

УДК 532.59.041:629.12

© 1995 г. Г. А. КОНСТАНТИНОВ, Ю. Л. ЯКИМОВ

РАСЧЕТ ТЯГИ ДВИЖИТЕЛЯ СУДНА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ЭНЕРГИЮ МОРСКИХ ВОЛН

Предложена схема расчета тяги волнового движителя с ограничивающими упорами, которая может быть распространена на аналогичные движители с более сложной подвеской крыльев или с более сложной крыльевой системой.

В настоящее время известен ряд схем волновых движителей, т. е. движителей, использующих энергию морских волн для создания тянущей силы судна [1—3]. Одна из наиболее простых схем волнового движителя представляет собой пару крыльев симметричного профиля, расположенных в носовой части судна, например на бульбе. Эти крылья могут поворачиваться под действием волн вокруг оси, перпендикулярной диаметральной плоскости судна. Поворот крыльев может быть ограничен упорами или упругими элементами.

Задача об определении тяги волнового движителя, установленного на судне, движущегося со скоростью v , взаимосвязана с задачей о вертикальной и килевой качке судна (продольно-горизонтальными колебаниями судна пренебрегаем). В линейном приближении, когда относительные амплитуды качки малы, в связанной с кораблем системе координат эти амплитуды могут быть вычислены из системы обыкновенных дифференциальных уравнений [4—6]

$$a\ddot{\zeta} + b\dot{\zeta} + c\zeta + d\dot{\psi} + e\psi + q\ddot{\psi} = F_1 \cos \omega_k t + F_2 \sin \omega_k t + F(t) \quad (1)$$

$$A\dot{\psi} + B\psi + C\dot{\zeta} + D\ddot{\zeta} + E\dot{\zeta} + Q\zeta = M_1 \cos \omega_k t + M_2 \sin \omega_k t + M(t)$$

где $\zeta(t)$ — амплитуда вертикальной качки центра тяжести судна; $\psi(t)$ — угол дифферента при килевой качке (относительно оси, перпендикулярной диаметральной плоскости и проходящей через центр тяжести судна); $F(t)$ — вертикальная составляющая подъемной силы крыла; $M(t)$ — момент подъемной силы крыла; $a, b, c, d, e, q, A, B, C, D, E, Q$ — коэффициенты, зависящие от геометрических и весовых характеристик судна; F_1, F_2, M_1, M_2 — составляющие сил и моментов, вызванных набегающими на судно плоскими регулярными волнами, имеющими амплитуду r и круговую частоту ω ; ω_k — приведенная частота колебаний судна. Пусть g — ускорение силы тяжести, β — курсовой угол судна по отношению к волне ($\beta = \pi$, если судно движется строго против волны), $k = \omega^2/g$ и $k_1 = k \cos \beta$, тогда, согласно [6], связь между приведенной частотой ω_k и частотой волны ω имеет вид $\omega_k = \omega - k_1 v$.

В данной работе не ставится задача об определении коэффициентов системы (1), так как этот вопрос подробно рассматривается во многих работах по качке корабля, например в [4—6].

Рассмотрим для определенности крыло, установленное в носовой части судна, подразумевая под крылом пару одинаковых крыльев, расположенных симметрично по обе стороны от диаметральной плоскости судна. Подъемная сила крыла и момент этой силы определяются по формулам [6, 7]

$$F(t) = 1/2 \rho v^2 S_k c_\alpha(t), \quad M(t) = -1/2 \rho v^2 S_k l c_\alpha(t)$$

где ρ — плотность воды, S_k — площадь крыла, l — расстояние от центра тяжести судна до передней кромки крыла, c_y — коэффициент подъемной силы крыла, $\alpha(t)$ — угол атаки крыла.

