



# Оценка сил, действующих на надводную часть судна

Александр Бесядовский

## Общие положения

Сопротивление надводной части судна складывается из сопротивления корпуса, палубного оборудования и экипажа. В зависимости от архитектуры и размеров судна соотношение этих слагаемых может варьироваться. Сопротивление надводной части корпуса может достигать 10% и более общего сопротивления судна, но с ростом скорости это соотношение быстро уменьшается. Подобная картина наблюдается до перехода к глиссированию, когда соотношение скачком растет, после чего опять начинает уменьшаться до некоторых пределов. Плотность воздуха в 800 раз меньше плотности воды, но скорость воздушного потока, вызванного движением судна, плюс скорость ветра в некоторых случаях могут оказаться в несколько (примерно в 10) раз больше, чем скорость в воде при водоизмещающем режиме. А поскольку воздействие потока пропорционально квадрату скорости, можно получить довольно большие значения воздушной составляющей сопротивления. Кроме того,

площадь надводной части судна зачастую больше, чем площадь корпуса, погруженная в воду, особенно у самых быстроходных судов с динамическим поддержанием.

## Силы и моменты

Взглянем на проблему несколько шире. Воздействие набегающего воздушного потока на надводную часть корпуса может быть описано некоторой равнодействующей силой. Нужно помнить, что эта сила, как любой вектор, определяется величиной, направлением и точкой приложения. Точка приложения в механике жидкости и газа часто называется центром давления, но в судостроении используется и другой термин: центр парусности. Эту силу можно разложить на три проекции в декартовой системе координат (рис.1). При этом проекция силы на ось  $X$  является силой сопротивления, и ее учет необходим при выборе силовой установки в процессе проектирования. Кроме того, эта сила создает продольный (дифференцирующий) момент, который особенно важно учитывать при

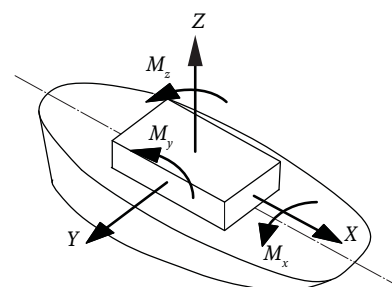


Рис. 1. Проекция аэродинамической силы и момента, действующих на надводную часть судна

проектировании легких быстроходных спортивных судов, поскольку он совместно с другими возмущениями – от волнения, неустойчивости хода и т.д. – может привести к резкому аварийному взлету судна, как это произошло, например, с «Синей птицей» Дональда Кемпбелла.

Проекция силы на ось  $Y$  (горизонтальную) приводит к дрейфу судна, который особенно неприятен при малой скорости хода, поскольку угол дрейфа зависит именно от соотношения продольной и поперечной проекции скорости. Эта проекция силы

Таблица 1

## Расчетные формулы

1. Аэродинамическая сила

$$\vec{R} = \vec{C}_R \frac{\rho V^2}{2} S$$

2. Аэродинамический момент

$$\vec{M} = \vec{C}_M \frac{\rho V^2}{2} SL$$

3. Сопротивление трения плоской пластины при ламинарном режиме

$$C_M = \frac{1,328}{\sqrt{Re}}$$

4. Формула Прандтля-Шлихтинга для сопротивления трения плоской пластины при турбулентном режиме

$$C_T = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}}$$

5. Формула Фолкнера для сопротивления трения плоской пластины при турбулентном режиме

$$C_T = 0,0307 Re^{\frac{1}{7}}$$

6. Коэффициент  $C_x$  для пластины, стоящей поперек потока

$$1,2 - 1,28$$

7. Коэффициент поперечной силы для крыла малого удлинения.

$$C_Y = \frac{\pi}{2} \lambda \alpha$$

8. Удлинение корпуса

$$\lambda = \frac{H^2}{S}$$

9. Коэффициент продольного момента для крыла малого удлинения.

