

УДК 533.6.04

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ЭКРАНА НА МГНОВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ ДВИЖУЩЕГОСЯ НАД НИМ КРЫЛА

В. Г. БЕЛИНСКИЙ, П. И. ЗИНЧУК

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 24.03.2000

Представлены некоторые результаты экспериментальных исследований влияния близости волнового экрана на аэродинамические характеристики крыла экраноплана. Определены мгновенные значения коэффициента подъемной силы крыла, движущегося над волновым экраном. Дана оценка влияния на подъемную силу крыла длины и высоты волн волнового экрана, удлинения крыла, его угла атаки и расстояния до гребней волн. Приведены некоторые результаты измерения сил и моментов на крыле, движущемся над косыми волнами.

Приведені деякі результати експериментальних досліджень впливу присутності хвильового екрану на аеродинамічні характеристики крила екраноплана. Визначені миттєві значення коефіцієнта підйомної сили крила, що рухається над хвильовим екраном. Наведені оцінки впливу на підйомну силу крила довжини та висоти хвиль хвильового екрану, видовження крила, його кута атаки та відстані до гребнів хвиль. Приведені деякі результати вимірювання сил і моментів на крилі, що рухається над косими хвилями.

Some results of experimental studies of wavy screen proximity effect upon aerodynamical characteristics of an ekranoplane wing are presented. Instantaneous values of lift for a wing moving above wavy screen are determined. Estimates for effect of wave length and height of a wavy screen, wing aspect ratio, attack angle and distance to wave crests upon wing lift are described. Some measurement results for forces and moments on the wing moving above the oblique waves are given.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия во многих странах мира неизменно наблюдалось стремление к повышению скоростей передвижения по воде. Это привело к разработке и созданию новых транспортных средств – экранопланов. Экранопланы предназначены для полета в непосредственной близости от водной поверхности (экрана) и основаны на использовании так называемого "экранного эффекта". Сущность этого эффекта заключается в значительном повышении подъемной силы крыла и его аэродинамического качества при полете на малых высотах над поверхностью моря.

Наиболее впечатляющие успехи при создании экранопланов были достигнуты в Советском Союзе, где под руководством выдающегося конструктора Р. Е. Алексеева был создан ряд особенно крупных экранопланов [1]. О достижениях в мировом экранопланостроении можно составить представление по обзорным работам [2 – 5] и др.

При создании экранопланов важным и малоисследованным остается вопрос о влиянии взволнованной поверхности моря на аэродинамические характеристики несущих поверхностей экранопланов. В настоящей работе затронут экспериментальный аспект этой проблемы. Известна экспериментальная работа по этой проблеме, выполнен-

ная в ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского [6]. Ряд результатов по этой проблеме, полученных нами в гидродинамическом канале Института гидромеханики Национальной Академии наук Украины, опубликован в работах [7 – 12].

Ниже приведены результаты экспериментов по определению влияния на амплитуду колебаний подъемной силы над волновым экраном как параметров волнового экрана (длина волны, высота волны), так и параметров самого крыла (удлинение, угол атаки, расстояние до экрана).

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении экспериментов был применен гидродинамический метод исследования задач аэродинамики [13]. Он сводится к тому, что движение крыла в воздушной среде заменяется в эксперименте движением крыла в водной среде, а жидкий плоский и волновой экран заменяется твердым плоским и волновым экраном. Такая замена целесообразна, так как позволяет получать относительно большие силы, подлежащие измерению, и достигать достаточно больших чисел Рейнольдса (до $2 \cdot 10^6$) при относительно малых скоростях буксировки.

Экспериментальная установка (рис. 1) пред-

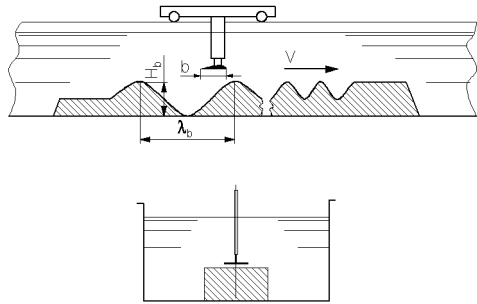


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ставляет собой гидродинамический канал длиной 140 м, шириной 4 м и глубиной 1,2 м с буксировочной тележкой, скорость которой может достигать 6 м/с. На дне гидродинамического канала был сооружен подводный твердый экран, состоящий из ряда участков плоской и волнообразной формы. Волнообразные участки состояли из отдельных групп синусоидальных волн различной длины и высоты. Гребни волн экрана были расположены параллельно размаху крыла и находились на одном горизонтальном уровне.

Буксировочная тележка была оборудована вертикальным гидродинамическим ножом, который имел приспособление для его перемещения по высоте и фиксации выбранного для испытаний положения крыла относительно гребней волн. На нижнем конце ножа был размещен тензометрический динамометр, к которому крепилось испытываемое крыло. Экран и крыло располагались в канале на достаточно большой глубине так, что влияние свободной поверхности воды исключалось. Все испытываемые крылья имели прямоугольную форму в плане и одинаковый профиль ЦАГИ СР - 16 - 6М с относительной толщиной 6% и хордой $b = 160 \div 250$ мм. Были испытаны крылья различных удлинений $\lambda = l/b$ от 0,5 до 5,0, где l – размах крыла; b – хорда крыла. Длина волн волнового экрана λ_b изменялась в пределах от $20 \cdot b$ до b . Высота волн экрана на разных волновых участках была равной $H_b = \lambda_b/20$. Общая длина подводного экрана была равна 70 м.

