

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА НАЧАЛЬНУЮ ОСТОЙЧИВОСТЬ СУДНА

Гегешидзе Э.И., Палавандишвили Г.А.
Грузинский технический университет

РЕЗЮМЕ

В работе рассмотрены некоторые конкретные вопросы, связанные с расчетом влияния свободной поверхности на начальную остойчивость судна, рассчитанную по составляющей изгибающего момента на мидели от сил дедвейта как арифметической полусуммы в моменты загрузки носовых и кормовых грузов относительно миделя.

Ключевые слова: свободная поверхность, метacentрическая высота, форпик, ахтерпик, перегиб, динамическая устойчивость, дедвейт.

Поправка к метacentрической высоте на влияние свободной поверхности определяется по формуле:

$$\Delta h = \frac{\sum \Delta m_h}{D_1},$$

$\sum \Delta m_h$ – суммарная поправка к статическому моменту массы судна от влияния свободной поверхности.

Для отдельных цистерн Δm_h определяется по формуле:

$$\Delta m_h = \rho_{жс} \cdot i_y, \quad \Delta m_n = \rho_{жс} \cdot i_y,$$

$\rho_{жс}$ – плотность жидкости;

i_x – центральный момент инерции свободной поверхности;

определяется по формулам:
для прямоугольных цистерн:

$$i_x = \frac{lb^3}{12},$$

для поверхностей, имеющих форму треугольника (форпик, ахтерпик):

$$i_y = \frac{bl^3}{36},$$

для поверхностей, имеющих форму трапеции:

$$i_y = \frac{b_1^2 + 4b_1b_2 + b_2^2}{36(b_1 + b_2)} l^3,$$

l – длина отсека

b – ширина отсека

b_1 и b_2 – ширина носовой и кормовой части цистерны

l и b – снимаются с чертежа.

В соответствии с требованиями Правил Регистра ССС включается только цистерны, для которых:
 $\Delta m_h > 0,01D_{\min}$.

Расчеты производятся в следующей последовательности.

– Составляется расчетная комбинация из цистерн каждого вида жидкого груза. Для этого составляется таблица, в которую заносятся цистерны по каждому виду груза или топлива с указанием их характеристик – таблица 1.

Таблица 1

Поправки на влияние свободной поверхности

№№	Наименование цистерны	Длина l	Ширина b	Момент инерции i_x	Δm_h
				$\sum i_x$	$\sum \Delta m_i$

- Определяется поправка к поперечной метацентрической высоте:

$$\Delta h = - \frac{\sum \Delta m_h}{D_1}.$$

- Определяется исправленное значение метацентрической высоты:

$$h_1 = h + \Delta h$$

Для свободной поверхности топливных цистерн можно не учитывать.

В судовых условиях контроль прочности корпуса осуществляется расчетным методом и при помощи приборов.

Проверка общей продольной прочности аналитическим методом производится в следующей последовательности:

- рассчитывается составляющая изгибающего момента от веса судна порожнем:

$$M_0 = K_0 DL,$$

K_0 – коэффициент, равный 0,100 – для грузовых судов с силовой установкой в средней части;

K_0 – 0,126 – для грузовых судов с силовой установкой в корме;

K_0 – 0,0975 для грузо-пассажирских судов с силовой установкой в средней части.

- рассчитывается составляющая изгибающего момента на мидели от сил дедвейта как арифметическая полусумма моментов носовых и кормовых грузов относительно миделя:

Для этого составляется таблица – таблица 2.

Таблица 2

Расчет изгибающего момента от сил дедвейта и груза

№№	Наименование помещения	Масса груза	Плечо до миделя	Момент М
	Сумма	$M_g = \frac{1}{2} \sum M_x $		

Следует обратить внимание, что если плоскость модель-шпангоута делит помещение на носовую и кормовую части, то моменты носовых и кормовых грузов в этом помещении пересчитываются отдельно. Ориентировочно можно считать:

$$p_{in} = p_i \cdot \frac{l_n}{l}, \quad x_n = \frac{1}{2} l_n$$

$$p_{ik} = p_i \cdot \frac{l_k}{l}, \quad P_k = \frac{1}{2} l_k,$$

p_i, p_{ik}, p_{in} – соответственно, вес груза во всем помещении, в носовой и кормовой части;

l, l_n, l_k – соответственно длина всего помещения, носовой и кормовой части.

