

# ДЕМПФИРУЮЩИЕ МОМЕНТЫ ГОНОЧНОЙ ЯХТЫ

Сергей Елистратов, Санкт-Петербург

Управление яхтой, как писал П. Эльвстрем, — настоящее искусство, но основанное на точной науке, имя которой — гидродинамика.

...Вот пришел порыв ветра или “накатила” волна, но яхта еще продолжает движение в прежнем режиме, а у гонщика есть лишь считанные мгновения, чтобы принять решение и отреагировать на изменение ветро-волновой обстановки. Эти мгновения предоставляют гонщику инерционные характеристики системы “яхта-экипаж”, определению которых и посвящена настоящая статья.

Округлые обводы яхты являются классическими, поэтому полученные ниже данные могут быть использованы для подобных яхт других размерений, но при одном условии — вес команды должен быть сопоставим с весом яхты.

## Постановка задачи

Силы и моменты, возникающие на разных частях яхты при ее движении, имеют гидростатическую, гидродинамическую и аэродинамическую природу. Яхта в условиях ветро-волнового волнения движется за счет отбрасывания воздушных масс парусом с ускорением по криволинейной траектории, что вызывает дополнительные силы и моменты инерционной природы.

В расчетах при проектировании яхт обычно рассматривают квазистационарный процесс без учета инерционных составляющих. Результаты натурных испытаний позволяют математически описать движение яхты как материальной точки, имеющей шесть степеней свободы, и в дальнейшем выделить инерционные составляющие в численном виде.

Из курсов движения яхты представляет интерес в первую очередь “гоночный бейдевинд”. Гидродинамические силы

обычно сводят к главным векторам и моментам позиционных сил на парусе, корпусе и шверте. Расчеты для швертбота-двойки с округлыми обводами выполнены на основе данных натурных испытаний: вес яхты в полном грузу  $D = 320$  кг; удлинение паруса  $\lambda_{\text{п}} = 4.0$ ; удлинение шверта  $\lambda_{\text{шв}} = 2.0$  и значений, приведенных в таблице.

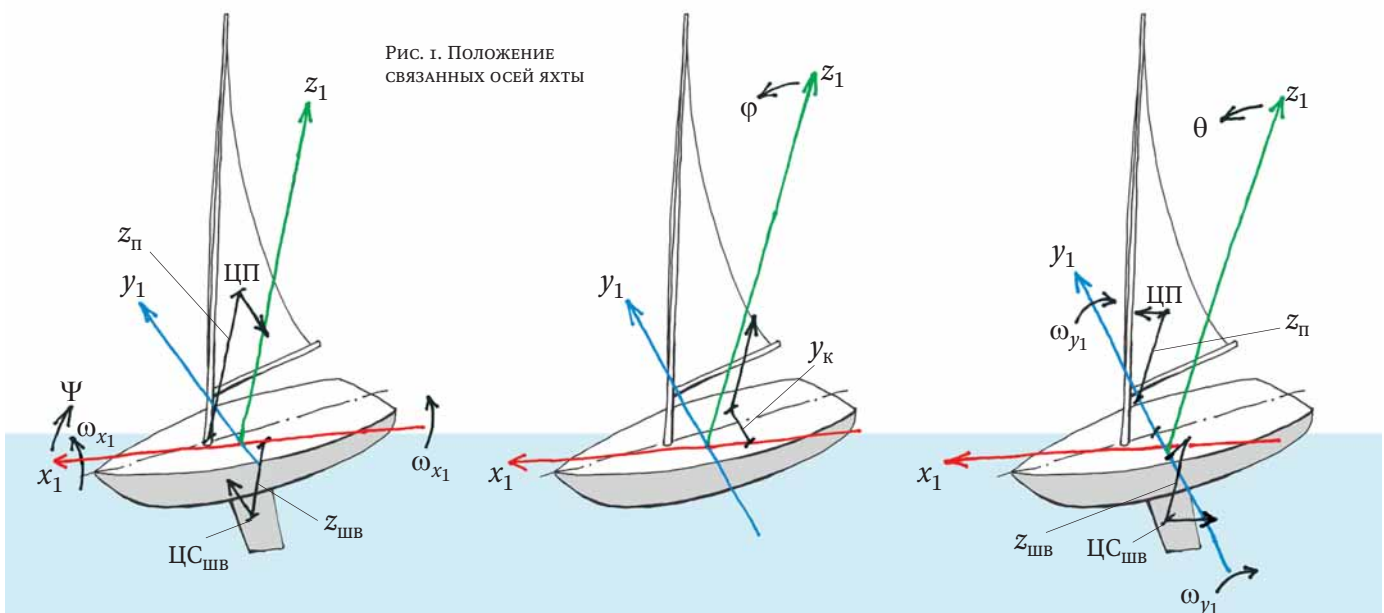
При этом следует отметить, что инерционные аэрогидродинамические силы и моменты дополняются демпфирующими силами и моментами, возникающими как от изменения внешних условий (“ветер-волна”), так и от действий экипажа.

