

УДК 629.124.791.2

Б.П. Ионов

КУРСОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

ОАО «Объединенная судостроительная корпорация», Санкт-Петербург

Рассматриваются вопросы устойчивости на курсе ледоколов и судов в различных ледовых условиях. Изменение направления движения судна (рысканье) во льдах связывается не только с геометрией корпуса и направлением вращения винта, но и с характеристиками ледяного покрова.

Ключевые слова: ледовые условия, ледоколы, суда ледового плавания, устойчивость на курсе

Устойчивостью на курсе называется способность судна при отсутствии дополнительных внешних воздействий сохранять выбранное направление движения. Оценка устойчивости на курсе на чистой воде осуществляется в соответствии с нормами, согласно которым судно считается устойчивым на курсе, если количество перекладок руля не превышает 5-6 в минуту [1].

Изучению устойчивости на курсе ледоколов и судов в различных ледовых условиях посвящено весьма ограниченное число работ, а нормы устойчивости на курсе во льдах в настоящее время не разработаны.

Особое значение имеет устойчивость на курсе во льдах для транспортных судов, так как вместе с поворотливостью определяет способность судна следовать в канале за ледоколом. Отметим, что изменение направления движения судна (рысканье) во льдах связано не только с геометрией корпуса и направлением вращения винта, но и с характеристиками ледяного покрова. Так, при движении судна в сплошном ледяном поле дополнительными причинами рыскания могут являться неоднородность морфологических и физико-механических характеристик льда, а при движении в битых льдах - неравномерность его распределения по поверхности воды.

Таким образом, переменные по площади характеристики ледяного покрова представляют собой дополнительные внешние воздействия, а полученные в этих условиях численные оценки устойчивости на курсе не могут рассматриваться как оценка устойчивости судна на курсе во льдах в целом. В связи с этим, для того чтобы исключить влияние дополнительных внешних воздействий, оценка устойчивости судна на курсе должны проводиться в регулярных однородных льдах.

Теоретическая оценка устойчивости на курсе во льдах представляет собой достаточно сложную задачу, необоснованное упрощение которой может привести к ошибочным выводам. Рассмотрим в связи с этим единственное известное теоретическое решение этой задачи, в рамках которого полагается, что имеет место плоское движение судна по прямому курсу в регулярных однородных льдах (сплошных и битых) в направлении оси x [2]. Рыскание судна и боковой снос с курса вызываются горизонтальными компонентами a_{jx} и a_{jy} , ударных импульсов, действующих на корпус судна. Вращение судна как твердого тела относительно оси в этом случае определяется дифференциальным уравнением:

$$(J_z + \lambda_{66}) \frac{d\psi'}{dt} + \lambda_{26} \frac{du_2}{dt} + \lambda_{26} u_1 \psi' = -(\lambda_{22} - \lambda_{11}) u_1 u_2 + M_z, \quad (1)$$

где ψ' - угловая скорость вращения относительно оси z ; u_1, u_2 - проекции линейной скорости судна на оси x и y ; J_z - момент инерции массы судна относительно оси z ; M_z - момент внешних сил; $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{26}, \lambda_{66}$ - присоединенные массы.

При установившемся режиме движения и сравнительно малом рыскании боковой снос

судна мал, а скорость его прямолинейного движения считается постоянной, т.е. $u_1=v=\text{const}$ и $u_2=0$. Тогда вместо выражения (1) можно получить линейное дифференциальное уравнение рыскания, вызванного случайной последовательностью ударов о лед:

$$(J_z + \lambda_{66}) \frac{d\Psi'}{dt} + \lambda_{26} v \Psi' = M_z. \quad (2)$$

Присоединенные массы λ_{22} и λ_{26} обычно определяются приближенно, представляя обводы корпуса судна трехслойным эллипсоидом тех же размеров, что и судно [3, 4]. Для присоединенного момента инерции относительно оси имеем

$$J_z + \lambda_{66} = J_z (1 + n), \quad (3)$$

где коэффициент n находится по графикам работы [4] в зависимости от отношений L/B и $2T/B$.

