

УДК 532.012.2

В.Н. Глушко, В.П. Каян

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЖЕСТКОГО КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ КРЫЛА

*Приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики жесткого прямоугольного колеблющегося крыла при обращенном движении. В диапазоне величин относительной поступи колеблющегося крыла  $\lambda_p = 0-4,5$  графически представлены зависимости пропульсивных характеристик колеблющегося крыла (коэффициент тяги) от величины линейных и угловых амплитуд колебаний крыла и величины  $\lambda_p$ .*

**Ключевые слова:** синусная установка, колеблющееся крыло, сила тяги  $F_{cp}$ , частота  $f$  колебаний крыла, коэффициенты тяги  $C_T$ ,  $K_b$ , относительная поступь  $\lambda_p$ .

*Приведені результати експериментальних досліджень гідродинаміки жорсткого прямокутного крила, що коливається, при оберненому русі. У діапазоні величин відносної ходи крила  $\lambda_p=0-4,5$ , що коливається, графічно представлені залежності пропульсивних характеристик крила (коефіцієнт тяги), що коливається, від величини лінійних і кутових амплітуд коливань крила і величини  $\lambda_p$ .*

**Ключові слова:** синусна установка, крило, що коливається, сила тяги  $F_{cp}$ , частота  $f$  коливань крила, коефіцієнти тяги  $C_T$ ,  $K_b$ , відносна хода  $\lambda_p$ .

*Results over of hydrodynamics experimental researches of hard rectangular hesitating wing are brought at the turned motion. In the range of relative sizes step of hesitating wing of  $\lambda_p = 0 - 4,5$  dependences of propulsive descriptions of hesitating wing (coefficient of traction) are graphically presented on the size of linear and angular amplitudes of wing vibrations and  $\lambda_p$  values.*

**Keywords:** sine setting, hesitating wing, tractive of  $F_{cp}$  force, frequency of  $f$  vibrations of wing, coefficients of traction of  $C_T$ ,  $K_b$ , relative step  $\lambda_p$ .

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 [1-3]. Дополнить такие теоретические исследования и определить пределы применимости предлагаемых решений должны систематические экспериментальные исследования, результаты которых будут весьма существенны для решения данной проблемы [4-12].

© Глушко В.Н., Каян В.П., 2015

Ниже рассматриваются результаты экспериментальных исследований гидродинамических сил, возникающих на колеблющемся в жидкости жестком крыле. Использовалось крыло прямоугольной формы в плане с симметричным профилем типа NASA-0015 [5, 6] (относительная толщина профиля ( $C = c/b = 15\%$ ; хорда профиля;  $b = 0,12$  м/с с удлинением  $C = b/l \lambda = 3$ , где  $l$  – размах крыла). Крыло выполнено из дюралюминия пустотелым, чтобы его масса равнялась массе вытесненной им воды [2; 3; 6].

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

$$y_{1i} = A_0 \cos \omega t_i, \tag{1}$$

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;

$t_i$  – 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, что 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  $P_{y1i}$  и  $P_{y2i}$ ). Исследования проводились в гидрлотке при обратном движении и скоростях набегающего потока  $V_x = 0; 0,3; 0,55; 0,75$  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 0,04; 0,06; 0,08 и 0,10 м, величина угловой амплитуды колебаний  $\beta_0$  в зависимости от задания угла  $\varphi$  составляла  $0^\circ - 21,4^\circ$ , с шагом около  $3^\circ$ . Установка обеспечивала устойчивые колебания

крыла с частотой 0,5-2,5Гц. Полученные на осциллограммах записи измерения величин  $F$ ,  $P_{y1}$  и  $P_{y2}$ , в течение периода колебаний подвергались статистической обработке, интегрированием определялась средняя за период колебаний сила тяги  $F$ .

Создаваемая колеблющимся в жидкости крылом тяга, является основным пропульсивным параметром, определяющим эффективность колеблющегося крыла как движителя. Ниже, на рисунке 1, в качестве примеров представлен ряд зависимостей величин средней за период колебаний крыла тяги  $F_{cp}$  от различных кинематических параметров (скорости потока, частоты колебаний, амплитуд линейных и угловых колебаний  $A_0$  и  $\beta_0$ ).

