

УДК 532.012.2

Глушко В.Н., к.т.н., Каян В.П. к.т.н., Белявцев А.И., вед.инж.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЖЕСТКОГО КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ КРЫЛА**

Институт гидромеханики НАН Украины

Получено НАУ 30. 06. 2020г.

Киев 2020

Приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики жесткого прямоугольного колеблющегося крыла серии NASA 0015 при обращенном движении. Графики представлены в диапазоне величин относительной поступи колеблющегося крыла $\lambda_p = 0 - 4,5$, графически представлены зависимости пропульсивных характеристик колеблющегося крыла (коэффициента тяги F_{cp}) от частоты f , величин линейных A_0 и угловых β_0 амплитуд колебаний крыла в зависимости от относительной поступи крыла λ_p .

. Работа будет полезной для специалистов в области гидродинамики, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Наведено результати експериментальних досліджень гідродинаміки жорсткого прямокутного крила що коливається серії NASA 0015 при зверненому русі. Графіки представлені в діапазоні відносної ходи крила що коливається $\lambda_p = 0 - 4,5$, графічно представлені залежності пропульсивних характеристик крила що коливається (коефіцієнт тяги F_{cp}) від частоти f , а також від величин лінійних A_0 і кутових β_0 амплітуд коливань крила в залежності від величини λ_p .

Робота буде корисною для фахівців в області гідродинаміки, а також для викладачів, аспірантів і студентів відповідних спеціальностей.

Ключевые слова: *синусная установка, колеблющееся крыло, сила тяги F_{cp} , частота f колебаний крыла, коэффициенты тяги C_T , K_T , относительная поступь λ_p . (Стр.15, рис. 8, таблица 1, источники 12).*

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]. 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 $\lambda = b/l = 3$, 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

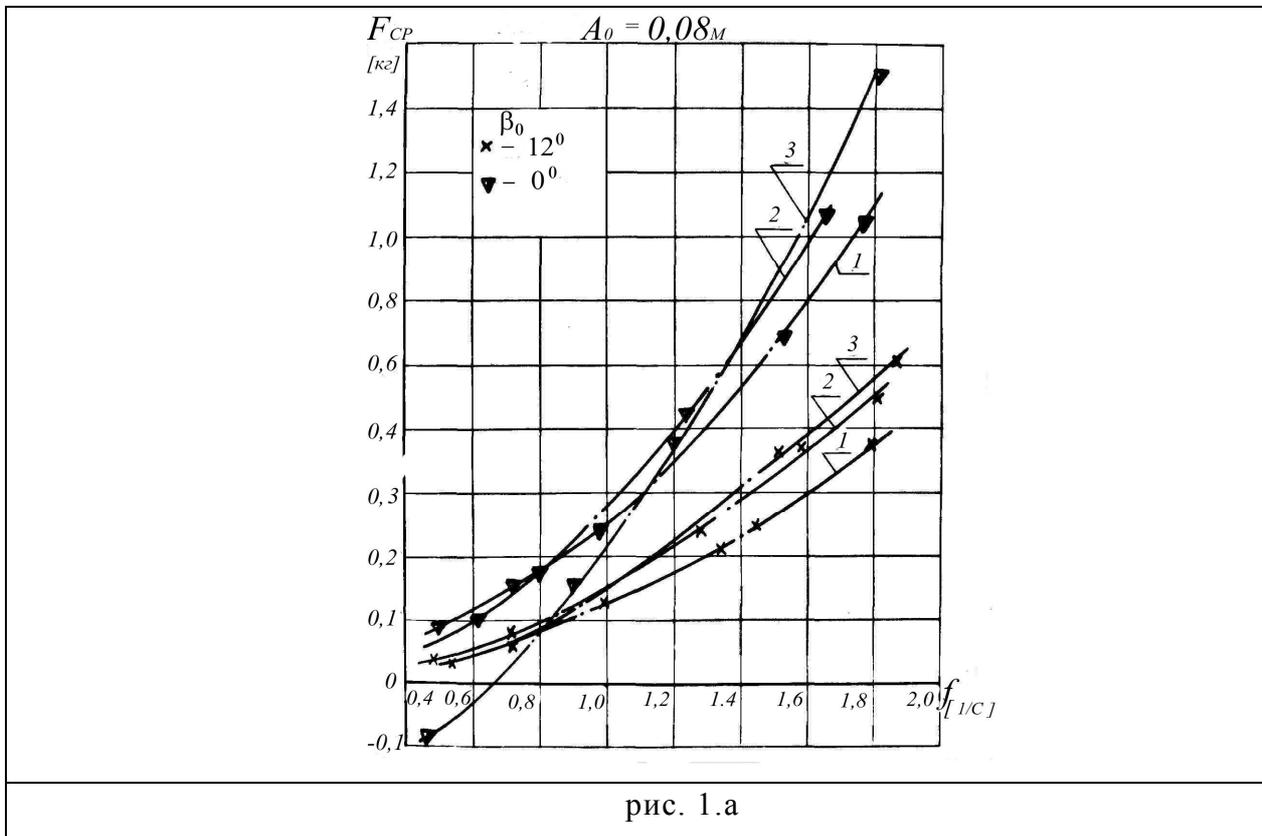
редуктором, а также двух синусных механизмов, размещенных на одной фундаментной раме [4,6]. При работе установки каретки синусных механизмов, опирающиеся роликами на вертикальные направляющие, совершают возвратно - поступательные вертикальные перемещения по закону