$$m_Z = \frac{\pi}{4} \lambda \alpha$$

10. Положение центра давления

$$X_D = \frac{m_Z}{C_Y} L$$

11.  $C_x$  при продольном обтекании овальных форм

$$0,6$$

12.  $C_x$  при поперечном обтекании овальных форм

$$1,6$$

13.  $C_x$  при продольном обтекании прямоугольника со скругленными углами (удлинение 2)

$$0,4 - 1,4$$

14.  $C_x$  при поперечном обтекании прямоугольника со скругленными углами (удлинение 2)

$$1,6 - 2,2$$

15. Коэффициент  $C_x$  для цилиндров

$$1,2$$

16. Коэффициент  $C_x$  для тросов при  $Re < 2 \cdot 10^4$ 

$$1,1 - 1,35$$

17. Коэффициент  $C_x$  для тросов при  $Re > 4 \cdot 10^4$ 

$$1,0 - 1,1$$

18. Величина  $C_x$  скругленного цилиндра малого удлинения

$$0,6$$

19.  $C_x$  надводной части судна

$$C_x = A_0 + A_1 \frac{2S_L}{L^2} + A_2 \frac{2S_T}{B^2} + A_3 \frac{2L}{B} + A_4 \frac{F}{L} + A_5 \frac{c}{L} + A_6 M$$

приводит также к появлению кренящего момента, вызывающего, естественно, крен судна. Кроме того, она может вызвать приводящий или уваливающий момент, влияющий на управляемость судна. Его необходимо учитывать при проектировании рулевого и подруливающих устройств.

Вертикальная составляющая силы (проекция на ось  $Z$ ) обычно не оказывает какого-либо заметного влияния на тихоходные суда и суда средних и больших размеров. Но для спортивных судов ее учет может иметь значение, поскольку она совместно с продольной составляющей создает дифферентующий момент, о котором говорилось выше.

Таким образом, при проектировании, да и в процессе эксплуатации судна желательно иметь представление о величине проекций силы и точке ее приложения.

Надо сразу поставить точки над «i». Точный расчет этих параметров возможен только с применением сложных математических моделей, численного и физического эксперимента. Это требует привлечения специалистов-гидроаэродинамиков и больших трудовых, временных и финансовых затрат. Выполнить его в рамках небольшого конструкторского бюро, тем более, при самостоятельной постройке катера, невозможно, да и не нужно. Подобные задачи обычно решают в исследовательских целях, когда стоит вопрос о поиске новых направлений в проектировании или если поставлена цель создать уникальное по своим свойствам либо рекордное судно. Здесь мы будем говорить об оценке аэродинамической силы и о тех параметрах, которые влияют на ее величину.

Формулы для силы и момента приведены в табл. 1.

При этом приняты следующие обозначения:  $R$  – вектор силы (или ее проекция) (в ньютонах);  $C_R$  – коэффициент соответствующей проекции силы (безразмерная величина);  $\rho$  – плотность среды, в которой происходит движение, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – характерная скорость, часто – скорость движения судна или скорость набегающего потока, м/с;  $S$  – характерная площадь, м<sup>2</sup>;  $L$  – характерный линейный размер, м.

Надо сказать, что в качестве ха-

рактерной площади и характерного линейного размера может быть выбрано все что угодно, имеющее соответствующую размерность. Но обычно эти величины зависят от того, при каких условиях были получены значения  $C_R$  и  $C_M$ .

Можно отметить, что почти вся прикладная и во многом теоретическая гидромеханика занимается тем, что решает задачу правильного и достоверного определения этих двух величин –  $C_R$  и  $C_M$ . К сожалению, не всегда успешно.

Начнем с воздушного сопротив-

ления. От чего оно зависит? И зачем нам нужно знать его величину?

Сопротивление, которое испытывает тело при движении в вязкой среде, может быть представлено в виде двух, как минимум, составляющих: сопротивления формы и сопротивления трения. На каждую точку поверхности движущегося тела действует давление. Его можно разложить на две проекции. Одна действует по нормали к поверхности и называется часто просто давлением, а вторая действует по касательной и называется касательным напряжением.

Если проинтегрировать нормальную составляющую по поверхности тела, то мы получим величину, которая называется сопротивлением формы, поскольку она зависит в первую очередь именно от формы тела. Если мы вычислим интеграл от касательных напряжений по поверхности тела, то определим величину сопротивления трения.

