

УДК [656.61.052.1 : 527.6] : 629.5.072.1

Переменные составляющие воздействия регулярного волнения на корпус судна

Ю.И. Юдин, В.В. Иванов

Судоводительский факультет МГТУ, кафедра судовождения

Аннотация. Статья посвящена разработке аналитических формул и алгоритма для расчёта продольного, поперечного усилий и вращающего момента, действующих на свободно плавающее судно со стороны регулярного волнения с использованием теоретического чертежа корпуса судна. В статье представлены результаты расчёта усилий и момента, образующихся на корпусе танкера типа "Астрахань" в условиях регулярного волнения.

Abstract. The paper considers analytical formulae and algorithm for calculating linear, transverse efforts and turning moment influencing free-floating vessel from the regular choppy sea. The line of the vessel has been used. The paper contains calculations of the efforts and moment taking place at the hull of the tanker of "Astrakhan" type at regular choppy sea.

Ключевые слова: регулярное волнение, судно, силовое воздействие
Key words: regular choppy sea, vessel, power influence

1. Введение

Наиболее эффективным средством исследования поведения судна при различных внешних воздействиях является компьютерное моделирование. При этом, аналитическое представление указанных воздействий в данном случае является предпочтительнее табличного и тем более графического. Однако, результаты многочисленных модельных и натуральных экспериментов, используемых в качестве информационной базы в научных исследованиях, чаще всего представлены в табличной или графической форме, что усложняет использование такого важнейшего инструмента исследования как компьютерное моделирование из-за сложностей программирования. Поэтому нами проводится ряд исследований, целью которых является перевод вычисления всех внутренних и внешних силовых воздействий на судно в аналитический вид. В частности, такого рода силовым воздействием являются воздействие на судно со стороны регулярного волнения, которое условно представлено тремя составляющими – продольным и поперечным усилиями, а также вращающим моментом. Содержанием данной статьи является представление аналитических формул для вычисления продольного, поперечного усилий и вращающего момента, действующих на свободно плавающее судно со стороны регулярного волнения, которые получены в процессе разработки программного обеспечения для моделирования движения судна. Следует отметить, что в конечном итоге, предметом исследования являются движения судна, находящегося в свободном дрейфе, стоящего на якоре, динамически позиционирующего и т.п.

2. Определение поперечного усилия и вращающего момента

Из материалов, представленных в работах (Хаскинд, 1959; 1973), известно, что переменные, представляющие собой силовое воздействие на судно со стороны регулярного волнения, а именно, поперечная составляющая и вращающий момент изменяются во времени по следующему закону:

$$\begin{aligned} Y_w &= Y_{w0} \cdot \alpha_{w0} \cdot \cos(\omega_w t); \\ M_w &= M_{w0} \cdot \alpha_{w0} \cdot \sin(\omega_w t). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь Y_{w0} , M_{w0} – амплитуды поперечной силы и момента, α_{w0} – угол волнового склона, ω_w – кажущаяся частота волны. Поскольку скорости локального перемещения судна невелики, можно считать, что кажущаяся частота равна истинной частоте регулярной волны ω_w . Угол волнового склона просто выражается через коэффициент формы волны $k=2\pi/\lambda$ (λ – длина волны) и равен $\alpha_{w0} = k \cdot \zeta_w$ (ζ_w – амплитуда волны). В свою очередь, амплитудные значения рассматриваемых силы и момента выражаются формулами:

$$\begin{aligned} Y_{w0} &= \rho g V \cdot \kappa_y \cdot \sin(q_w); \\ M_{w0} &= g I_{zz} \cdot \kappa_m \cdot k \cdot \sin(q_w), \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ – массовая плотность воды; g – ускорение свободного падения; V – объёмное водоизмещение судна; I_{zz} – момент инерции массы судна относительно вертикальной оси z ; q_w – курсовой угол волны.

