

# За́зор между мачтой и парусом: добро или зло?

А. Р. Бесядовский, А. И. Васильев

**Б**ольшинство современных парусных вооружений представляют собой комплекс мачта – парус. И если парус – это крыло, на котором создается полезная сила тяги, то мачта является плохообтекаемым телом, искажающим набегающий на парус поток (рис. 1) [1]. Наиболее сильное негативное влияние мачты оказывает на подветренную сторону паруса, где возникает до 70%

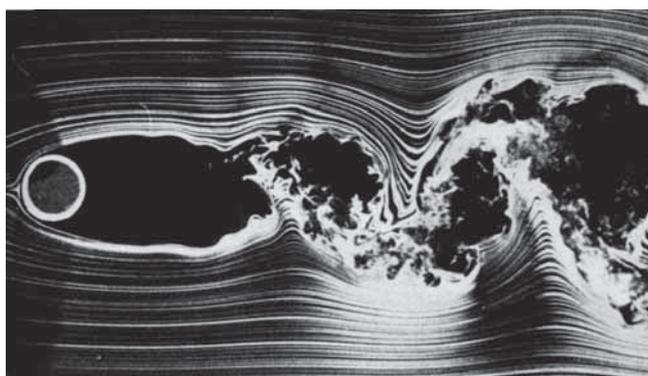


Рис. 1. Обтекание кругового цилиндра

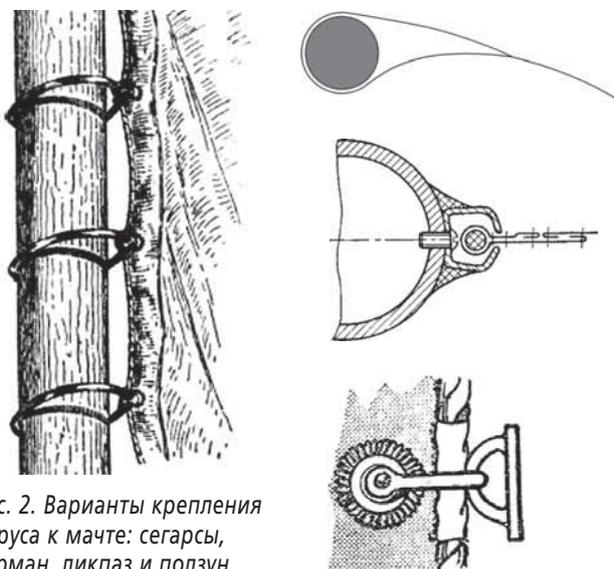
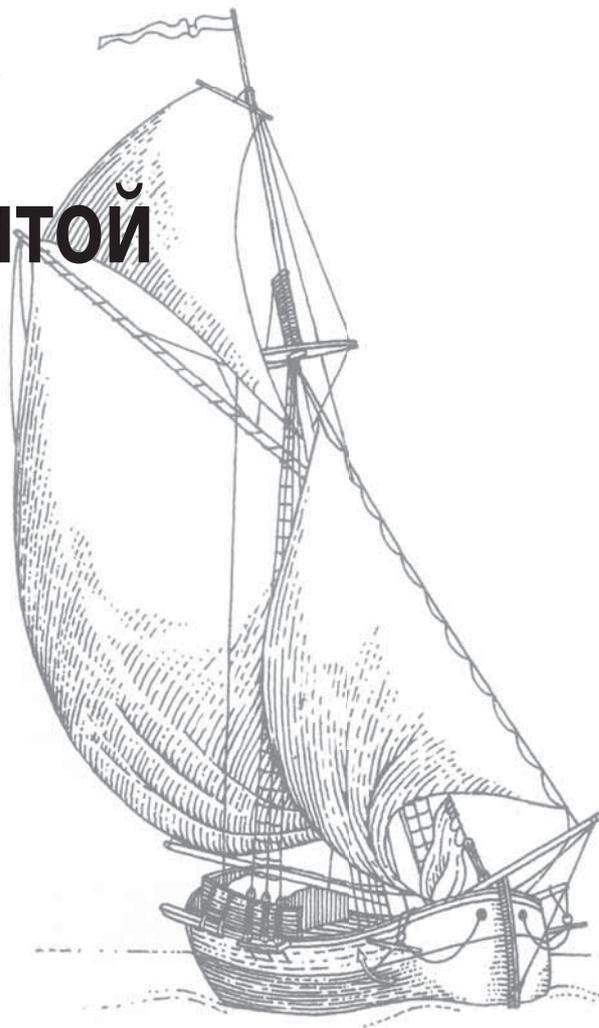


Рис. 2. Варианты крепления паруса к мачте: сегарсы, карман, ликпаз и ползун



подъемной силы. Исключением является мачта-крыло, применяемая на катамаранах и буерах. Следовательно, вопрос аэродинамического взаимодействия паруса и мачты определяет эффективность парусного вооружения в целом и ходовые качества яхты.