### Сопротивление трения

Нужно сказать, что определение величины сопротивления трения для тел корабельной формы – весьма трудная задача. Обычно для ее оценки используют метод эквивалентной пластины. Суть его состоит в том, что надводная (в нашем случае) часть судна рассматривается как пластина длиной, соответствующей длине судна и площадью, равной площади смоченной поверхности судна (в нашем случае – «смоченной» воздухом).

Для подобной пластины существуют аппроксимационные зависимости, позволяющие рассчитать ее сопротивление при различных режимах движения – ламинарном и турбулентном. Они также приведены в табл. 1.

При ламинарном режиме движения можно использовать формулу (3). Здесь в качестве характерного линейного размера взята длина судна.

При турбулентном режиме ( $Re > 10^6$ ) используют формулу Прандтля–Шлихтинга (4) или формулу Фолкнера (5). Здесь  $Re = \frac{VL}{\nu}$  – число Рейнольдса,  $\nu$  – характерная скорость, м/с;  $L$  – характерный линейный размер, м;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/c$ .

Ошибка, допускаемая при расчете сопротивления трения, не так страшна, поскольку сопротивление трения для тел корабельных обводов значительно меньше сопротивления формы, хотя это утверждение справедливо не для всех случаев.

### Сопротивление формы. Корпус

Теперь перейдем к методам оценки сил, связанных с формой судна.

Итак, начнем с корпуса. Рассмотрим продольную составляющую – силу сопротивления формы.

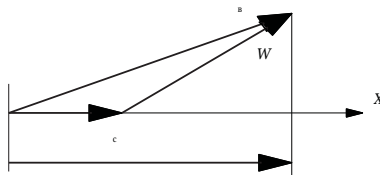
Чтобы приблизительно рассчитать ее величину с запасом в безопасную (большую) сторону, можно считать корпус пластиной, стоящей поперек потока и имеющей площадь, равную площади надводной части мидель-шпангоута.

Коэффициент сопротивления для пластины, обтекаемой подобным образом, можно принять равным приведенному в 6-й строчке табл. 1.

Полная составляющая этой проекции силы будет определяться по формуле (1).

Точкой приложения силы можно считать центр тяжести площади надводной части мидель-шпангоута. В качестве скорости при определении силы берем скорость набегающего потока (вымпельного ветра)  $V$  (скорость ветра  $W$  + скорость судна  $C$ ). Следует отметить, что ветер – это тоже векторная величина. Поэтому в

Рис. 2. Вымпельный ветер и его учет при определении сил



расчете надо учитывать его направление, если он дует откуда-то сбоку, и брать проекцию скорости на ось  $X$  (рис.2). Кроме того, следует учитывать и знак – он же может дуть и с кормы, т.е. быть попутным. В качестве характерной площади используют упомянутую выше площадь мидель-шпангоута.

При расчете боковой силы можно использовать тот же прием – считать силу на пластине, поставленной поперек потока и имеющей форму в плане и размеры, соответствующие надводной части корпуса. Такой подход дает удовлетворительные результаты при направлении набегающего потока на углах от  $30-40^\circ$  до  $140-150^\circ$  к диаметральной плоскости. При этом коэффициент  $C_y$  может быть взят равным  $C_x$  из строки 6-й в табл. 1 и точка приложения силы определяется аналогичным образом. В качестве характерной площади берем площадь проекции на ДП.

При меньших углах можно рас-

считывать корпус как крыло малого удлинения, а угол между ДП и скоростью набегающего потока – как угол атаки подобного крыла. Тогда, если пренебречь влиянием толщины, для расчета поперечной составляющей силы величину коэффициента  $C_y$  в этом диапазоне углов можно приближенно определить по формуле (7) из табл. 1. Здесь  $\alpha$  – угол атаки, радианы;  $\lambda$  – удлинение корпуса.

Для корпусов, форма которых близка к прямоугольной, удлинение – это отношение средней высоты борта к средней длине вдоль ватерлинии. Для корпусов сложной формы можно воспользоваться формулой (8), где  $H$  – средняя высота надводного борта,  $S$  – площадь проекции на ДП.

В этом случае для определения коэффициента уваливающего продольного момента можно воспользоваться формулой (9), а продольное положение центра давления в метрах определить по формуле (10). Здесь  $L$  – средняя длина корпуса.

