

УДК 532.012.02

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕСТКОГО КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ КРЫЛА**

**В.Н. ГЛУШКО, В.Н. ГРЕБЕННИКОВ, А.И. БЕЛЯВЦЕВ**

**ИНСТИТУТ ГИДРОМЕХАНИКИ НАНУ, НАУ.**

Киев 2021

## АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментального исследования гидродинамики жесткого прямоугольного вертикально колеблющегося крыла при обращенном движении. В диапазоне величин относительной поступи колеблющегося крыла  $\lambda p = 0 \div 4,5$  графически представлены зависимости пропульсивных характеристик колеблющегося крыла (коэффициент тяги  $K_T$  и гидромеханический КПД  $\eta$ ) от величины линейных  $A_0$  и угловых  $\beta_0$  амплитуд колебаний крыла и величины  $\lambda_p$ .

Объект исследований - колеблющееся крыло (КК) и системы его управления с точки зрения применения их на судах различного водоизмещения и назначения.

Цель работы - исследование возможности применения КК на судах различного водоизмещения, для повышения его эксплуатационной эффективности.

Решения теоретической задачи об определении гидродинамических характеристик колеблющегося крыла в зависимости от изменения различных кинематических параметров имеются к настоящему времени с рядом существенных ограничений и приближений. Дополнить такие теоретические исследования и определить пределы применимости предлагаемых решений должны систематические экспериментальные исследования, результаты которых будут весьма существенны для решения данной проблемы. Ниже рассматриваются результаты экспериментальных исследований гидродинамических сил, возникающих на колеблющемся в жидкости жестком крыле. Использовалось крыло прямоугольной формы в плане с симметричным профилем типа *NACA-0015* [5,] (относительная толщина профиля ( $C = c/b = 15^\circ$ ; хорда профиля;  $b = 0,12$  м с удлинением  $\lambda = b/l = 3$ , где  $l$  — размах крыла). Крыло выполнено из дюралюминия пустотелым, чтобы его масса равнялась массе вытесненной им воды [2].

Приводом для придания крылу гармонических колебаний служила экспериментальная синусная установка, состоящая из электродвигателя с муфтой и редуктором, а также двух синусных механизмов, размещенных на одной фундаментной раме [4]. При работе установки каретки синусных механизмов, опирающиеся роликами на вертикальные направляющие, совершают возвратно - поступательные вертикальные перемещения по закону  $y_1 = A_0 \cos \omega t_i$  и  $y_{2i} = A_0 \cos(\omega t_i - \varphi)$ , где  $y_i$  — мгновенная координата вертикального перемещения;  $A_0$  — максимальная линейная амплитуда вертикальных колебаний;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота;  $f$  — частота колебаний;  $t$  — время; ( $\varphi$  — угол сдвига по фазе колебаний одного синусного механизма относительно другого. Через две тензобалки крыло посредством двух пар тяг присоединялось к кареткам

синусных механизмов. Тяги крепились шарнирно на торцах крыла таким образом, чтобы оси шарниров совпадали с линиями передней и задней кромок крыла, т. е. расстояние между осями передней и задней тяг составляло  $b$ . Передняя тензобалка измеряла горизонтальную и вертикальную составляющие равнодействующей гидродинамических сил, а задняя только вертикальную (т. е. измерялись мгновенные величины силы тяги и поперечных сил  $P_{y_{1i}}$  и  $P_{y_{2i}}$ ).

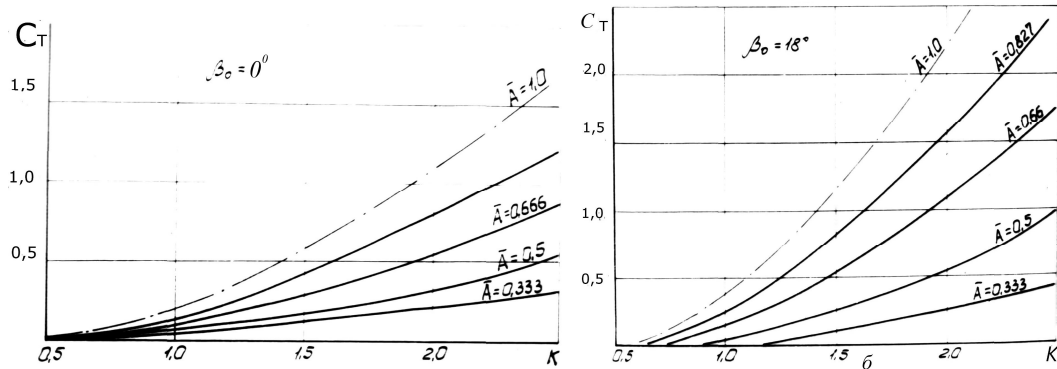


Рис. 1. Зависимости коэффициента тяги  $C_T$  колеблющегося крыла от числа Струхали  $k$  и относительной амплитуде линейных колебаний  $\bar{A}$  при  $\beta_0$  равном  $0^\circ$  (а) и  $18^\circ$  (б) и следующих значениях  $\bar{A}$ .