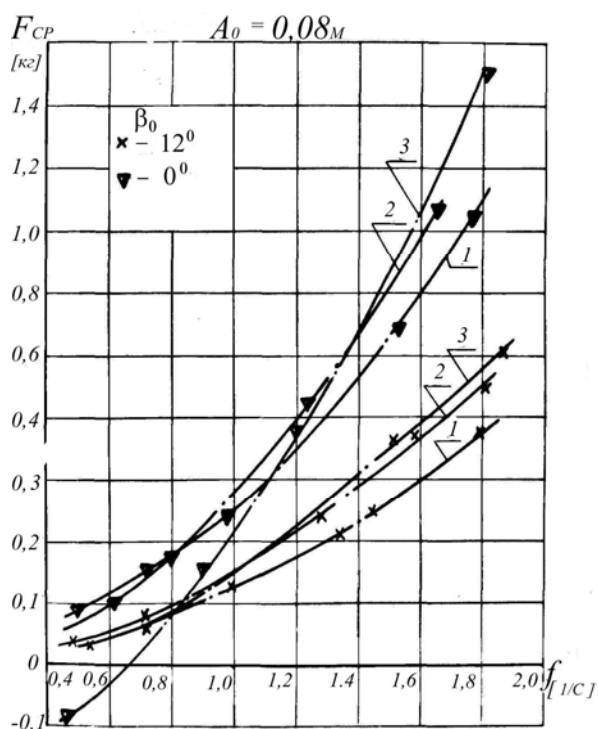


Рис. 1. Зависимость величины тяги от частоты, скорости потока, амплитуды угловых колебаний крыла при значении линейной амплитуды  $A_0 = 0,08$  м

На рисунке 1 представлены зависимости величин тяги  $F_{cp}$  от частоты  $f$ , скорости потока  $V_x$  амплитуд угловых колебаний крыла  $\beta_0$  при постоянном значении линейной амплитуды  $A_0 = 0,08$  м. Значение величин  $\beta_0$  в градусах указано на рисунках (см. таблицу).

Таблиця

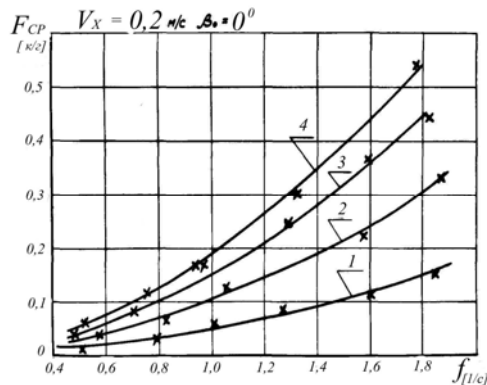
Расшифровка обозначений, принятых на графиках

*Амплитуда колебаний*

$A_0 = 0,04 \text{ м}$				$A_0 = 0,06 \text{ м}$				$A_0 = 0,08 \text{ м}$				$A_0 = 0,10 \text{ м}$			
№ поз.	Кол-во зубьев	$\beta_0$ (град)	Обозначение	№ поз.	Кол-во зубьев	$\beta_0$ (град)	Обозначение	№ поз.	Кол-во зубьев	$\beta_0$ (град)	Обозначение	№ поз.	Кол-во зубьев	$\beta_0$ (град)	Обозначение
1	0	0	×	1'	0	0	×	1''	0	0	×	1'''	0	0	×
2	2	1°29'	■	2'	3	3°22'	▣	2''	2	2°58'	□	2'''	2	3°43'	■
3	4	2°59'	□	3'	5	5°37'	○	3''	4	5°58'	○	3'''	3	5°37'	○
4	6	4°30'	●	4'	8	9°01'	△	4''	6	9°01'	△	4'''	5	9°24'	▲
5	8	6°	○	5'	11	12°27'	▽	5''	8	12°	▽	5'''	6	11°44'	▼
6	10	7°31'	▲	6'	13	14°45'	▽	6''	10	15°07'	▽	6'''	8	15°07'	▽
7	12	9°1'	△					7''	12	18°14'	◇	7'''	9	17°04'	◇
8	14	10°35'	*					8''	14	21°27'	◇	8'''	11	21°	◇
9	16	12°5'	▽												
10	18	13°35'	◇												

Кривые 1, 2 и 3 соответствуют поступательным скоростям потока  $V_x$ , равным соответственно 0,05, 0,02 и 0,07 м/с. При небольших скоростях потока (кривые 1 и 2) увеличение угловой амплитуды  $\beta_0$  ведет к существенному возрастанию величины силы тяги  $F_{cp}$ . При более значительном увеличении скорости и амплитуды угловых колебаний  $\beta_0$  при малых частотах колебаний появляются режимы, при которых величина силы тяги падает и даже может стать отрицательной (кривая 3 при  $\beta_0 = 2^\circ$ ).