Вертикальная и горизонтальная составляющие орбитального движения частиц волны в области передней кромки крыла, имеющего заглубление h , в связанной с судном системе координат, записываются в виде [6]

$$\xi_0(t) = -r\omega e^{-kh} \sin(\omega_k t - k_1 l), \quad \xi_0(t) = r\omega e^{-kh} \cos(\omega_k t - k_1 l)$$

Тогда вертикальную и горизонтальную составляющие скорости жидкости в этой же системе координат и угол скоса потока θ представим в виде

$$U(t) = l\psi(t) - \dot{\xi}(t) + \dot{\xi}_0(t), \quad V(t) = v - \dot{\xi}_0(t), \quad \theta(t) = \text{arctg } U(t)/V(t)$$

Пусть угол поворота крыла относительно плоскости, параллельной плоскости ватерлинии, $\varphi(t) = \varphi_0 \cos(\omega_k t - \varepsilon)$. Тогда для угла атаки $\alpha(t)$ имеем

$$\alpha(t) = \theta(t) - \psi(t) - \varphi(t) \quad (2)$$

В силу нелинейности выражения (2) относительно $\dot{\xi}(t)$ и $\psi(t)$ система (1), определяющая качку судна с крылом, становится существенно нелинейной. Чтобы привести ее к виду, допускающему интегрирование в квадратурах, предположим, что $\dot{\xi}_0(t) \ll v$, $U(t) \ll v$. Тогда

$$\alpha(t) \approx U(t)/v - \psi(t) - \varphi(t) \quad (3)$$

Теперь подстановка (3) в выражения для $F(t)$ и $M(t)$ позволяет получить частное решение системы (1), соответствующее установившемуся колебанию судна

$$\xi(t) = \zeta_1 \cos \omega_k t - \zeta_2 \sin \omega_k t, \quad \psi(t) = \psi_1 \cos \omega_k t - \psi_2 \sin \omega_k t \quad (4)$$

Формулы для коэффициентов ζ_1 , ζ_2 , ψ_1 , ψ_2 приведены, например, в работах [4, 6].

Рассмотрим теперь симметричное крыло (фиг. 1), работающее в режиме, когда хорда крыла устанавливается вдоль местной скорости (в связанной с судном системе координат), а при достижении некоторого заданного значения угла α_1 ограничивается упорами на угол $\pm \alpha_1$. В этом случае для угла атаки получаем

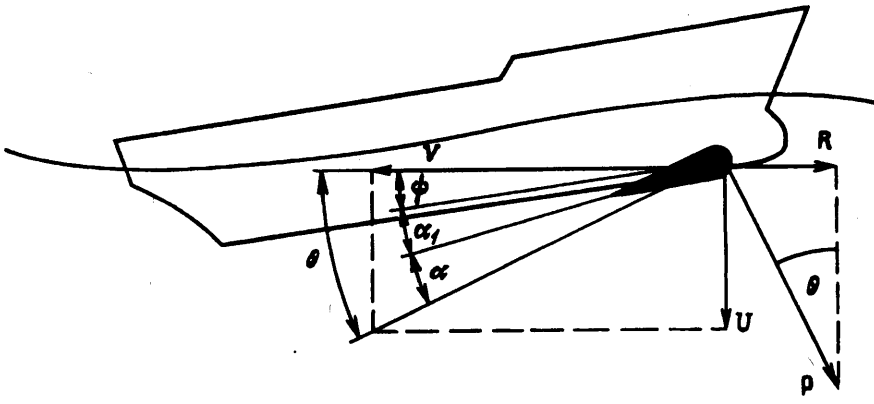
$$\alpha(t) = 0 \quad (|\Gamma(t)| < \alpha_1); \quad \Gamma(t) - \alpha_1 \text{ sign } \Gamma(t) \quad (|\Gamma(t)| \geq \alpha_1) \quad (5)$$