Основная особенность движения швертбота заключается в том, что главные центральные оси инерции  $\Theta_{\text{ц}}$ ,  $\Psi_{\text{ц}}$  не совпадают с осями симметрии яхты, и нестационарные характеристики движения приобретают превалирующие значения, так как достигают величин, соизмеримых с позиционными моментами (рис. 1).

## Моменты демпфирования яхты

При движении “несущие” (в смысле образования аэро- и гидродинамических сил) части яхты — парус, корпус, шверт и руль — создают инерционные демпфирующие моменты, которые препятствуют изменению положения яхты в пространстве как по курсу, крену и дифференту, так и по угловым скоростям. Это так называемые моменты демпфирования  $M_{\text{д}}$ , или моменты противодействия изменения траектории и режима движения яхты.

При демпфировании возникают пары сил: “парус—шверт”, “парус—корпус”, “корпус—шверт”. Моменты демпфирования  $M_{\text{д}}$  разделяют на моменты устойчивости  $M_{\text{д.у}}$  по углам положения в пространстве, вращения по угловым



скоростям  $M_{д.вр}$  и перекрестных связей  $M_{д.п.св}$ , когда угловая скорость влияет на угловое перемещение, и наоборот. Прямое определение  $M_{д}$  путем выделения приращения векторов скорости вымпельного ветра и скорости хода яхты [метод И. Остославского (1)] затруднено в силу сложности определения координат приложения сил  $x_1 y_1 z_1$ .

На рис. 2 показаны демпфирующие силы, возникающие на частях яхты: парусе-шверте и на корпусе по крену  $\theta_1$ .

Заметим, что силы представлены в виде сосредоточенных, приложенных в центрах давления. Демпфирующие силы корпуса по дифференту  $\Psi_1$  малы, так как стараются нос яхты для встречи с волной держать приподнятым.

### Решение задачи

Для определения  $M_{д}$  решают уравнения моментов движения яхты как материальной точки:

$$M_{д} = f \left( \frac{1}{V_{якт}^2}; \frac{1}{F_{хшв}}; \frac{1}{F_{ушв}}; F_{х}; F_{у}; D; \theta; \psi; I_{x_1}; I_{y_1}; \omega'_{x_1}; \omega'_{y_1}; x; y; z \right).$$

Решение уравнения (1) для трех уровней скорости ветра (см. табл.) и сокращение числа  $M_{д}$  путем введения в расчет значений  $m_{д}$  из работ С. Белоцерковского для крыльев, соответствующих геометрической конфигурации паруса и шверта при малых скоростях полета позволили в численном виде получить коэффициенты демпфирующих моментов:

$$m_{х д.п} = 0.002; \quad m_{х д.шв} = -0.01;$$

$$m_{у д.п} = 0.02; \quad m_{у д.шв} = -0.04; \quad m_{у д.к} = -0.01.$$

Окончательно  $M_{д}$  относительно осей можно представить в виде

$$M_{х1д} = m_{y_1 д.п} \frac{\rho V_{в}^2}{2} S_{п} z_{п} + m_{y_1 д.шв} \frac{\rho V_{якт}^2}{2} S_{шв} z_{шв} + m_{y_1 д.к} \frac{\rho V_{якт}^2}{2} S_{к} y_{к};$$

$$M_{y_1д} = m_{x_1 д.п} \frac{\rho V_{в}^2}{2} S_{п} z_{п} + m_{x_1 д.шв} \frac{\rho V_{якт}^2}{2} S_{шв} z_{шв},$$