Кроме того, в выражения (2) входят поправочные коэффициенты κ_y и κ_m , которые для условно неподвижного судна можно выразить с помощью формул:

$$\begin{aligned} \kappa_y &= \kappa_{1кр}(1+k_{22})e^{-kz_c}, \\ \kappa_m &= \kappa_{2кр}(1+k_{66})e^{-kz_c}\cos(q_w). \end{aligned} \quad (3)$$

В этих двух формулах z_c – глубина погружения центра величины под ватерлинией, а редуцированные коэффициенты $\kappa_{1кр}$ и $\kappa_{2кр}$ находятся с помощью известных формул, представленных в работе (Войткунский, 1985а), как функции условного параметра $\mu = kL|\cos(q_w)| = 2\pi(L/\lambda)|\cos(q_w)|$ (L – длина судна по ватерлинии), k_{22} , k_{66} – коэффициенты присоединённой массы судна и присоединённого момента инерции массы, соответственно. Эти формулы носят интегральный характер, и используют зависимость площади шпангоутов $\omega(x)$ от продольной координаты x :

$$\begin{aligned} \kappa_{1кр} &= 2/V \int_{-L/2}^{L/2} \omega(x) \cos(\mu x) \frac{I_1\left[\mu\sqrt{\frac{\omega(x)}{\pi}}\right]}{\mu\sqrt{\frac{\omega(x)}{\pi}}} dx; \\ \kappa_{2кр} &= 0.2/VL^2 \int_{-L/2}^{L/2} x\omega(x) \frac{\sin(\mu x)}{\mu} \frac{I_1\left[\mu\sqrt{\frac{\omega(x)}{\pi}}\right]}{\mu\sqrt{\frac{\omega(x)}{\pi}}} dx. \end{aligned} \quad (4)$$

Для прямого применения этих формул следует с помощью теоретического чертежа судна получить строевую по шпангоутам $\omega = \omega(x)$ в аналитическом виде. Решение этой задачи рассмотрено на примере т/к типа "Астрахань".

После оцифровки координаты (y , z) 48-ми шпангоутов, взятых из теоретического чертежа танкера, рассчитаны их площади. Результаты этих расчётов с трехкратной разрядкой для сокращения данных в численном виде представлены в таблице.

Таблица

№ шп.	1	4	7	10	13	16	19	22
x , м	-71.2	-61.3	-51.4	-41.2	-30.3	-19.4	-8.5	0
$\omega(x)$, м ²	6.25	61.6	137.0	176.1	215.9	228.8	231.0	231.2
№ шп.	25	28	31	34	37	40	43	46
x , м	9.6	20.5	31.4	42.2	53.1	64.0	68.0	72.1
$\omega(x)$, м ²	230.9	230.1	228.3	224.4	197.8	113.9	98.8	29.0

Зависимость значений площадей шпангоутов ω от их продольной координаты x в среде MathCad были аппроксимированы степенной функцией – полиномом 5-ой степени:

$$\omega(x) = 233 - 0.194x - 7.842 \cdot 10^{-3}x^2 + 6.041 \cdot 10^{-4}x^3 - 6.746 \cdot 10^{-6}x^4 - 1.046 \cdot 10^{-7}x^5. \quad (5)$$

Расчётные и аппроксимационные значения площади приведены в графической форме на рис. 1, из которого хорошо видна высокая степень адекватности аппроксимационной формулы (5), несмотря на "плато" в расчётных данных площадей. Оно соответствует цилиндрической вставке в корпусе судна. В аппроксимации использованы все данные без купюр.

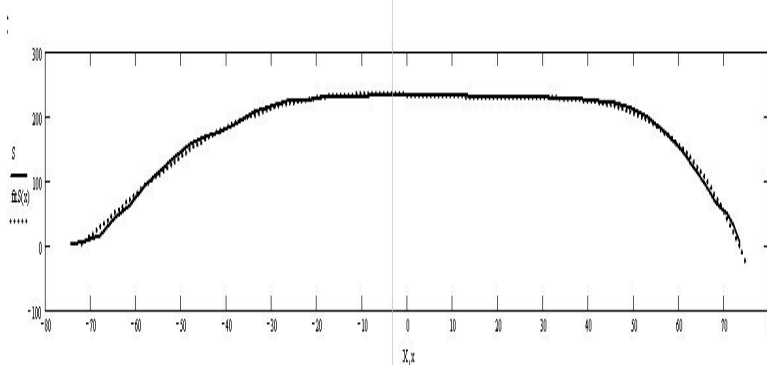


Рис. 1. Результаты аппроксимации площади шпангоутов вдоль ДП судна

Полученная аналитическая форма представления строевой по шпангоутам позволяет в среде MathCad реализовать интегральные формулы (4) для коэффициентов $\kappa_{1кр}$ и $\kappa_{2кр}$, поскольку эта среда имеет встроенные значения функций Бесселя. Такие расчёты позволяют графически представить зависимость редуционных коэффициентов $\kappa_{1кр}$ и $\kappa_{2кр}$ в функции от условного параметра μ (см. рис. 2).