Статический момент поперечной присоединенной массы относительно оси z приближенно вычисляется по формуле

$$\lambda_{26} = \int_L \lambda_{22}(x) x dx, \quad (4)$$

где значение $\lambda_{22}(x)$ определяется по графикам работы [5] в зависимости от отношения $2T/B$ и коэффициента полноты шпангоута β .

Момент от одиночного импульса a_j , приложенного в точке $x=x_j$, $y=y_j$, записывается следующим образом:

$$M_{zj} = a_j [l(x_j) y_j - m(x_j) x_j] \quad (5)$$

Рассмотрим стационарный режим движения судна на достаточно большом интервале времени $(-T, T)$. Так как взаимодействие корпуса судна со льдом является пуассоновым процессом, то за интервал времени $2T$ на судно подействует $N \approx 2\lambda T$ импульсов [2]. Дифференциальное уравнение (2) тогда примет вид

$$J_z (1 + n) \frac{d\Psi'}{dt} + \lambda_{26} v \Psi' = \sum_{j=1}^N a_j(t) (l_j y_j - m_j x_j). \quad (6)$$

Из статистической независимости ударов и симметрии обоих бортов судна следует, что математическое ожидание правой части уравнения (6) равно нулю ($\overline{M_z} = 0$). Полагая форму и длительность каждого импульса $a(t)$ постоянными, можно найти спектр мощности такого отцентрированного процесса:

$$S(\omega) = \frac{\sigma_M^2 \tau_0^2}{\pi \tau_a} |g(\omega \tau_0)|^2, \quad (7)$$

где σ_M^2 - дисперсия амплитуды момента M_z ; $\tau_a \approx \lambda^{-1}$ - средняя продолжительность промежутка времени между импульсами; $g(\omega \tau_0)$ - безразмерный спектр Фурье одиночного импульса единичной амплитуды.

Аппроксимируя реальную форму импульса прямоугольником, имеем

$$g(\omega \tau_0) = \frac{\sin \frac{\omega \tau_0}{2}}{\frac{\omega \tau_0}{2}}. \quad (8)$$

Введя плотность вероятности попадания удара в точку борта с координатой x , можно получить выражение для дисперсии:

$$\sigma_M^2 = a^{-2} \int_{\Omega} (ly - mx)^2 p(x) dx. \quad (9)$$

В уравнении (9) интеграл берется лишь по одному из бортов.

Таким образом, задача сводится к анализу линейной системы (2), на вход которой по-

дается дискретный сигнал, обладающий спектром мощности (7). По известной теореме о соотношении между спектрами входа и выхода [6] можно найти

$$S_{\Psi}(\omega) = |Y(i\omega)|^2 S(\omega), \quad (10)$$

где $Y(i\omega)$ - частотная характеристика однородного уравнения (2):

$$Y(i\omega) = \frac{1}{\beta_{26} - i\omega}, \quad (11)$$

где

$$\beta_{26} = \frac{\lambda_{26}v}{J_z(1+n)}. \quad (12)$$

Окончательно спектр S_{Ψ} можно определить по формуле

$$S_{\Psi} = \frac{\lambda\sigma_M^2\tau_0^2|g(\omega_{\tau_0})|^2}{\pi J_z^2(1+n)^2(\omega^2 + \beta_{26}^2)}. \quad (13)$$

Дисперсия угловых скоростей случайных отклонений от прямого курса определяется интегрированием спектра выходного процесса (13) по всему диапазону частот. Полагая импульсы прямоугольными,

$$\sigma_{\Psi}^2 = \frac{\lambda\sigma_M^2}{v^2\lambda_{26}^2} \left[\tau_0 - \frac{1}{\beta_{26}}(1 - e^{-\tau_0\beta_{26}}) \right]. \quad (14)$$

Обычно $\tau_0\beta_{26} \ll 1$, откуда

$$\sigma_{\Psi}^2 = \frac{\lambda\sigma_M^2\tau_0^2}{2v\lambda_{26}J_z(1+n)}. \quad (15)$$

Из формулы (15) следует, что дисперсия угловых скоростей существенно зависит от формы обводов корпуса судна и параметров ударов о лед: их длительности, амплитуды, вероятности попадания в данную точку борта и т.д. Экспериментально было доказано, что случайный процесс, описывающий отклонения от прямого курса, является гауссовым [2]. Поэтому задание дисперсии полностью определяет все его параметры.