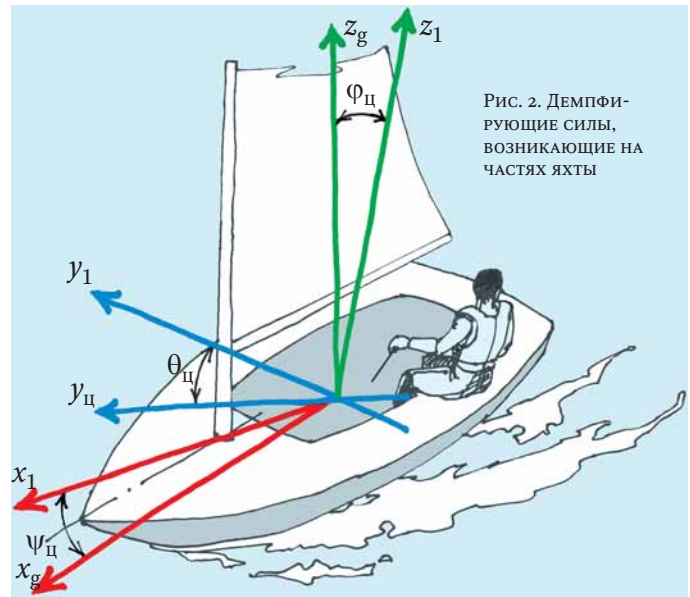
где  $\rho$  и  $\rho_{в}$  — плотность воздуха и воды соответственно;  $V_{в}$  — скорость вымпельного ветра;  $z_{п}$ ;  $z_{шв}$ ;  $y_{к}$ ;  $x_{п}$ ;  $x_{шв}$  — координаты приложения суммарных сил на парусе, шверте и корпусе.

Отметим, что полученные коэффициенты демпфирующих моментов представляют суммарные силы и моменты как реакцию на действие ветра  $V_{ист}$  и волны  $\Psi$ ;  $\Theta$ . Перекрестные вращательные производные в большей степени влияют на смену траектории движения яхты и, в конечном итоге, ведут к образованию новой равновесной системы позиционных сил.

Угловые скорости и ускорения  $\omega'_x$ ;  $\omega'_y$  возникают при ходе яхты на волнении. Орбитальное поверхностное течение воды, знакопеременное по направлению (гребень, ложбина), вызывает демпфирующие силы и моменты, которые совместно с аэрогидродинамическими силами и моментами действуют на части яхты. Так, в частности, происходит “отвал” топа мачты под ветер — парус как бы скидывает лишнюю нагрузку, отыгрывая каждую волну (рис. 3).

### Заключение

Значения ряда демпфирующих моментов приведены в работах, посвященных исследованию динамики движения судна на волнении. Так, производная  $m_{y \Theta}$  коэффициента  $M_{д}$  может быть представлена через коэффициенты “Джим-крак” [3]. Известна работа, в которой через величины вращательных производных был оценен запас “поперечной



