

Управляемость судна при ветре, волнении и течениях.



Компетенция: « Маневрирование судна »

Управляемость судна при ветре, волнении и течении.

ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Корпус судна как крыло. Свойства крыла
2. Силы и моменты, возникающие под воздействием ветра.
3. Ветровой дрейф судна.
4. Маневрирование в условиях ветра

Корпус судна как крыло. Свойства крыла

Свойства крыла применительно к корпусу судна следующие. Корпус судна в подводной и надводной частях представляет удлиненное тело, симметричное относительно ДП, т. е. подобен вертикальному крылу симметричного профиля.

Теория крыла, рассматриваемая в гидромеханике судна, позволяет определить характер распределения аэро- и гидродинамических воздействий на корпус при его движении на границе двух сред и найти величину, направление и точку приложения равнодействующих этих сил, а значит аэро- и гидродинамические моменты относительно вертикальной оси. Эти данные в сочетании с силами и моментами, приложенными к корпусу со стороны средств управления, определяют поступательное и угловое движение судна данной массы.

Теоретические расчеты сил и моментов, возникающих на корпусе судна, сложны и трудоемки, поэтому не всегда могут использоваться при практическом маневрировании. Тем не менее, существуют общие закономерности, знание которых имеет большое значение для правильной оценки и предсказания поведения судна как объекта управления.

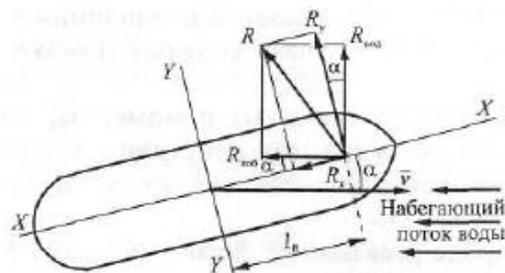


Рис. 1.2. Гидродинамическая сила R , приложенная к корпусу судна и ее проекции на оси X и Y

Для получения этих закономерностей рассмотрим основные свойства крыла применительно к корпусу судна.

1. Если крыло перемещается прямолинейно в потоке воды или воздуха под некоторым углом *атаки*, то, помимо *силы лобового сопротивления*, направленной противоположно движению, возникает также *подъемная сила*, направленная перпендикулярно набегающему потоку. Величина подъемной силы в первом приближении пропорциональна углу атаки. Она может существенно превышать силу лобового сопротивления, в связи с чем равнодействующая этих сил не совпадает с направлением потока, а отклонена в сторону траверзного направления.

2. Точка приложения равнодействующей силы смещена по ДП от центра площади крыла навстречу потоку. Величина этого смещения (плечо поперечной проекции гидродинамической силы) тем больше, чем острее угол атаки. При углах атаки, близких к 90° , плечо стремится к нулю, т. е. точка приложения приближается к центру площади; для надводной части — к центру парусности (ЦП), для подводной — к центру площади проекции погруженной части на ДП, называемому центром бокового сопротивления (ЦБС).

Применительно к подводной части корпуса углом атаки является угол дрейфа, а к надводной — курсовой угол кажущегося ветра.

Силы и моменты, возникающие под воздействием ветра

В судовых условиях скорость ветра измеряется с помощью анемометра на открытом пространстве судна, а сила ветра определяется по шкале Бофорта и оценивается по двенадцатибалльной системе. Если судно на ходу, то измеряется так называемая кажущаяся скорость ветра \bar{W} , вектор которой представляет собой разность двух векторов — вектора истинного ветра $\bar{W}_н$ и вектора скорости судна \bar{V} , т. е.

$$\bar{W} = \bar{W}_н - \bar{V}. \quad (2.40)$$

Вектор кажущегося ветра, помимо скорости, характеризуется курсовым углом q_w , т. е. углом между носовой частью ДП и кажущимся направлением ветра. За направление ветра принимается то, откуда дует ветер (ветер дует «в компас»).

Курсовые углы ветра измеряются от 0 до 180° вправо и влево от ДП (курсные углы правого или левого борта).

Геометрический смысл формулы (2.40) характеризуется векторным треугольником, показанным на рис. 2.5 (а, б, в). Из рисунка видно, что под влиянием движения судна вперед со скоростью V курсовой угол кажущегося ветра будет всегда меньше, чем истинного.

