

УДК 533.6.011:532.5.013

В.И. Коробов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИДРОДИНАМИКИ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ КРЫЛА

Приведены результаты исследований гидродинамических характеристик колеблющегося крыла относительно трансверсальной оси в гидродинамической трубе. Мгновенные значения коэффициентов подъемной силы и сопротивления / тяги по углу атаки, который изменялся по гармоническому закону, превышают данные для стационарной продувки.

Ключевые слова: колеблющееся крыло, мгновенные гидродинамические характеристики.

Приведені результати досліджень гідродинамічних характеристик крила, що коливається відносно трансверсальної осі в гідродинамічній трубі. Миттєві значення коефіцієнтів підйомної сили і опору / тяги по куту атаки, який змінювався за гармонійним законом, перевищують дані для стаціонарного продування.

Ключові слова: крило, що коливається, миттєві гідродинамічні характеристики.

Results over of researches of hydrodynamic characteristics of hesitating wing of relatively transversal axis are brought in a wind tunnel. The instantaneous values of lift and resistance/traction coefficients on the attack angle, which changed by harmonic law, exceed data for the stationary experiments.

Keywords: hesitating wing, instantaneous hydrodynamic characteristics.

Введение. В большинстве устройств, в которых в качестве рабочего элемента используется крыльевой профиль, реализуется нестационарное обтекание. Это характерно, например, для винта при работе в косом потоке, для гидротурбины с вертикальной осью (ротор Дарье).

Обоснованность применения поправок или дополнительных слагаемых при определении динамических характеристик многолопастной гидротурбины с использованием модифицированной теоремы Жуковского для решетки профилей, можно подтвердить или опровергнуть либо прямым численным решением нестационарной задачи обтекания ротора турбины, либо прямым экспериментом. Однако в эксперименте с турбиной практически не возможно отследить мгновенные характеристики профиля, из которых складываются параметры турбины. При этом можно воспользоваться данными по гидродинамике колеблющегося крыла.

© Коробов В.И., 2015

Изучению гидродинамических характеристик крыла, которое колеблется в потоке, посвящено много работ. В большинстве своем это теоретические и численные исследования [1-3]. Незначительная часть экспериментальных работ в основном направлена на оценку пропульсивных характеристик колеблющегося крыла [4-6].

Системный анализ характеристик колеблющихся профилей приведен в экспериментальной работе [7], однако там представлены только осредненные за период характеристики профиля, что делает эти результаты практически неприменимыми для турбины.

Учитывая эти обстоятельства целесообразно вернуться к анализу нестационарного обтекания одиночного профиля и определения мгновенных параметров (сопротивления-тяги, подъемной силы) при его колебательном движении в натекающем потоке.

Настоящая работа поставлена с целью определения мгновенных значений гидродинамических характеристик жесткого крыла, которое колеблется в потоке по углу атаки. В основу методики исследований положен эксперимент в гидродинамической трубе.

Изложение основного материала. В качестве объекта исследований использовано крыло малого удлинения прямоугольной формы в плане с небольшими торцевыми шайбами. Профиль крыла симметричный, хорда $b = 120$ мм, удлинение $\lambda = 1,5$ ($\lambda = l/b$, где l – размах крыла), толщина профиля $c = 20$ %. Ось вращения крыла смещена от носика профиля крыла на расстояние $x_{ц} = 0,3 b$.

Эксперименты проводились в гидродинамической трубе 5 (ГДТ) (рис.1) в диапазоне скоростей $U = 0,2-2,0$ м/с.

Крыло 4 крепилось в рабочем участке ГДТ к 2-х компонентным тензометрическим весам 1. Вращение крыла относительно трансверсальной оси Z (3) осуществлялось с помощью электромеханизма 2. При этом электромеханизм обеспечивал перекладку крыла таким образом, что угол поворота крыла во времени изменялся по гармоническому закону $\alpha(t) = \beta \sin \omega t$, где ω – круговая частота колебаний; β – амплитуда угловых колебаний; $\beta = 30^\circ$.

Частота колебаний крыла в экспериментах f регулировалась в пределах 0,2-2,0 Гц.