Крепление паруса к мачте может быть выполнено различными способами (рис. 2). В некоторых вариантах между мачтой и парусом имеется зазор, в других он отсутствует. Возникает вопрос о влиянии этого зазора – щели между мачтой и парусом – на аэродинамику системы.

Ч. Мархай в своей известной книге [2] приводит аргументы (рис. 3), на основании которых делает вывод о неблагоприятном влиянии щели между парусом и мачтой. Но недавно компания Profurl, выпускающая рангоут, провела аэродинамические исследования в Исследовательском центре архитектуры и морской индустрии (CRAIN), которые показали преимущество создания промежутка между гротом и мачтой, так называемый «эффект щели» (рис. 4).

К сожалению ни в той, ни в другой работе не приводится подробного описания эксперимента, на основании которого можно было бы принять решение об обоснованности и достоверности полученных результатов и выводов. Чтобы получить объективную информацию о влиянии щели, в аэродинамической трубе СПбГМТУ в рамках подготовки бакалаврской работы был проведен эксперимент. Продувалась модель мачты и установленного за ней паруса (рис. 5), при этом предусматривалась возможность изменения расстояния между парусом

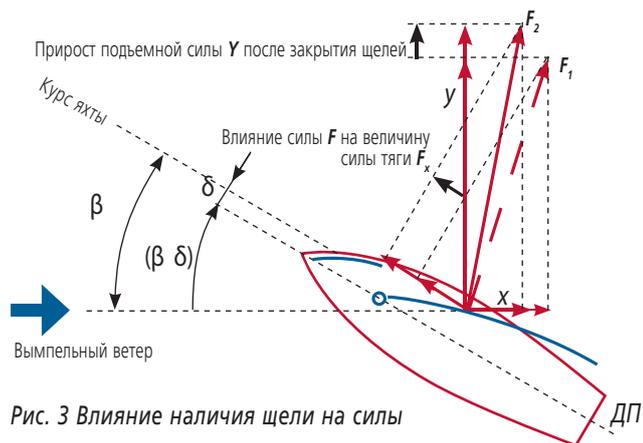


Рис. 3 Влияние наличия щели на силы

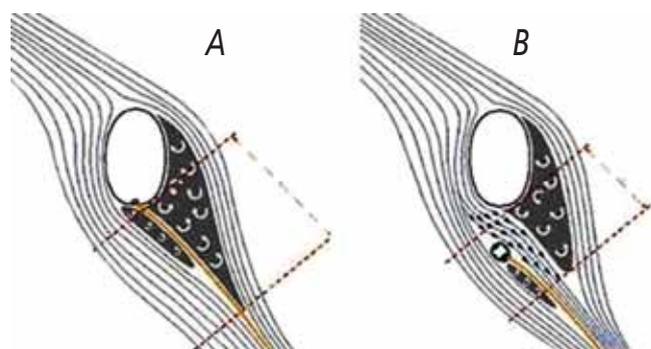


Рис. 4. Влияние щели по версии Profurl. Грот, использующий «щелевой эффект», обтекает намного более эффективно, поскольку длина зоны турбулентности на нем в первом случае (А) больше, чем во втором (В)

и мачтой и установка парусной системы под различными углами атаки и курсовыми углами к потоку.

Мачта имела круглое сечение, парус выполнен из фанеры толщиной 1.5 мм. Часть продувок выполнялась с использованием мачтового кармана, изготовленного из полиэтилена.

