

УДК 531.7., 532.517/045

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

*Разработка и создание экспериментальной установки, аппаратуры и методики измерения гидродинамических характеристик колеблющегося крыла (КК), рабочего элемента плавникового движителя (ПД).*

*Получено НАУ 30. 06. 2020г.*

*Институт гидромеханики НАН Украины*

*Киев 2020*

*Универсальная синусная установка, принцип работы и конструктивные особенности которой приведены ниже, предназначена для исследования нестационарного режима обтекания крыльев различной формы в плане при синусоидальном законе их угловых и вертикальных колебаний с проведением широкомасштабного эксперимента в малоисследованном диапазоне кинематических и геометрических параметров, анализ его результатов с точки зрения существующих теоретических представлений, выявление наиболее интересных режимов с точки зрения получения максимальных тяги  $F_{cp}$  и КПД  $\eta$  .,*

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

*Універсальна синусная установка, принцип роботи та конструктивні особливості якої наведені нижче, призначається для дослідження нестационарного режиму обтікання крил різної форми в плані при синусоидальном законі їх кутових і вертикальних коливань з проведенням широкомасштабного експерименту в малодослідженому діапазоні кінематичних і геометричних параметрів, аналіз його результатів з точки зору існуючих теоретичних уяв, виявлення найбільш цікавих режимів з точки зору отримання макимальної тяги  $F_{cp}$  і ККД  $\eta$  .,*

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

**Ключевые слова;** *инерционные силы, крыло, машущее крыло, колебательные движения крыла, синусный механизм, линейная теория (Стр.9, рис. 3, источники 8).*

Идея использования колеблющегося крыла в качестве несущего элемента и движителя возникла давно, однако ее осуществление в авиации, не нашло практического применения из-за трудности обеспечения прочностных характеристик, что связано с возникновением больших инерционных сил, вследствие колебательных движений крыла. При работе в воде инерционные силы, обусловленные весом конструкции крыла (по сравнению с возникающими на нем гидродинамическими силами) из-за значительно большей плотности среды, оказываются существенно меньшими. Поэтому в жидкости заданную тягу можно получить при значительно меньших размерах крыльев чем в воздухе. Изучение принципов движения гидробионтов и их пропульсивных качеств говорит о перспективности использования в технике бионических движителей типа

"колеблющееся крыло". Широко распространенное в природе [1 - 3] и применяемое в качестве движителя машущее крыло является обычно эластичным, однако в технике пока чаще используются жесткие крылья, это связано в основном со слабой изученностью проблемы в целом и отсутствием научно обоснованных рекомендаций по практическому использованию гибких крыльев в качестве движителей.

Вместе с тем, в связи с активным развитием численных методов в нестационарной аэродинамике и гидромеханике и все более широким внедрением численного эксперимента в научных и проектных организациях, возрастает роль физического эксперимента, необходимого для проверки достоверности разработанных математических моделей, а также для их углубления и совершенствования, сегодня эффективное решение новых классов задач нестационарной гидродинамики возможно только при органическом единстве теории и эксперимента.

Как уже отмечалось, основные закономерности образования и поведения гидродинамических сил на колеблющемся крыле получены и осмыслены в рамках линейной теории, классические результаты относятся к случаю поступательных либо чисто вращательных колебаний. Наиболее интересный случай совместных вращательно – поступательных колебаний в классических работах подробно не рассматривался. В то же время ограничения линейной теории (малые значения амплитуд колебаний и углов атаки, безотрывность обтекания, отсутствие вязкости и др.) весьма существенны. Постановка тонких физических экспериментов, в частности визуализации течений, выявила совершенно иную вихревую схему, чем постулируемая в линейной теории [4,5]. Для теоретического описания таких явлений необходимо и привлечение более сложных физических и математических моделей, учитывающих нелинейность колебаний, эффекты конечности размаха и толщины профиля колеблющегося крыла, вязкость среды, отрывы и присоединения потока в процессе движения. Существующие в настоящее время подходы в том или ином приближении учитывают указанные эффекты. Однако современное состояние этих исследований еще далеко от своей завершенности.

В силу этого основная направленность этой работы связана с проведением широкомасштабного эксперимента в малоисследованном диапазоне кинематических и геометрических параметров, анализ его результатов с точки зрения существующих теоретических представлений, выявление наиболее интересных режимов с точки зрения получения максимальных тяги  $F_{cp}$  и КПД $_{\eta}$ , а также выработка практических рекомендаций для эффективного использования колеблющегося крыла при конструировании различных движительно - двигательных комплексов.