$$y_i = A_0 \cos \omega t_i,$$

$$и \quad y_{2i} = A_0 \cos(\omega t_i - \varphi) \quad (1)$$

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; (φ - 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 β_0 в зависимости от задания угла φ составляла 0° — $21,4^\circ$, с шагом около 3° . Установка обеспечивала устойчивые колебания крыла с частотой 0,5—2,5 Гц. 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 рис. 1 в качестве примеров представлен ряд зависимостей величин средней за период колебаний крыла тяги F_{cp} от различных кинематических параметров (скорости потока V_x , частоты колебаний f , амплитуд линейных и угловых колебаний A_0 и β_0).



На рис.1а представлены зависимости величин тяги F_{cp} от частоты f , скорости потока V_x амплитуд угловых колебаний крыла β_0 при постоянном значении линейной амплитуды $A_0 = 0,08m$. Значение величин β_0 в градусах указано на рисунках (см. таблицу 1). Кривые 1,2 и 3 соответствуют поступательным скоростям потока V_x , равным соответственно 0,05, 0,02 и 0,07м/с. При небольших скоростях потока (кривые 1 и 2) увеличение угловой амплитуды β_0 ведет к существенному возрастанию величины силы тяги F_{cp} . При более значительном увеличении скорости и амплитуды угловых колебаний β_0 при малых частотах колебаний появляются режимы, при которых величина силы тяги падает и даже может стать отрицательной (кривая 3 при $\beta_0 = 12^\circ$).

Влияние амплитуды линейных колебаний A_0 на величину создаваемой колеблющимся крылом тяги F_{cp} характеризуется графиками на рис.1б и 1г.