Основные размеры модели: хорда  $b = 0.8$  м, размах  $L = 0.8$  м, площадь  $S = 0.64$  м<sup>2</sup>, диаметр мачты  $d = 80$  мм. Стрелка погиби профиля – 10%. Для увеличения эффективного удлинения паруса он был оборудован сверху и

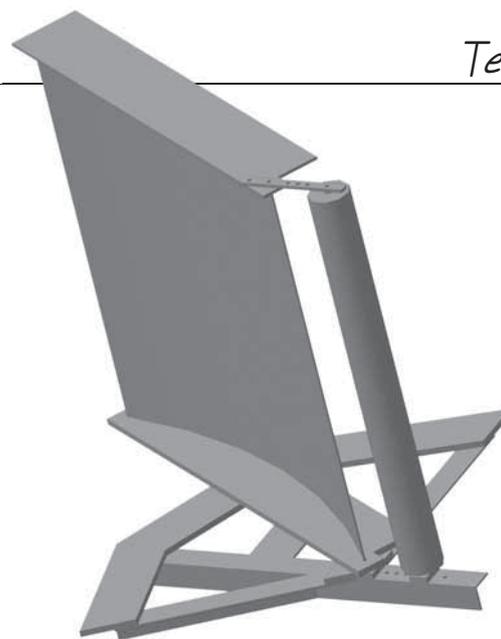


Рис. 5 Схема экспериментальной установки

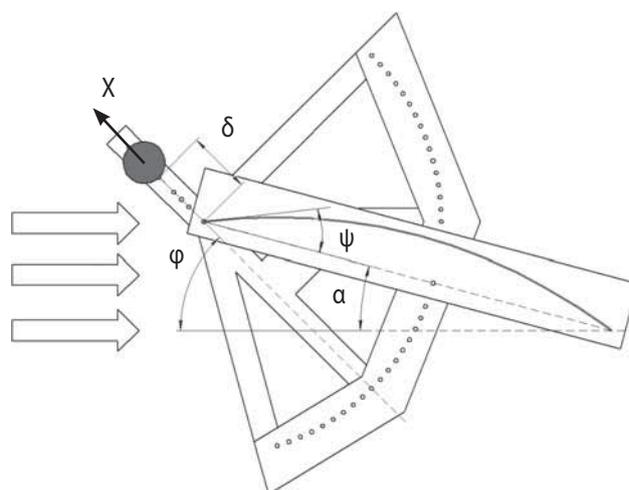


Рис. 6. Система координат, использованная в эксперименте

снизу торцевыми шайбами, выполнявшими одновременно роль элементов крепления.

Скорость потока в эксперименте составляла 10 м/с, что соответствует числу Рейнольдса  $Re = 5.5 \cdot 10^5$ . Увеличить скорость не позволяла конструкция модели.

Измерение сил выполнялось в связанной системе координат, приведенной на рис. 6. Здесь  $\alpha$  – угол атаки па-



Рис. 7. Модель в аэродинамической трубе

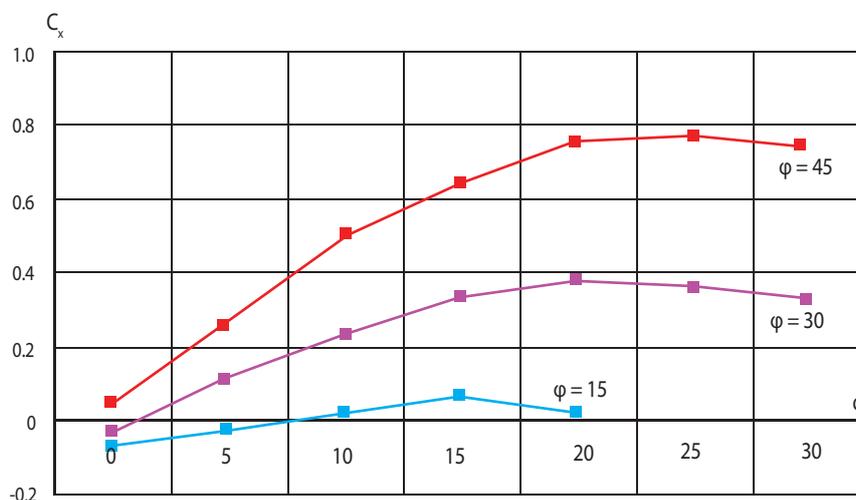
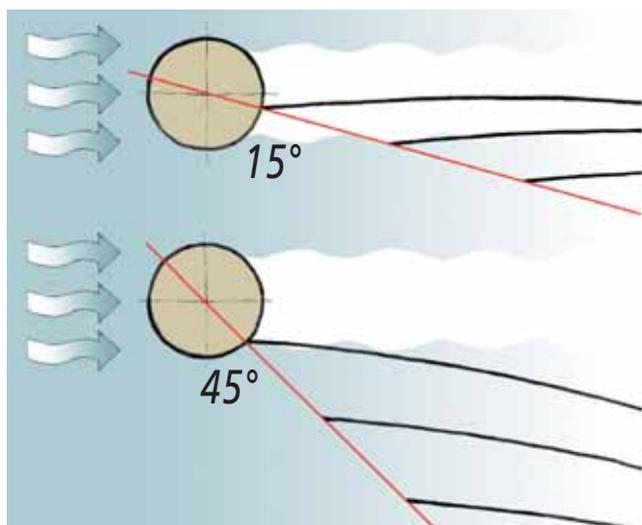