## 2.1. Экспериментальная синусная установка для исследования гидродинамических характеристик колеблющегося крыла.

Универсальная синусная установка, принцип работы и конструктивные особенности которой приведены ниже, предназначена для исследования нестационарного режима обтекания крыльев различной формы в плане при синусоидальном законе их угловых и вертикальных колебаний. На рис.1 показана траектория центра вращения крыла.

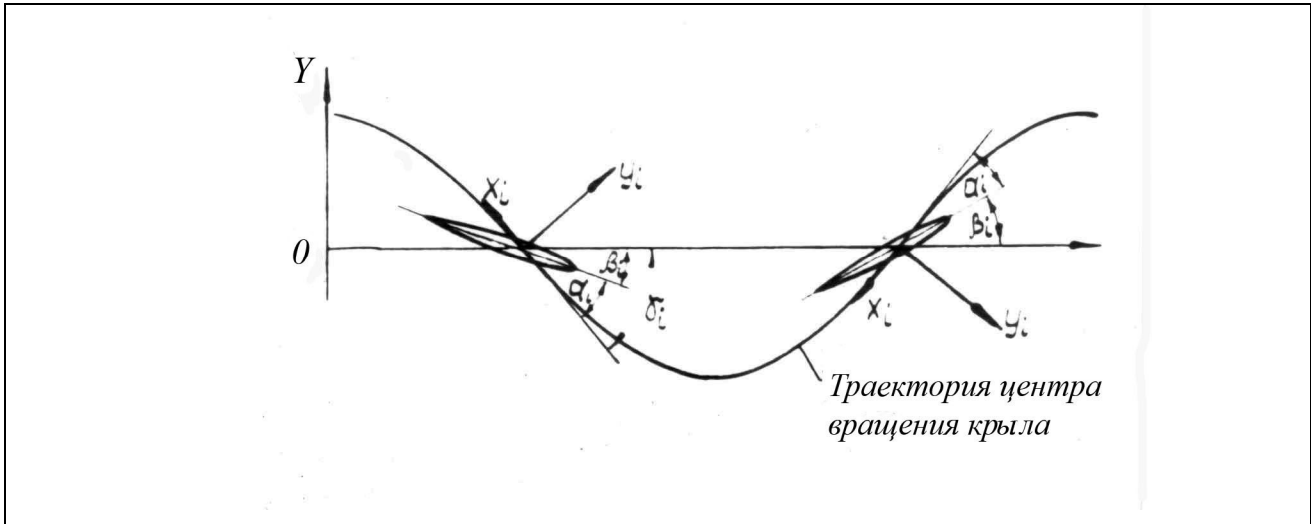


Рис.1

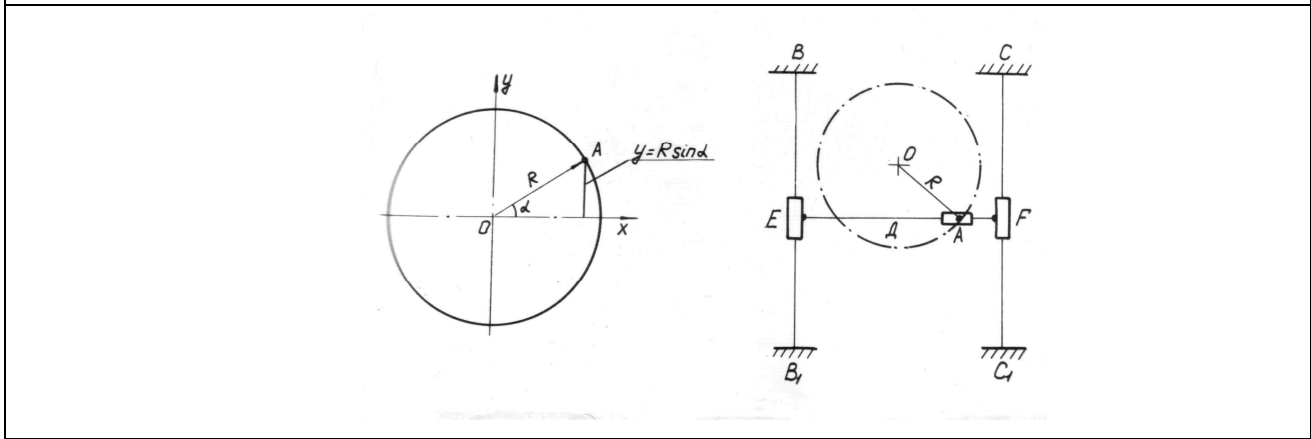


Рис.2а, и 2б

Принцип действия синусного механизма заключается в следующем. Если точка А (рис.2а) движется по окружности и угол  $\alpha$  между осью  $Ox$  и радиусом-вектором  $r$  точки А определяется как  $\alpha = \omega t$ , где  $\omega = 2\pi/n$  - число оборотов радиуса-вектора 1(сек), то вертикальные колебания точки А в функции времени осуществляются по синусоидальному закону.