Среднее число рысканий за единицу времени можно определить по общей формуле математического ожидания числа нулей нормального процесса:

$$N_0 = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\int_0^{\infty} \omega^2 S_{\Psi}(\omega) d\omega}{\sigma_{\Psi}^2} \right]^{1/2}. \quad (16)$$

Подставив в эту формулу выражения (13) и (15), после интегрирования можно получить

$$N_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2\lambda_{26}v}{J_z(1+n)\tau_0}}. \quad (17)$$

Для возможности сопоставления характеристик различных судов уравнение (17) приведем к безразмерному виду, умножив на дробь L/v . Тогда критерий устойчивости на курсе записывается следующим образом:

$$K_N = \frac{N_0 L}{v} = \frac{L}{\pi} \sqrt{\frac{2\lambda_{26}}{J_z(1+n)\tau_0 v}}. \quad (18)$$

Из формулы (18) следует, что большие значения величины K_N соответствуют меньшей устойчивости на курсе. Время соударения τ_0 довольно стабильно и слабо зависит от ледовых условий.

Таким образом, представленный теоретический анализ показал, что устойчивость на курсе во льдах при движении с достаточно большой скоростью мало отличается от устойчивости на чистой воде, а при малых скоростях - движение будет неустойчивым.

В середине 80-х годов XX века в России были проведены обширные натурные исследования устойчивости на курсе ледоколов и судов в различных ледовых условиях. В табл. 1-4 приведены результаты натурных испытаний во льдах устойчивости на курсе танкера типа "Самотлор". Измерения устойчивости на курсе проводились на прямых участках с продолжительностью непрерывных кадров от 180 до 3000 секунд. Обработка результатов измерений велась по амплитудным значениям угла перекадки руля. Методика обработки экспериментальных данных представлена в табл. 1-4, где приняты следующие условные обозначения:

$\sum t_i$, с, - суммарное время перекадки руля;

T , с, - продолжительность непрерывного кадра;

n - количество перекадок руля в пределах кадра;

M_y^{\max} , градус, - математическое ожидание амплитуды перекадки руля;

$\sigma_{y_{\max}}^2$, градус², - дисперсия амплитуды перекадки руля;

$\frac{\sigma_{y_{\max}}}{M_y^{\max}}$ - величина СКВО, отнормированная по математическому ожиданию;

$K_t = \frac{\sum t_i}{T}$ - временной коэффициент маневрирования рулем;

$f = \frac{n}{T}$, мин⁻¹, - частота перекадки руля.

Не останавливаясь на анализе упрощений, принятых при теоретическом решении задачи об устойчивости на курсе [2], отметим, что выводы теоретического решения задачи не получили подтверждения в результате натурных испытаний. Так, у танкера типа «Самотлор» в грузу при движении в битых льдах сплоченностью 10 баллов частота перекадки руля с увеличением толщины льда (уменьшением скорости движения) убывает и составляет $f = 1,91$ при $h = 0,05-0,1$ и $f = 1,15$ при $h = 0,15$ и в балласте $f = 3,45$ при $h = 0,1-0,15$ и $f = 2,87$ при $h = 0,25$.

Аналогичные результаты были получены при исследованиях устойчивости на курсе ледоколов и судов в сплошных и битых льдах (табл. 5).

Таким образом, полученные в натурных испытаниях результаты позволяют сделать вывод, что с увеличением толщины льда (уменьшением скорости движения) устойчивость судна на курсе во льдах возрастает. Этот вывод можно объяснить тем, что с приближением толщины льда к предельной ледопроеходимости судна (в относительно толстых битых льдах) мощности судна становится недостаточно для реализации вращательного момента M_z и разрушения льда. Поэтому лед является препятствием для рыскания и способствует удержанию судна на заданном курсе.

