

УДК 533.69.01

533.69.01

О.В. Яценко

## КОЛЕБАНИЯ КРЫЛА С УПРУГИМ ЗАКРЕПЛЕНИЕМ НА ОСИ ВРАЩЕНИЯ В ПОТОКЕ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

*Рассмотрена задача о вынужденных колебаниях жесткого крыла с упругим закреплением на оси вращения в несжимаемом потоке, решенная методом дискретных вихрей с усовершенствованиями расчетной методики, позволяющими получать данные для достаточно больших моментов времени. Приведены некоторые результаты анализа данных численных исследований.*

Задача о вынужденных колебаниях жесткого крыла с упругим закреплением на оси вращения в безграничном потоке несжимаемой жидкости в линеаризованной постановке исследовалась в работах [1 – 4] и в нелинейной постановке – в [5; 6]. В работах [5; 6] показано, что результаты линеаризованной теории можно считать удовлетворительными только для малых амплитуд поперечных колебаний и малых частот. Для определения оптимальных режимов колебаний необходимо использовать нелинейную теорию. Используемая методика расчетов колебаний крыла основана, как и в работах [5; 6], на методе дискретных вихрей, но с усовершенствованиями схемы [7]. Применяемая методика позволяет получать аэрогидродинамические характеристики с более высокой точностью и вследствие хорошей устойчивости вычислительной схемы проводить расчеты до достаточно больших моментов времени. Это дает широкие возможности для численного моделирования вынужденных вращательных колебаний крыла как при установившемся режиме колебаний, так и при переходном процессе, связанном с началом движения. Полученные результаты по колебаниям крыла с упругим закреплением в безграничной жидкости дополняют и уточняют данные, приведенные в работах [5; 6]. Совместный анализ картины вихревого следа, поля скоростей и динамических характеристик и их взаимовлияния дает возможность для достаточно полного и всестороннего исследования изучаемого физического явления.

Приведем кратко постановку задачи и основные идеи метода ее решения. Детальное изложение этих вопросов можно найти в работах [5; 6]. В безграничном потоке идеальной несжимаемой жидкости расположено тонкое жесткое слабоизогнутое крыло бесконечного размаха с хордой единичной длины. В некоторой точке крыла находится ось вращения, совершающая вертикальные колебания по заданному закону. Крыло упруго закреплено на оси и под действием момента внешних сил может совершать вокруг нее угловые колебания. По заданному закону движения точки закрепления и известным свойствам упругой связи требуется определить кинематические и динамические характеристики течения и гидроаэродинамические силы и моменты, действующие на крыло. Значительный интерес представляют пропульсивные характеристики - тяга, мощность и КПД.

Теоретическая модель строится при следующих предположениях:

- обтекание крыла непроницаемое, т.е. нормальная составляющая скорости движения частиц жидкости на поверхности крыла совпадает с нормальной составляющей скорости движения точек самого крыла;
- на задней кромке крыла скорость жидкости конечна (постулат Кутта-Жуковского);
- сходящую с задней кромки крыла вихревую пелену считаем бесконечно тонкой поверхностью тангенциального разрыва скорости жидкости, форма этой поверхности заранее неизвестна;
- возмущения скорости, вносимые в жидкость движущимся крылом, убывают по мере удаления от крыла и стремятся к нулю на бесконечности;

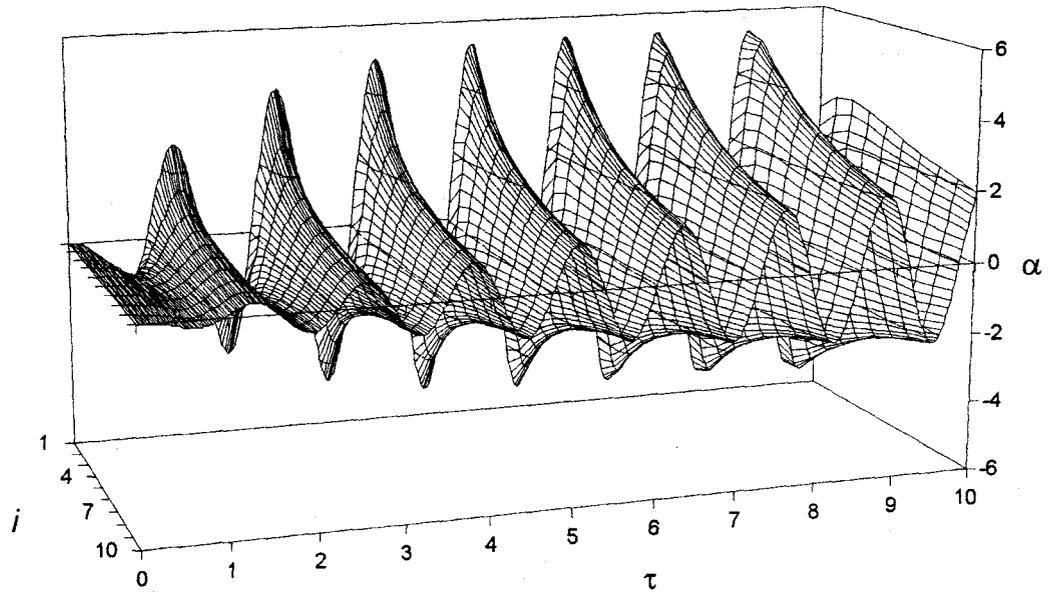


0 -

( ), - ( ).