Схема работы синусного механизма представлена на рис. 2б.

Кривошип  $OA$  вращаясь вокруг точки  $O$ , заставляет ползун скользить кулисе  $EF$ . При этом, под действием усилий, возникающих при вертикальных

перемещениях ползуна по окружности с радиусом  $R$ , кулиса  $EF$  совершает возвратно-поступательные вертикальные перемещения по направляющим  $BB_1$  и  $CC_1$ , усилие от горизонтальных перемещений ползуна  $A$  вдоль кулисы из-за незначительной величины трения скольжения на нее не передаются.

Экспериментальные исследования проводились на установке синусных колебаний, кинематическая схема которой приведена на рис. 3

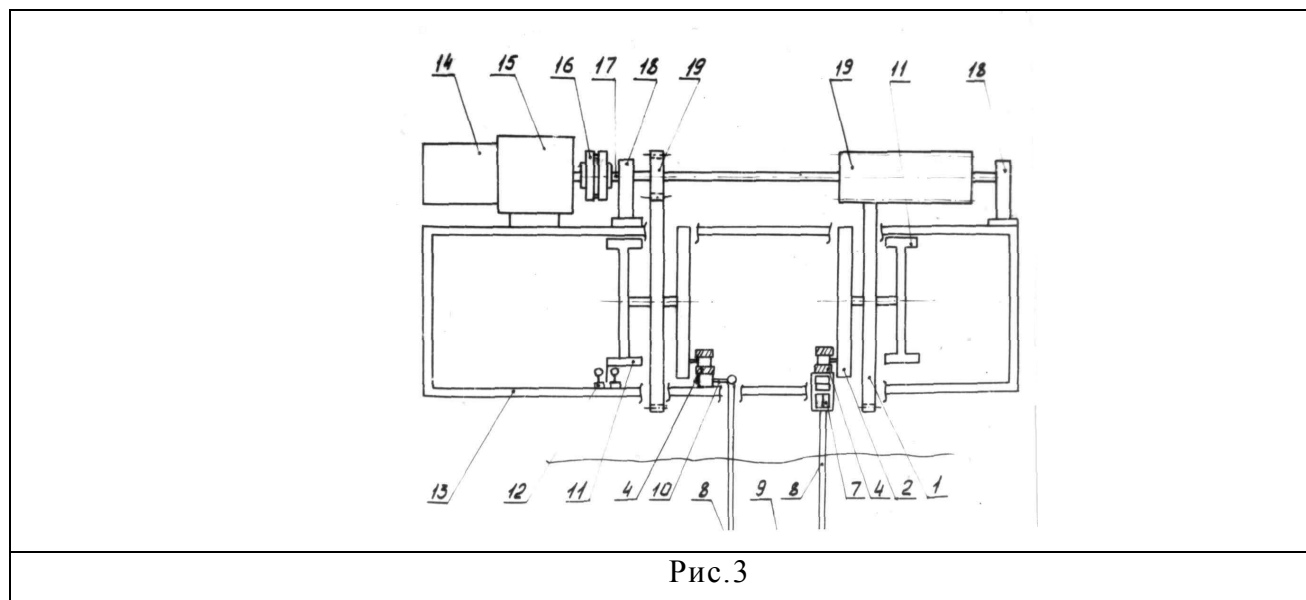


Рис.3

Установка состоит из фундаментальной рамы, электродвигателя постоянного тока, с редуктором и двух синусных механизмов. Один синусный механизм закреплен на раме стационарно, а второй может перемещаться продольной оси установки по направляющим. Фиксация его в определенном положении осуществляется при помощи стопоров. Такая конструкция позволяет плавно менять расстояние между синусными механизмами в пределах от 60 до 300 мм, что дает возможность проводить исследования крыльев с различными величинами их хорд, а также позволяет осуществлять сдвиг по фазе (от 0 до 45°) вертикальных колебаний точек  $D$  синусных механизмов. Соединение сухаря ползуна точка  $A$  (на рис.2б) с регулирующим винтом позволяет менять амплитуду вертикальных колебаний в пределах от 0 до 100 мм. На противоположном конце направляющей ползуна находится противовес, который расположен на одинаковом с ползунами расстоянии от оси вращения. Устранение заклинивания каретки от перекоса на направляющих достигнуто с установкой на ее концах пары обкатывающих роликов. С целью преодоления «мертвых» точек в течение полного цикла колебаний на осях синусных механизмов установлены маховики.