Иллюстрацией справедливости подобного подхода могут служить результаты экспериментальных исследований корпуса фрегата, приведенные в [2]. На рис. 3 видна зона, где расчеты должны выполняться по формулам (7)–(10) и зона действия формулы (1) с коэффициентом (6).

### Надстройки

Перейдем теперь к надстройкам и палубному оборудованию. Для оценки сил можно приближенно рассматривать каждый элемент в отдельности и суммировать их. При таком подходе ошибка в расчетах определяется, в частности, тем, что не учитывается взаимное влияние отдельных элементов друг на друга.

Для надстроек и рубок, имеющих форму, близкую к параллелепипеду, что характерно для тихоходных судов, может быть использован описанный выше прием замены их пластиной, стоящей поперек потока (6), с использованием в расчете величины соответствующей проекции скорости. Но суда, спроектированные для движения с большими скоростями, обычно имеют плавные очертания надстроек. При моделировании подобных форм можно взять в качестве коэффициента  $C_x$  для продольного

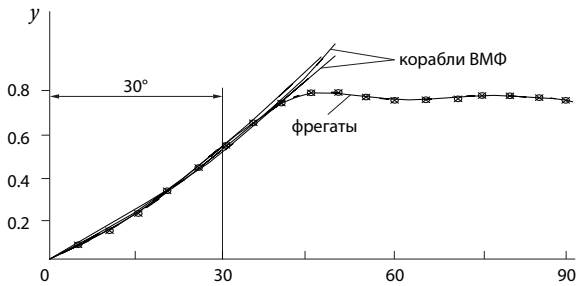


Рис. 3. Результаты круговых продувок корпусов судов

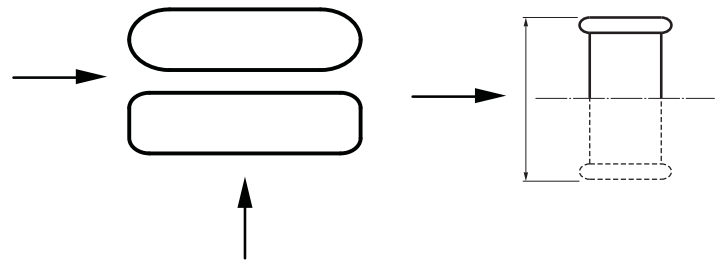


Рис. 4. Варианты схематизации надстроек и рубок при определении сил

Рис. 5. Учет влияния палубы при расчете сил, действующих на палубное оборудование

обтекания его значение для овальных форм или для прямоугольника со скругленными углами [1] (см. рис.4).

Величина коэффициента  $C_x$  для этого случая приведена в строках 11 и 13 табл. 1. Во втором случае коэффициент зависит от радиуса скругления. При поперечном обтекании эти величины будут больше – см. строки 12, 14 в табл.

В литературе можно найти следующие данные, позволяющие судить об эффективности придания надстройкам обтекаемой формы (исследовались схематизированные модели без такелажа и мелких надстроек):

Океанский пассажирский пароход	$C_x$
обычного типа	1.37
с полуобтекаемыми надстройками	0.74
с обтекаемыми надстройками	0.34

Как видно, правильный выбор архитектуры позволяет снизить силу воздушного сопротивления почти в четыре раза.

### Палубное оборудование

На палубе судна расположено много оборудования, которое тоже создает сопротивление движению. В рамках статьи рассмотреть все многообразие форм палубных устройств не представляется возможным. Интересующихся деталями можно отослать к уже упоминавшейся здесь книге [1], где приведен обширный материал, позволяющий учесть сопротивления самых разнообразных конструкций. Там же приведен и большой список литературы по рассматриваемому вопросу. Но следует заметить, что учет всех мелких деталей не приведет к заметному изменению величин сил, возникающих на корпусе и надстройках, хотя и отнимет много времени.

Для примера в табл. 1 приведены

значения коэффициента сопротивления цилиндров (строка 15) и тросов (строки 16, 17), что может быть использовано при расчете сопротивления леерного ограждения.

