительно точки крепления мачты к корпусу (шпора мачты). Но на подводную часть судна действуют свои силы, которые тоже будут создавать свой кренящий момент. Мы о них не говорим, но они зависят от силы дрейфа, создаваемой парусом. Кроме того, в данной модели не учитывается вес рангоута и паруса. Он должен компенсироваться вертикальной составляющей силы на парусе. Для

этого ее придется увеличить. За счет тяги. И предполагается, что мачта прикреплена к парусу в центре давления. Это ограничивает возможность увеличения вертикального размера паруса из-за близости поверхности воды. Поэтому конструкцию надо отрабатывать с учетом большого количества различных ограничений. Кроме того, надо рассматривать все судно в комплексе, с учетом подводной части.

Полученные результаты позволяют предположить, что использование наклона паруса вряд ли целесообразно на однокорпусниках. Но может, после соответствующих исследований, принести пользу на катамаранах и судах типа проа. Подтверждением этому является упомянутая выше SailRocket.

Дополнительно в дипломной работе был рассмотрен еще один интересный вопрос – влияние продольного на-

Таблица 1. Сравнение расчета с экспериментом

Угол наклона, град.	C _y		C _z
	Расчет	Эксперимент	Расчет
0	0.623	0.623	0.000
5	0.617	0.620	0.090
10	0.607	0.620	0.143
15	0.593	0.599	0.196
20	0.573	0.572	0.246
25	0.550	0.546	0.295
30	0.522	0.518	0.342
45	0.415	0.466	0.466
60	0.281	0.292	0.557
75	0.127	0.160	0.611
90	0.000	0.000	0.623

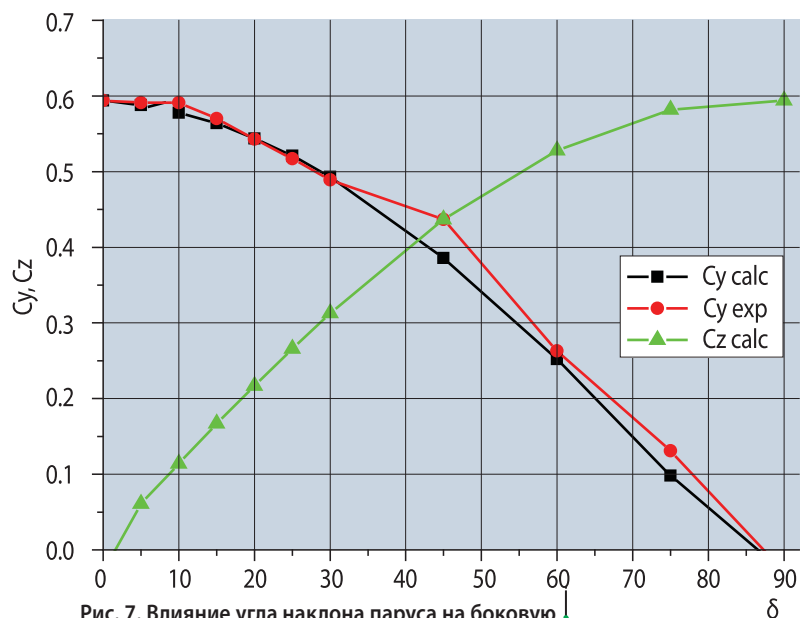
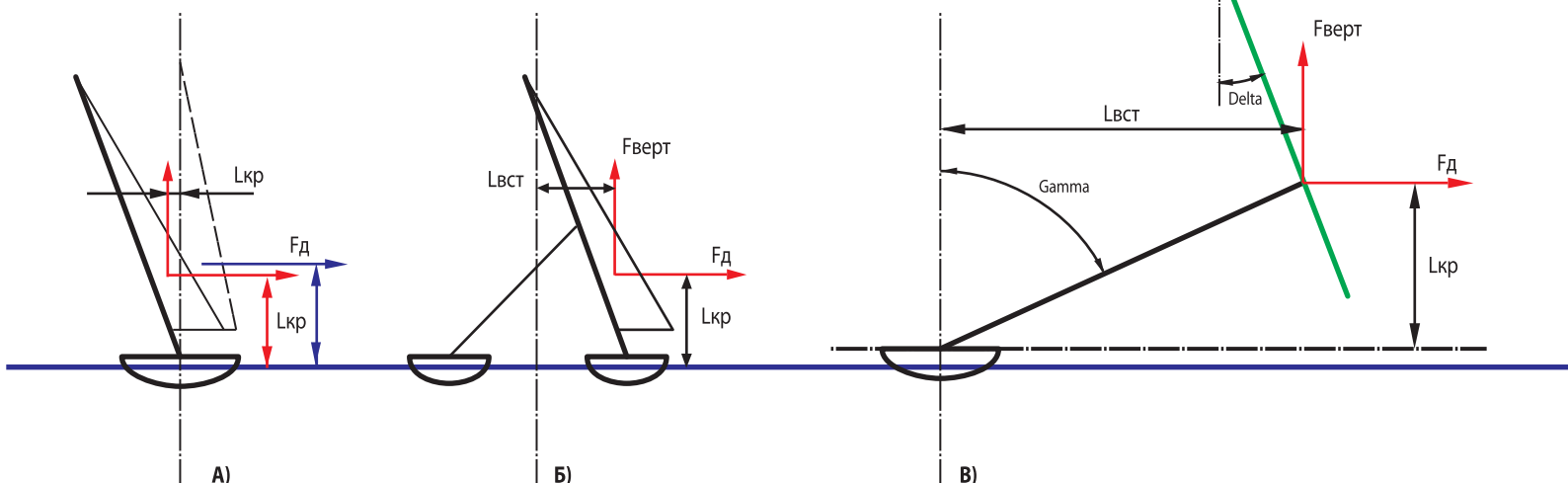