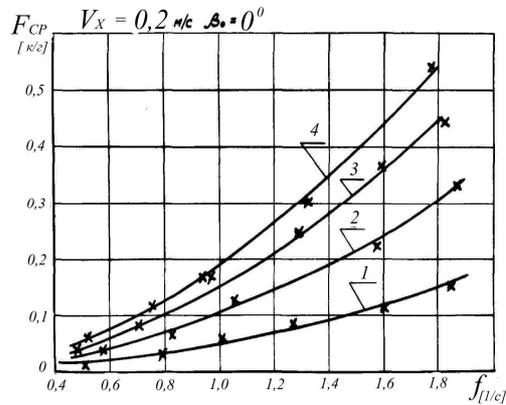


Рис. 1.б

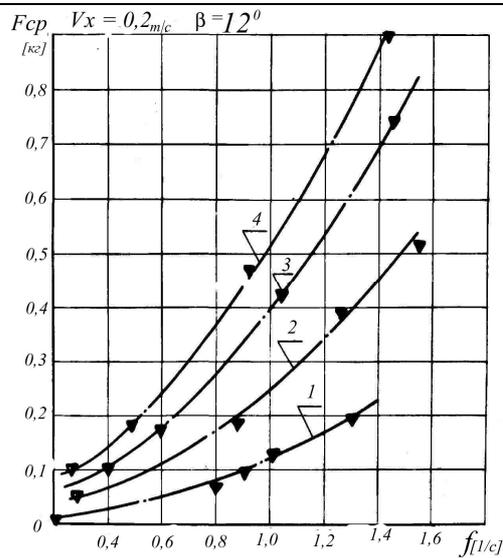
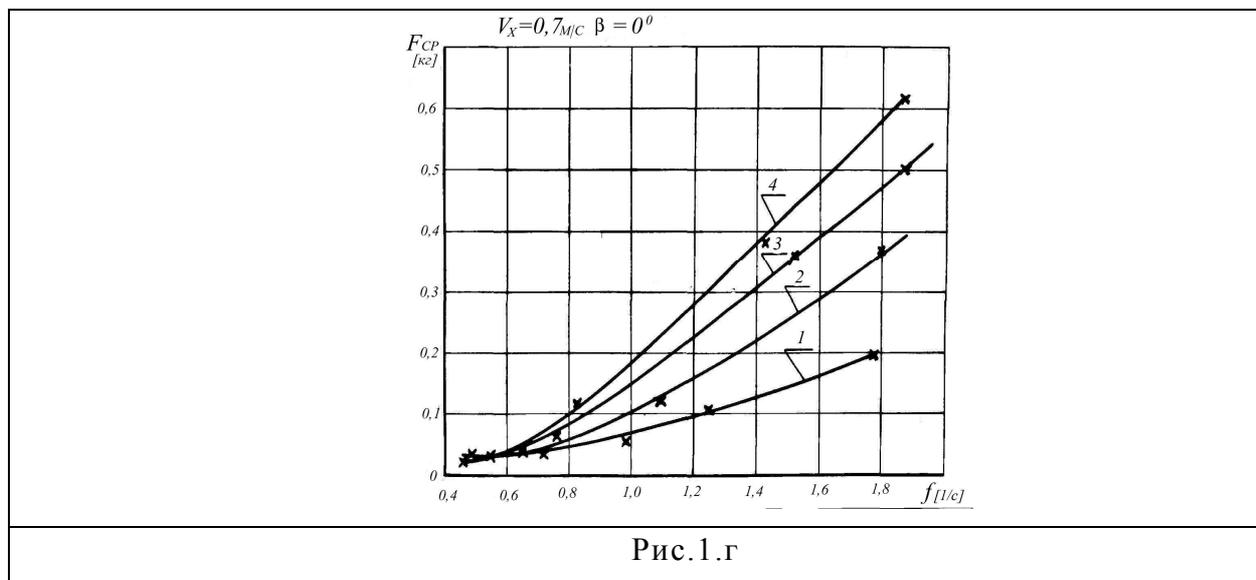


Рис. 1.в

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 0,04м до 0,10м 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

β_0 (рис.1в).



Сравнение графиков на рис.1б и 1г 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 рис.1а,б,в,г 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 зависимости коэффициента тяги C_T от числа Струхала k , где

$C_T \frac{2F_{CP}}{\rho V_x^2 S}$	(2)
------------------------------------	-----

$$K = \frac{\omega b}{V_x}$$

3)

Зависимости коэффициента тяги от числа Струхаля $C_T(K)$ для различных величин относительной амплитуды колебаний $\bar{A} = \frac{A_0}{b}$ представлены на рис.2а и