- Рассчитывается составляющая изгибающего момента на модели от сил поддержания:

$$M_{cn} = -K_{cn} D \cdot L,$$

K_{cn} – численный коэффициент, равный: $K_{cn} = 0,0895\delta + 0,0315$.

- Определяется величина изгибающего момента на тихой воде в миделевом сечении:

$$M_{изг} = M_0 + M_\delta + M_{cn}.$$

Если момент получится положительным, то судно испытывает перегиб, а если отрицательный – прогиб на тихой воде.

- Рассчитывается нормативная величина изгибающего момента на тихой воде по формуле:

$$M_{дон} = K_0 W_0,$$

W_0 – базисный минимальный момент сопротивления (в см³) поперечного сечения корпуса,

$$W_0 = C_n \cdot B \cdot L^2 (\delta + 0,7) \Phi,$$

C_n – коэффициент,

$$C_n = 0,75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{3/2},$$

δ – коэффициент общей полноты, снимается с КЭТЧ.

Φ – численный коэффициент, определяемый по методике Регистра, для практических расчетов можно принимать $\Phi = 1$;

K_0 – численный коэффициент, принимаемый:

а) для судов группы 1 (обычно сухогрузные суда для перевозки начальных грузов при 0,85 м³/т, пассажирские суда, научно-исследовательские, паромы, суда накатного типа, промысловые суда)

0,0736	при перегибе	(Мизг. > 0)
[0,0075]		
0,0785	при прогибе	(Мизг. < 0)
[0,0080]		

б) для судов 2 и 3 группы

0,0667	при перегибе
[0,0068]	
0,0716	при прогибе
[0,0073]	

Значения коэффициента K_0 в квадратных скобках подставляется, если изгибающий момент определяется в тс. м, а без скобок, если $M_{изг.}$ в кн.м.

– Величина изгибающего момента, действующего в миделевом сечении сопоставляется с нормативными значениями:

$$M_{доп.прогиба} \leq M_{изг} \leq M_{доп.перегиб}.$$

Если изгибающий момент на тихой воде находится в пределах, допустимых значений, то общая продольная прочность считается обеспеченной.

Если $M_{изг.}$ выходит за пределы допустимых значений, то общая прочность считается необеспеченной и необходимо принять меры для уменьшения абсолютной величины изгибающего момента.

Абсолютную величину изгибающего момента при перегибе можно уменьшить перемещением грузов от миделя к оконечностям.

После перемещения грузов необходимо заново выполнить расчеты по контролю прочности.

Диаграмма статической остойчивости рассчитывается по формуле:

$$l = l_{\Phi} - l_b; \quad l = l_{\Phi} - (z_{g1} - z_{x1}) \sin \theta = l_{\Phi} - a \sin \theta,$$

или

$$l = l_{\Phi} = z_{g1} \sin \theta$$

l_{Φ} – плечо остойчивости формы.

Плечо остойчивости формы снимаются с интерполяционных кривых плеч остойчивости формы (пантокарен) по значению объемного водлизмещения:

$$V = \frac{D_1}{\rho},$$

l_b – плечо остойчивости веса.

Диаграмма динамической остойчивости рассчитывается по формуле:

$$C_d = \int_0^{\theta} l d\theta.$$

Интеграл решается приближенным методом – методом трапеций.

Расчеты плеч статической и динамической остойчивости удобно выполнять в табличной форме – табл. 3.

Таблица 3

Расчет плеч статической и динамической остойчивости							
№№	Расчетные величины		Значения расчетных величин				
1.	θ	0	10	20	30	40	50
2.	$\sin \theta$	0					
3.	$a \sin \theta$	0					
4.	$l_{\Phi} = f(V)$ с пантокарен	0					
5.	$l = l_{\Phi} - a \sin \theta$ (4)-(3)	0					
6.	$\Sigma l_{\text{инт.}}$	0					
7.	$ld = \frac{\Delta \theta}{2} \Sigma l$	0					

$$\Delta \theta = 10^{\circ}, \quad \Delta \theta_p = \frac{10^{\circ}}{5703} = 0,174.$$

– По рассчитанным значениям l и ld строятся диаграммы статической и динамической остойчивости.

Критерий погоды K определяется по формуле:

$$K = \frac{M_{\text{онр}}}{M_{\text{кр}}},$$

$M_{\text{онр.}}$ – опрокидывающий момент минимальный, определяемый с учетом бортовой качки;

$M_{\text{кр.}}$ – динамически приложенный кренящий момент от действия ветра.