В интервале  $2 \cdot 10^4 < Re < 4 \cdot 10^4$  значения  $C_x$  тросов меняются линейно для приведенных в таблице величин. В качестве характерной площади в данном случае берется величина  $S = d \cdot l$ , где  $d$  – диаметр троса, м. Число Рейнольдса также определяется по диаметру.

При расчете сопротивления мелких деталей на корпусе или надстройке, если такая необходимость возникнет, надо учитывать, что корпус в подобном случае следует рассматривать как экран. Такой подход может приближенно быть реализован, если при расчете сопротивления, размер детали увеличить вдвое в направлении корпуса (рис. 5).

При учете сопротивления экипажа его тоже можно приближенно моделировать скругленными цилиндрами малого удлинения, расположенными в местах обычного пребывания людей. Величину коэффициента сопротивления для каждого такого человека-цилиндра можно выбрать из табл. 1, строка 18.

Для определения полного значения той или иной проекции силы необходимо просуммировать отдельные ее составляющие, действующие на корпус, надстройку, палубное оборудование и экипаж. Для определения момента надо вычислить момент, создаваемый каждым из рассматриваемых элементов и сложить полученные величины.

Для расчета суммарного воздушного сопротивления для судна в целом можно воспользоваться формулой (19) из табл. 1, полученной Ишервудом в результате обработки

большого объема экспериментальных данных [3].

В этой формуле  $L$  и  $B$  – наибольшая длина и ширина судна соответственно,  $S_L$  и  $S_T$  – площади проекции продольной и поперечной надводной части соответственно,  $F$  – периметр продольной проекции надводной части за исключением ватерлинии и мачт,  $s$  – расстояние от носа до центра площади парусности,  $M$  – число отчетливо различимых в продольной проекции мачт и стоек.

Значения коэффициентов  $A_i$  в зависимости от курсового угла приводятся в книге [4, табл. №3 на с.263]. Для типичных курсовых углов коэффициенты  $A_i$  равны:

$\gamma^\circ$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$
0	2.15	-5.0	0.24	-0.16	-	-	-
90	0.355	-	-	-	-0.247	-	0.018
180	-2.53	3.76	-0.174	0.128	-	1.55	-

### Что для чего

Хотя это и трудно, попробуем прикинуть, в каких случаях какие параметры играют определяющую роль. Надо заметить, что эти оценки довольно субъективны и обсуждаемы.

Для проектирования тихоходного водоизмещающего катера, особенно малых размерений, когда из условий обитаемости рубку или надстройку приходится делать достаточно большой, основным, естественно, будет учет воздушного сопротивления движению судна, особенно при сильных встречных ветрах. Это можно сделать по формуле (1), взяв величину  $C_x$  из 6-й строки табл. 1. При этом надо помнить, что в качестве расчетной скорости надо взять величину вымпельного ветра (см. рис. 2). Для подобного судна важнее учет боковой силы, создающий дрейф. Оценить ее можно с использованием тех же



зависимостей, только подставив соответствующую площадь в формулу (1). При расчете боковой силы нужно обратить внимание на точку ее приложения, поскольку возникающий момент придется компенсировать рулевым устройством. Это может повлиять на выбор площади пера руля. Расчет сил на палубном оборудовании в этом случае особого смысла не имеет, если судно не оборудовано высокими мачтами или смотровыми площадками.

Учет боковой силы важен и при проектировании современных прогулочных катеров с развитым корпусом и надстройками. Эту величину надо знать для оценки возможности маневрирования в гавани при сильном боковом ветре на малом ходу. Для судна с одновальной силовой установкой при отсутствии угловой колоноки может встать вопрос о необходимости подруливающих устройств.

Для расчета управляемости таких катеров на острых курсах к ветру боковую силу и поперечный момент можно сосчитать по формулам (1) и (2) с использованием зависимостей (7)–(10).

При проектировании небольших прогулочных лодок и катеров открытой компоновки в первую очередь следует учитывать сопротивление корпуса и экипажа. При этом вторая составляющая может внести существенный вклад в общее сопротивление. Не надо забывать о лобовом стекле и капоте подвесного мотора.