Влияние амплитуды линейных колебаний  $A_0$  на величину создаваемой колеблющимся крылом тяги  $F_{cp}$  характеризуется графиками на рисунках 2 и 4.



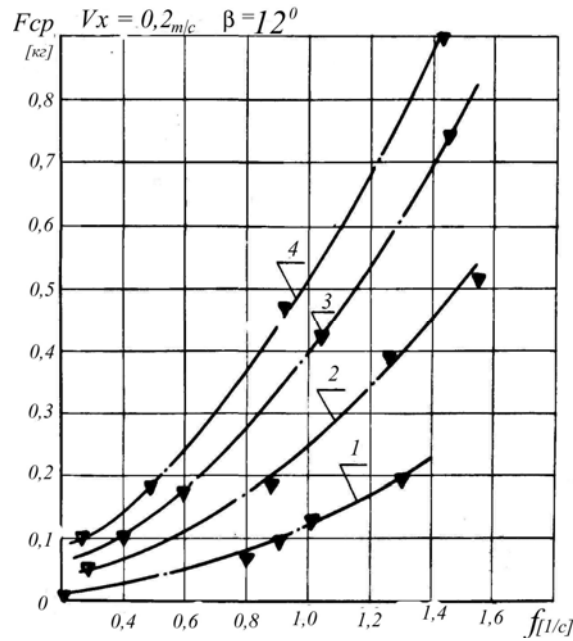


Рис. 3. Зависимость величины тяги от частоты, скорости потока, амплитуды угловых колебаний крыла при значении линейной амплитуды  $A_0 = 0,08 \text{ м}$

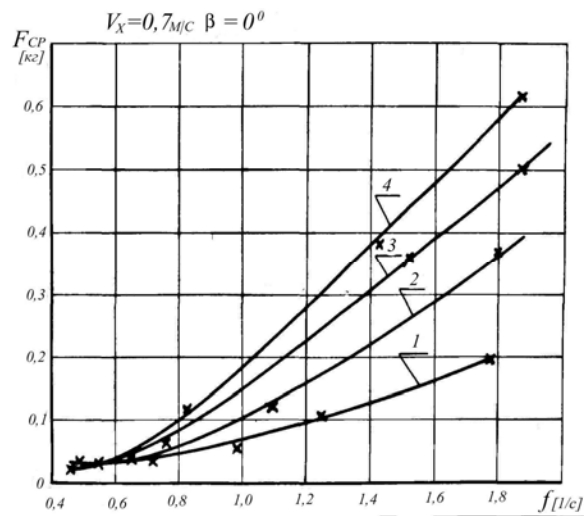


Рис. 4. Зависимость величины тяги от частоты, скорости потока, амплитуды угловых колебаний крыла при значении линейной амплитуды  $A_0 = 0,08 \text{ м}$

Здесь величина тяги  $F_{cp}$  представлена в зависимости от частоты колебаний крыла при постоянной скорости потока  $V_x = 0,2$  м/с и постоянных амплитуд угловых колебаний от  $\beta_0 =$  от 0,04 м до 0,10 м с шагом 0,02 м (кривые 1-4).

Следует отметить что в полученных экспериментальных зависимостях  $F_{cp}(A_0)$  величина тяги  $F_{cp}$  не является строго пропорциональной величине  $A_0^2$ , что следовало бы из теоретических выкладок, изложенных в работе [3]. Сравнение кривых 1 и 3 ( $A_0 = 0,04$  м и 0,08 м) показывает, что при возрастании амплитуды в 2 раза, величина силы тяги  $F_{cp}$  увеличивается примерно в 3 раза при  $f > 1$ . При меньших значениях частоты ( $f \approx 0,6-0,9$  Гц) это увеличение несколько больше, особенно с возрастанием угловой амплитуды колебаний крыла  $\beta_0$  (рисунок 3).