/  $\theta = 1$

. 1.



. 1.

" = 1, = 5, = 0,05

( )

( )

-1

. 2

= 10, \* = 5, - 0,05, - 0,25 .

1.

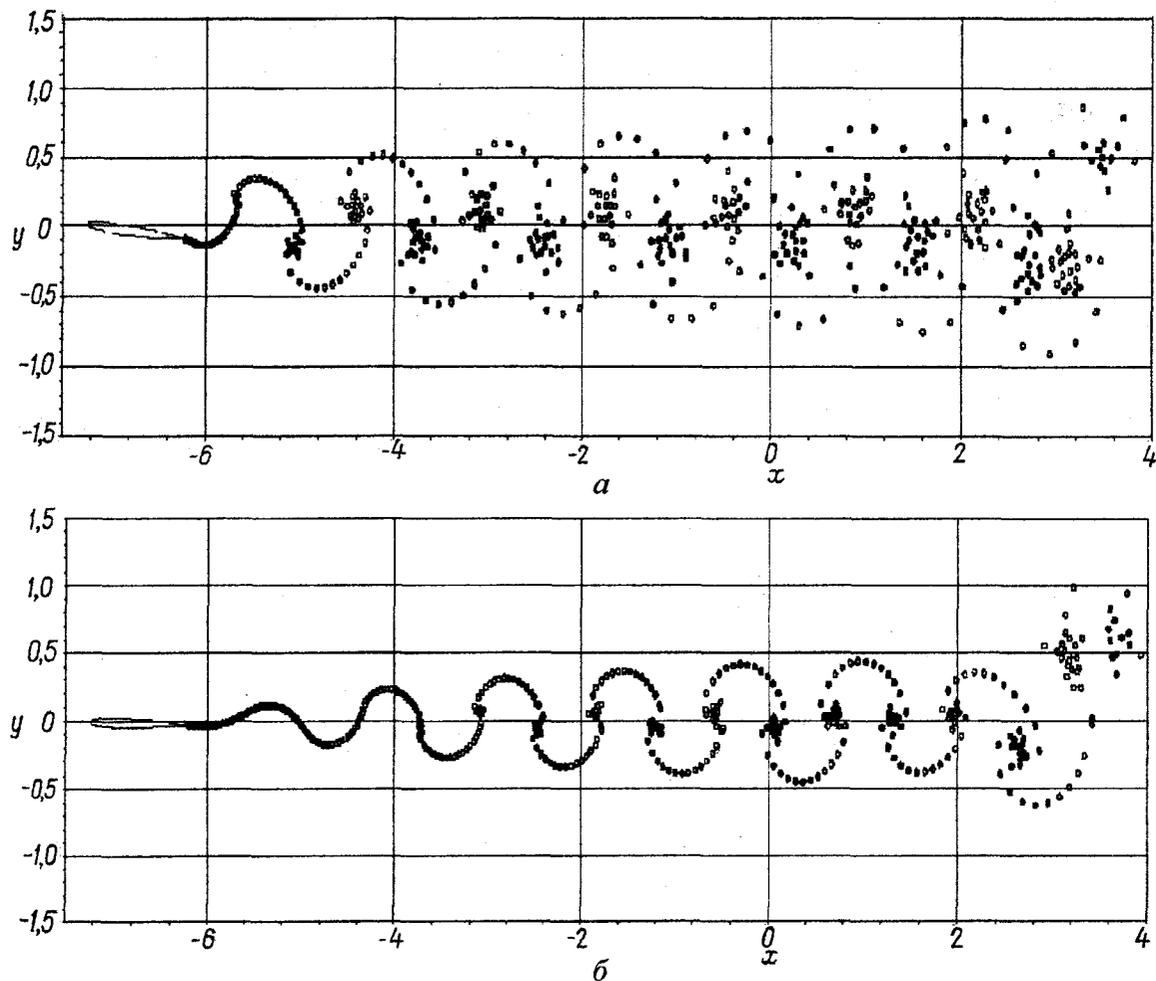


Рис. 2. Форма вихревого следа при  $p^*/p_0 = 0,8$  (а),  $p^*/p_0 = 1,2$  (б)

2. Угловая амплитуда вращательных колебаний крыла в начальные моменты времени тем больше, чем менее жестким является закрепление. При малых моментах инерции крыла (при колебаниях в более плотной среде) максимальная угловая амплитуда в начальной стадии процесса может превышать угловую амплитуду в установившемся режиме, при больших моментах инерции (в менее плотной среде) она меньше.