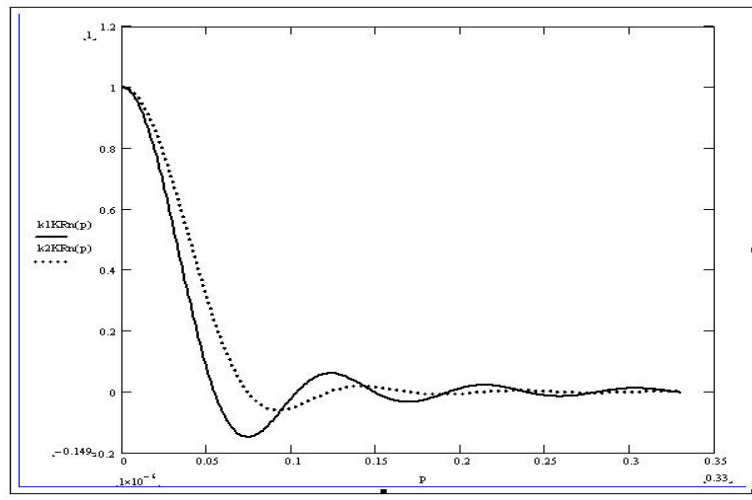


Рис. 2. Редуционные коэффициенты $\kappa_{1кр}$ и $\kappa_{2кр}$ как функции параметра $\mu = kL|\cos(q_w)| = 2\pi(L/\lambda)|\cos(q_w)|$

Вычислив редуционные коэффициенты, легко определить само поперечное усилие и вращающий момент. Их значения для волнения с высотой волны $h = 3$ м приведены как функции курсового угла волны q_w при различных значениях её длины λ на рис. 3 (поперечные усилия) и рис. 4 (вращающий момент).

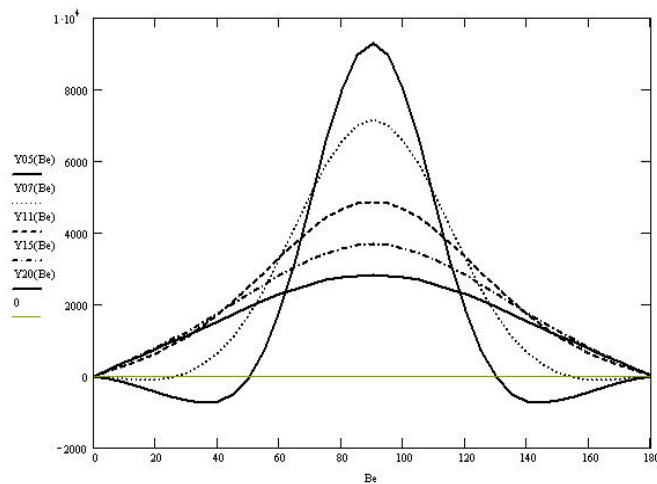


Рис. 3. Поперечное усилие (кН) в зависимости от курсового угла волны (параметр семейства кривых – длина волны различной величины $\lambda=0.5L, 0.7L, 1.1L, 1.5L, 2.0L$)

Параметром семейств кривых на этих рисунках выбрана длина волны λ в долях от длины по ватерлинии т/к типа "Астрахань" в грузу $L=147$ м. Представлено 5 кривых семейств для $\lambda = 0.5L, 0.7L, 1.1L, 1.5L, 2.0L$. Значения параметров отражены в именах самих кривых на осях ординат.

3. Определение продольного усилия

Определение продольного усилия от воздействия регулярного волнения на судно представляет собой отдельную задачу. Можно указать целый ряд источников (Войткунский, 1985a,b) с различными формулами для вычисления этого усилия. Остановимся на формуле, предложенной Хаскиндом М.Д. (1973), так как, на наш взгляд, основным её преимуществом перед аналогичными формулами является возможность найти значение продольного усилия для любых курсовых углов волны q_w , лежащих в

пределах $0 \leq q_w \leq 180^\circ$. К тому же она по своей структуре аналогична формулам (2) и не нарушает стереотипности вычислений. Указанная зависимость выглядит следующим образом:

$$X_w = X_{w0} \cdot \sin(\omega_r t), \quad (6)$$

где $X_{w0} = \rho V \kappa_d \kappa_L (2\pi \zeta_w / \lambda) \cdot \cos(q_w)$.