Сравнение графиков на рисунках 2 и 4 показывает, что увеличение скорости набегающего потока  $V_x$  при неизменной кинематике колебаний крыла незначительно влияет на приращение создаваемой колеблющимся крылом величины тяги  $F_{cp}$ . Так, при частоте  $f = 1,5$  Гц возрастание скорости потока в 3,5 раза дает увеличение силы тяги всего на 12 %-15 %.

Графики на рисунках 1-4 и обсуждение характера изменения зависимостей приведенных на них в размерном виде, были представлены для анализа влияния кинематических параметров колеблющегося крыла на создаваемую им тягу.

Однако, для более полного понимания полученных результатов с целью использования их для выбора определенных кинематических параметров волнового движителя (рабочий орган колеблющееся крыло) с необходимыми тяговыми характеристиками, более показательным будет представить результаты исследований в безразмерном виде.

Для исследования влияния кинематических параметров колеблющегося крыла на величину создаваемой им тяги  $F_{cp}$  рассмотрим зависимость коэффициента тяги  $C_T$  от числа Струхала  $K$ , где

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

$$K = \frac{\omega b}{V_x}. \quad (3)$$

Зависимости коэффициента тяги от числа Струхала  $C_T(K)$  для различных величин относительной амплитуды колебаний  $\bar{A} = \frac{A_0}{b}$  представлены на рисунке 5 при постоянных величинах угловой амплитуды колебаний  $\beta_0 = 0^\circ$  (рисунок 8) и  $\beta_0 = 18^\circ$  (рисунок 9).

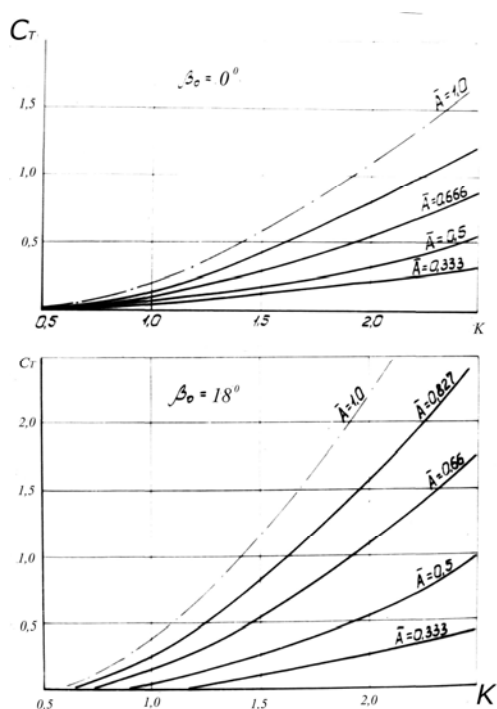


Рис. 5. Зависимости коэффициента тяги от числа Струхала  $C_T(K)$  для различных величин относительной амплитуды колебаний  $\bar{A} = \frac{A_0}{b}$

Величина  $C_T$  прямо пропорциональна величине  $K$  и  $\bar{A}$ . Для более яркого представления как зависит коэффициент тяги  $C_T$  от относительной амплитуды  $\bar{A}$  построены графики зависимостей  $C_T(\bar{A})$  при постоянных значениях угловой амплитуды  $\beta_0$  и числа Струхала  $K$  (рисунок 6).

Зависимость коэффициента тяги  $C_T(\bar{A})$  очень близка к квадратичной. Пунктирными линиями на графике показаны кривые описываемые уравнением (4), которые довольно близки экспериментальным зависимостям  $C_T(\bar{A})$ , показанным на графике сплошными линиями.

$$C_T = C_1 \cdot \bar{A}^2. \quad (4)$$

Характерно, что при малых значениях величин относительной амплитуды колебаний  $\bar{A}$  и при отсутствии угловых колебаний (рисунок 6) наблюдается существенное превышение экспериментально полученных значений  $C_T$  над величинами  $C_T$ , полученными расчетным путем с помощью уравнения 5, что объясняется существенным вкладом возникающей на закругленной кромке толстого колеблющегося профиля подсывающей силы.