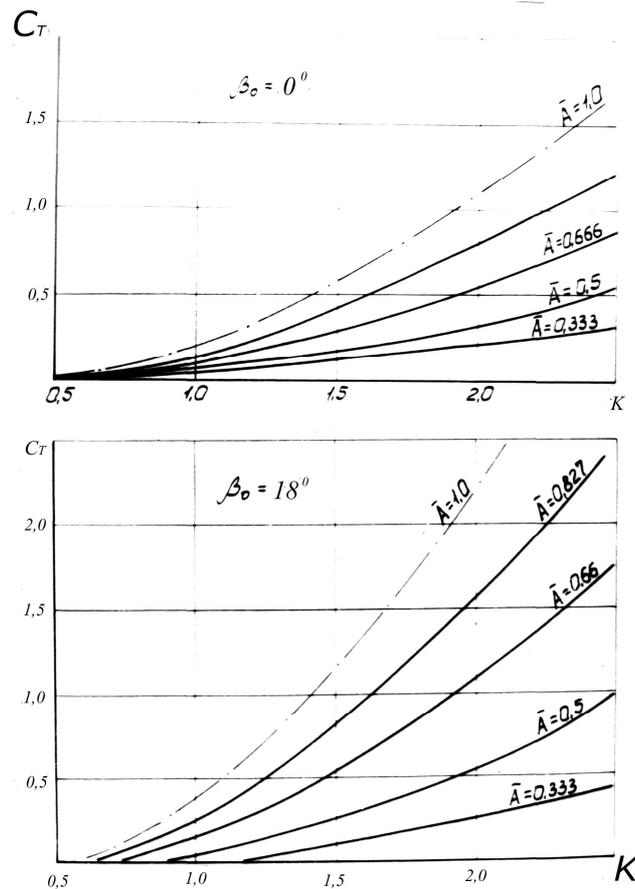


Рис.2.а,б.

при постоянных величинах угловой амплитуды колебаний $\beta_0 = 0^\circ$ (рис. 5) и $\beta_0 = 18^\circ$ (рис.6). 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 β_0 и числа Струхаля k (рис.3а,б).

