

### Расчет собственных колебаний яхты на тихой воде

Возьмем опять ту же самую модель яхты Александра из Киева /см. данные в пост №108 темы, на стр.5/.

Собственный массовый момент инерции относительно оси X получим по формулу Шиманского от „Качка корабля”-Семенов-Тянь-Шанский, Благовещенский, Холодилин, 1969г.

Формула Шиманского выведена в предположении, что корпус судна представляет сплошной параболический цилиндр.

$$J_x = 0,0895 \text{ t} \cdot \text{m}^2 / \text{см. пост №108/}$$

Далее ведем расчет по рис.196, стр.595 „Гидродинамика судна”-Басин, Анфимов, 1961г.

$$\text{Радиус инерции массы яхты: } \rho_x = (g \cdot J_x / D)^{1/2}$$

$$\text{При } D = 1,219 \text{ т и } g = 9,81 \text{ м/с}^2 \text{ получаем } \rho_x = 0,8487 \text{ м}$$

$$\text{Среднее плечо смоченной поверхности } \rho_s = (1/4) \alpha B [1 + (1/6) \cdot (B/T)]$$

где  $\alpha = 0,686$  – коэффициент полноты ВЛ;  $B = 2,456 \text{ м}$  – ширина яхты;  $T = 0,3 \text{ м}$  – осадка

$$\text{получаем } \rho_s = 0,996 \text{ м;}$$

$$\rho_x / \rho_s = 0,852$$

$$\text{по диаграмме на рис. 196 получаем } K_{44} = J_x / (J_x + \lambda_{44}) = 0,67$$

$$\lambda_{44} = J_x \cdot [(1 - K_{44}) / K_{44}] = 0,4925 J_x; \text{ Принимаем } \lambda_{44} = 0,5 J_x; J_{x1} = J_x + \lambda_{44} = J_x + 0,5 J_x = 1,5 J_x = 1,5 \cdot 0,0895$$
$$J_{x1} = 0,13425 \text{ т} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2$$

$$\text{Тогда собственный период качки } T_\theta = 2\pi \cdot [J_{x1} / (D \cdot h_0)]^{1/2} = 2\pi \cdot [0,13425 / (1,219 \cdot 0,552)]^{1/2} = 2,8 \text{ с}$$

### Расчет бортовой качки яхты на волнении

Получим изменение длины и высоты резонансной волны.

Рассмотрим случай с максимальной амплитуды качки при резонансе, т.е. период волнения равен периоду собственных колебаний яхты:  $\tau = T_\theta = 2,8 \text{ с}$

$$\text{Круговая частота волн } \sigma = 2\pi / \tau = 2\pi / 2,8 = 2,244 \text{ рад/с}$$

От уравнения  $\tau \sim 0,8 \lambda^{1/2}$  получим:  $\lambda \sim 1,56 \tau^2 = 1,56 \cdot 2,8^2 = 12,23 \text{ м}$  – длина волны при резонансе

Высота волны определим по формуле Циммермана:

$$2 r_b = 0,17 \lambda^{3/4} = 0,17 \cdot 12,23^{3/4} = 1,11 \text{ м; } r_b = 0,556 \text{ м}$$

$$\text{Скорость бега волн } c = \lambda / \tau = 12,23 / 2,8 = 4,37 \text{ м/с;}$$

$$\text{Крутизна волны } 2 r_b / \lambda = 1,11 / 12,23 = 0,09 \sim 1/11$$

У крупных водохранилища и озера имеем  $h_b / \lambda = 1/8 \div 1/12$

$$\text{Наибольший угол волнового склона будет: } \alpha_0 = 2\pi r_b / \lambda = 2\pi \cdot 0,556 / 12,23 = 0,2856 \text{ рад} = 16,36^\circ$$

Расчет поправочных /редукционных/ коэффициентов влияния ширины и осадки яхты на возмущающих силы и момента при качке:

Для бортовой качки  $\alpha_\theta = \alpha_{\theta B} * \alpha_{\theta T}$

$\alpha_{\theta B} = 1 - C_{wp}^{1/2} (B/\lambda)^2$  – коэффициент влияния ширины

$$\alpha_{\theta B} = 1 - 0,686^{1/2} * (2,456 / 12,23)^2 = \mathbf{0,9666}$$

Формулу можно использовать при  $\lambda/B > 4 \div 5$ ; В нашем случае  $\lambda/B = 12,23/2,456 = 4,98$