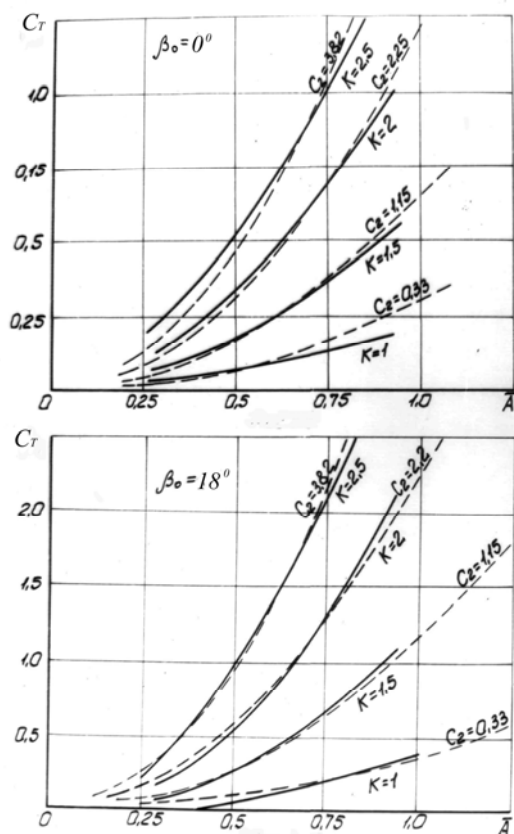


Рис. 6. Графики зависимостей  $C_T(\bar{A})$  при постоянных значениях угловой амплитуды  $\beta_0$  и числа Струхалия  $K$

Величина коэффициента  $C_T$  в уравнении 6 не является постоянной, а зависит от величины числа Струхалия  $K$  и от угла амплитуды  $\beta_0$ . Зависимость  $C_T(K, \beta_0)$  представлена на рисунке 7.

Кривыми 1-4 представлены зависимости  $C_T(K)$  для угловых амплитуд  $\beta_0 = 0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, 18^\circ$  соответственно. Все указанные кривые лежат в области между пунктирными кривыми 5 и 6, которые соответствуют зависимостям  $C_T = 0,3(K^2)$  – кривая 5, и  $C_T = 0,3(K^3)$  – кривая 6. Таким образом, в первом приближении коэффициент  $C_T$  можно описать эмпирической формулой (5)

$$C_T = 0,3(K^n), \quad (5)$$

где  $3 > n > 2$ , причем величина  $n$  возрастает от 2 до 3 при возрастании величины угловой амплитуды  $\beta_0$ .



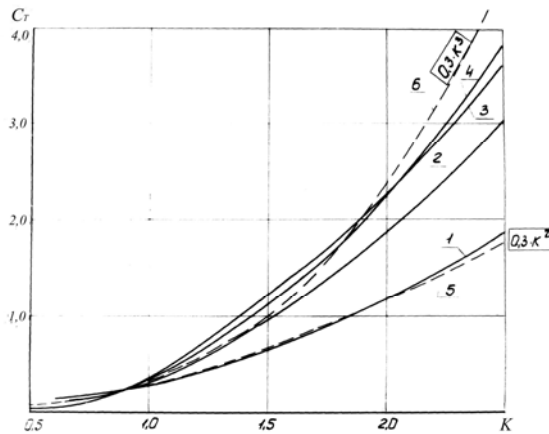


Рис. 7. Зависимость величины коэффициента  $C_T$  от величины числа Струхаля  $K$  и от угла амплитуды  $\beta_0$

На рисунке 8 для случая поступательных колебаний ( $\beta_0 = 0$ ) показаны зависимости приведенного коэффициента тяги  $K_T$ , обезразмеренного по квадрату безразмерной амплитуды  $\bar{A}^2$  и квадрату числа Струхаля.