Рис. 8 Коэффициент силы тяги при отсутствии зазора



руса,  $\varphi$  – курсовой угол к направлению вымпельного ветра,  $\delta$  – зазор между мачтой и парусом. Ось  $X$  совпадает с ДП, а ось  $Y$  параллельна плоскости мидель-шпангоута. Таким образом, измеренная в эксперименте сила  $X$  является силой тяги, движущей яхту вперед. А сила  $Y$  – сила дрейфа.

Продувки проводились на курсовых углах  $\varphi = 15^\circ, 30^\circ$  и  $45^\circ$ . Угол атаки  $\alpha$  для каждого из курсовых углов менялся от 0 до  $35^\circ$  (при курсовом угле  $\varphi = 15^\circ$  соответственно до  $15^\circ$ ) с шагом  $5^\circ$ . Зазор  $\delta$  варьировался в диапазоне: 0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 и 2.0 диаметра мачты. В эксперименте также были использованы два кармана размером по хорде  $2.5d$  и  $5.0d$ .

На рис. 8 приведены графики для паруса, примыкающего к мачте без зазора. С ростом курсового угла к ветру при одном и том же угле атаки сила тяги растет. Это очевидный результат, и он связан с изменением проекции вектора полной аэродинамической силы на парусе на ось  $X$  связанной системы координат, то есть чем «полнее» лавировка, тем эффективнее работает парус даже на малых углах атаки.

Посмотрим теперь на результаты со щелью. На рис. 9 угол к ветру составляет  $15^\circ$ . На этом и последующих рисунках вихревой след за мачтой нарисован условно, для иллюстрации. Реальное его положение в эксперименте не определялось, это предполагается сделать в будущем.

Мы видим, что при углах атаки до  $15^\circ$  варианты со щелью любого размера имеют преимущество. Но при этом надо учесть, что угол наклона передней кромки модели паруса к хорде  $\psi$  (рис. 6) около  $20^\circ$ . Это значит, что в районе передней кромки поток набегающий на парус с другой стороны. Мягкий матерчатый парус в таких условиях может потерять форму. При этом визуализация потока, сделанная на другой модели при ламинарном течении, показывает увеличение местного угла атаки в районе передней кромки при малых зазорах (рис. 10). Этим можно объяснить положительное влияние щели. Надо отметить, что начиная с угла атаки в  $10^\circ$  эффективность паруса с карманом вне конкуренции.

Рассмотренный случай требует дальнейших исследо-

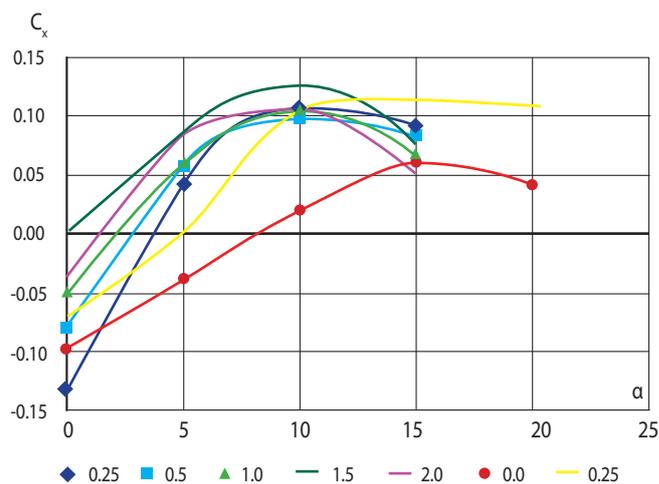


Рис. 9. Курсовой угол к вымпельному ветру  $15^\circ$

ваний, в частности, с мягкими парусами, хотя яхты, лавирующие под углом  $15^\circ$  к вымпельному ветру, еще поискать надо. Для подавляющего большинства судов это не рабочий режим.