$\alpha_{\theta T}$  - коэффициент влияния осадки определим по формуле Благовещенского от „Качка судов” - Басин, 1969г, ф-ла IV-68, стр.122:

$$\alpha_{\theta T} = (\alpha_r * r + \alpha_{zp} * Z_p - \alpha_{zw} * Z_w) / (r - a)$$

$r = 1,002m$  – поперечный метацентрический радиус

$$r - a = h_0 = 0,552m; a = 0,45m$$

При  $Z_g = 0,6m$  от ОЛ и  $Z_c = 0,149m \sim 0,15m$  от ОЛ имеем:

$Z_p = -0,3m$  – отстояние ЦТ от WL в покое /положительное направление –вниз/

$Z_w \sim 0,15m$  – отстояние ЦВ от WL

По графикам в зависимости от  $\chi$  определяем коэффициенты:

$$\alpha_r = 0,934; \alpha_{zp} = 0,946; \alpha_{zw} = 0,923$$

$$\alpha_{\theta T} = [ 0,934 * 1,002 + 0,946 * (-0,3) - 0,923 * 0,15 ] / 0,552 = \mathbf{0,93}$$

$$\alpha_\theta = \alpha_{\theta B} * \alpha_{\theta T} = 0,9666 * 0,93 = \mathbf{0,899}$$

Определим эффективный угол волнового склона  $\alpha_m$ :

$$\alpha_m = \alpha_\theta * \alpha_0 = 0,899 * 0,2856rad \sim 0,2567rad = \mathbf{14,7^\circ}$$

Определим безразмерный коэффициент демпфирования при бортовой качке.

Силы сопротивления возникают от набегающие на яхту на стоянке волны регулярного волнения.

Эти силы затухают с определенном коэффициентом демпфирования  $2\mu$ .

Если нет статистические данные от проведенных экспериментов близких прототипов обычно при бортовой качке ориентировочно можно принять среднюю величину  $\mu = 0,1$ , т.е.  $2\mu = \mathbf{0,2}$

Для коэффициента присоединенной массы воды получим:

$$1 - q = J_x / J_{x1} = 0,0895 / 0,13425 = 0,67$$

$$J_x = 0,0895 \text{ t} * m * s^2$$

$$J_{x1} = 0,13425 \text{ t} * m * s^2$$

Амплитуда относительного наклона при бортовой качке на волнении при резонансе  $/X=1/$ :

$$\vartheta_m = (1-q) * \alpha_m / 2\mu = 0,67 * 0,2567 / 0,2 = 0,86rad = \mathbf{49,3^\circ}$$

Набегающие волны регулярного волнения вызывают вынужденные колебания яхты с углом относительного наклона  $\vartheta$  и сдвиг фазы  $\delta$  этих вынужденных колебаний по отношению к возмущающему моменту /  $\delta$  – фазовой угол на который вынужденные колебания яхты отстают от колебания возмущающего момента/.

Для фазового угла получается:  $\operatorname{tg} \delta = 2\mu * x / (1 - x^2)$

где  $x = \sigma / n_{\theta} = T_{\theta} / \tau$

$\sigma$  – круговая частота волнения (rad/s)

$n_{\theta}$  – частота собственных колебаний при бортовой качке (rad/s)

При резонансе  $x = 1$ , тогда  $\operatorname{tg} \delta = 0,2 * 1 / (1 - 1) = 0,2 / 0 = \infty$  или  $\delta = \pi / 2 \text{ rad} = 90^\circ$

Уравнение бортовой качки в относительных координатах получим как функцию мгновенного угла  $\vartheta(t)$  относительного наклона ДП яхты по отношению к нормали к поверхности волны:

$$\vartheta = \vartheta_m * \sin(\sigma t - \delta) = 49,3^\circ * \sin(\sigma t - \pi/2) = -49,3^\circ * \cos \sigma t$$

Определим  $\theta(t)$ - мгновенный угол абсолютного наклона яхты при бортовой качке , равный углу отклонения ДП от вертикального положения при резонансе:

$$\theta = \vartheta + \alpha$$

$$\alpha = \alpha_m * \sin \sigma t = 14,7^\circ * \sin \sigma t$$

Получим следующее уравнение бортовой качки в абсолютных координатах в условиях резонанса:

$$\theta = 14,7^\circ * \sin \sigma t - 49,3^\circ * \cos \sigma t$$

инж. Размик Бахарян