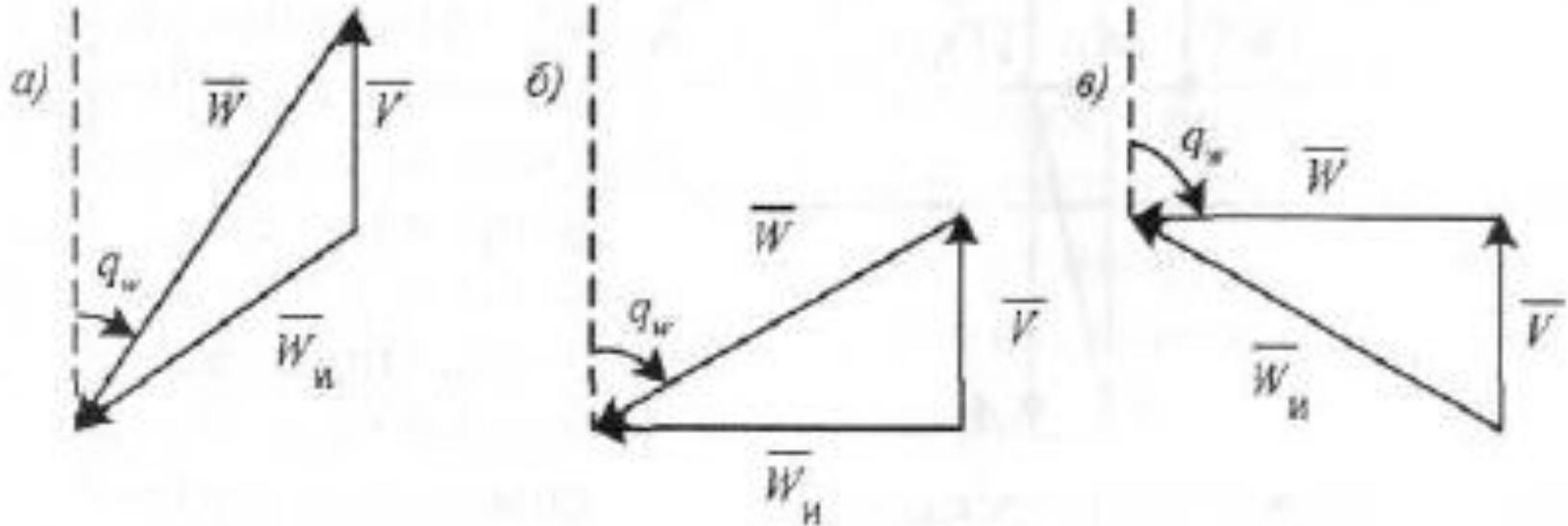


Рис. 2.5. Курсовой угол кажущегося ветра на движущемся судне

Силы и моменты, возникающие под воздействием ветра

Аэродинамическая сила и ее момент. Равнодействующая сила давления ветра на надводную часть — аэродинамическая сила A не совпадает в общем случае с направлением кажущегося ветра, а отклоняется в сторону траверзного направления.

Надводная часть судна находится в потоке воздуха под углом атаки, равным курсовому углу кажущегося ветра. При этом на надводной части создается аэродинамическая сила A , имеющая продольную A_x и поперечную A_y составляющие (рис. 2.6). Продольная составляющая A_x влияет на скорость судна, а поперечная A_y вызывает боковое перемещение судна.

Поперечную аэродинамическую силу (H) можно рассчитать по формуле

$$A_y = C_{ay} \frac{\rho_a}{2} Q_y W^2, \quad (2.41)$$

где C_{ay} — безразмерный коэффициент поперечной аэродинамической силы, зависящий от формы надводной части судна и курсового угла кажущегося ветра;

Q_y — боковая площадь парусности (площадь проекции надводной части на ДП) м^2 ;

ρ_a — массовая плотность воздуха ($\rho_a \approx 1,226 \text{ кг/м}^3$).

Безразмерный аэродинамический коэффициент C_{ay} по данным натурных и модельных исследований для разных судов находится обычно в пределах от $0,8 \sin q_w$ до $1,3 \sin q_w$.

Точка приложения аэродинамической силы в соответствии со свойствами крыла смещается от ЦП навстречу потоку воздуха (см. рис. 2.6), т. е. при носовых курсовых углах ветра в сторону носа, а

Аэродинамическая сила

при кормовых курсовых углах — в корму. Величина смещения зависит от курсового угла кажущегося ветра: чем острее угол атаки между ДП и направлением ветра, тем дальше от ЦП смещается точка приложения аэродинамической силы. Максимальное смещение точки приложения аэродинамической силы (при курсовых углах, близких к 0 и 180°) составляет в среднем приблизительно четверть длины судна, т. е. $0,25L$, а при курсовых углах кажущегося ветра, равных 90° , точка приложения аэродинамической силы совпадает с ЦП.

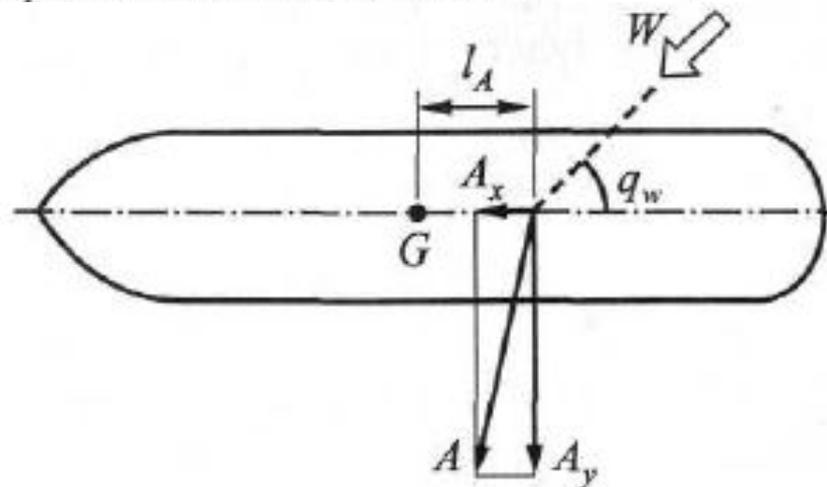


Рис. 2.6. Аэродинамическая сила и ее составляющие

Силы и моменты, возникающие под воздействием ветра

Таким образом, в общем случае на корпус судна действует не только поперечная аэродинамическая сила, вызывающая дрейф судна, но и момент этой силы, стремящийся развернуть судно вокруг вертикальной оси, проходящей через ЦТ.

Плечо поперечной аэродинамической силы \bar{l}_A относительно ЦТ можно определить по приближенной формуле:

$$\bar{l}_A = 0,25 + \frac{l_{\text{цп}}}{L} - \frac{q_w^0}{360^\circ}, \quad (2.42)$$

Плечо
аэродинамической
силы

где \bar{l}_A — относительное плечо аэродинамической силы, выраженное в долях длины корпуса;

L — длина судна между перпендикулярами, м;

$l_{\text{цп}}$ — отстояние ЦП от ЦТ, м.

В формуле величина $l_{\text{цп}}$ принимается положительной, если ЦП смещен в нос от ЦТ, и отрицательной при его смещении в корму. Знак величины \bar{l}_A укажет соответственно направление смещения точки приложения аэродинамической силы от ЦТ.

Положение ЦП по длине судна $l_{\text{цп}}$ зависит от размеров и расположения надстроек и других надводных частей, а также от дифферента судна и его осадки. Площадь парусности и положение ЦП по длине судна можно рассчитать по чертежу бокового вида судна с учетом масштаба. При этом следует иметь в виду, что положение ЦП значительно изменяется с изменением дифферента судна.