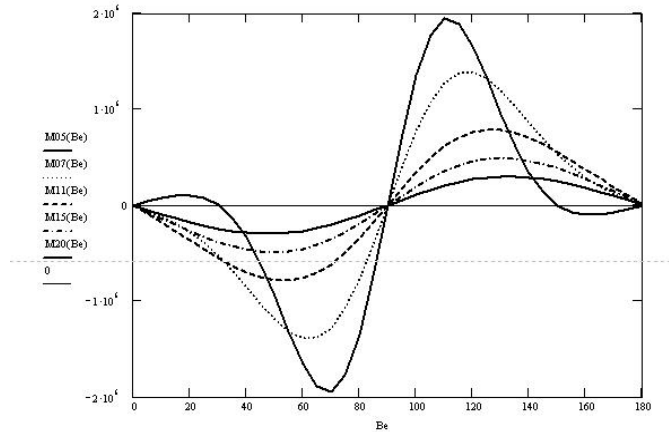


Рис. 4. Вращающий момент (кН·м) в зависимости от курсового угла волны с параметром λ

Здесь кроме известных величин фигурируют два редуционных коэффициента: κ_d – коэффициент влияния осадки d , κ_L – коэффициент влияния длины судна L .

Оба коэффициента, естественно, оперируют относительными величинами осадки и длины судна по сравнению с длиной регулярной волны λ .

Коэффициент κ_d находится в зависимости от коэффициента вертикальной полноты судна χ с помощью формулы:

$$\kappa_d = 1 - \frac{\pi}{2 - \chi} \left(\frac{d}{\lambda} \right) + \frac{2\pi^2}{3(3 - 2\chi)} \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2. \quad (7)$$

Для т/к типа "Астрахань" в грузу при осадке $d = 9$ м и вертикальной полноте $\chi = 0.983$ этот коэффициент можно представить в виде функции длины волны λ :

$$\kappa_d = 1 - \frac{27.79}{\lambda} + \frac{263.97}{\lambda^2}. \quad (8)$$

Ниже коэффициент κ_d представлен графически в двух формах: как функция длины волны λ (рис. 6) и как функция отношения длины судна к длине волны L/λ (рис. 5).

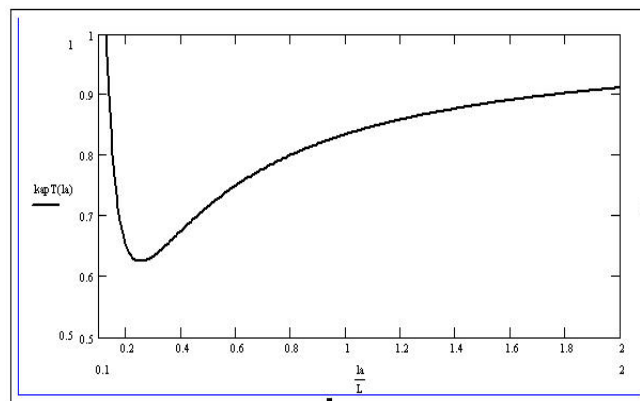


Рис. 5. Коэффициент κ_d как функция относительной длины волны ($L/\lambda=147/\lambda$)

Второй редуционный коэффициент κ_L находится в зависимости от составного аргумента $(L/\lambda) \cdot \cos(q_w)$ при помощи графиков с параметром C_{wl} (коэффициент полноты действующей ватерлинии)

(Благовещенский, 1954). Для т/к типа "Астрахань" в полном грузу $C_{w1} = 0.934$, что позволяет выделить из семейства кривых $\kappa_L[(L/\lambda) \cdot \cos(q_w), C_{w1}]$ одну конкретную кривую и её оцифровать.

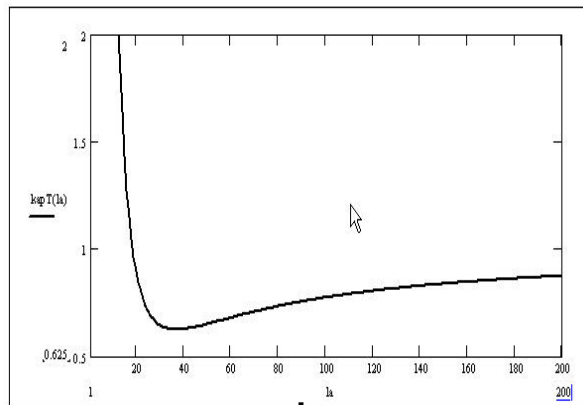


Рис. 6. Коэффициент κ_L как функция длины волны λ

Для получения аналитического выражения рассматриваемой здесь зависимости аппроксимируем полученные цифровые данные с помощью привычной технологии в среде MathCad. Результат аппроксимации показан на рис. 7.