В данном случае для обеспечения максимальной точности измерений сил была выбрана такая схема привода, в которой крыло приводилось в колебание двумя тягами, присоединенными, к передней и задней кромке крыла и совершающими

возвратно -поступательные движения, вдоль вертикальной оси  $OY$ . Был выбран гармонический закон колебания крыла, близкий к синусоидальному [6 - 8].

Колебательные механизм установки выполнен в виде кулисного синусного механизма. На оси с ведомым цилиндрическим зубчатым колесом (1), посажена кулиса (2) которая через ползун соединена кареткой (4). При равномерном вращении кулисы (2) каретка (4) опирающаяся 4 - мя роликами на направляющие совершает вертикальные колебания закону  $y_i = A_0 \cos \omega t_i$ , где  $y_i$  - мгновенная координата вертикального перемещения каретки,  $A_0$  - максимальная линейная амплитуда колебаний,  $\omega = 2\pi f$  - круговая частота,  $f$  - частота колебаний,  $t$  - время.

Крыло 9 через два шарнира по корневой хорде с помощью двух тяг 8 и двух тензоэлементов 7 и 10 закреплено к кареткам 4 синусных механизмов, тензоэлемент 7 выполнен в виде двухкомпонентной тензобалки, с помощью которой измерялись вертикальная и горизонтальная составлявшие гидродинамических сил, возникающих на колеблющемся крыле, а тензоэлемент 10 в виде однокомпонентной тензобалки с шарниром, с помощью которой измерялась вторая вертикальная составляющая гидродинамических сил. Вращение колес I синусных механизмов осуществлялось от двух ведущих зубчатых колес 19, смонтированных на одном приводном валу 17, который крепился на раме 13, через две опоры 18. Одно колесо 19 выполнено большой ширины, что позволяло изменять место положения одного синусного механизма и исследовать, таким образом, крылья с различной величиной корневой хорды.

Приводом установки служил двигатель 14 постоянного тока типа Д - 2500 ТВ, с понижающим редуктором 15 и упругой муфтой 16, через которую он соединялся с приводным валом 17. Посредством зубчатых передач с отношением  $i = 5$ , приводились в движение синусные механизмы. К обмотке якоря и последовательной обмотке возбуждения двигателя напряжение подавалось с выпрямителя, собранного на диодах ВК – 200 на который оно поступало с регулятора напряжения РНО - 20. На параллельную обмотку электродвигателя от выпрямителя ВС – 24 подавался постоянный ток напряжением 24 вольта. За счет изменения величины напряжения на обмотке якоря, регулировалось число оборотов двигателя, а значит и частота колебаний крыла. Регулировка частоты вертикальных колебаний каретки плавная от 0,5 до 5 Гц.

Рама универсальной установки изготовлена из швеллеров, имеет габариты 1350 x 524 x 568 мм и через гибкие подвески крепилась к раме, установленной в гидрлотке ИГМ НАНУ. Масса установки 180 кг. В заключение приведем некоторые расчетные формулы, которые использовались при обработке экспериментальных результатов.

В эксперименте рассматривалось крыло с симметричным профилем сечения NASA - 0015, которое двигалось в жидкости с постоянной скоростью  $v_x$ , совершая при этом гармонические поперечные колебания (рис. 1). В этом случае поперечная скорость  $v_y$  зависит от закона колебания крыла, а скорость набегающего потока  $v_i$  равна

$$v_i = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (1)$$

Поскольку на экспериментальной синусной установке каретки совершают вертикальные колебания по синусному закону, то отклонения передней  $Y_1$  и задней  $Y_2$  кромок крыла от нейтральной оси в каждый момент времени определяются выражениями :

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

и

$$y_{2i} = A_0 \cos(\omega t_i - \varphi) \quad (3)$$

Где  $A_{01}$  – и  $A_{02}$  - заданные амплитуды колебаний передней и задней тяг;  $\varphi$  - угол сдвига по фазе колебаний задней кромки относительно передней;

Поперечную скорость средней точки хорды профиля находим как векторную сумму скоростей  $y_1$  и  $y_2$ .