При определении отстояния ЦП от ЦТ для (2.42) необходимо учитывать положение ЦТ по длине, которое только при посадке судна на «ровный киль» приблизительно совпадает с мидель-шпангоутом. Если ЦТ смещен в сторону одной из оконечностей судна, то благодаря дифференту ЦП смещается в противоположную сторону, что приводит к существенному изменению $l_{\text{цп}}$ и, следовательно, \bar{l}_A .

Аэродинамический момент $M_A = A_y l_A$ стремится развернуть судно относительно вертикальной оси в направлении уваливания наветренной оконечности судна.

Силы и моменты, возникающие под воздействием ветра

Гидродинамическая сила и ее момент. Поперечная аэродинамическая сила A_y создает боковое перемещение судна — дрейф со скоростью V_y , в результате чего корпус судна движется с углом дрейфа α . В этих условиях корпус судна испытывает сопротивление со стороны воды в виде гидродинамической силы R , имеющей поперечную составляющую R_y .

Подводная часть судна характеризуется площадью проекции погруженной части на ДП. Эту площадь S_y для приближенных оценок можно принимать равной произведению длины судна между перпендикулярами на среднюю осадку.

При движении судна лагом, когда $\alpha = 90^\circ$, точка приложения силы реакции воды (гидродинамической силы R) носит название центра бокового сопротивления (ЦБС).

Приближенно можно считать, что ЦБС совпадает с центром площади проекции погруженной части судна на ДП, а по длине судна практически совпадает с ЦТ.

При посадке судна на ровный киль ЦБС, как и ЦТ, примерно совпадает с мидель-шпангоутом, а при наличии дифферента отстояние ЦБС от мидель-шпангоута можно приближенно рассчитать по формуле

$$\bar{l}_{\text{ЦБС}} = \frac{1 + 2d_n / d_k}{3(1 - d_n / d_k)} - 0,5, \quad (2.43)$$

где $\bar{l}_{\text{ЦБС}}$ — расстояние ЦБС от мидель-шпангоута, выраженное в долях длины судна L .
 d_n — осадка носа, м;
 d_k — осадка кормы, м.

Знак «-» у $\bar{l}_{\text{ЦБС}}$ укажет, что ЦБС смещено в корму от мидель-шпангоута, а знак «+» — в нос.

Если угол дрейфа не равен 90° , то точка приложения гидродинамической силы смещается по ДП в направлении движения, т. е. навстречу набегающему потоку воды. Если угол дрейфа меньше 90° , то точка приложения смещается от ЦБС в сторону носа, а при угле дрейфа более 90° — в сторону кормы, т. е. смещение точки приложения гидродинамической силы имеет ту же закономерность, что и для аэродинамической. Однако величина смещения точки приложения гидродинамической силы примерно в 2 раза больше, чем аэродинамической при одинаковых углах атаки ($\alpha = q_w$), что объясняется

более совершенными обводами подводной части и, следовательно, более выраженным проявлением свойств крыла.

Плечо поперечной гидродинамической силы относительно ЦТ можно приближенно рассчитывать по формуле

$$\bar{l}_R = 0,5 + \frac{l_{\text{ЦБС}}}{L} - \frac{\alpha^\circ}{180^\circ}, \quad (2.44)$$

где \bar{l}_R — относительное плечо поперечной гидродинамической силы, выраженное в долях длины корпуса ($\bar{l}_R = \frac{l_R}{L}$);

$l_{\text{ЦБС}}$ — отстояние ЦБС от ЦТ, м.

В соответствии с формулой (2.44) точка приложения гидродинамической силы имеет максимальное смещение при углах дрейфа, близких к 0 и 180° , когда это смещение достигает $\pm 0,5L$, т. е. точка приложения приближается к носовому или кормовому перпендикуляру.

Угол дрейфа, близкий к 180° , судно может иметь при движении назад.

Поперечная составляющая гидродинамической силы R_y создает гидродинамический момент M_R относительно вертикальной оси, проходящей через ЦТ судна,

$$M_R = R_y l_R, \quad (2.45)$$

Поперечная гидродинамическая сила R_y в Н рассчитывается по формуле:

$$R_y = C_y \frac{\rho}{2} S_y V^2, \quad (2.46)$$

где ρ — массовая плотность забортной воды, кг/м³;
 S_y — площадь проекции подводной части судна на ДП, м²;
 V — скорость судна относительно воды, м/с;
 C_y — безразмерный коэффициент поперечной гидродинамической силы, значение которой можно выразить приближенной зависимостью

$$C_y = \frac{0,23 \sin \alpha + 1,09 \sin^2 \alpha}{(2,18 - 7d/L)^2}, \quad (2.47)$$

где δ — коэффициент общей полноты;
 d/L — отношение средней осадки судна к его длине.

Очевидно, что формулы (2.42) и (2.44) структурно подобны. Следует лишь еще раз отметить, что ЦБС располагается по длине судна всегда сравнительно близко от ЦТ, поэтому в практических расчетах допустимо $l_{\text{ЦБС}}$ принимать равным нулю, в то время как $l_{\text{ЦТ}}$ может иметь значительную величину.

Плечо гидродинамической силы

Гидродинамическая сила

Ветровой дрейф судна

Ветровой дрейф судна. Условия движения судна постоянным курсом с углом ветрового дрейфа выражаются вторым и третьим уравнениями системы (1.1), которые для случая установившегося движения, когда инерционные силы и момент равны нулю, можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} R_y \pm P_{py} &= A_y; \\ M_R \pm M_p &= M_A \end{aligned} \right\} \quad (2.48)$$

Ветер, дующий со скоростью W под произвольным курсовым углом, воздействует на надводную часть судна силой A , которую в общем случае можно разложить (рис. 2.7) на две составляющие: продольную A_x и поперечную A_y .