Расчеты критерия погоды производятся в следующей последовательности:

1. Определяется величина кренящего момента от действия ветра:

$$M_{\text{кр}} = 0,001 P_v \cdot S_{n_1} \cdot Z_{n_1},$$

P_v – удельное давление ветра выбирается из табл. 2.1, 2.2 части IV Правил;

S_{n_1} – площадь парусности судна при выходе в рейс:

$$S_{n_1} = S_n - \Delta T_1 L; \quad \Delta T_1 = T_{\text{ср}} - T_{\text{зр}},$$

$T_{\text{зр}}$ – осадка по летнюю грузовую марку;

Z_{n_1} – плечо парусности (возвышение Ц.П.) над действующей ватер-линией при $T_{\text{ср}}$.

$$Z_{n_1} = \frac{S_{n_1} (Z_n - \Delta T_1) + 0,05 (\Delta T_1)^2 L}{S_{n_1}}.$$

2) Рассчитывается расчетная амплитуда бортовой качки θ_2 по методике Регистра (§ 2, часть IV Правил).

– амплитуда качки для судна без бортовых килей:

$$\theta_1 = x_1 x_2 y$$

x_1, x_2 – безразмерные множители, принимаемые в соответствии с табл. 2.1.3.1 – 2.1.3.1 – 3 части IV Правил.

y – множитель (градусы) принимается в соответствии с табл. 2.1.3.1 – 1.

Если судно имеет бортовые кили (как правило, все транспортные суда имеют бортовые кили), то расчетная амплитуда качки вычисляется по формуле:

$$\theta_2 = K \cdot \theta_1,$$

где значение коэффициента K принимается в соответствии с табл. 2.1.3.2 в зависимости от отношения

$$\frac{S_{\kappa}}{LBV} \text{ в } \%, \text{ в котором:}$$

S_{κ} – суммарная площадь бортовых килей;

$$S_{\kappa} = \sum a_{\kappa} \cdot l_{\kappa}.$$

При отсутствии точных данных длина скулового киля l_{κ} к может быть принята равной (0,4-0,6), а высота a_{κ} определяется по чертежу мидель-штангоута.

Для транспортных судов обычно $S_{\kappa} = (0,02 \div 0,03)BL$, т.е. в отношении:

$$\frac{S_{\kappa}}{LB} = 2 \div 3\%.$$

Рассчитанное значение амплитуды бортовой качки округляется до целых градусов.

3) Определяется минимальный опрокидывающий момент – $M_{опр}$.

Рекомендуется определять $M_{опр}$ по диаграмме динамической остойчивости по схеме, изложенной в Приложении 2 части Правил.

Поскольку на диаграмме по оси ординат отложены величины плеч, то определяется плечо опрокидывающего момента $l_{опр}$, а затем находится:

$$M_{опр} = D_1 \cdot l_{опр}.$$

4) Рассчитывается значение критерия погоды:

$$K = \frac{M_{опр}}{M_{кр}}.$$

Остойчивость судна считается достаточной, если

а) критерий погоды

$$K = \frac{M_{опр}}{M_{кр}} \geq 1.$$

б) максимальное плечо диаграммы статической остойчивости:

$$l_{\max} \geq 0,2,$$

в) угол максимума диаграммы статической остойчивости

$$\theta_{\max} \geq 30^\circ,$$

г) угол заката диаграммы статической остойчивости:

$$n > 0^\circ.$$

Изменение осадок оконечностей ΔT_{κ} и ΔT_{η} от приема 100 т груза определяется по формулам:

$$\Delta T_{\eta} = \frac{100}{q} + \frac{100(x - x_f)}{\overline{M}l} \left(\frac{L}{2} + x_f \right),$$

$$\Delta T_{\kappa} = \frac{100}{q} + \frac{100(x - x_f)}{\overline{M}l} \left(\frac{L}{2} + x_f \right) \text{ см.}$$

$\overline{M}$ – момент дифферентующий судно на 1 см.