$$K_T^1 = \frac{C_T}{\bar{A}^2 \cdot K^2}.$$

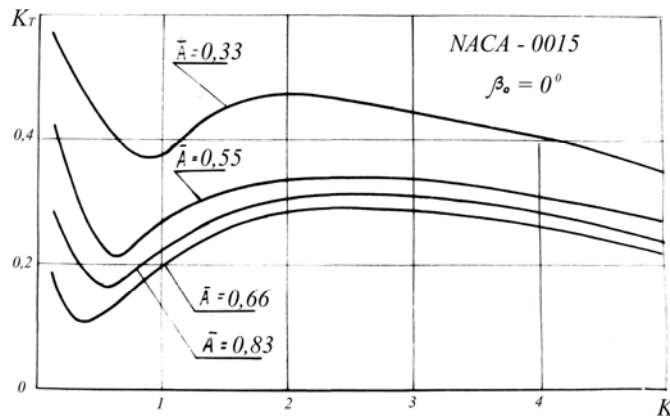


Рис. 8. Зависимости приведенного коэффициента тяги  $K_T$ , обезразмеренного по квадрату безразмерной амплитуды  $\bar{A}^2$  и квадрату числа Струхаля для случая поступательных колебаний ( $\beta_0=0$ )

Из рисунка видно, что в диапазонах чисел Струхаля  $K < 1,5$  и  $K > 3,5$  существенно нарушается квадратичная зависимость силы тяги от  $K$ . В диапазоне  $1,5 \leq K \leq 3,5$  эта зависимость близка к квадратичной.

На рисунке 9 проведено сопоставление экспериментальных данных с теоретическими результатами [6, 7]. Теоретическая кривая получена на основе численных расчетов по линейной теории для тонкого прямоугольного крыла удлинения  $\lambda = 3$ . Как и следовало ожидать, линейная теория дает завышенные результаты. Кроме того наглядно виден установленный в эксперименте факт отличия квадратичной зависимости коэффициента тяги от  $K^2$  в отмеченных диапазонах, чего не учитывает линейная теория. Следовательно, при малых числах Струхала  $K < 1,5$  и при  $K > 3,5$  в расчетах необходимо учитывать нелинейные эффекты, возникающие при конечных значениях  $\bar{A}$ .

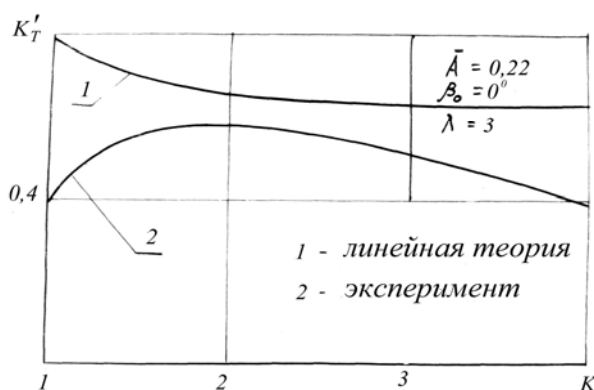


Рис. 9. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими результатами

Если рассматривать колеблющееся крыло в качестве движителя, то изменение его пропульсивных характеристик (коэффициента тяги) более интересным будет рассмотреть в зависимости от величины относительной поступи движителя (6)

$$K_T = \frac{2F_{cp}}{\rho V^2 S}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность воды;

$S$  – площадь крыла ( $S = 0,043 \text{ м}^2$ );

$V = \sqrt{V_x + (A_0 \omega)^2}$  – средняя действительная скорость обтекания крыла потоком жидкости, м/с. Действительная скорость обтекания крыла (постоянно изменяющаяся в течении периода колебаний, т.к.  $\omega = 2\pi f$ ) применена для того, чтобы избежать бесконечных и сверхбольших значений коэффициента тяги  $K_T$  при нулевых и очень малых скоростях горизонтально набегающего потока воды  $V_x$ .

На рисунке 10 а, б коэффициент тяги  $K_T$  колеблющегося крыла представлен в зависимости от величины относительной поступи  $\lambda_p$ , где  $\lambda_p$  имеет вид

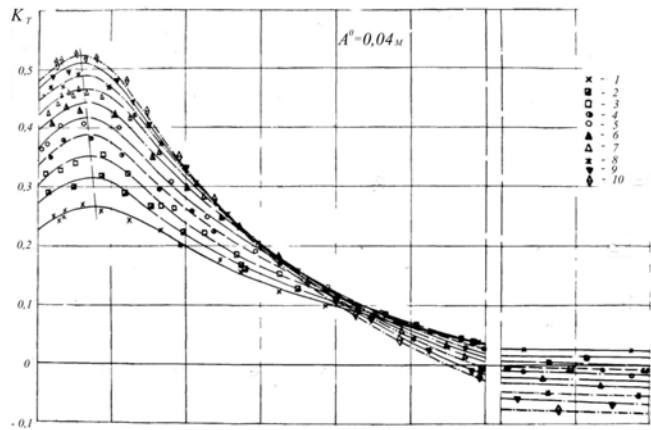
$$\lambda_p = \frac{V_x}{A_0 \omega},$$

где  $V_x$  – скорость потока набегающего на колеблющееся крыло;

$A_0$  – заданная максимальная вертикальная амплитуда колебаний крыла;

$\omega = 2\pi f$  – круговая частота.