3. В течение переходного процесса сдвиг фазы вращательных колебаний крыла относительно фазы поступательных колебаний оси вращения меняется со временем. В начальные моменты времени он тем меньше, чем больше жесткость закрепления. При резонансе вращательные колебания отстают от поступательных примерно на  $\pi/2$ .

4. По результатам расчетов кинематических параметров, в частности, численной визуализации картин образования вихревых цепочек в ближнем следе, установлено, что ослабление жесткости закрепления крыла приводит к тому, что крыло, способное под воздействием жидкости совершать угловые перемещения, принимает по отношению к потоку такое положение, при котором сила сопротивления и мгновенный угол атаки становятся меньше, чем в случае жесткого закрепления. Режим обтекания крыла в окрестности задней кромки становится более гладким, в результате чего вихревой след вблизи крыла имеет форму, близкую к траектории движения задней кромки.

5. Диаметр крупномасштабных вихрей в вихревом следе с ослаблением жесткости уменьшается. Однако на режиме резонанса он максимальный и сравним по величине с диаметром при жестком закреплении.

6. Расчет поля скоростей вблизи крыла показал, что возмущенные скорости при упругом закреплении крыла меньше, чем при жестком закреплении.

7. Результаты расчетов тяговых характеристик крыла показывают, что в дорезонансной области изменения параметра упругости (отношения  $p^*/p_0$  при фиксированном  $p_0$ ) коэффициент силы тяги в жидкости превышает коэффициент силы тяги в газе, в послерезонансной области – наоборот, коэффициент силы тяги в газе больше, чем в жидкости. Поведение КПД на дорезонансном и послерезонансном режимах противоположно поведению коэффициента силы тяги.

8. При колебаниях в газе КПД на дорезонансном и послерезонансном режимах слабо зависит от жесткости закрепления. При колебаниях в жидкости зависимость КПД от упругих свойств закрепления существенная на всем диапазоне изменения отношения  $p^*/p_0$ .

9. Резонансный характер зависимости приведенного коэффициента силы тяги от  $p^*/p_0$  сильнее проявляется при больших значениях числа Струхала  $p^*$ . На дорезонансном и послерезонансном режимах коэффициент силы тяги всегда больше при меньших частотах колебаний оси. На режиме резонанса его поведение зависит от момента инерции крыла (или относительной плотности среды). В более плотной среде коэффициент силы тяги больше в том случае, если больше частота. В менее плотной среде с увеличением частоты колебаний оси резонансный всплеск коэффициента силы тяги уменьшается, и на всем диапазоне изменения  $p^*/p_0$  он меньше, если больше частота.

10. На всех режимах колебаний КПД крыла растет с уменьшением частоты поступательных колебаний точки закрепления. Максимум КПД на всех частотах достигается непосредственно после резонанса при минимуме силы тяги. Максимум силы тяги достигается при максимальных значениях амплитуды угла перекладки, т.е. на резонансе.

11. Сравнение данных по характеристикам крыла с упругим закреплением в безграничной жидкости, полученных по нелинейной теории, с имеющимися в литературе результатами линейной теории показывает, что при очень малых амплитудах ( $a < 0,03$ ) и малых числах Струхала ( $p^* < 2$ ) они близки и их можно считать практически совпадающими в пределах погрешности численного метода. Это свидетельствует, во-первых, о достоверности получаемых результатов, а во-вторых, о том, что линейная теория удовлетворительно описывает процесс лишь при крайне малых амплитудах и малых частотах поступательных колебаний точки закрепления.

#### Список литературы

1. Горелов Д.Н. Машущий полет при высокочастотных колебаниях крыла // Изв. АН СССР, МЖГ. – 1984. – № 2. – С. 154 – 158.
2. Горелов Д.Н. Пропульсивные характеристики машущего крыла с упруго закрепленным элероном // Бионика. – 1991. – Вып. 24. – С. 18 – 24.
3. Ростовцев В.М., Рождественский К.В. Математическая модель колеблющегося крыла с упругой связью // Тр. Ленингр. кораблестроительного ин-та: Системы автоматизированного проектирования в судостроении. – 1987. – С. 39 – 46.
4. Rozhdestvensky K., Ryzhov V., Kurapov A. Hydrodynamic Design of Thrust Generators Based on Oscillating Wings // Twentieth Symposium on Naval Hydrodynamics. 21–26 Aug. 1994. – P. 157 – 173. (Preprints. Santa Barbara, California.)
5. Довгий С.А., Фомин В.И., Харакозов И.Б. Колебания профиля с упругой заделкой в потоке жидкости // Вопросы эксплуатационной аэродинамики. – К.: 1989. – С. 39 – 43.
6. Довгий Т.А., Фомин В.И. Нелинейная математическая модель колеблющегося крыла с упругим закреплением // Прикладная аэродинамика: Сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 1997. – С. 3 – 14.
7. Довгий С.А., Шеховцов А.В. Усовершенствованный метод дискретных вихрей. – К.: 1995. 9 с. – Деп. в ИГМ НАН Украины, ГНТБ Украины 06.07.95. № 1692.–Ук.95.