Сечение рабочего участка (РЧ) ГДТ квадратное с размерами 400 мм х 400 мм. Площадь поперечного сечения РЧ $F = 0,16$ м². Загромождение потока крылом РЧ ГДТ в пределах полупериода колебаний крыла изменялось в пределах от $S_{voz}/F = 1,95$ % до $S_{voz}/F = 4,5$ %.

В процессе эксперимента регистрировались мгновенные значения продольной (X) и поперечной (Y) компонент гидродинамической силы, действующей на крыло, а также текущий угол колебания крыла α .

Отображение и запись информации, получаемой от датчиков, производились на цифровом осциллографе Tektronix TDS 2014 В.

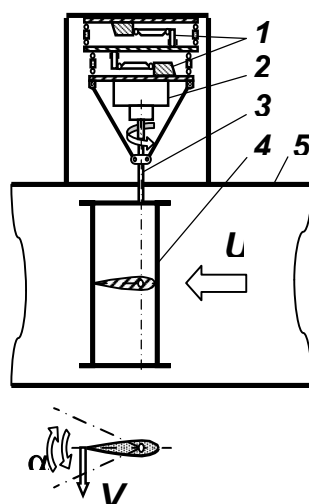


Рис. 1. Схема размещения крыла
в рабочем участке гидродинамической трубы

При разработке методики динамического эксперимента вопросу повышения точности измерений уделялось особое внимание.

Точность регистрации по углу перекладки составляла $\pm 0,25$ градуса и определялась дискретностью датчика.

В процессе экспериментов изменялась частота перекладки крыла и, соответственно, величина регистрируемых сил. Для повышения точности измерений силовых компонент весь диапазон измерений по частоте разбивался на ряд поддиапазонов с разным коэффициентом усиления сигнала таким образом, что погрешность измерений не превышала соответственно 5 % в начале и 3 % в конце поддиапазона.

Особенности конструкции тензоподвески, в которой реализован остронаправленный минимум жесткости во взаимно перпендикулярном направлении, обеспечили практически полное отсутствие взаимного влияния компонент X и Y .

Механизм колебательного привода в сборе с крылом максимально сбалансированы. Для устранения влияния остаточного сигнала от инерционной составляющей первоначально осуществлялись колебания крыла в воздухе. Затем зафиксированный сигнал вычитался из данных испытаний крыла в гидродинамической трубе. Итоговая информация содержала только данные по гидродинамической нагрузке.

Результаты экспериментов представлены в виде гидродинамических коэффициентов C_y и C_x , которые связаны с силами известными соотношениями

$$X = C_x S q, \quad Y = C_y S q,$$

где $q = (1/2) \rho U^2$ – скоростной напор;

S – площадь крыла.

Гидродинамические коэффициенты крыла (C_y , C_x) в зависимости от угла атаки α при стационарной продувке ($\omega = 0$), т.е. при отсутствии колебаний крыла, показаны на рис. 2: кривая 1 – $C_y(\alpha)$, кривая 2 – $C_x(\alpha)$. Эти данные согласуются с данными других авторов [7; 8] (крив. 3 и 4).

Экспериментальные зависимости амплитуды коэффициента подъемной силы C_{yA} от частоты колебаний f для разных значений скорости набегающего потока приведены на рис. 3.