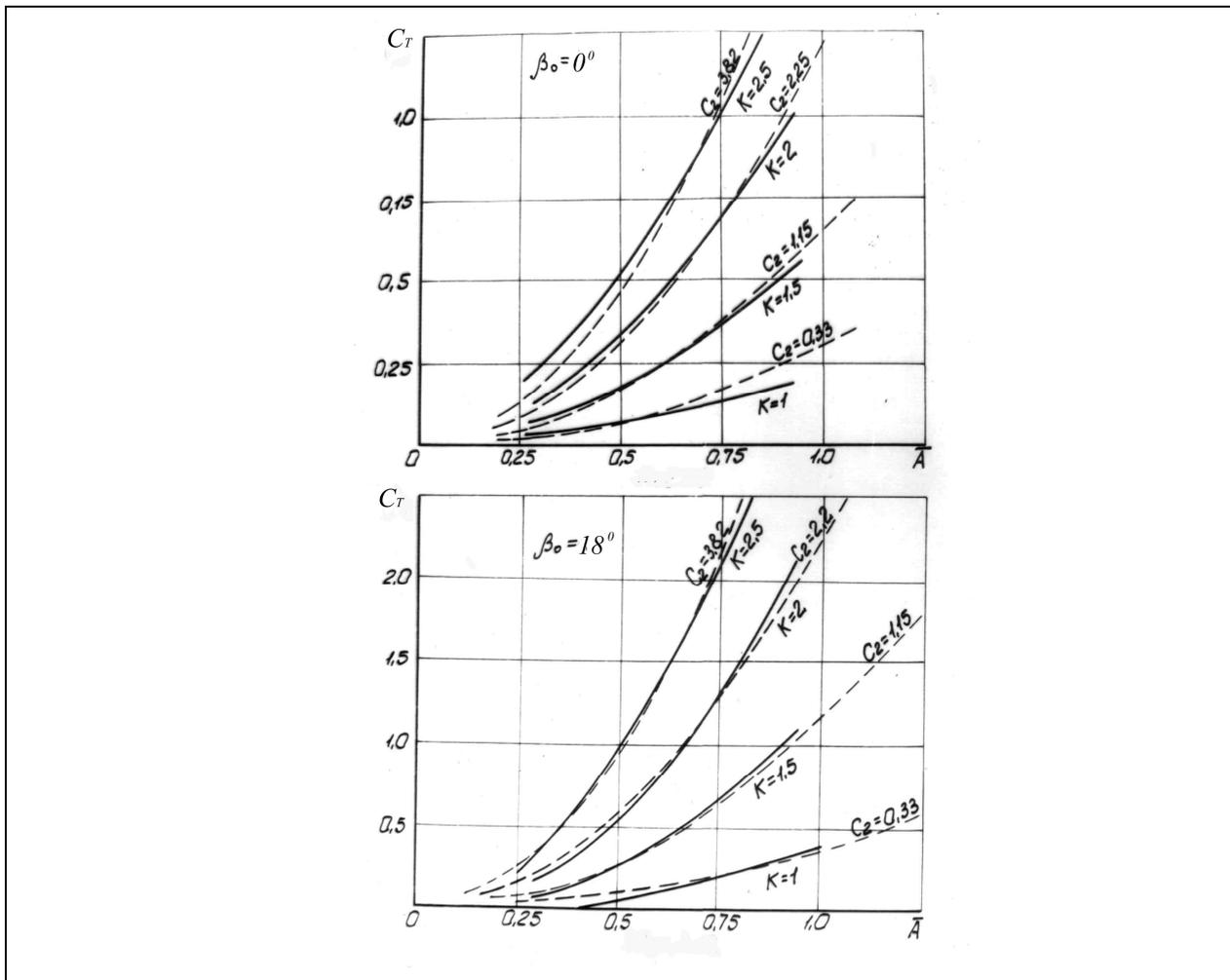


Рис.3.а,б.

Зависимость коэффициента тяги $C_T(\bar{A})$ очень близка к квадратичной.

Пунктирными линиями на графике показаны кривые описываемые уравнением

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

которые довольно близки экспериментальным зависимостям $C_T(\bar{A})$, показанным на графике сплошными линиями. Характерно, что при малых значениях величин относительной амплитуды колебаний \bar{A} и при отсутствии угловых колебаний (рис.3а,б) 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 подсосывающей силы.

Величина коэффициента C_1 в уравнении 6 не является постоянной, а зависит от величины числа Струхала K и от угла амплитуды β_0 . Зависимость $C_T(K, \beta_0)$ представлена на рис.4.

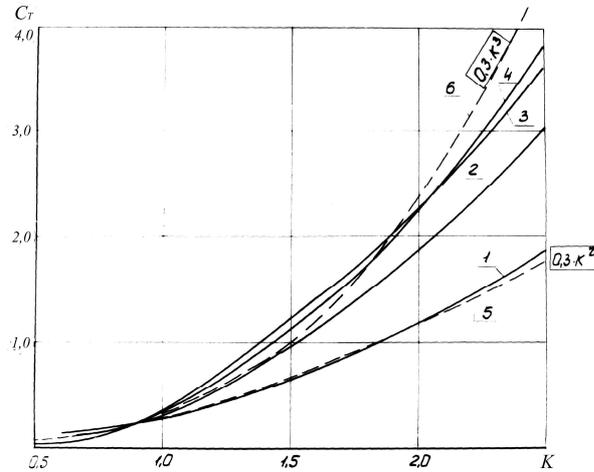


Рис.4.

Кривыми 1 - 4 представлены зависимости $C_1(K)$ 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 $C_1 = 0,3(K^2)$ - кривая 5, и $C_1 = 0,3(K^3)$ - кривая 6. Таким образом, в первом приближении коэффициент C_1 можно описать эмпирической формулой

$C_1 = 0,3K^n$	(5)
----------------	-----

где $3 > n > 2$, причем величина n возрастает от 2 до 3 при возрастании величины угловой амплитуды β_0 .

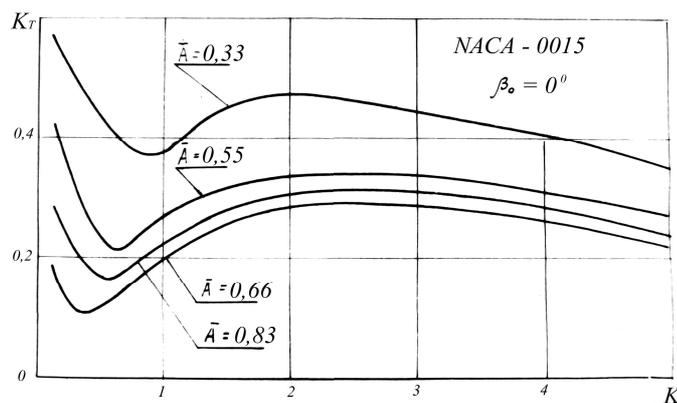


Рис.5.