Исследования проводились в гидротомке при обращенном движении и скоростях набегающего потока  $V_x = 0,2 \div 0,77 \text{ м/с}$ . Относительное погружение крыла составляло  $H = h/b = 1,55$ , где  $h$  — расстояние от нейтральной оси колебаний крыла до поверхности воды. Величина линейной амплитуды колебаний  $A_0$  в экспериментах задавалась равной  $A_0 = 0,04; 0,06; 0,08; 0,10 \text{ м}$ , величина угловой амплитуды колебаний  $\beta_0$  в зависимости от задания угла  $\varphi$  составляла  $0^\circ \text{—} 21,4^\circ$ , с шагом около  $3^\circ$ . Установка обеспечивала устойчивые колебания крыла с частотой  $0,5 \text{—} 2,5 \text{ Гц}$ . Полученные на осциллограммах записи измерения величин  $F$ ,  $A$  и  $P_{y_{2i}}$ , в течение периода колебаний подвергались статистической обработке, интегрированием определялась средняя за период колебаний сила тяги  $F$ .

Полученные результаты представлены в безразмерном виде. На рис. 1 для двух величин угловых амплитуд колебаний крыла  $\beta_0 = 0^\circ$  и  $18^\circ$  представлены зависимости коэффициента тяги  $C_T$  от числа Струхали  $k$ , где

$$C_T = \frac{2F_{cp}}{\rho V_x^2 S} \quad (1)$$

$$K = \frac{\omega b}{V_x} \quad (2)$$

где  $S$  — площадь крыла;  $\rho$  — плотность воды. Кривые 1—5 соответствуют зависимостям  $C_T(k)$  при  $A = \frac{A_0}{b} = 0,0333; 0,50; 0,66; 0,827; 1,00$  соответственно (кривая 5 получена экстраполяцией по графику  $C_T = f(A)$ ). Величина коэффициента тяги  $C_T$  прямо пропорциональна величинам  $K$  и  $W = v^2 + (A_0\omega)^2$ , причем зависимость  $C_T = \bar{A}^2$  близка к квадратичной и ее можно представить уравнением типа

$$C_T = \bar{A}^2 \quad (3)$$

где величина коэффициента  $C_1$  является функцией от частоты колебаний, крыла и для диапазона чисел Струхала  $k = 0,5—2,5$  может быть представлена уравнением типа

$$C_1 = 0,3k^n \quad (4)$$

где  $2 < n < 3$ , причем при  $\beta_0 = 0^0 - 21,4$  показатель степени  $n$  равен примерно 2, и с возрастанием величины угловой амплитуды колебаний  $\beta_0$  также увеличивается.

Если рассматривать колеблющееся крыло в качестве движителя, то изменение его пропульсивных характеристик (коэффициента тяги и КПД) более интересным будет рассмотреть в зависимости от величины относительной поступи движителя  $\lambda_p = \frac{V_x}{A_0\omega}$ , наиболее полно характеризующей кинематические параметры колеблющегося крыла. При этом коэффициент тяги удобнее представить в виде

$$K_T = \frac{2F_{cp}}{\rho V^2 S} \quad (5)$$

где  $V = v^2 + (A_0\omega)^2$ , что позволит избежать сверхбольших значений коэффициента тяги  $C_T$  при очень малых значениях  $\lambda_p = (AK)^{-1}$ . Следует отметить также, что  $\lambda_p$  и  $k$  суть обратно-пропорциональные величины и связаны между собой выражением  $\lambda_p = (AK)^{-1}$ .

На рис. 2 представлены зависимости  $K_T(\lambda_p)$  при  $\bar{A} = 0,333$  (а) и  $\bar{A} = 0,667$  (б) при различных амплитудах угловых колебаний  $\beta_0 = 0^0 - 21,4^0$  с шагом  $3^0$  (кривые 1—8). Характер полученных экспериментально зависимостей  $K_T(\lambda_p)$  свидетельствует о весьма существенном влиянии величины угловой амплитуды колебаний  $\beta_0$  на величину

коэффициента тяги  $K_T$  и по форме хорошо совпадают с данными, приведенными нами ранее в [2,3,5,6] для геометрически подобного, но большего по размерам крыла с несколько иным принципом крепления к нему тяг.