Рис. 7. Влияние угла наклона паруса на боковую и вертикальную силы. Расчет и эксперимент

Рис. 8. Несколько вариантов возможного наклона паруса



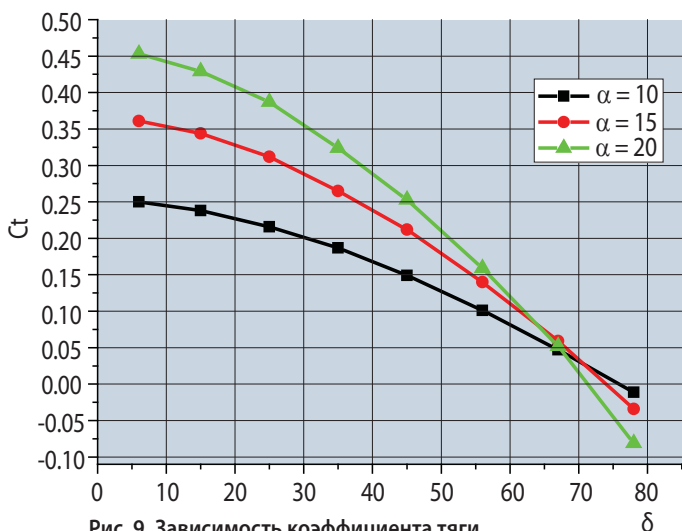


Рис. 9. Зависимость коэффициента тяги от наклона паруса при $M_{пар}=0$

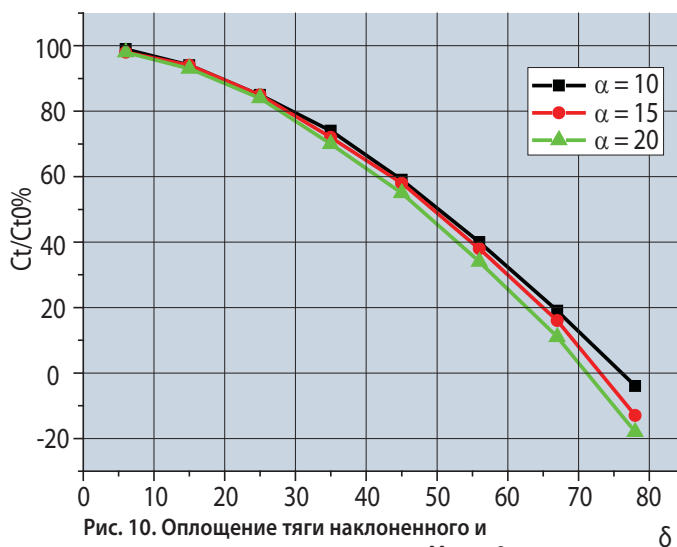


Рис. 10. Оплощение тяги наклонного и стоящего вертикально паруса при $M_{пар}=0$

клона мачты на силу, действующую на парус. Спортсмены очень часто при настройке яхт наклоняют мачту в плоскости, совпадающей с ДП. Обычно это делается для обеспечения поперечной центровки яхты. А как наклон повлияет на скорость? Для оценки этого влияния также были проведены расчеты и продувка модели паруса. Модель представляла собой плоскую пластину со скругленной передней и клиновидной задней кромками. Парус установлен под углом атаки, равном 15° . Наклон осуществлялся от -20° до 20° с шагом 5° . Наклон вперед соответствовал отрицательным значениям угла. На рисунке 12 приведена зави-