### ТАБЛИЦА

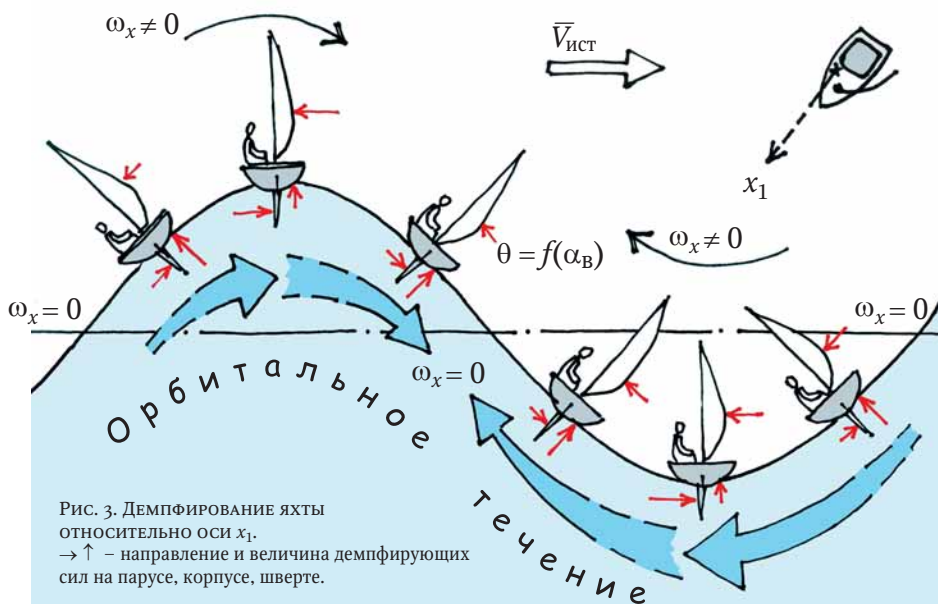
Данные натуральных испытаний швертбота-двойки и расчетные характеристики

Характеристика	Значения при		
	$V_{ист} \leq 3;$ $V_{якт} \leq 1,5$	$V_{ист} \leq 6;$ $V_{якт} \leq 3$	$V_{ист} \leq 9;$ $V_{якт} \leq 4,5$
1-я подвижная система координат $x_g y_g z_g$			
Продольная сила паруса $F_{хп}$ , кг	8.5	14.0	19.45
Поперечная сила паруса $F_{yp}$ , кг	15.1	34.4	55.7
Поперечная сила шверта $F_{yшв}$ , кг	4.5	16.7	54.5
Продольная сила шверта $F_{хшв}$ , кг	1.0	3.5	10.0
Связанная система координат $x_1 y_1 z_1$			
Угловая скорость $\omega_{x_1}$ относительно оси $x_1$	0.02	0.04	0.06
Угловая скорость $\omega_{y_1}$ относительно оси $y_1$	0.01	0.03	0.05
Суммарный момент инерции $I_{x_1}$ относительно оси $x_1$	7.5	13.5	23.0
Суммарный момент инерции $I_{y_1}$ относительно оси $y_1$	78.0	86.0	114.0
по крену $\theta_{ц}$	50°	46°	35°
по дифференту $\Psi_{ц}$	32°	30°	23°
по курсу $\phi_{ц}$	28°	29°	32°

стабилизации” корпусов “12-метрового” класса [4]. Исследование О. Шипукова [5] показали, что “демпфирование бортовой качки судна с киями и без них весьма сложным образом зависит от скорости хода”.

Движение яхты происходит в нестационарной автоколебательной системе “воздух—вода”, когда ветер является начальной причиной волнения, причем часто остаточное, “вчерашнее”, волнение накладывается на новое, “молодое”, зачастую другого направления, или начинают “работать” бриз и прибрежные течения. Во всех случаях яхта движется, то ускоряя ход, то теряя его, т. е всегда присутствует  $M_{д}$ . Значение  $M_{д}$  соизмеримо с основными аэрогидродинамическими силами и моментами, что сказывается в первую очередь на динамической остойчивости яхты. С ростом скорости ветра  $V_{ист}$  аэродинамические силы на парусе растут быстрее, чем гидродинамические силы на шверте и корпусе.

По оценкам автора, для швертбота с округлыми обводами запас динамической остойчивости исчерпывается при  $V_{ист} \leq 25$  м/с.



В гоночных условиях, т. е. при тактической борьбе на дистанции с противником и постоянном изменении ветро-волновой обстановки, гонщик «ведет» яхту автоматически, он ее «чувствует», все время оценивая запас динамической устойчивости как во времени, так и при маневрах.