Результаты натурных испытаний позволяют также сформулировать вывод о существенной зависимости устойчивости на курсе во льдах от водоизмещения судна, при этом большему водоизмещению соответствует большая устойчивость на курсе. Относительно высокий уровень частоты перекадки руля у танкера типа "Самотлор" в балласте по сравнению с уровнем частоты перекадки руля у этого же танкера в грузу объясняется тем, что при меньшем водоизмещении судна ударные импульсы со стороны льда оказывают значительно большее влияние на изменение курсового угла. В связи с этим, устойчивость на курсе может служить одним из критериев для выбора водоизмещения судна, предназначенного для работы во льдах.

Таблица 1

Результаты натурных испытаний танкера “Самбург” в грузу ($D=24200$ т) на р. Енисей в канале за ледоколом. $h_{ice}=0,05-0,1$ м, $h_{sn}=0-0,05$ м, $S=10$ баллов (01-03 ноября 1985 г.)

Статические характеристики	Левый борт	Правый борт	Оба борта
$\sum t_i, \text{ с}$	830	406	1236
$T, \text{ с}$	-	-	3519
n	70	42	112
$M_y^{\max}, \text{ градус}$	6,80	5,50	6,31
$\sigma_{y_{\max}}^2, \text{ градус}^2$	3,14	3,73	3,75
$\frac{\sigma_{y_{\max}}}{M_y^{\max}}$	0,25	0,35	0,31
$K_t = \frac{\sum t_i}{T}$	0,236	0,115	0,351
$f = \frac{n}{T}, \text{ мин}^{-1}$	1,19	0,716	1,19

Таблица 2

Результаты натурных испытаний танкера “Ленинск-Кузнецкий” в грузу ($D=24000$ т) на р.Енисей в канале за ледоколом. $h_{ice}=0,15$ м, $h_{sn}=0$ м, $S=10$ баллов (14 ноября 1985 г.)

Статические характеристики	Левый борт	Правый борт	Оба борта
$\sum t_i, \text{ с}$	1331	3160	4491
$T, \text{ с}$	-	-	5030
n	31	66	97
$M_y^{\max}, \text{ градус}$	9,73	2,33	4,69
$\sigma_{y_{\max}}^2, \text{ градус}^2$	2,98	7,07	17,53
$\frac{\sigma_{y_{\max}}}{M_y^{\max}}$	0,177	1,141	0,893
$K_t = \frac{\sum t_i}{T}$	0,265	0,628	0,893
$f = \frac{n}{T}, \text{ мин}^{-1}$	0,370	0,787	1,157

Таблица 3

Результаты натурных испытаний танкера “Самбург” в балласте ($D=18300$ т) на р. Енисей в канале за ледоколом. $h_{ice}=0,10-0,15$ м, $h_{sn}=0-0,05$ м, $S=10$ баллов (7 ноября 1985 г.)

Статические характеристики	Левый борт	Правый борт	Оба борта
1	2	3	4
$\sum t_i, \text{ с}$	545	471	1016
$T, \text{ с}$	-	-	1807
n	51	53	104
$M_y^{\max}, \text{ градус}$	3,51	4,08	3,80

Окончание табл. 3

1	2	3	4
$\sigma_{y_{\max}}^2$, градус ²	10,59	3,61	7,16
$\frac{\sigma_{y_{\max}}}{M_y^{\max}}$	0,927	0,466	0,704
$K_t = \frac{\sum t_i}{T}$	0,302	0,61	0,562
$f = \frac{n}{T}$, мин ⁻¹	1,69	1,76	3,45

Таблица 4

Результаты натурных испытаний танкера “Ленинск-Кузнецкий” в балласте ($D=19600$ т) на р. Енисей в канале за ледоколом. $h_{ice}=0,25$ м, $h_{sn}=0,05-0,1$ м, $S=10$ баллов (19 ноября 1985 г.)