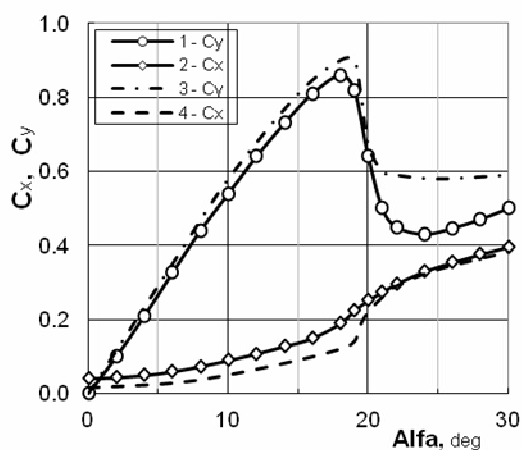


Рис. 2

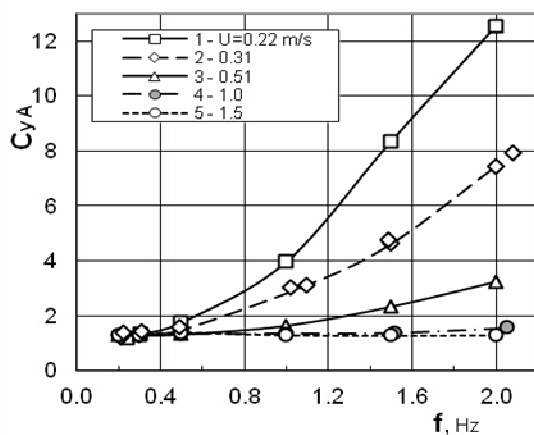


Рис. 3

Максимальные значения коэффициента продольной силы $C_{X \max}$ (тяга), а также минимальные значения коэффициента продольной силы $C_{X \min}$ (сопротивление), в пределах одного периода колебаний, в зависимости от частоты колебаний f для разных значений скорости набегающего потока приведены на рис. 4.

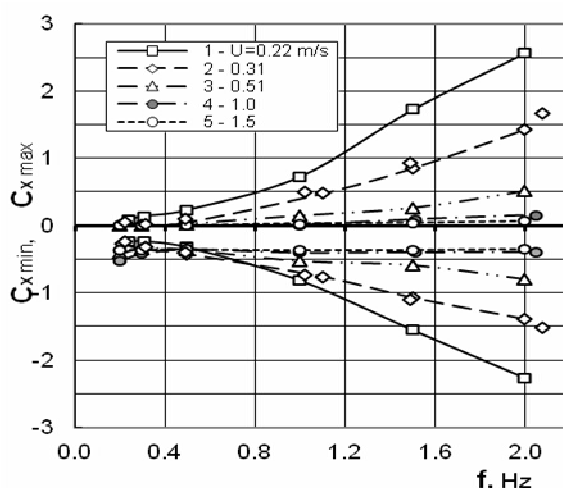


Рис. 4

Эти же гидродинамические характеристики колеблющегося крыла, представленные в виде зависимости от безразмерной скорости V_k / U , приведены соответственно на рис. 4 и рис. 5, где U – скорость потока в РЧ ГДТ, $V_k = \omega r$ – максимальное значение (поперечной) скорости задней кромки крыла за период колебаний (рис. 1), $r = b - x_{ц}$ – расстояние от задней кромки крыла до оси вращения. Кинематический параметр V_k / U является обратной величиной относительной скорости λ_p , который, в свою очередь, по своей сущности аналогичен относительной поступи гребного винта. Данные всех опытов на разных скоростях, представленные в таком виде, разместились на одной универсальной экспериментальной кривой.

Изменение величины продольной и поперечной компонент гидродинамической силы в пределах одного периода колебаний в зависимости от мгновенного значения угла колебания крыла показано на рис. 7 и рис. 8. Представлены характерные данные для 3-х режимов колебаний, отличающиеся по безразмерной скорости: кривая 1 – $V_k / U = 0,52$ ($U = 0,51$ м/с, $f = 1,0$ Гц); кривая 2 – $V_k / U = 1,29$ ($U = 0,31$ м/с, $f = 1,5$ Гц); кривая 3 – $V_k / U = 2,43$ ($U = 0,22$ м/с, $f = 2,0$ Гц).

Максимальные значения гидродинамических коэффициентов силы сопротивления (тяги) C_x , а также поперечной (подъемной) силы C_y , в пределах одного периода колебаний на соответствующих режимах, по абсолютной величине соответствуют данным, приведенным на графиках – рис. 5. и рис. 6.