Возвращаясь к рис. 1, отметим практическую сторону вопроса. Часто в процессе гонок, особенно с пересадкой, наблюдается такой вроде бы парадокс — один и тот же гонщик на разных лодках идет круче всех. Объяснение этому «парадоксу» заключается в том, что относительно главных

центральных осей инерции, прежде всего оси  $z_1$ , гонщик интуитивно располагает так, что не создает дополнительных моментов, увеличивающих дрейф.

Проектирование яхты, выполненное именно на основе натуральных испытаний прототипа, а не путем слепого перебора компьютерных вариантов, позволяет создать лодку, которая не будет «тупой на парусах». ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Остославский И.* Аэродинамика самолета. М., Оборонгиз, 1957.
2. *Белоцерковский С., Скрипач Б.* Аэродинамические производные летательного аппарата и крыла при дозвуковых скоростях. М., 1975.
3. *Киселев Ю.* Методы изучения ходовых качеств гоночных яхт. Материалы по обмену опытом. — Тр. НТО им. А. Н. Крылова, 1963, вып. 52.
4. *Milgram H.* Sailing Vessel and sails // Rep. in fluid mech, 1972, № 4.
5. *Шипуков О.* Экспериментальное исследование демпирования бортовой качки скуловыми киллями: Автореферат. Л., ЛКИ, 1974.




**С-Пб ул. Бабушкина, 119** Тел.: (812)973-25-91; (812)715-17-57,  
 для оптовых покупателей (812)715-35-08  
[www.astron-marine.ru](http://www.astron-marine.ru), [Alexashi@hotmail.ru](mailto:Alexashi@hotmail.ru) [Info@astron-marine.ru](mailto:Info@astron-marine.ru)

**Производим и продаем:**  
 Катера алюминиевые "Корвет-600WA" (New! 2006 год), "Корвет-500НТ" (New! 2005 год),  
 и катер "Корвет-500" (New! 2005 год).  
 Стеклопластиковые катера "Стрелка" и "Новая Ладога-М" (New! 2005 год).  
 Высылаем каталог новых моделей (2006 года). Работаем с дилерами.

**Продаем и даем гарантию на:**  
 Лодочные моторы:  
 Yamaha, Honda, Mercury, Suzuki, Jonson  
 Мало б/у и новых, от 2 до 250 л/с,  
 Надувные лодки: "Мнев",  
 катера б/у, прицепы для катеров,  
 комплектующие по каталогу "Маритим",  
 тросы, винты, навигаторы и эхолоты.  
 Тюнинг катеров, продажа в кредит,  
 предпродажная подготовка и установка двигателя,  
 обкатка техники,  
 ремонт, сервисное обслуживание двигателей,  
 изготовление "релингов" для катеров.

**катер Пегас**  
 от 220 000 р



Эйрслот-6, 4x2, 2м  
 ПЛМ от 70 до 250 л.с.

А В И А Ц И О Н Н Ы Е Т Е Х Н О Л О Г И И А В И А Ц И О Н Н Ы Й П О Д Х О Д

**Казанский Судостроительный Завод**

[www.tatscan.ru](http://www.tatscan.ru)

**Разработка и производство изделий из стеклокомполитов (катеров, лодок, модульных причалов)**

т. (843) 512-00-16  
 516-82-07, 516-82-08  
[www.kazanboats.ru](http://www.kazanboats.ru)

**катер Пегас**  
 от 150 000 р



Эйрслот-6, 4x2, 2м  
 ПЛМ от 70 до 250 л.с.

**Диана 1-01**  
 13 990 р



тримаран 3x1м

**Казанка 5М4**  
 от 150 000 р



Каютная модификация Казанки 5М4

**Диана 2-01**  
 от 25 880 р



тримаран 4x4, 1м

**Понтон**  
 26 910 р



понтон для модульных причалов 2,7x1,8 м

д о с т а в к а п о Р о с с и и