Расчеты выполняются в следующей последовательности:

1) Для осадки судна перед погрузкой записываются исходные данные:

$\overline{M}_0$ – момент дифферентующий судна на 1 см для $T_{ср.0}$ перед погрузкой.

q_0 – число тонн на 1 см осадки;

x_{p_0} – абсцисса Ц.Т. площади ватерлинии;

Рассчитываются значения $\Delta T_{онн}$ и $\Delta T_{кн}$ при приеме Р100 т на носовой перпендикуляр:

$$\Delta T_{онн} = \frac{100}{q_0} + \frac{100}{\overline{M}_0 L} \left(\frac{L}{2} - x_{f_0} \right)^2,$$

$$\Delta T_{окк} = \frac{100}{q_0} - \frac{100}{\overline{M}L} \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 + x_f^2 \right].$$

Рассчитываются значения $\Delta T_{онк}$ и $\Delta T_{окн}$ при приеме Р 100 т на кормовой перпендикуляр:

$$\Delta T_{онк} = \Delta T_{окк},$$

$$\Delta T_{окн} = \frac{100}{q} + \frac{100}{\bar{M}_0 L} \left(\frac{L}{2} + x_f \right)^2.$$

2) для осадок судна после погрузки записываются исходные данные:

$\bar{M}_1$ – момент дифферентующий судна на 1 см для T_{cp1} после погрузки;

q_1 – число тонн на 1 см осадки;

x_{f1} – абсцисса Ц.Т. площади ватерлинии в грузу;

Рассчитываются значения: $\Delta T_{1нн}$ и $\Delta T_{1кн}$

$$\Delta T_{1нн} = \frac{100}{q_1} + \frac{100}{\bar{M}_1 L} \left(\frac{L}{2} - x_{f1} \right)^2,$$

$$\Delta T_{1кн} = \frac{100}{q_1} - \frac{100}{\bar{M}_1 L} \left(\frac{L^2}{2} - x_{f1}^2 \right).$$

Рассчитываются значения: $\Delta T_{1нк}$ и $\Delta T_{1кн}$

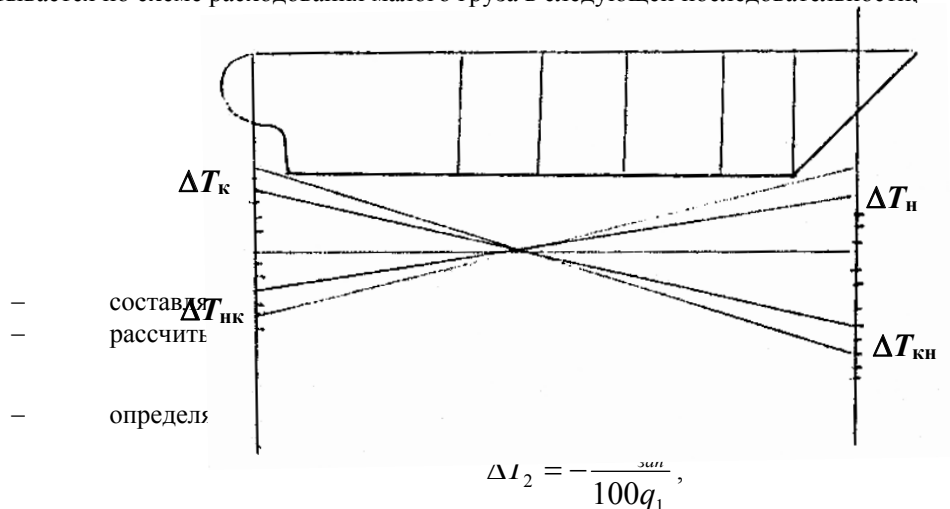
$$\Delta T_{1нк} = \Delta T_{1кн},$$

$$\Delta T_{1кн} = \frac{100}{q} + \frac{100}{\bar{M}L} \left(\frac{L}{2} + x_f \right)^2.$$

По полученным значениям строит график осадок оконечностей от приема 100 т груза:

К концу рейса расходуются 90% и более запасов, что вызывает изменение посадки и остойчивости.

Израсходованные запасы рассматривают как снятый малый груз и поэтому изменение посадки рассчитывается по схеме расходования малого груза в следующей последовательности:



– определяется T_{cp2} к концу рейса:

$$T_{cp2} = T_{cp1} - \Delta T_2,$$

– рассчитывается поперечная метацентрическая высота:

$$h_2 = h_1 + \frac{-\sum P_3}{D_2} \left(T_1 + \frac{\Delta T_2}{2} - h_1 - z_3 \right).$$

Таблица 4

Таблица израсходованных запасов

№№	Запасы и их расположение	Масса израсходованных запасов	Плечи		Моменты	
			x	z	M_x	M_z
1.	Топливо Масло Пресная вода					
Всего израсходовано		$\sum P_i$	x_3	z_3	$\sum M_x$	$\sum M_z$