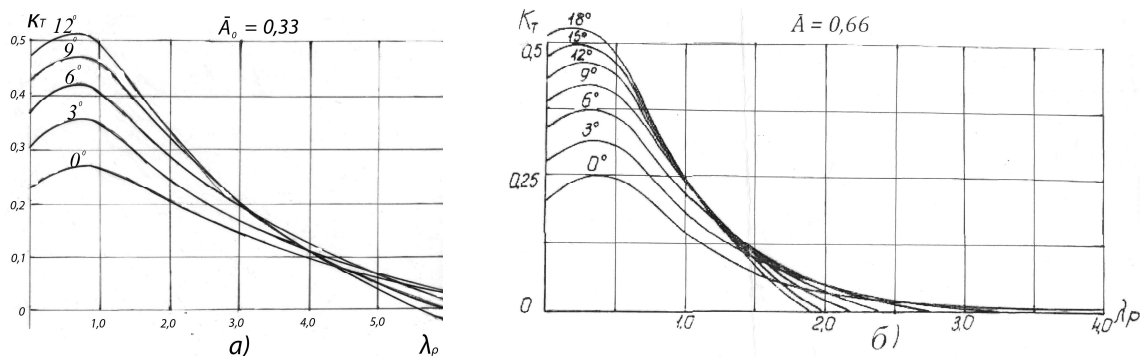


Рис. 2. Зависимости коэффициента тяги колеблющегося крыла  $K_T$  от относительной поступи  $\lambda_p$  при значениях  $\bar{A}$ , равных 0,333 (а) и 0,667 (б) и следующих амплитудах  $\beta_0$  угловых колебаний крыла, равном  $0^\circ - 18^\circ$ .

Все зависимости  $K_T(\lambda_p)$  имеют явно выраженные максимумы (все в районе малых значений  $\lambda_p$ ), причем величина  $\lambda_{p_{opt}}$  при которой  $K_{T_{max}}$ , уменьшается с увеличением  $\beta_0$  и  $A_0$ . При  $A_0 = const$  практически все точки  $K_{T_{max}}$  лежат на одной прямой, наклон которой на всех графиках  $K_T(\lambda_p)$  одинаков. Следует отметить также, что при  $\beta_0 = const$  величина  $K_{T_{max}}$  при увеличении  $A_0$  уменьшается. С возрастанием величины относительной поступи  $\lambda_p$ , т. е. с увеличением  $V_x$  или уменьшением  $A_0$  и  $f$  значения  $K_T$  быстро уменьшаются, достигая в конце концов значения  $K_T = 0$  (кроме кривой  $K_T(\lambda_p)$  для  $\beta_0 = 0^\circ$ ), причем чем больше величина угловой амплитуды колебаний  $\beta_0$ , тем при меньших значениях  $\lambda_p$  это происходит. С возрастанием величины  $\lambda_p$  происходит также изменение прямой зависимости величины  $K_T$  от величины  $\beta_0$  (при  $\lambda_p = 0 - 0,6$ ) на обратную (при  $\lambda_p > 1,5 \div 3,0$ ). Следует отметить, что точки пересечения двух соседних кривых  $K_T(\lambda_p)$  (например, кривых  $K_T(\lambda_p)$  для величин угловой амплитуды  $\beta_0$ , равных 3 и 6°, 6 и 9°, 9 и 12° и т. д.) располагаются вдоль оси абсцисс графика  $K_T(\lambda_p)$  в определенной последовательности и заключенные между этими точками отрезки кривой  $K_T(\lambda_p)$  являются линией максимальных значений  $K_T$  (например, в диапазоне значений  $K_T(\lambda_p) = 1,7 - 2,2$  при  $A_0 = 0,04$  м величины  $K_T$  будут максимальны при  $\beta_0 = 6^\circ$ , в диапазоне  $\lambda_p = 1,05 - 1,35$  — соответственно  $K_{T_{max}}$  при  $\beta_0 = 12^\circ$ ).

Второй основной пропульсивной характеристикой движителя с рабочим органом в виде жесткого гармонически колеблющегося крыла является гидромеханический коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{\bar{N}_x}{N_y} \quad (6)$$

где  $\bar{N}_x = F_{cp} V_x$  — полезная работа, совершаемая колеблющимся крылом за один период колебаний;  $\bar{N}_y = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} P_{y\phi i} \cdot V_{y\phi i} / dt$  — средняя за период колебаний работа, затрачиваемая на вертикальные колебания крыла;  $T_0 = 1/f$  - период колебания крыла.