На рис.5 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

$K_T^1 = \frac{C_T}{\bar{A}^2 \cdot K^2}$	(6)
---	-----

Из рисунка видно, что в диапазонах чисел Струхала $K < 1,5$ 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.

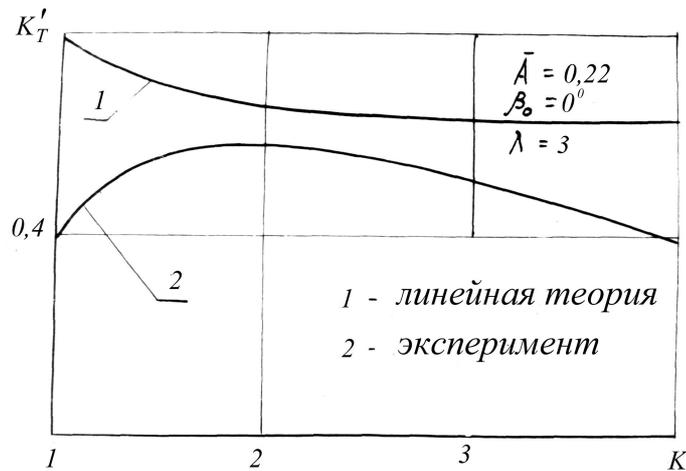


рис.6.

На рис.11. 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} .

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

$C_T \frac{2F_{CP}}{\rho V_x^2 S}$	(7)
------------------------------------	-----

где ρ - плотность воды, S - площадь крыла ($S = 0,043\text{м}^2$)
 $V = \sqrt{V_x^2 + (A_0\omega)^2}$ - 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 рис. 7–8 коэффициент тяги K_T колеблющегося крыла представлен в зависимости от величины относительной поступи λ_p , где λ_p имеет вид

$$\lambda_p = \frac{V_x}{A_0\omega} \quad (8)$$

где V_x - скорость потока набегающего на колеблющееся крыло, A_0 - заданная максимальная вертикальная амплитуда колебаний крыла, $\omega = 2\pi f$ - круговая частота.

Полученные таким образом величины коэффициентов тяги K_T в зависимости от величин относительной поступи λ_p и величин β_0 представлены ниже.

Варьирование значениями величин кинематических параметров A_0, f и V_x в настоящих опытах, обусловленное техническими характеристиками применявшегося экспериментального оборудования, позволило исследовать поведение коэффициента тяги K_T в широком диапазоне величин относительной поступи $\lambda_p = 0 \div 6$.

Амплитуда колебаний

Таблица 1

$A_0 = 0,04\text{м}$				$A_0 = 0,06\text{м}$				$A_0 = 0,08\text{м}$				$A_0 = 0,10\text{м}$			
№поз.	Кол-во зубьев	β_0 [град]	Обозначение	№поз.	Кол-во зубьев	β_0 [град]	Обозначение	№поз.	Кол-во зубьев	β_0 [град]	Обозначение	№поз.	Кол-во зубьев	β_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°04'	△	4''	6	9°04'	△	4'''	5	9°24'	▲
5	8	6°	○	5'	11	12°27'	▽	5''	8	12°	▽	5'''	6	11°14'	▼
6	10	7°34'	▲	6'	13	14°45'	▽	6''	10	15°07'	▽	6'''	8	15°07'	▽
7	12	9°4'	△					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'	◇												

Расшифровка обозначений, принятых на графиках, приведена в таблице 1.

На рис. 7а,б представлены зависимости $K_T(\lambda_p)$ при $\bar{A} = 0,333$ (а) и $\bar{A} = 0,667$ (б) при различных амплитудах угловых колебаний $\beta_0 = 0 - 21,4^\circ$ с шагом 3° (кривые 1—8).