$$V_{y1} = 1/2(V_{y1i} + V_{y2i}) \quad (4)$$

где

$$V_{y1i} = d_{y1i} / dt, \quad V_{y2i} = d_{y2i} / dt \quad (5)$$

Иначе мгновенные значения  $V_{yi}$  можно определить через мгновенный угол скоса потока  $\gamma$

$$V_{yi} = V_{ox} \operatorname{tg} \gamma_i \quad (6)$$

а поперечная скорость  $V_y$  центра давления профиля крыла определяется как равнодействующая скоростей  $V_{y1}$  и  $V_{y2}$  по формуле

$$V_{y.c.d} = V_{y1}(1 - z / b + V_{y2}(z / b)) \quad (7)$$

где  $b$  - хорда крыла ;  $z$  - расстояние от носика профиля до центра давления, или если значения  $V_{ox}$  и  $V_{y1}$  в каждый момент времени известны, можно определить мгновенный угол скоса потока  $\gamma$

$$\gamma_i = \operatorname{arctg} V_{y_i} / V_{x_0} \quad (8)$$

Угол наклона хорды профиля к оси  $OX$  (т.е. к направлению вектора поступательной скорости)  $\beta_0$  зависит только от кинематики передней и задней

кромки крыла, а именно от угла сдвига по фазе колебаний  $\varphi$  и расстояния между осями передней и задней тяг, мгновенный угол атаки крыла  $\alpha_i$  в каждый момент времени будет определяться разницей углов  $\varphi$  и  $\beta$ , т.е.

$$\alpha_i = \gamma - \beta_i \quad (9)$$

Поскольку колебания происходят по гармоническому закону, средние значения силы тяги  $F_{cp}$  и поперечной силы  $P_{cp}$  за период колебаний  $T = 1/f$  определяются по формулам

$$F_{cp} = \int_0^{T_0} (Y \sin \gamma - X \cos \gamma) dt \quad (10)$$

$$P_{cp} = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} (Y \cos \gamma - X \sin \gamma) dt \quad (11)$$

Осредненный за период колебаний коэффициент тяги  $K_T$  колеблющегося крыла будет равен

$$K_T = 2F_{cp} / \rho V^2 S \quad (12)$$

где  $\rho$  - плотность воды;  $S$  - площадь крыла;  $V = \sqrt{V_x^2 + (A_0 \omega)^2}$  амплитуда мгновенных значений скорости обтекания крыла. Используя суммарную скорость мы избегаем бесконечные значения  $K_T$  при работе крыла на швартовых (т.е. когда  $V_x = 0$ ). Гидромеханический коэффициент полезного действия  $\eta$  колеблющегося крыла определялся по формуле

$$\eta = \bar{N}_x / \bar{N}_y \quad (13)$$

где  $\bar{N}_x = F_{cp} V_x$  полезная работа, совершаемая колеблющимся крылом за один период колебаний.

А средняя за период мощность, затрачиваемая на вертикальные колебания равна:

$$\bar{N}_y / T_0 = \int_0^{T_0} P_{y_{\omega i}} dt \quad (14)$$

Вертикальная составляющая гидродинамических сил - каждый момент времени определялась как сумма значений составляющих на передней и задней тягах экспериментальной установки, т.е.

$$P_{y_{\omega i}} = P_{y_{1i}} + P_{y_{2i}}$$



### **Цитируемая литература:**

1. *Шулейкин В.В.* Физика моря. - М. : Наука, 1968. - 1069с.
2. *Петрова П.Н.* Гидробионика в судостроении. - Обзор ЦНИИТЭИС. - Л.: 1970. - 270с.
3. *Росс Д.* Энергия волн - Л.: Гидрометеоздат , 1981. - 111с.
4. *Голубев В.В.* Труды по аэродинамике. – М.- Л.: Гостехиздат, 1957. – 580с.
5. *Довгий С.А.* Исследование вихревых течений за колеблющимися крыльями // Наука - механике. - Киев: Наук, думка, 1983. - С. 109 - 116.
6. *Глушко В.Н., Каян В.П., Козлов Л.Ф.* Гидродинамические характеристики прямоугольного колеблющегося крыла // Бионика. -1984. - Вып. 18. – С. 40 – 44.
7. *Глушко В.Н.* Экспериментальные исследования гидродинамических характеристик колеблющегося крыла // Тез. докл. - Проблемы гидромеханики в освоении океана. - Киев: 1984. – С. 29.
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.