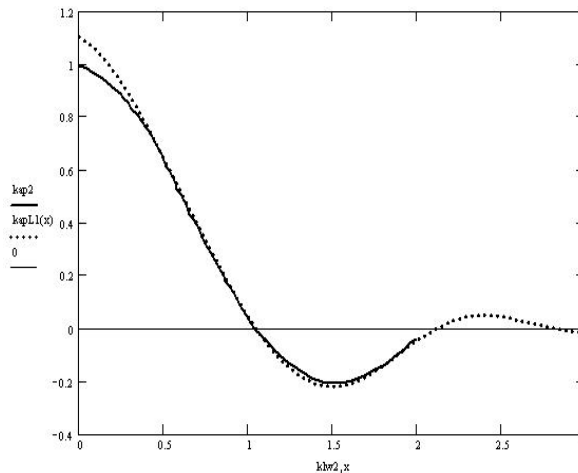


Рис. 7. Результаты аппроксимации редукционного параметра κ_L для продольного волнового усилия по аргументу $(L/\lambda)\cos(q_w)$

Функция аппроксимируется в форме $\kappa_L = k_1 \exp(k_2 x) \cdot \cos(k_3 x^2 + k_4)$, содержащей четыре неизвестных параметра k_j . Эти параметры находятся функцией MathCad GENFIT, которая требует для своей работы выражения для производных от функции по параметрам k_j и их начальные значения для старта процесса приближения. В тригонометрическую функцию введён квадрат аргумента x , чтобы период колебаний падал с ростом x , как это следует из числовых данных. Результатом этих процедур является функция

$$\kappa_L = -1.3 \exp(-0.93x^{1.4}) \cdot \cos(0.93x^2 + 3.7), \quad (9)$$

причём её коэффициенты после получения в среде MathCad подкорректированы вручную, чтобы добиться большего соответствия исходным данным. Аргументом x функции (9) является составной параметр $x = (L/\lambda) \cdot \cos(q_w)$. Он учитывает не только относительные размеры длины волны и судна, но и направление бега регулярной волны q_w .

Теперь найдены все коэффициенты, входящие в формулы (5), что позволяет найти само продольное усилие. Графическое представление зависимости продольного усилия, образующегося на корпусе судна, от курсового угла волны q_w при различных соотношениях её длины λ и длины судна L , показано на рис. 8.

4. Заключение

Алгоритм расчёта продольного и поперечного усилий, а также вращающего момента, образующихся на корпусе судна в результате воздействия на него регулярного волнения, позволяет с помощью программных средств моделировать процесс движения судна в различных условиях плавания с целью определения безопасных способов управления судном.

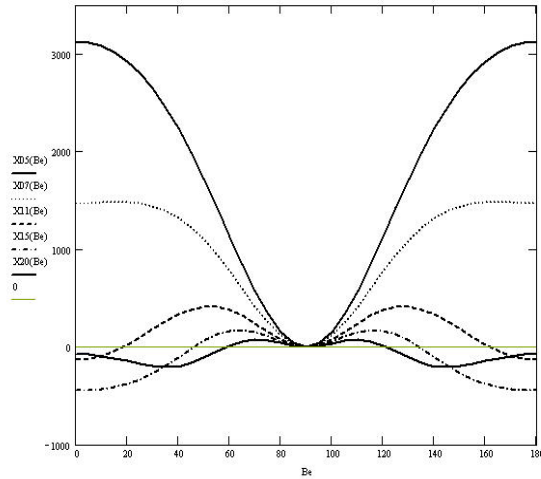


Рис. 8. Продольное усилие (кН) в зависимости от курсового угла волны (параметр семейства кривых – длина волны $\lambda = 0.5L, 0.7L, 1.1L, 1.5L, 2.0L$)

Литература

- Благовещенский С.Н. Качка корабля. Л., Судпромгиз, 520 с., 1954.
Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. В 3 т. Л., Судостроение, т.1, 762 с., 1985а.
Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. В 3 т. Л., Судостроение, т.3, 541 с., 1985б.
Хаскинд М.Д. Гидродинамическая теория качки корабля. М., Наука, 327 с., 1973.
Хаскинд М.Д. Теория сопротивления при движении судна на волнении. Изв. АН СССР, № 2, с.46-56, 1959.