Статические характеристики	Левый борт	Правый борт	Оба борта
$\sum t_i$, с	299	716	1015
T , с	-	-	2160
n	41	60	101
M_y^{\max} , градус	5,22	4,30	4,07
$\sigma_{y_{\max}}^2$, градус ²	4,66	9,04	7,47
$\frac{\sigma_{y_{\max}}}{M_y^{\max}}$	0,414	0,699	0,585
$K_t = \frac{\sum t_i}{T}$	1,14	0,331	0,470
$f = \frac{n}{T}$, мин ⁻¹	1,69	1,67	2,81

Таблица 5

Результаты натурных испытаний устойчивости на курсе ледокольно-транспортных судов в различных ледовых условиях

Ледовые условия	Судно/ водоизмещение	h_{ice} , м	h_{sn} , м	S , баллы	v , м/с	f , мин ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7
Сплошной ровный лед	т/х “Михаил Стрекаловский” $D=24800$ т	0,45	0,10	-	0,4	0,55
	т/х “Капитан Бочек” $D=22100$ т	0,25	0,10	-	2,5	1,68
	т/х “Капитан Кутузов” $D=24000$ т	0,15	0,10	-	3,0	1,40
	т/х “Капитан Свиридов” $D=23600$ т	0,10	0	-	4,3	1,33

Окончание табл. 5

	т/х "Ленинск-Кузнецкий" D=24000 т	0,25	0,10	-	2,4	0,62
	т/х "Ленинск-Кузнецкий" D=19800 т	0,15	0,10	-	3,5	1,11
	т/х "Самбург" D=24100 т	0,10	0,10	-	4,5	1,60
Битый лед	т/х "Капитан Свиридов" D=23600 т	0,05-0,10	0	10	5,2	1,74
	т/х "Капитан Кутузов" D=24000 т	0,10-0,15	0,05-0,10	10	4,0	1,43
	т/х "Капитан Бочек" D=22100 т	0,20-0,25	0,05-0,10	10	3,3	2,61
	т/х "Самбург" D=24100 т	0,05-0,10	0-0,10	10	5,4	1,91
	т/х "Самбург" D=18300 т	0,10-0,15	0-0,05	10	4,8	3,45
	т/х "Ленинск-Кузнецкий" D=24000 т	0,15	0	10	5,0	1,16
	т/х "Ленинск-Кузнецкий" D=19800 т	0,25	0,05-0,10	10	3,5	2,81

Примечание: ледокольно-транспортные суда типа "Дмитрий Донской": т/х "Михаил Кутузов", т/х "Капитан Бочек", т/х "Капитан Свиридов", т/х "Михаил Стрекаловский". Танкера типа "Самолор": т/х "Самбург", т/х "Ленинск-Кузнецкий".

Библиографический список

1. **Рывлин, А.Я.** Испытания судов во льдах / А.Я. Рывлин, Д.Е. Хейсин. – Л.: Судостроение, 1980. – 260 с.
2. **Хейсин, Д.Е.** Использование вероятностных методов при оценке маневренных качеств судов во льдах // Труды ААНИИ. – Л. 1979. Т. 309. С. 35-50.
3. **Роман, И.С.** Присоединенные массы тел различной формы / И.С. Роман, Р.Л. Крепс // Труды ЦАГИ. – М. 1947. Вып. 635.
4. **Федяевский, К.К.** Управляемость корабля / К.К. Федяевский, Г.В. Соболев. – Л.: Судпромгиз, 1963.
5. **Кудрявцева, Н.А.** Силы и моменты инерционной природы, действующие на сечение подводной части накрененного корабля // Труды ВНИИТОС. – М. 1957. Т. 7. Вып. 2.
6. **Бендат, Д.Т.** Основы теории случайных шумов и ее применение / Д.Т. Бендат. – М.: Наука, 1965.

Дата поступления
в редакцию 06.07.2010

В.Р. Юнов

COURSE STABILITY OF VESSELS IN ICE

The issues of sustainability on the course of icebreakers and ships in different ice conditions are considered. Changing the direction of motion of the vessel in the ice is connected not only with the geometry of the body and the direction of rotation of the screw, but also with the characteristics of the ice cover.

Key words: ice conditions, icebreakers, vessels of ice navigation, course stability