симость коэффициента силы тяги от угла наклона. Результаты показывают наличие максимума при угле наклона мачты примерно на 10° в корму. Это можно объяснить увеличением относительного удлинения паруса за счет опускания вниз шкотового угла.

Стоит заметить, что это предварительные выводы. Окончательно можно будет судить после испытания модели с имитацией мачты и гика \blacktriangleleft

В заключение хочется выразить благодарность сотруднику кафедры Теории корабля Д. А. Виццеву, оказавшему большую помощь в подготовке и обсуждении результатов эксперимента.

Таблица 2. Потери тяги при $M_{пар}=0$

Угол наклона мачты, град.	Угол наклона паруса, град.	Тяга C_t	Относит. тяга, %
Γ	δ	C_t	C_t/C_{t0}
10	78	-0.011	-4
20	67	0.047	19
30	56	0.101	40
40	45	0.149	59
50	35	0.187	74
60	25	0.216	85
70	15	0.238	94
80	6	0.250	99



Рис. 11. Вторая модель

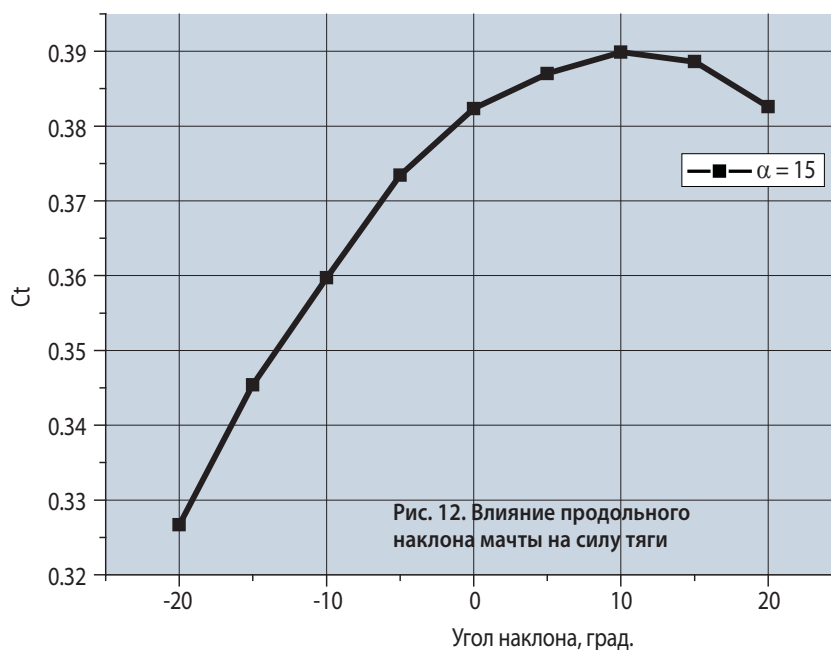


Рис. 12. Влияние продольного наклона мачты на силу тяги