$$\Gamma(t) = \theta(t) - \psi(t)$$

Функция $\alpha(t)$, определенная таким образом, не является синусоидальной и уравнения (1) снова становятся нелинейными. Поэтому при расчете качки судна по уравнениям (1) используется приближенное представление $\alpha(t)$ в виде (3), где функция $\varphi(t)$ играет роль подвижного упора, а при расчете тяги волнового движителя используется представление $\alpha(t)$ в виде (5). Амплитуда φ_0 функции $\varphi(t)$ находится из условия, что средняя за период качки T величина угла атаки при работе крыла с упорами равна средней по периоду величине угла атаки при повороте крыла по закону (3)

$$\int_0^T \alpha(t) dt = \int_0^T [\Gamma(t) - \varphi(t)] dt \quad (6)$$

Фаза ε при этом предполагается равной фазе функции $U(t)/v - \psi(t)$. Суть этого предположения состоит в том, что ввиду большой инерции судна при относительно малом импульсе средней силы от крыла для колебаний судна с



Фиг. 1

крылом важна не точная зависимость подъемной силы от времени, а только ее среднее за период значение, которое заменяется синусоидальной силой с тем же средним значением и фазой. Такая замена позволяет получить частное решение системы (1) в виде (4), соответствующем установившемуся колебанию судна.

Делая некоторое количество последовательных приближений, т. е. решая систему (1), используя выражение (3) для $\alpha(t)$, а затем вычисляя $\alpha(t)$ по формуле (5) и требуя выполнения условия (6), находим амплитуду ϕ_0 и фазу ϵ . Расчеты показывают, что для выполнения условия (6) с точностью до 0,1% требуется 4—5 итераций.

Переходим теперь непосредственно к вычислению тяги волнового движителя. Подъемную силу $P(t)$ и сопротивление крыла $X(t)$ можно записать в виде

$$P(t) = \frac{1}{2} \rho (U^2(t) + V^2(t)) S_k C_y(\alpha(t)), \quad X(t) = \frac{1}{2} \rho [U^2(t) + V^2(t)] S_k C_x(\alpha(t))$$

Теперь сила тяги крыла находится как составляющая подъемной силы и сопротивления крыла

$$R(t) = P(t) \sin \theta(t) - X(t) \cos \theta(t)$$

Среднее значение тяги крыла R' за период колебаний вычисляется численным интегрированием

$$R' = \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt$$

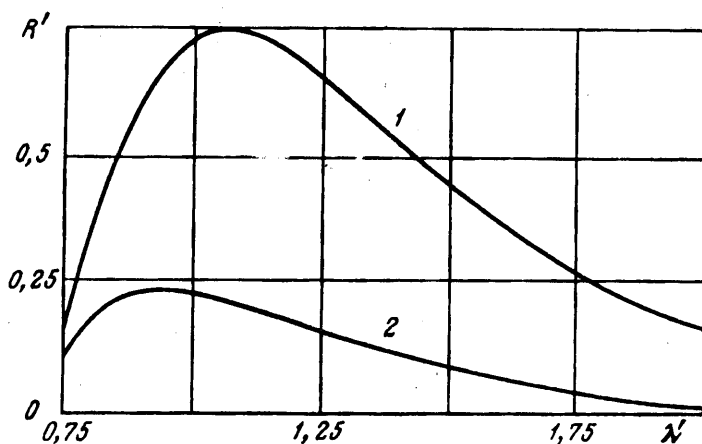
$$C_x(\alpha(t)) = c_1 + c_2 |\alpha(t)| + c_3 \alpha^2(t)$$

$$C_y(\alpha(t)) = c_4 \alpha(t) \quad (\alpha \leq \alpha_*) ; \quad c_5 \alpha_* \exp \left[\left(\frac{\alpha(t)}{\alpha_*} - 1 \right)^{1+\delta} \right] \quad (\alpha > \alpha_*)$$

Здесь α_* — критический угол атаки крыла, $\delta = 10^{-4}$.