Теперь посмотрим, что будет на больших углах. На рис. 11 – результаты для курсового угла к вымпельному ветру  $30^\circ$ . Это типичный угол для гоночных судов. Здесь до угла атаки  $20^\circ$ , когда поток набегающий «снаружи» паруса, щель дает незначительное преимущество. А дальше она только вредит. На рис. 11 построена зависимость силы тяги от величины зазора (в диаметрах мачты), который

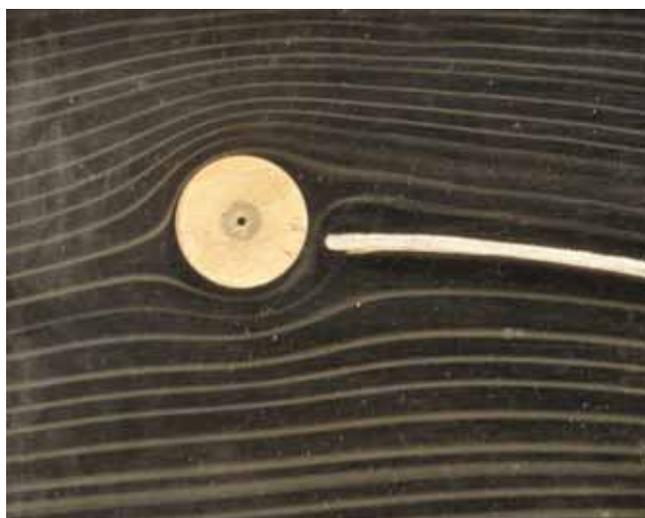


Рис. 10. Визуализация течения между мачтой и парусом. Ламинарный случай

отложен по горизонтальной оси. Последние две точки соответствуют парусу с карманом  $2.5d$  и  $5.0d$ . Графики приведены для углов атаки  $15^\circ$  и  $20^\circ$ . И опять мы видим преимущество мачтового кармана.

Кстати, результаты, полученные в эксперименте, согласуются с результатами Ч. Мархая [2]. По его данным, в районе угла атаки  $12^\circ$  мачта со щелью имеет некоторое преимущество, которое пропадает с увеличением угла.

Наконец, еще один вариант лавировки –  $45^\circ$  к вымпельному ветру. Такой угол характерен для круизных

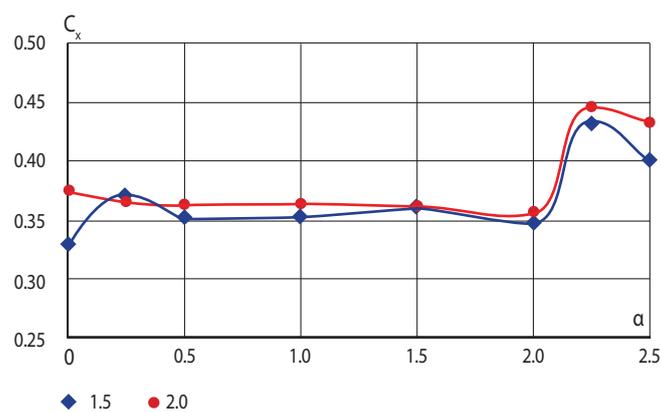
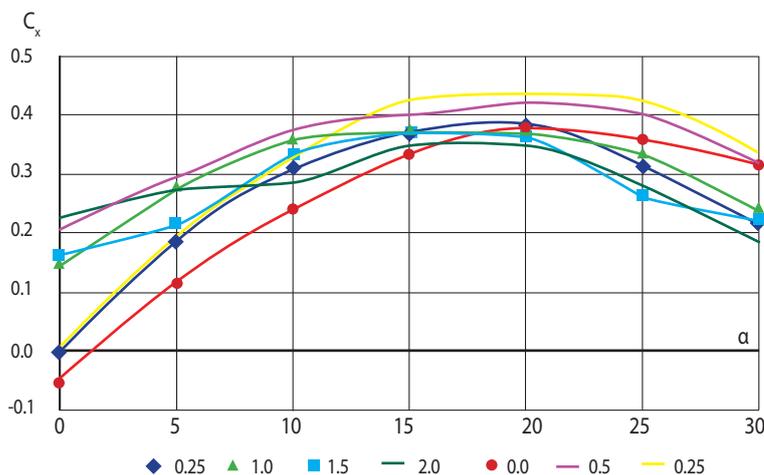