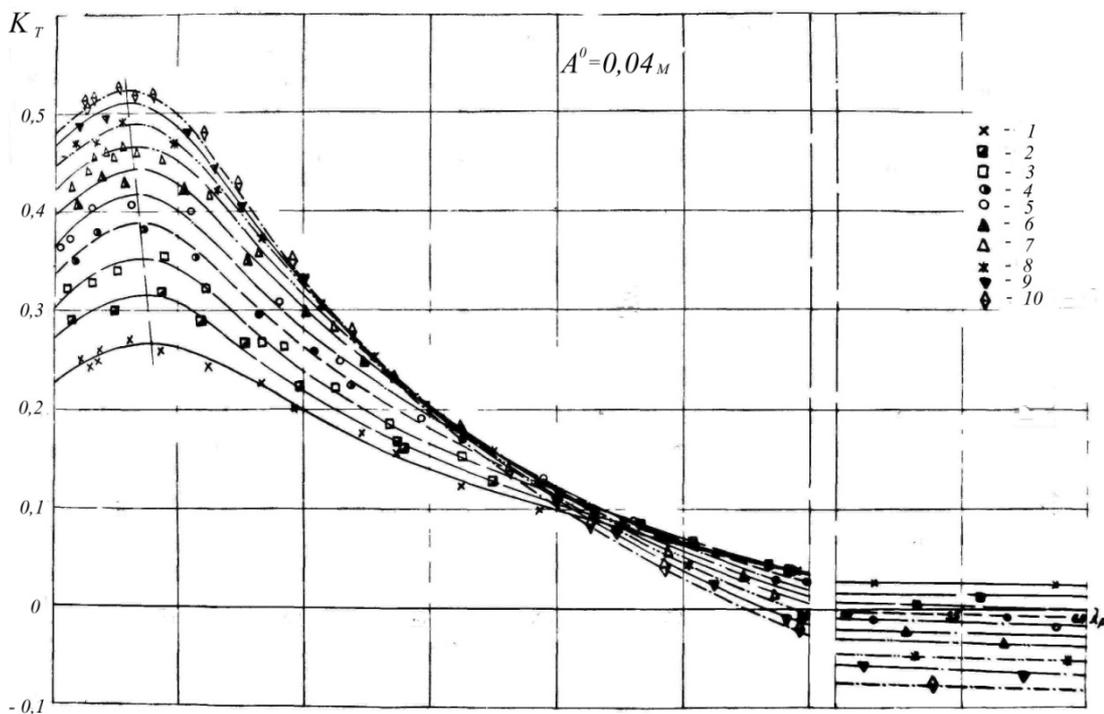


Рис.7а

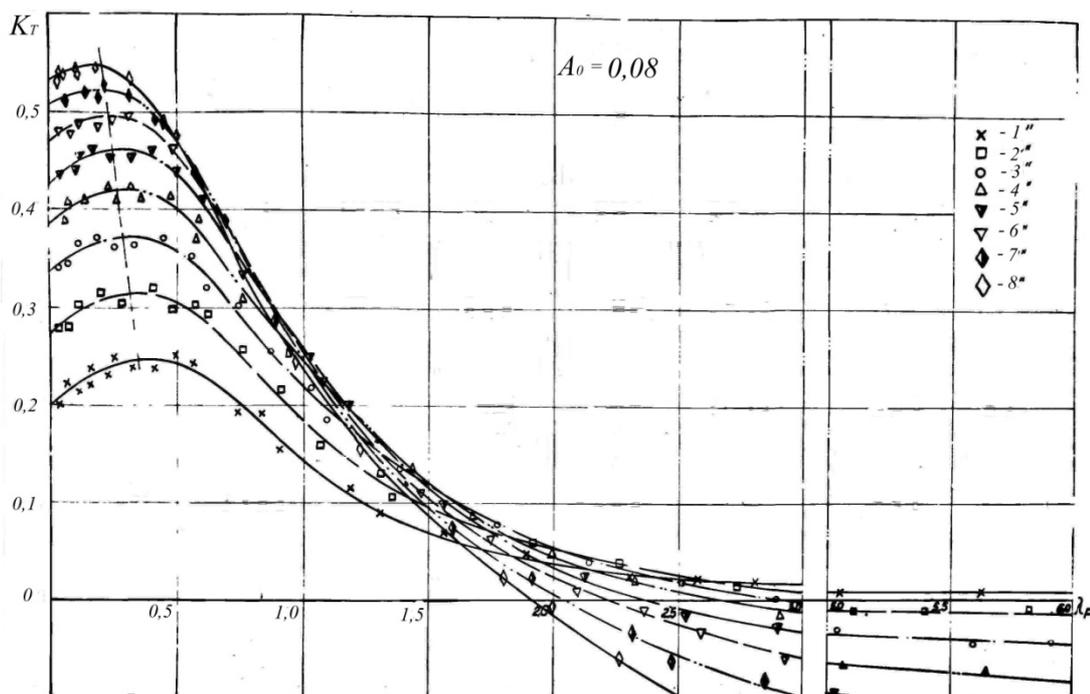


Рис.7б.