а



б

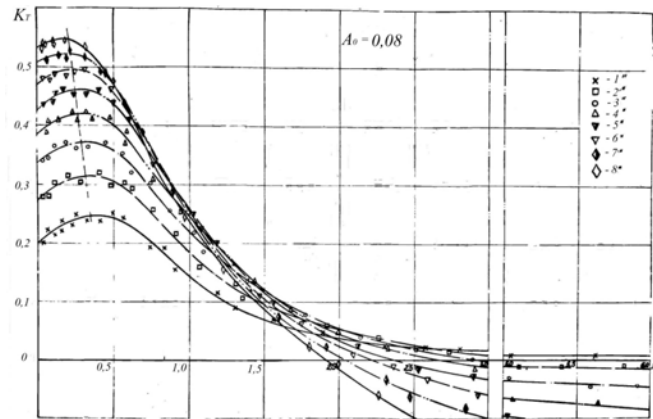


Рис. 10. Экспериментальные зависимости  $K_T(\lambda_p)$  при различных значениях угловой амплитуды  $\beta_0$  (с шагом  $3^\circ$ ):  
а – при значениях  $\bar{A} = 0,333$ ; б – при значениях  $\bar{A} = 0,667$

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  $\lambda_p > 1,5-3,0$ ). 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  $\beta_0 = 12^\circ$ ).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алгазин В. А. Теоретическое исследование силы тяги колеблющегося крыла конечного размаха // Бионика. – 1983. – Вып. 18. – С. 52-57.
2. Воробьев Н.Ф. О дискретной вихревой схеме крыла конечного размаха // Изв. СО АН СССР. – Сер. техн. наук. – С. 59-68.
3. Гребешов Э.П., Ручин А. П. Некоторые вопросы гидродинамики движителя типа «колеблющееся крыло» // Тр. ЦАГИ. – Вып. 2386. – 1988.
4. Глушко В.Н., Каян В.П., Козлов Л. Ф. Гидродинамические характеристики прямоугольного колеблющегося крыла // Тр. ЦАГИ. – 1984. – Вып 18. – С. 40-44.
5. Глушко В.Н., Каян В.П., Козлов Л.Ф. Исследование гидродинамики колеблющегося крыла с жестким и пассивно-деформируемым профилем // Математические методы механики жидкости и газа. – Днепропетровск. – 1986. – С. 21-29.
6. Каян В.П. Экспериментальное исследование гидродинамического упора, создаваемого колеблющимся крылом // Бионика. – 1983. – Вып. 17. – С. 45-49.
7. Кравец А.С. Характеристики авиационных профилей / А.С. Кравец – М.; Л.: Оборонгиз. – 1939. – 264 с.
8. Kayan V.P., Glushko V.N. Research of Hydrodynamics of a Fin Propulsor // In book: First International Industrial Conference: Bionic 2004 – Hanover, Germany, 2004. – P. 179-184.
9. Глушко В.Н. Исследование влияния параметров морского волнения на величину тяги, создаваемой волновым движителем в виде колеблющегося крыла с упругой заделкой // Прикладна гидромеханіка. – 2009. – Т.11. – Вып. 4. – С. 47-53.

10. Козлов Л.Ф. Теоретическая биогиродинамика. – К.: Вища школа, 1983. – 236 с.
11. Глушко В.Н, Каян В.П. Исследование работы плавникового движителя с упругим закреплением лопасти // Прикладна гідромеханіка. – Т.11(83). – № 4. – 2013. – С. 13-18.
12. Патент на корисну модель № 81736 / В.Н. Глушко, В.П. Каян – 10.07.2013.

*Стаття надійшла до редакції 20.11.2015*