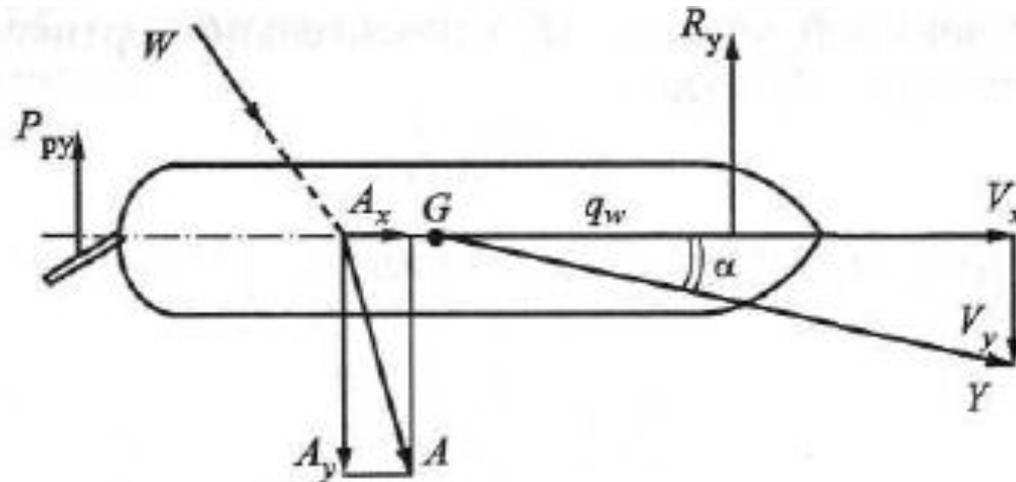


Рис. 2.7. Силы, действующие на судно при движении с углом дрейфа

Ветровой дрейф судна

Продольная составляющая A_x , складываясь алгебраически с силой сопротивления R_x , увеличивает или уменьшает скорость движения судна V_x . Эта скорость учитывается лагом, поэтому силу A_x можно не рассматривать.

Сила A_y , действующая перпендикулярно ДП, заставляет судно смещаться в поперечном направлении со скоростью V_y , называемой скоростью дрейфа. В данных условиях направление и скорость действительного перемещения судна относительно воды

определяются вектором V , который является геометрической суммой векторов V_x и V_y (см. рис. 2.7).

Непосредственно из приведенной схемы следует

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_y}{V_x}; \quad V = \frac{V_x}{\cos \alpha}. \quad (2.49)$$

Для получения формулы угла дрейфа можно воспользоваться первым уравнением системы (2.48) на том основании, что гидродинамическая сила R_y согласно (2.47) зависит от угла дрейфа.

Боковая сила руля P_{dy} , возникающая в связи с перекладкой руля для удержания судна на курсе, по сравнению с силой R_y при движении с углом дрейфа относительно невелика, поэтому ее в первом приближении можно не учитывать и тогда

$$R_y = A_y,$$

а после подстановки значений (2.4) и (2.46)

$$C_y \frac{\rho}{2} S_y v^2 = C_{ay} \frac{\rho_a}{2} Q_y W^2. \quad (2.50)$$

По данным, приведенным в п. 2.3 можно принять значение аэродинамического коэффициента

$$C_{ay} = 1,18 \sin q_w. \quad (2.51)$$

Подстановка в уравнение (2.50) выражений (2.48) и (2.51) приводит к квадратному уравнению относительно $\sin \alpha$. Решение этого уравнения с последующим переходом от скорости относительно воды V , выраженной в м/с, к скорости по курсу V_n , выраженной в узлах $\left(V_n = \frac{V \cos \alpha}{0,514} \right)$, и некоторые упрощающие преобразования дают рабочую формулу для определения угла дрейфа

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{(0,11V_n)^2 + k_\alpha^2 W^2 \sin q_w} - 0,11V_n}{V_n}, \quad (2.52)$$

где W — скорость кажущегося ветра, м/с;
 V_n — скорость судна по курсу, уз;
 k — коэффициент дрейфа, который в свою очередь можно рассчитывать по приближенной формуле

$$k_\alpha = \left(0,168 - 0,5 \frac{d}{L} \right) \sqrt{\frac{Q_y}{S_y}}. \quad (2.53)$$

Сопоставление с формулой (2.49) показывает, что числитель формулы (2.52) выражает скорость бокового перемещения судна под влиянием ветра (скорости дрейфа), а знаменатель — скорость судна по курсу.

Из формулы (2.52) видно, что скорость дрейфа V_y зависит от скорости судна по курсу V_n : чем больше V_n , тем меньше V_y при тех же значениях W и q_w .

Для практического применения полученной формулы следует учесть еще то обстоятельство, что скорость ветра вблизи поверхности моря за счет трения нижнего слоя воздуха о поверхность воды меньше, чем в более высоких слоях. Поскольку измерение скорости ветра анемометром выполняется на высоте мостика, то результаты оказываются несколько завышенными по сравнению со средней скоростью ветра, действующего на надводную часть.

Профиль скоростей ветра на высоте подчиняется логарифмическому закону, из которого вытекает, что для получения эквивалентного давления скорость ветра, измеренная над верхним мостиком, должна быть умножена на коэффициент 0,83, т. е.

$$W = 0,83 W', \quad (2.54)$$

где W — эквивалентная скорость кажущегося ветра для использования в формуле, м/с;

W' — скорость кажущегося ветра, измеренная анемометром над верхним мостиком, м/с.

Опыт практического использования формулы (2.52) на различных судах показывает, что предвычисление угла дрейфа обеспечивается с точностью 1–2°, что примерно соответствует точности графического счисления пути судна.