Вертикальная составляющая гидродинамических сил  $P_{y\phi i}$  в каждый момент времени определялась как сумма значений составляющих  $P_{y1i}$  и  $P_{y2i}$  на передней и задней тягах экспериментальной установки, т. е.

$$P_{y\phi i} = P_{y1i} + P_{y2i} \quad (7)$$

Силы  $P_{y1i}$  и  $P_{y2i}$  определялись по методике, описанной в [4]. Вертикальная скорость, определялась как

$$V_{y\phi i} = V_{y1} (1 - z/b + V_{y2}(z/b)) \quad (8)$$

где  $V_{y1}$  и  $V_{y2}$  — мгновенные вертикальные скорости передней и задней кромок крыла соответственно;  $z$  — расстояние от центра переднего шарнира до центра давления крыла.

Величины  $V_{y1}$  и  $V_{y2}$  определялись расчетом и зависели от величин  $A_0, f, \eta$ ,

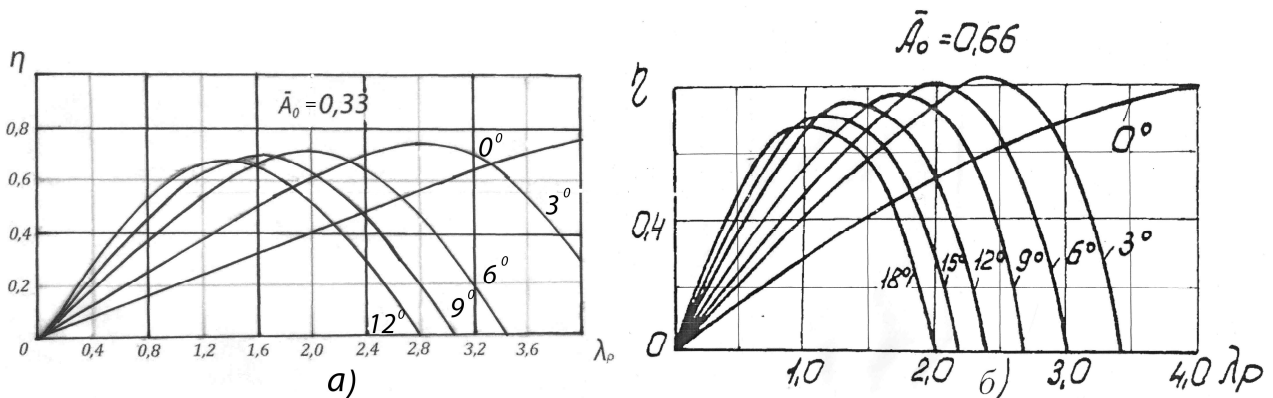


Рис. 3. Зависимости гидромеханического КПД  $\eta$  колеблющегося крыла от относительной поступи  $\lambda_p$  при значениях  $\bar{A}$ , равных 0,333 (а) и 0,667 (б) и следующих амплитудах  $\beta_0$  угловых колебаний крыла, град. равном  $0^\circ - 18^\circ$ .

Зависимости полученных по формуле (6) величин  $KПД_\eta$  колеблющегося крыла от величин  $\lambda_p$  и  $\beta_0$  для  $\bar{A} = 0,333$  (а) и  $\bar{A} = 0,667$  (б) представлены на рис. 3. При малых значениях  $\lambda_p < 1$  наблюдается прямая пропорциональность величины  $\eta$  относительно величины  $\beta_0$ . Увеличение амплитуды угловых колебаний  $\beta_0$  вдвое (от  $3$  до  $6^\circ$  или от  $6$  до  $12^\circ$ ) увеличивает  $KПД_\eta$  в 1,5 раза. Все кривые  $\eta(\lambda_\delta)$  при  $\beta_0 = \text{const}$  имеют явно выраженные максимумы (кроме кривой для  $\beta_0 = 0^\circ$ ), и с увеличением величины  $\beta_0$  значение  $\lambda_{popt}$ , при котором  $\eta = \text{max}$ , уменьшается. Все графики  $\eta(\lambda_\delta)$  сходятся в точке начала координат графика  $\eta, \lambda_\delta$ , так как при  $\lambda_p = 0$  и  $V_x = 0$  соответственно и  $N_x$  также равна нулю.