Коэффициенты подъемной силы c_y и сопротивления крыла c_1, c_2, c_3 , зависящие от удлинения крыла, относительной толщины и заглубления, для каждого конкретного крыла рассчитываются известными методами [7] или определяются экспериментально.

Для расчета тяги волнового движителя по описанной выше методике была составлена программа для ПЭВМ ПС-АТ-286 в системе МКАД [9]. Исходными данными для расчета являются основные размеры корабля, параметры волнения и геометрические характеристики крыла.



Фиг. 2

Эксперименты, проведенные в гидроканале Института механики МГУ с моделью корабля, выполненной в масштабе 1 : 50 (длине модели 2,5 м; ширина 0,335 м; осадка 0,125 м; площадь главной ватерлинии 0,55 м²; водоизмещение 0,52 Кн), при общей площади пары крыльев 0,06 м² (11% площади ватерлинии) и упорами ± 22° показали, что при движении навстречу волнам высотой 0,2 м и с периодом 1,6 с модель движется со средней скоростью $v = 0,5$ м/с. В пересчете на натурное судно это означает, что только за счет энергии морских волн оно может двигаться со средней скоростью до 7 узлов.

Расчеты силы тяги, выполненные для данной модели по описанной выше методике, и силы сопротивления корабля волновой и вязкостной природы, вычисленной известными методами [8], показывают, что при движении навстречу волнам средняя за период качки сила тяги волнового движителя равна 2,06 н, а среднее сопротивление корабля равно 1,96 н, т. е. сила тяги и сопротивление совпадают с точностью до 5%. Это позволяет сделать вывод о пригодности данного метода для расчета тяги волнового движителя при движении судна со средней постоянной скоростью.

На фиг. 2 приведены рассчитанные графики средней тяги R' (в Мн) волнового движителя для натурного судна, соответствующего данной модели, движущегося со средней скоростью 3,5 м/с (~ 6,9 узлов) в зависимости от относительной длины $\lambda' = \lambda/L$ набегающих на судно волн, высота которых равна высоте волн с 3%-ной обеспеченностью при нерегулярном волнении (L — длина судна, $\lambda = 2\pi/k$). На этих графиках 1 — тяга волнового движителя при строгом движении навстречу волнам, 2 — при ходе судна по направлению движения волн.

Модельные эксперименты и результаты расчетов указывают на большое будущее в применении подобных экологически чистых движителей судов.

Авторы выражают искреннюю признательность Ю. Ф. Сенькину, по инициативе и при доброжелательной поддержке которого были проведены работы по исследованию волновых движителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павленко Г. Е. Использование энергии качки на волнении для движения судов. Л.: Судостроение, 1936. № 6. С. 394—401.
2. Сенькин Ю. Ф. Движет судно энергия волн//Катера и яхты. 1987. № 2(126). С. 22—27.
3. Чикаренко В. Г., Гаверюшин А. Г. Эффективность работы волновых крыльевых движителей//Морской флот. 1994. № 5—6. С. 22.

4. *Бородай И. К., Нецветаев Ю. А.* Качка судов на морском волнении. Л.: Судостроение, 1969. 432 с.
5. *Дроздов Ю. М., Нецветаев Ю. А.* Расчет продольной качки судна на встречном волнении с помощью ЦВМ//Тр. ЦНИИ им. А. Н. Крылова. Л.: Судостроение, 1970. Вып. 259. С. 64—73.
6. Справочник по теории корабля//Под ред. Я. И. Вейткунского. Л.: Судостроение, 1985. Т. 1. 764 с.; Т. 2. 440 с.
7. *Колызаев Б. А., Косоруков А. И., Литвиненко В. Л.* Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. Л.: Судостроение, 1980. 471 с.
8. *Бородай И. К., Нецветаев Ю. А.* Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. 287 с.
9. *Аладьев В. З., Герцгорн Н. А.* Вычислительные задачи на персональном компьютере. Киев: Техника, 1991. 248 с.

Москва

Поступила в редакцию
5.I.1994