Угол дрейфа по формуле (2.52) в условиях плавания легко рассчитывать с помощью калькулятора. При этом следует иметь в виду, что коэффициент дрейфа k_α для каждого конкретного судна зависит только от его осадки, поэтому значения коэффициента целесообразно заранее рассчитать для рабочего диапазона осадок судна с интервалом, например, через 1 м и использовать то значение k_α , которое соответствует средней осадке на данный период плавания. Переменными величинами будут скорость кажущегося ветра W , м/с, его курсовой угол q_w и скорость судна V_n , уз.

Ветровой дрейф судна

Влияние переложенного руля на угол дрейфа. При определении угла дрейфа по формуле (2.52), а также с помощью таблиц или номограммы, построенных по указанной формуле, не учитывается тот факт, что под действием аэро- и гидродинамической сил, точки приложения которых в общем случае не совпадают с ЦТ судна, последнее имеет тенденцию разворачиваться вокруг вертикальной оси, т. е. приводится к ветру или уваливать в зависимости от знака результирующего момента действующих сил.

Чтобы обеспечить движение заданным курсом, приходится перекладывать руль на некоторый средний угол, т. е. создавать момент боковой силы руля для компенсации результирующего момента аэро- и гидродинамической сил. При этом поперечная сила руля $P_{ру}$, складываясь алгебраически с поперечной аэродинамической силой A_y , увеличивает или уменьшает скорость бокового перемещения судна V_y , что приводит к изменению угла дрейфа α на величину $\Delta\alpha$, которая зависит от отношения площадей руля и погруженной части ДП — S_p/S_y .

Для морских транспортных судов можно приблизительно считать, что в среднем

$$S_p/S_y \approx 0,017. \quad (2.55)$$

Учесть влияние перекладки руля на угол дрейфа можно с помощью приближенной формулы, полученной с учетом (2.55),

$$\Delta\alpha^\circ = \pm 0,2\delta'_p. \quad (2.56)$$

Из приведенной формулы видно, что на каждые 5° перекладки руля угол дрейфа изменяется приблизительно на 1° . При перекладке руля под ветер (судно стремится к ветру) абсолютное значение угла дрейфа уменьшается на величину $\Delta\alpha^\circ$. Если же судно уваливает и приходится руль перекладывать на ветер, то значение угла дрейфа соответственно возрастает.

Ветровой дрейф судна

Приложение 2.1

Наиболее просто угол дрейфа может быть получен из специальных таблиц дрейфа, рассчитанных по формулам (2.52) с учетом (2.53) и (2.54). Предлагаемые таблицы приведены в Приложении 2.1 и состоят из трех таблиц (необходимая интерполяция выполняется «на глаз»).

Таблицы дрейфа являются универсальными и могут быть использованы на любом судне по заранее вычисленным значениям k_{α} для разных осадок.

Угол дрейфа α° по V_{α_0} и скорости судна V_s по курсу

V_{α_0} , уз	Скорость судна по курсу V_s , уз													
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
	Угол дрейфа α° , град													
0,5	9	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,0	22	9	5	3	2	2	1	1	1	1	1	0	0	0
1,5	33	16	9	6	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1
2,0	42	22	14	9	7	5	4	3	3	2	2	2	1	1
2,5	49	28	18	12	9	7	6	5	4	3	3	2	2	2
3,0	54	33	22	16	12	9	7	6	5	4	4	3	3	2
3,5	59	38	36	19	14	11	9	8	6	6	5	4	4	3
4,0	62	42	29	22	17	14	11	9	8	7	6	5	5	4
4,5	65	46	33	25	19	16	13	11	9	8	7	6	5	5
5,0	67	49	36	28	22	18	15	12	11	9	8	7	6	6
5,5	69	52	39	30	24	20	17	14	12	11	9	8	7	7
6,0	71	54	42	33	27	22	18	16	14	12	10	9	8	7

Примечание. Коэффициент дрейфа r_{α} рассчитывается по формуле:

$$r_{\alpha} = \left(0,168 - 0,5 \frac{d}{L} \right) \sqrt{\frac{Q_y}{Ld}}$$

где: Q_y — площадь парусности; L — длина судна; d — средняя осадка; δ — коэффициент общей полноты.

ТАБЛИЦЫ ДРЕЙФА

Приведенная скорость ветра W_{np} по W и q_w^0 кажущегося ветра

q_w^0	Скорость кажущегося ветра W , м/с													
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
	Приведенная скорость ветра W_{np} , м/с													
10/170	1	2	3	3	4	5	6	6	7	8	8	9	10	10
20/160	3	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
30/150	2	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	18
40/140	3	4	5	7	8	9	11	12	13	15	16	17	19	20
50/130	3	4	6	7	9	10	12	13	14	16	17	19	20	22
60/120	3	5	6	8	9	11	12	14	15	17	19	20	22	23
70/110	3	5	6	8	10	11	13	14	16	18	19	21	22	24
80/100	3	5	7	8	10	12	13	15	16	18	20	21	23	25
90	3	5	7	8	10	12	13	15	17	18	20	22	23	25

Скорость дрейфа «на стопе» V_{α_0} по W_{np} и коэффициенту дрейфа r_{α}

r_{α}	Приведенная скорость ветра W_{np} , м/с										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
	Скорость дрейфа «на стопе» V_{α_0} , уз										
0,04	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,06	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
0,08	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8	1,9
0,10	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
0,12	0,5	0,7	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9	2,2	2,4	2,6	2,9
0,14	0,6	0,8	1,1	0,4	1,7	2,0	2,2	2,5	2,8	3,1	3,4
0,16	0,6	1,0	1,3	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8
0,18	0,7	1,1	1,4	1,8	2,2	2,5	2,9	3,2	3,6	4,0	4,4
0,20	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8

Ветровой дрейф судна

Дрейф судна с остановленными двигателями. Иногда судну приходится длительное время находиться в море с остановленными двигателями (ожидание светлого времени, неисправность двигателя, ожидание распоряжений и т. п.). При наличии ветра судно в данных обстоятельствах дрейфует с некоторой скоростью, направление дрейфа в общем случае не совпадает с направлением действующего ветра.