Проектирование очень быстроходных маломерных судов спортивного типа – это вообще отдельный разговор. Нужно отметить, что в этом случае уже играют роль и сопротивление трения, и сопротивление палубного оборудования. В то же время влияние сопротивления экипажа, укрытого в кабине или за развитым обтекателем, уменьшается. Для подобных судов важно определить вертикальную составляющую силы от встречного потока воздуха. Для ее приближенной оценки можно воспользоваться формулами (7)–(10) из табл. 1, взяв в качестве характерной площади – площадь части корпуса, выступающей из воды во время глиссирования.

## Заключение

Несколько выходя за рамки обсуждаемого материала, следует заметить, что форма надстроек часто определяется не только требованиями к сопротивлению, но и необходимостью создать нужную структуру потока в том или ином месте. Например, на быстроходных судах в кормовой оконечности может быть расположена прогулочная палуба или зона отдыха. Но при ошибках в проектировании этой части судна можно столкнуться с попаданием на палубу из-за возмущений и отрывных явлений в районе транца брызг или выхлопных газов. Поэтому при проектировании кормовой оконечности корпуса и надстроек приходится так видоизменять их форму, чтобы создать потоки воздуха, отсекающие нежелательное забрызгивание или задымление. Иногда это приходится делать ценой увеличения воздушного сопротивления.

Другой пример использования набегающего потока – это создание с помощью щитков-дефлекторов воздушной завесы перед открытыми постами управления, защищающей судоводителя от дождя и брызг. Подобная конструкция, повышая комфортность и эксплуатационные качества судна, также способствует увеличению лобового сопротивления.

Несколько слов о вертикальной составляющей силы. Как уже говорилось, она представляет интерес при проектировании и эксплуатации спортивных судов. В литературе и Интернете можно встретить примеры использования для изменения величины этой составляющей различных конструкций типа антикрыльев, устанавливаемых на гоночных автомобилях. Нужно заметить, что к этому способу следует подходить достаточно осторожно. Дело в том, что если автомобиль при своем движении сохраняет относительно стабильное положение на поверхности земли или относительно вектора скорости набегающего потока, что важнее в нашем случае, то про катер этого сказать нельзя. Судно движется при постоянно меняющемся угле дифферента, кроме того, при движении на волне, вызванной ветром или встречными судами, оно испытывает как про-

долные, так и вертикальные колебания. Все это приводит к тому, что угол атаки стабилизирующего крыла непрерывно меняется в довольно широких пределах. При этом сила на крыле может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Подобное стабилизирующее крыло к тому же имеет довольно большое удлинение – 5–7 единиц. Для подобных крыльев критический угол, при котором происходит срыв потока и подъемная сила резко падает, принимает небольшие значения: всего 10–12°. Поэтому вполне реальна следующая ситуация: катер по каким-то причинам задирает нос. В этот момент на стабилизирующем крыле должна увеличиться подъемная сила, которая компенсирует рост дифферента. Но в этот же момент прошедшая волна подбрасывает катер вверх. В районе крыла возникает отрицательный скос потока, и сила на нем не увеличивается, а уменьшается или даже меняет знак. Или, наоборот, катер проваливается между волнами. На крыле возникает дополнительный положительный скос, который приводит к увеличению угла атаки больше критического, и подъемная сила тоже падает.

Этими примерами хотелось показать, что при проектировании стабилизирующего крыла, оборудованного системой автоматического управления, нужно быть весьма осторожным. Это не простая задача, которую, «на коленке» без ущерба собственному здоровью решить очень трудно. Не хочется употреблять категорическое «невозможно». Просто без серьезного расчета продольной устойчивости с вычислением аэро- и гидродинамических фокусов по целому набору кинематических параметров здесь не обойтись.

## Литература

1. Девнин С.И. Аэрогидродинамический расчет плохообтекаемых судовых конструкций. – Л.: Судостроение, 1967.
2. Blendermann Werner. An Analysis of the Wind Forces on Ships Sailing Close to the Wind // Schiffstechnik, 2000, Bd. 47 / Ship Technology Research, 2000, vol. 47
3. Isherwood R. Wind Resistance of Merchant Ships // TRINA, 1973, vol.115, p.327–335
4. Справочник по теории корабля/ Под ред. Я.И.Войткунского.– Л.: Судостроение, 1985, т.1.