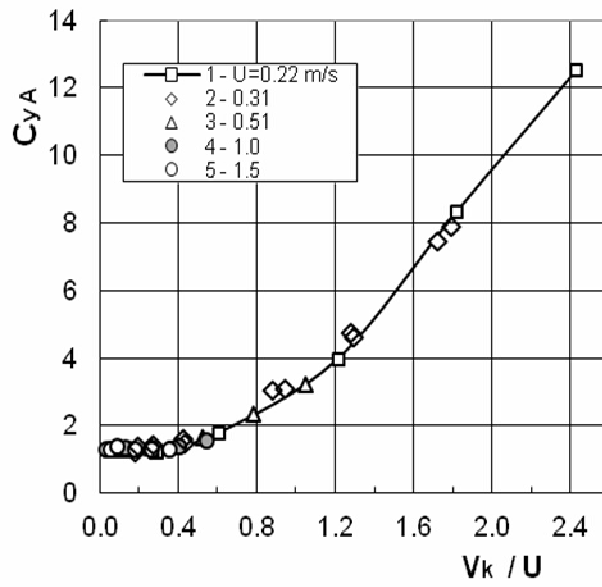


Рис. 5

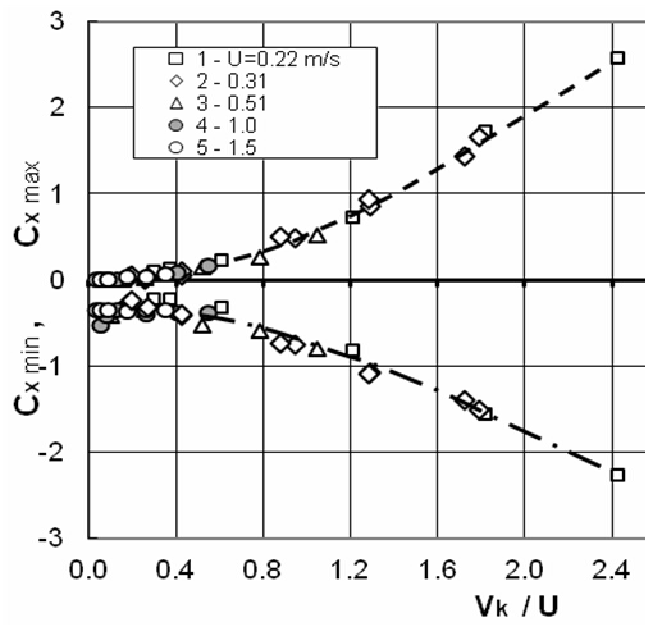


Рис. 6

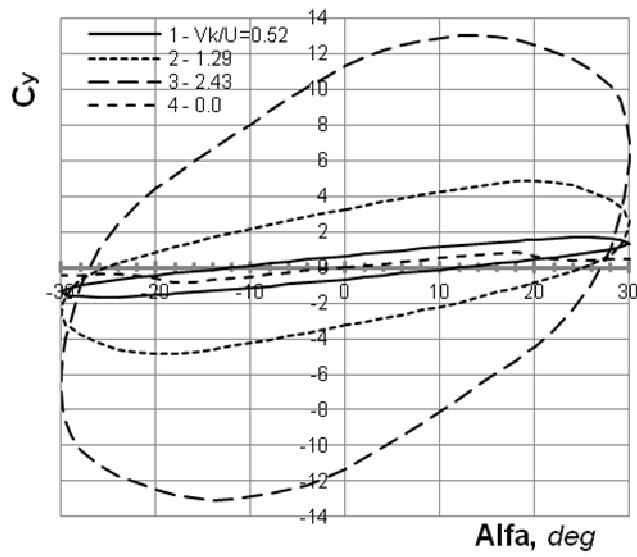


Рис. 7

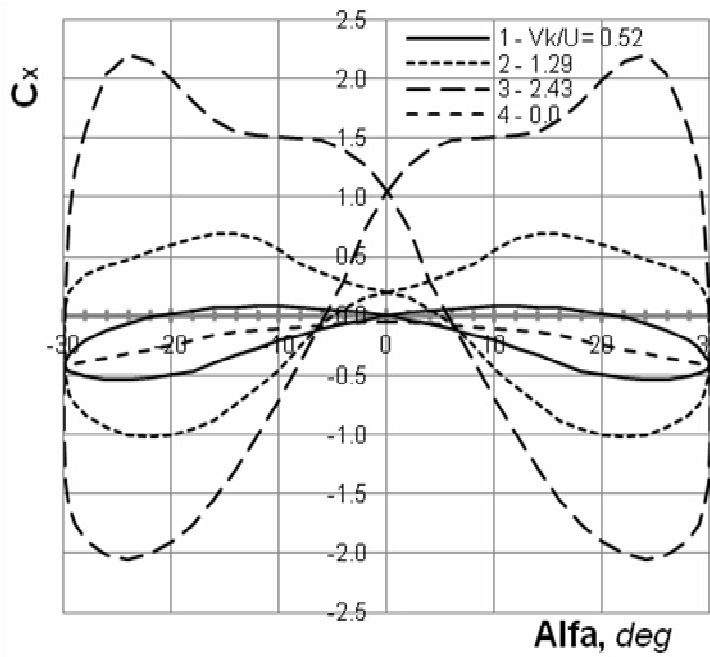


Рис. 8

С ростом частоты крутильных гармонических колебаний крыла (а также с увеличением параметра безразмерной скорости V_k/U) максимум значений коэффициента поперечной (подъемной) силы C_y , в пределах одного полупериода колебаний, смещается от предельных углов перекидки крыла в область меньших значений угла (от $\alpha = 28^\circ$ до $\alpha = 14^\circ$ на рис. 7).

Для значений коэффициента силы сопротивления (тяги) C_x наблюдается обратный эффект. С ростом величины безразмерного параметра V_k/U колебаний крыла максимум значений коэффициента C_x перемещается ближе к предельным значениям угла динамической перекидки крыла.

Следует отметить, что с ростом частоты крутильных колебаний крыла в пределах периода наблюдается преобладание силы тяги над силой сопротивления. На таких режимах обтекания колеблющееся по углу атаки крыло выполняет роль гидродинамического движителя. Однако гидродинамическая эффективность в этом случае ниже, чем у колеблющегося крыла с двумя степенями свободы [7].

Для сравнения на рис. 7 и рис. 8 (крив. 4) также приведены результаты стационарной ($\omega = 0$) продувки крыла (рис. 2). Мгновенные значения гидродинамических параметров колеблющегося крыла значительно превышают (в рамках эксперимента – на порядок) соответствующие характеристики при стационарном обтекании.

Выводы. С ростом частоты колебаний крыла мгновенные значения гидродинамической нагрузки многократно возрастают.

Режим нестационарного обтекания крыла приводит к значительным динамическим перегрузкам конструкции.