При установившемся дрейфе аэродинамическая сила A уравновешивается гидродинамической силой R . Для равновесия судна по курсу необходимо, чтобы аэро- и гидродинамические силы действовали в одной плоскости. При этом условия аэро- и гидродинамические моменты уравновешивают друг друга.

Указанному условию соответствуют положения судна носом или кормой строго против ветра, однако это случаи неустойчивого равновесия, так как при любом случайном отклонении ДП от данного направления возникает поперечная аэродинамическая сила, момент которой стремится развернуть судно еще больше от линии ветра. Одновременно возникает поперечная гидродинамическая сила, момент которой разворачивает судно в том же направлении, что и аэродинамический момент.

Действующие при свободном дрейфе силы и их моменты стремятся развернуть судно приблизительно лагом к ветру, следовательно, где-то вблизи этого направления и должно быть положение устойчивого равновесия. Данный вывод подтверждается опытом: суда в установившемся свободном дрейфе располагаются примерно лагом к ветру.

Аналитическое определение условия устойчивого свободного дрейфа выражается системой трех уравнений (1.1), которое для случая установившегося режима, т. е. при отсутствии инерционных сил, а также равенства нулю силы упора винта и силы на руле, имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} R_x &= A_x; \\ R_y &= A_y; \\ M_R &= M_A \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

Система (2.57) выражает условие равновесия аэро- и гидродинамических сил по осям X и Y , а также равновесие аэро- и гидродинамических моментов вокруг оси Z .

Продольная гидродинамическая сила R_x выражается зависимостью:

$$R_x = C_x \frac{\rho}{2} S_y V^2, \quad (2.58)$$

где C_x — коэффициент продольной гидродинамической силы, который для движения с углом дрейфа может быть получен по эмпирической формуле

$$C_x = 0,075 \sin \left[168^\circ \left(1 - \frac{\alpha^\circ}{100} \right) \right]. \quad (2.59)$$

Продольная аэродинамическая сила A_x выражается приближенной формулой:

$$A_x = 1,3 \frac{\rho \alpha}{2} Q_x W^2 \cos q_w, \quad (2.60)$$

где Q_x — лобовая площадь парусности, m^2 .

Ранее были приведены формулы для выражения поперечных сил и их коэффициентов: (2.41), (2.46), (2.47) и (2.51).

Условие равновесия одновременно по осям X и Y можно получить, если поделить второе уравнение на первое в системе (2.57):

$$\frac{R_y}{R_x} = \frac{A_y}{A_x}. \quad (2.61)$$

Подставляя в найденное условие выражения (2.41), (2.46), (2.58) и (2.60), окончательно получим

$$\operatorname{tg} q_w = \frac{0,23 \sin \alpha + 1,09 \sin^2 \alpha}{\left(2,18 - 7 \frac{d}{L} \right)^2} \frac{Q_x}{Q_y} \frac{0,075 \sin \left[168^\circ \left(1 - \frac{\alpha^\circ}{100} \right) \right]}{Q_y}. \quad (2.62)$$

Полученное выражение дает возможность для любого значения угла дрейфа α определить значение курсового угла ветра q_w , при котором обеспечивается равновесие сил по продольной и поперечной осям одновременно.

Второе условие устойчивого свободного дрейфа выражается равновесием аэро- и гидродинамического моментов относительно вертикальной оси, проходящей через ЦТ судна.

Если разделить третье уравнение на второе системы (2.57), то, учитывая, что отношение момента к силе равняется плечу этой силы, получим указанное условие в виде равенства плеч аэро- и гидродинамических сил

$$\bar{l}_R = \bar{l}_A. \quad (2.63)$$

Подставляя значения плеч из формул (2.42) и (2.44) и учитывая при этом, что ЦБС располагается, как правило, достаточно близко к ЦТ судна ($l_{\text{ЦБС}} \approx 0$), получим окончательное второе условие равновесия при свободном дрейфе

$$q_w^\circ = 2(\alpha^\circ - 45^\circ + 180 \bar{l}_{\text{ин}}). \quad (2.64)$$

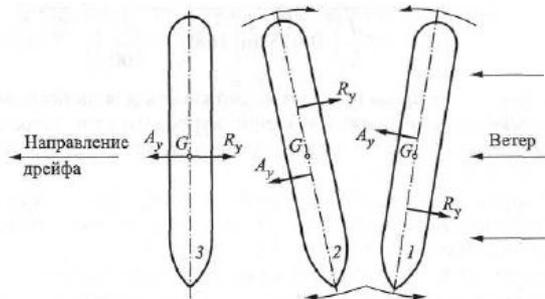


Рис. 2.8. Силы и моменты, действующие на судно в свободном дрейфе

Положение устойчивого равновесия при дрейфе с остановленными двигателями будет иметь место при одновременном выполнении двух условий, выражаемых формулами (2.62) и (2.64).

На большинстве морских судов коэффициент δ находится в пределах 0,6–0,8, а отношение d/L — в пределах 0,03–0,07, поэтому можно приближенно принять средние постоянные значения:

$$\delta = 0,7; \quad d/L = 0,5.$$

При свободном дрейфе практически важно знать не только направление движения, но и скорость судна относительно воды V .

Из приведенной схемы (см. рис. 2.9) видно, что

$$V = \frac{V_y}{\cos(90^\circ - \alpha^\circ)} = \frac{V_y}{\sin \alpha}, \quad (2.65)$$

где V_y — поперечная составляющая скорости судна.