Рис. 11. Курсовой угол к вымпельному ветру 30°

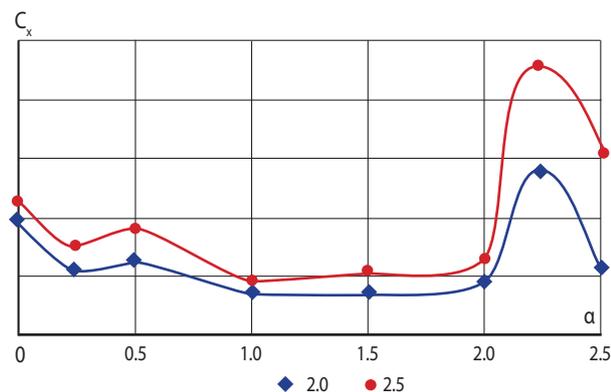
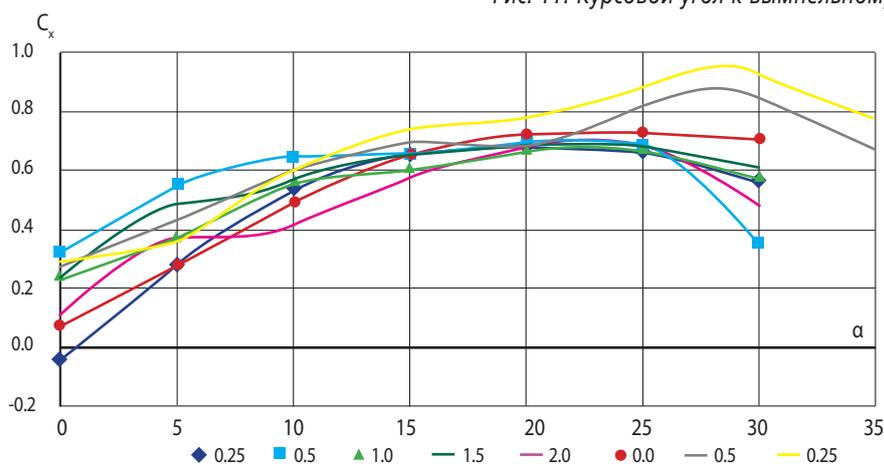


Рис. 12. Курсовой угол к вымпельному ветру 45°

яхт. Здесь практически во всем реальном диапазоне углов атаки щель приносит вред. И польза от кармана большого размера тоже не велика.

Во всех рассмотренных случаях боковая сила (сила дрейфа)  $U$  для паруса со щелью и без него меняется слабо, но в подавляющей большинстве вариантов при отсутствии щели сила дрейфа меньше. Для примера приведем график для  $\varphi = 30^\circ$ . Курсовой угол к вымпельному ветру  $45^\circ$ .

Итак, какие же выводы можно сделать на основании полученных результатов? На малых (практически недосягаемых) углах атаки и курсовых углах зазор полезен. На эксплуатационных углах – вреден. Чтобы реализовать преимущества щели, нужны паруса с жесткой передней шкаториной, сохраняющей форму при малых углах атаки, когда поток набегаает на переднюю часть паруса с подветренной стороны. Добиться этого можно или применяя очень жесткую и толстую ткань вдоль передней шкаторины, или снабжая парус жесткими короткими латами по передней шкаторине (типа паруса джонки), если это не противоречит правилам класса.

Карман на парусе, охватывающий мачту, приносит несомненную пользу. Он улучшает обтекание мачты, снижая потери, связанные с отрывом потока и улучшает об-

текание передней части паруса, на которой реализуется основная полезная нагрузка. Но делать этот карман большого размера не следует, т.к. при этом он утрачивает свои полезные свойства.

Следует сказать, что все сделанные выводы касаются рассмотренной модели и связаны с ее особенностями. Можно предположить, что для мачты другого сечения численные значения изменятся. Но оснований для серьезных качественных различий не видно. Основным влияющим фактором является жесткость паруса, используемого в эксперименте. Продувки модели из мягкого материала позволят получить более реалистичный диапазон углов, в которых щель может быть полезна или полностью исключают возможность ее использования. Для прогнозов серьезный интерес представляет анализ картины течения в щели и поля скоростей и давлений в этой области. Это – направление дальнейших исследований, которое предполагается реализовать с помощью физического и численного эксперимента.

В заключение авторы хотят выразить благодарность сотруднику ЦНИИ им. акад. Крылова Е. Б. Карулину, который оказал неоценимую помощь в создании экспериментальной установки и анализе полученных результатов 

### Литература

1. Ван-Дейк М. Альбом течений жидкости и газа: Альбом-справочник. – М. : Мир, 1986.
2. Мархай Ч. Теория плавания под парусами. – М. : Физкультура и спорт, 1970.