Результаты измерений гидродинамических характеристик колеблющегося крыла подтверждают вывод, полученный применительно к винтам при работе в косом потоке. Анализ натурных данных и результатов лабораторных экспериментов показывает, что определение переменной силы, возникающей на на лопасти в таком режиме, по кривым действия приводит к меньшему значению переменной нагрузки по сравнению с реальной ее величиной. А это, в свою очередь, приводит к недооценке циклической прочности винтов при работе за корпусом (например) судна на подводных крыльях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Некрасов А.И. Теория крыла в нестационарном потоке. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 258 с.
2. Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К., Табачников В.Г. Крыло в нестационарном потоке газа. – М.: Наука, 1971. – 767 с.
3. Рождественский К.В., Рыжов В.А. Математические модели в теории машущего крыла. – Л.: Изд. Ленинградского кораблестроительного института, 1985. – 89 с.

4. Горелов Д.Н. Экспериментальное исследование тяги машущего крыла // Бионика. – К.: Наукова думка, 1980. – Вып.14. – С.42-45.
5. De Lourier J.D., Harris J.M. Experimental study of oscillating – wing propulsion // J. Aircraft. – 1982. – № 5. – P. 368-373.
6. Глушко В.Н., Каян В.П., Кочин В.А. Об оптимизации пропульсивных характеристик машущего двигателя // Бионика. – К.: Наукова думка, 1992. – Вып.2 5. – С.75-80.
7. Гребешов Э.П., Сагоян О.А. Гидродинамические характеристики колеблющегося крыла, выполняющего функции несущего элемента и двигателя // Тр. ЦАГИ. – М., 1976. – Вып. 1725. – С.3-30.
8. Табачников В.Г. Стационарные характеристики крыльев на малых скоростях во всем диапазоне углов атаки // Тр. ЦАГИ. – М., 1974. – Вып. 1621. – С.79-93.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2015