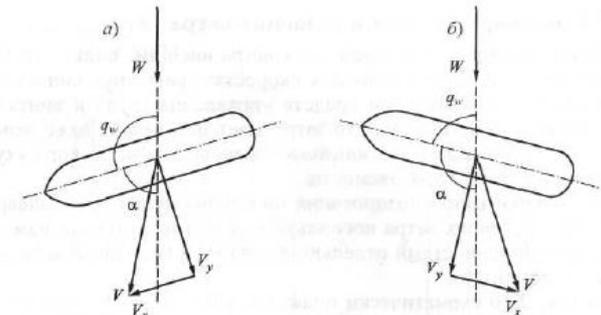


Рис. 2.9. Положение судна при свободном дрейфе в зависимости от знака смещения ЦП от ЦТ: а) ЦП смещен в нос от ЦТ; б) ЦП смещен в корму от ЦТ

Маневрирование в условиях ветра

При маневрировании в условиях ветра внешние силы и их моменты, особенно при небольших скоростях движения, сопоставимы с силами и моментами средств управления (руля и винта), а нередко и превосходят их, что затрудняет или делает даже невозможным выполнение того или иного маневра из-за резкого ухудшения или потери управляемости.

Для оценки и прогнозирования поведения судна при маневрировании в условиях ветра воспользуемся уже известными нам общими закономерностями отдельно для аэро- и гидродинамических сил и их моментов.

На рис. 2.10 схематически показано действие на судно аэро- и гидродинамических сил в зависимости от курсового угла кажущегося ветра для трех условий.

Точки приложения поперечных сил показаны в соответствии с приближенными формулами (2.42) и (2.44) для плеч аэро- и гидродинамической сил соответственно. При этом для простоты сделано допущение, что ЦП и ЦТ совпадают по длине судна и находятся в точке G (такое допущение достаточно справедливо для судов без дифферента с надстройкой, расположенной посередине, а также для судов с кормовым расположением надстройки, но имеющих такой дифферент на корму, при котором ЦП смещен вперед до совпадения с ЦТ судна).

Рассмотрим подробнее каждый из трех случаев (см. рис. 2.10).

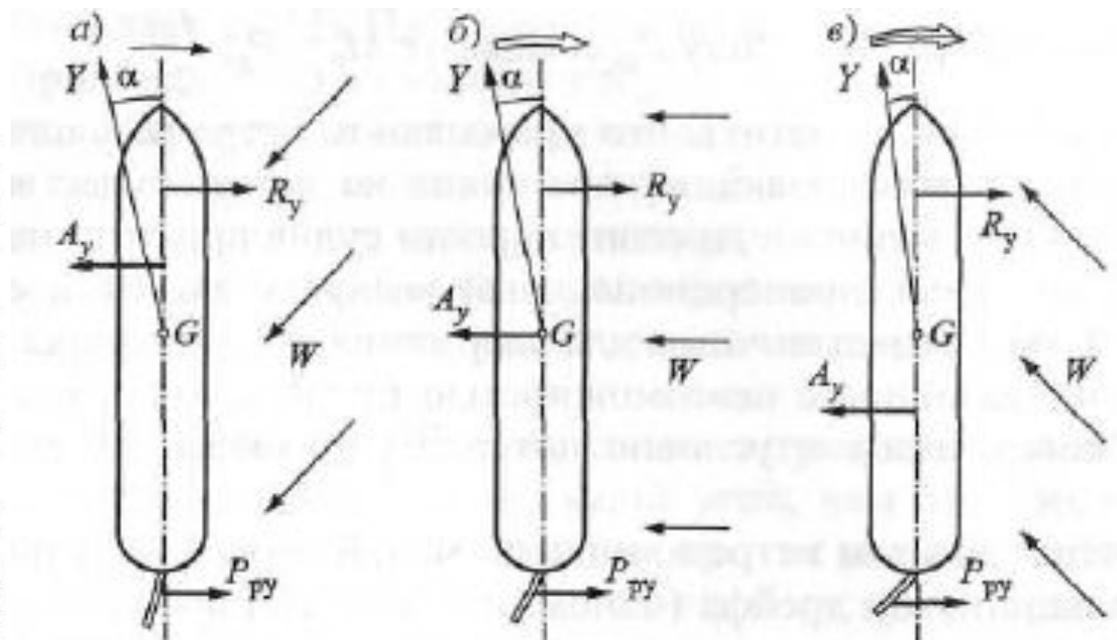


Рис. 2.10. Силы и моменты, действующие на судно в зависимости от курсового угла кажущегося ветра:
а) $q_w = 45^\circ$; б) $q_w = 90^\circ$; в) $q_w = 135^\circ$

Маневрирование в условиях ветра

Ветер со стороны носовых курсовых углов. Поток воздуха, действующий на надводную часть судна, имеющего скорость V_x , со стороны носового курсового угла (см. рис. 2.10, а) создает поперечную аэродинамическую силу A_y . Точка ее приложения в соответствии с формулой смещена от ЦТ вперед по ДП, т. е. навстречу потоку воздуха, на расстояние l_A . В связи с этим создается момент $A_y l_A$, стремящийся развернуть судно в направлении увеличения q_w , т. е. носом от ветра. В то же время сила A_y создает поперечное движение со скоростью V_y , благодаря чему судно движется относительно воды с углом дрейфа α .

Косое натекание потока воды на подводную часть корпуса с углом атаки, равным углу дрейфа, приводит к появлению поперечной гидродинамической силы R_y , точка приложения которой смещена от ЦТ вперед по ДП навстречу потоку в соответствии с формулой (2.44) на расстояние l_R . Гидродинамический момент $R_y l_R$ стремится развернуть судно в направлении увеличения угла дрейфа, т. е. носом к ветру.

Таким образом, очевидно, что аэро- и гидродинамические моменты в рассматриваемом случае имеют разные знаки. Если при этом учесть, что силы A_y и R_y уравниваются друг друга и (если не учитывать сравнительно небольшую боковую силу руля $P_{ру}$) приблизительно равны по абсолютной величине, то сравнительные величины их моментов полностью определяются значениями плеч l_A и l_R .