- рассчитывается продольная метацентрическая высота:

$$H_2 = H_1 + \frac{-\sum P_3}{D_2} \left(T_1 + \frac{\Delta T_2}{2} - H_1 - Z_3 \right),$$

- рассчитывается угол дифферента от расхода топлива:

$$\operatorname{tg} \Psi_2 = \frac{-P(x - x_f)}{D_2 \cdot H_2}.$$

- определяется осадка носом и кормой:

$$T_{n_2} = T_{n_1} + \Delta T_n + \left(\frac{L}{2} - x_{f_1} \right) \operatorname{tg} \Psi_2,$$

$$T_{k_2} = T_{k_1} + \Delta T_2 - \left(\frac{L}{2} - x_{f_1} \right) \operatorname{tg} \Psi_2$$

- определяется дифферент:

$$d = T_{n_2} - T_{k_2},$$

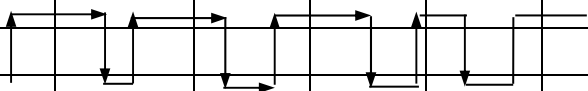
- определяется осадка T_{k_2} и T_{n_2} с помощью графика изменения осадок оконечностей от приема 100 т груза:

$$T_{n_2} = T_{n_1} + 0,01 \Delta T_n \frac{-\sum P_3}{100}; \quad T_{k_2} = T_{k_1} + 0,01 T_k \frac{-\sum P_3}{100}.$$

T_n и T_k определяется по графику изменения осадки носом и кормой при приеме 100 т груза в точку с абсциссой, равной x_3 .

Расчет диаграмм статической и динамической остойчивости к концу рейса удобно производить в табличной форме – табл. 5.

Таблица 5

№№ пп	Расчетные величины		Расчет				
1.	θ	0	10	20	30	40	50
2.	$\sin \theta$						
3.	l из табл. 6 5 л. строка						
4.	$K_1 l - K_1$ (3)						
5.	$K_2 \sin \theta - K_2$ (2)						
6.	$l_1 = K_1 l - K_2 \sin \theta$ (4)-(5)						
7.	$\sum l_1$						
8.	$ld_1 = \frac{\Delta \theta}{2} \sum l$						

По полученным значениям строится диаграмма статической и динамической остойчивости к концу рейса. Плечо статической остойчивости после приема груза вычисляется по формуле:

$$l_1 = l + \frac{\sum P_i}{D_2} \left[\left(T_1 + \frac{\Delta T_2}{2} - z \right) \sin \theta - l \right].$$

При снятии груза (расходование запасов) $\sum P_i$ и T_2 принимаются со знаком “–”, тогда будет равно:

$$l_1 = l - \frac{\sum P_i}{D_2} \left[\left(T_1 + \frac{\Delta T_2}{2} - z \right) \sin \theta - l \right] = K_1 l - K_2 \sin \theta,$$

K_1 и K_2 – численные значения, получаемые после преобразования уравнения для плеча:

$$K_1 = \left(1 + \frac{\sum P_i}{D_2}\right); \quad K_2 = \frac{\sum P_i}{D_2} \left(T_1 - \frac{\Delta T_2}{2} - z\right).$$

Проверка остойчивости к концу рейса:

– кренящий момент от действия ветра:

$$M_{кр1} = 0,001 \cdot P_v \cdot S_{n1} \cdot Z_{n2}$$

P_v – удельное давление ветра:

$$S_{n2} = S_n - \Delta T_2 L;$$

$$\Delta T_2 = T_{cp2} - T_{cp1} Z_{n1}^3 = \frac{S_n (Z_n - \Delta T_2) + 0,5(\Delta T_3)^2 L}{S_{n2}},$$

$M_{оп1}$ – минимальный опрокидывающий момент определяется по диаграмме динамической остойчивости, перестроенной с учетом расхода запасов.

$$K_0 \text{ – критерий погоды, } K = \frac{M_{оп}}{M_{кр}}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований выявлены необходимые зависимости для расчета влияния свободной поверхности на начальную остойчивость судна.

Литература

1. Афонин З.М. и др. Теория и устройство судов. М.-Л., Транспорт, 1985, 372 с.
2. Бекенский Б.В. Практические расчеты мореходных качеств судна. М., Транспорт, 1974, 264с.
3. Мельник В.Н., Сизов В.Г., Степанов В.В. Эксплуатационные расчеты мореходных качеств судна. М. ЦРИА, МОСФЛОТ, 1979.
4. Правила классификации и постройки морских судов. Л., Транспорт, 1981.