Представлены экспериментальные зависимости $K_T(\lambda_p)$ при различных значениях угловой амплитуды β_0 (с шагом 3°) при значениях $\bar{A} = 0,333$ (а) и $0,667$ (б) соответственно.

Характер полученных экспериментально зависимостей $K_T(\lambda_p)$ свидетельствует о весьма существенном влиянии величины угловой амплитуды колебаний β_0 на величину коэффициента тяги K_T и по форме хорошо совпадают с данными, приведенными нами ранее в [3] для геометрически подобного, но большего по размерам крыла с несколько иным принципом крепления к нему тяг.

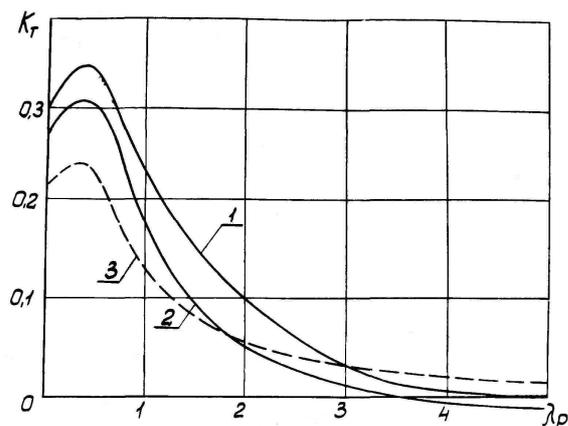


Рис.8.

Максимумы значений коэффициента тяги для всех экспериментальных зависимостей $K_T(\lambda_p)$ наблюдаются при малых значениях $\lambda_{p_{opt}} = 0,2 \div 0,3$. При этом необходимо отметить следующую особенность - максимумы значений $K_T(\lambda_p)$ по существу лежат на одной кривой, наклон которой на всех графиках одинаков, причем по мере увеличения амплитуды поперечных колебаний крыла A_0 , указанная кривая смещается приближаясь к оси ординат зависимости $K_T(\lambda_p)$.

Все зависимости $K_T(\lambda_p)$ имеют явно выраженные максимумы (все в районе малых значений λ_p , причем величина $\lambda_{p_{opt}}$ при которой $K_T = \max$, уменьшается с увеличением β_0 и A_0 . При $A_0 = \text{const}$ 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 $\beta_0 = \text{const}$ величина $K_{T_{max}}$ при увеличении A_0 уменьшается. С возрастанием величины относительной поступи λ_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 β_0 , тем при меньших значениях λ_p это происходит. С возрастанием величины λ_p происходит также изменение прямой зависимости величины K_T от величины β_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 β_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 $\beta_0 = 12^\circ$).

Использованная литература

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. ДСП
4. Глушко В. Н., Каян В. П., Козлов Л. Ф. Гидродинамические характеристики прямоугольного колеблющегося крыла // Там же. - 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. - М.;Л. : Оборонгиз, 1939. - 264 с.
8. 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.
9. Глушко В.Н. Исследование влияния параметров морского волнения на величину тяги, создаваемой волновым движителем в виде колеблющегося крыла с упругой заделкой / Прикладна гідромеханіка. - 2009.т.11,вип. 4 - С. 47 - 53.

10. *Козлов Л.Ф.* Теоретическая биогидродинамика. - Киев: Вища школа, 1983. - 236с.

11. *Глушко В.Н., Гребенников В.Н., Белявцев А.И.* Влияние морского волнения на величину тяги создаваемой волновым двигателем в виде колеблющегося крыла.- Ин-т гидромеханики НАН Украины, Нац. авиац. ун-т. - Киев, 14.04.09, №14 – Ук 2009. 11с.- Рус. - ГНТБ Украины.

12. *Глушко В.Н, Каян В.П.* - : Патент на корисну модель № 81736, 10.07.2013р.