Величины этих плеч, как известно, зависят от углов атаки q_w° и α° . Чем меньше угол, тем больше плечо, причем при одинаковых углах атаки величина смещения точки приложения гидродинамической силы примерно в 2 раза больше, чем аэродинамической. Угол дрейфа α° в большинстве случаев не очень велик, поэтому даже при достаточно остром курсовом угле ветра q_w° плечо гидродинамической силы l_R , как правило, больше плеча аэродинамической силы l_A . Следовательно, при сложении двух моментов, имеющих разные знаки, результирующий момент имеет то же направление, что и гидродинамический, т. е. стремится разворачивать судно носом в направлении к ветру. Указанная тенденция отмечена стрелкой.

Результирующий момент при носовых курсовых углах ветра является разностью аэро- и гидродинамических моментов, поэтому

он обычно не очень велик, что позволяет удерживать судно на заданном курсе с помощью переложенного на некоторый угол руля, создающего поперечную силу $P_{ру}$ и момент $M_p = P_{ру} \frac{L}{2}$.

Следует, однако, отметить, что при сильном ветре результирующий момент, разворачивающий нос судна на ветер, будет все же значительным по величине, и если скорость судна при этом невелика, то момент руля, пропорциональный квадрату скорости судна, может оказаться недостаточным для удержания судна на курсе.

Явление, связанное с невозможностью предотвратить разворот судна на ветер, назовем условно потерей управляемости первого рода.

1

При очень сильном ветре или очень малой скорости судна возникает большой угол дрейфа (напомним, что угол дрейфа пропорционален отношению скорости кажущегося ветра и скорости судна по курсу — W/V_x), что приводит к уменьшению плеча гидродинамической силы l_R , т. е. к сближению точек приложения поперечных аэро- и гидродинамических сил. При этом результирующий момент становится меньше, и судно снова обретает способность удерживаться на заданном курсе.

При дальнейшем увеличении отношения W/V_x и возрастании угла дрейфа наступает ситуация, когда плечо гидродинамической силы l_R становится меньше плеча аэродинамической силы l_A и судно вместо наблюдавшегося ранее стремления к ветру начинает проявлять тенденцию уваливать под ветер. Для удержания на курсе в этой ситуации потребуется уже перекладка руля не под ветер, а на ветер.

Дальнейшее увеличение отношения W/V_x и угла дрейфа приводит в конечном счете к невозможности удерживать судно от уваливания под ветер, и наступает потеря управляемости второго рода.

2

Таким образом, при движении на носовых курсовых углах ветра по мере возрастания отношения W/V_x , например, за счет снижения скорости V_x судно сначала испытывает потерю управляемости первого рода, затем снова становится управляемым и, наконец, попадает в зону потери управляемости второго рода.

Отметим, что при достаточно острых носовых курсовых углах ветра судно может, минуя зону потери управляемости первого рода, сохранять способность удерживаться на курсе вплоть до потери управляемости второго рода.

Маневрирование в условиях ветра

Ветер в борт. При направлении ветра прямо в борт судна (рис. 2.10, б) точка приложения поперечной аэродинамической силы совпадает с ЦП, поэтому для рассматриваемого случая, когда ЦП совпадает с ЦТ. Плечо аэродинамической силы равно нулю, т. е. аэродинамический момент отсутствует.

Под действием гидродинамического момента нос судна стремится развернуться в сторону ветра. В отличие от предыдущего случая стремление судна приводиться к ветру выражено более сильно, так как отсутствует аэродинамический момент обратного знака. На рис. 2.10, б, эта увеличенная тенденция показана двумя стрелками.

Для удержания на курсе в данной ситуации потребуется перекладка руля под ветер на больший угол, чем это имело место в случае носовых курсовых углов при прочих равных условиях.

Естественно также, что при ветре в борт судна произойдет потеря управляемости первого рода при меньшем значении отношения W/V_x , чем это имело место при носовых курсовых углах ветра.

При ветре в борт потеря управляемости второго рода не наступает. В случае остановки двигателя судно остается в положении лагом к ветру, т. е. переходит к дрейфу на стопе.

Ветер со стороны кормовых курсовых углов. При набегании потока воздуха со стороны кормовых углов (рис. 2.10, в) точка приложения поперечной аэродинамической силы смещается на величину плеча l_A , которое в данном случае в соответствии с формулой (2.42) будет иметь отрицательное значение, что указывает на смещение в сторону кормы.

Так как аэро- и гидродинамическая силы, направленные в противоположные стороны, в рассматриваемом случае имеют плечи разного знака, то, очевидно, что их моменты будут направлены в одном и том же направлении. Следовательно, результирующий момент будет равен их сумме.

Последний случай по сравнению с ранее рассмотренными характеризуется максимальным моментом, разворачивающим судно носом к ветру, что показано на рисунке тремя стрелками (см. рис. 2.10, в). В этом случае для удержания судна на курсе требуются большие углы перекладки руля под ветер, а потеря управляемости первого рода наступает при относительно малом значении отношения W/V_x . Потеря управляемости второго рода при кормовых курсовых углах не наблюдается.

Управляемость судна при ветре, волнении и течениях.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Каковы свойства крыла применительно к судну?
2. Что такое «кажущийся ветер»?
3. Что такое «аэродинамическая сила» и где ее точка приложения?
4. Что такое «гидродинамическая сила» и где ее точка приложения?
5. Какими уравнениями системы, описывающей движение судна, определяется ветровой дрейф?
6. В каком положении к ветру располагается судно при свободном установившемся дрейфе?
7. Какова тенденция разворота судна при ветре с носовых курсовых углов?
8. Что такое «потеря управляемости 1-го рода»?
9. Что такое «потеря управляемости 2-го рода»?
10. Какова тенденция разворота судна при ветре с траверза?
11. Какова тенденция разворота судна при ветре с кормовых курсовых углов?

Используемая литература.

1. Демин С.И. Управление судном/Демин С.И., Жуков Е.И. и др. – М. :Транспорт, 1991. -359 с.с

Подготовил

Доцент кафедры УС и БЖД на море ХМГА

К.Д.П., К.Т.Н.

Товстокорый О.Н.