После достижения значения  $\eta = \text{max}$  все кривые  $\eta(\lambda_\delta)$  меняют прямую зависимость  $\eta$  от  $\beta_0$  на обратную и с дальнейшим увеличением  $\lambda_p$  значения  $KПД_\eta$  уменьшаются до нуля, причем точки пересечения кривых  $\eta(\lambda_\delta)$  с осью абсцисс графика  $\eta, \lambda_\delta$  хорошо совпадают с точками пересечения кривых  $K_T(\lambda_\delta)$  с той же осью, и чем больше величина амплитуды  $\beta_0$  тем при меньшем значении  $\lambda_p$  это происходит.

Влияние величины амплитуды колебаний крыла  $A_0$  при  $\beta_0 = \text{const}$  на характер зависимостей  $\eta(\lambda_\delta)$  показан на рис. 4.

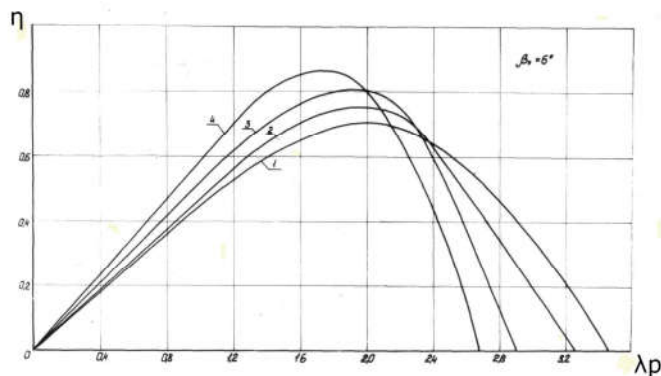


Рис. 4. Зависимости гидромеханического КПД  $\eta$  колеблющегося крыла от относительной поступи  $\lambda_p$  и относительной амплитуде  $\bar{A}$  при  $\beta_0 = 6^\circ$ .

С увеличением  $A_0$  увеличивается и максимально достижимое значение  $KПД_\eta$ , причем относительное приращение величины существенно при малых значениях

относительной амплитуды  $\bar{A}$  и весьма уменьшается при больших, величинах  $\bar{A}$  (когда  $\bar{A} \approx 1,0$ ). Причем чем больше  $\bar{A}$ , тем при меньших значениях  $\lambda_p$  достигает максимума  $KПД_\eta$ .

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что для движителя с колеблющимся крылом в качестве рабочего органа можно получить весьма высокие значения  $KПД_\eta$  (около 80 % при  $\lambda_p > 1,5$ ), но величины коэффициента тяги при этом невелики ( $K_T < 0,1$ ). Высокие значения  $K_T$  ( $K_T > 0,5$ ) можно получить при малых значениях  $\lambda_p < 0,5$ ), но величины  $KПД_\eta$  при этом не превышают значения 0,1 - 0,3. Представленные выше семейства кривых  $K_T(\lambda_p, \beta_0)$  при различных значениях относительной амплитуды  $\bar{A} \approx 0,3—0,9$  позволяют подбором определенных величин кинематических параметров  $A_0, \beta_0, f$  при заданной скорости  $V_x$  получить либо максимальную тягу, либо максимальный  $KПД_\eta$  (т. е. максимальную экономичность). Пересчет значений  $K_T$  и  $\eta$  для прямоугольного крыла иного удлинения ( $\lambda_p = 2$  или  $\lambda_p = 4—5$ ) можно провести, используя данные работы (1).

## ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Алгазин В, А. Теоретическое исследование силы тяги колеблющегося крыла конечного размаха // Бионика. - 1983. - Вып. 18 - С. 52 - 57.
2. Глушко В. Н., Каян В. П., Козлов Л. Ф. Гидродинамические характеристики прямоугольного колеблющегося крыла // Там же. - 1984. - Вып 18. - С. 40 - 44.
3. Глушко В. Н., Каян В. П., Козлов Л. Ф. Исследование гидродинамики колеблющегося крыла с жестким и массивно-деформируемым профилем // Математические методы механики жидкости и газа. - Днепропетровск, 1986. - С. 21 - 29.
4. Каян В. П. Экспериментальное исследование гидродинамического упора, создаваемого колеблющимся крылом // Бионика. - 1983. - Вып. 17. - С. 45 - 49.
5. Кравец А. С. Характеристики авиационных профилей. - М.;Л. : Оборонгиз, 1938
6. V.P. Kayan, V.N. Glushko. Research of Hydrodynamics of a Fin Propulsor // In book : First International Industrial Conference - : «Bionic 2004» - Hanover, Germany : - 2004. – pp 179 - 184.
7. Глушко В.Н., Белявцев А.И. // Экспериментальное исследование гидромеханики жесткого колеблющегося крыла. Вісник інженерної академії України №2, 2015, С.7-11.