В процессе испытаний измерялись мгновенные значения сил и моментов, действующих на крыло, а также скорость движения крыла, и фиксировалось положение крыла относительно экрана в каждый данный момент времени.

Положение крыла по высоте над экраном характеризовалось безразмерным расстоянием от задней кромки крыла до экрана h , отнесенным к хорде

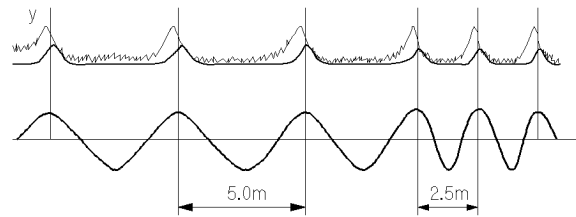


Рис. 2. Кривая мгновенных значений подъемной силы крыла, движущегося над волновым экраном

крыла.

Исследуемый процесс движения крыла над волновым экраном характеризуется числом Струхала в виде

$$p = \frac{2\pi b}{\lambda_b}$$

Испытания проводились в диапазоне изменения числа Струхала

$$p = 0, 201 \div 6, 28.$$

Приведенные ниже результаты экспериментов представлены в виде безразмерных коэффициентов подъемной силы и момента крена

$$C_y = \frac{2Y}{\rho v^2 S}; \quad C_{mx} = \frac{2M_x}{\rho v^2 S b^2},$$

где S – площадь крыла.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КРЫЛЬЕВ НАД ВОЛНОВЫМ ЭКРАНОМ

При движении крыла на малой высоте над волновым экраном подъемная сила, действующая на него (как и другие характеристики), непрерывно изменяется в зависимости от изменения взаимного расположения крыла и волн экрана. В работе [8] показано, что при движении над синусоидальным волновым экраном подъемная сила крыла изменяется не по синусоидальному закону. Кривая мгновенных значений подъемной силы скорее напоминает трохоиду (рис. 2).

Это является следствием нелинейной зависимости величины подъемной силы от положения по высоте крыла над экраном. Максимумы кривой мгновенных значений подъемной силы наступают раньше, чем передняя кромка крыла оказывается над пиком гребня очередной волны экрана. Кривая подъемной силы не симметрична относительно вертикалей, проходящих через экстремальные

точки этой кривой. При этом ветви кривой подъемной силы, которые соответствуют приближению крыла к гребню волны, являются более полными, чем те, которые соответствуют удалению крыла от гребня волны. Необходимо также отметить, что, как следует из работы [7], средние за период волны значения подъемной силы крыла над волновым экраном превышают по величине значение подъемной силы крыла при его движении над плоским экраном, расположенным на уровне средней линии волны экрана.

Ниже рассматривается влияние некоторых параметров крыла и волнового экрана на кривую мгновенных значений коэффициента подъемной силы. Будем рассматривать следующие характеристики этой кривой:

- мгновенные значения коэффициента подъемной силы над гребнем волны C_{y1} ;
- то же над подошвой волны C_{y3} ;
- средние за период значения коэффициента подъемной силы C_{y22} .

Эти значения коэффициента подъемной силы будем сравнивать с теми его значениями, которые он принимает:

- над плоским экраном на уровне гребней волн C_{y01} ;
- над плоским экраном на уровне средней линии волны C_{y02} .

Таковыми же индексами ($i = 1, 01, 02, 3$) будем отмечать соответствующие расстояния (безразмерные) от задней кромки крыла до плоского или волнового экрана:

- до гребня и до подошвы волны h_1 и h_3 ;
- до плоского экрана на уровне гребней h_{01} ;
- до плоского экрана на уровне средней линии волны h_{02} .

На рис. 3 представлены характеристики кривой подъемной силы C_{y1} , C_{y3} и C_{y22} в зависимости от угла атаки крыла. Разность ординат ($C_{y1} - C_{y3}$) определяет амплитуду колебаний подъемной силы крыла над волновым экраном.

Видно, что с увеличением угла атаки амплитуда возрастает и становится соизмеримой с подъемной силой крыла над плоским экраном на уровне средней линии волны (кривая C_{y02}). Это обстоятельство дает представление о масштабе воздействия волнового экрана на динамику экраноплана. При малых углах атаки ($\Theta \leq 1^\circ$) разность ординат ($C_{y1} - C_{y3}$) становится отрицательной. При этом крыло теряет подъемную силу, что может привести к удару крыла о гребень волны.

Превышение кривой C_{y22} над кривой C_{y02} отражает тот важный факт [7], что среднее за период значение подъемной силы выше, чем при движе-

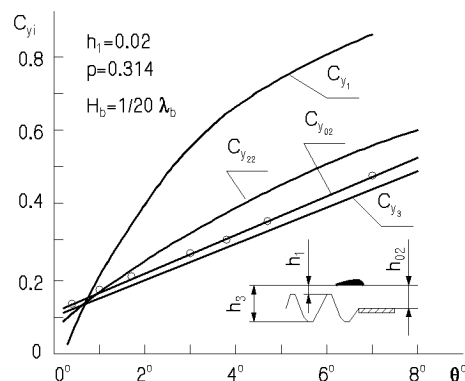


Рис. 3. Зависимость коэффициентов подъемной силы крыла C_{y1} , C_{y3} , C_{y22} и C_{y02} от угла атаки θ°

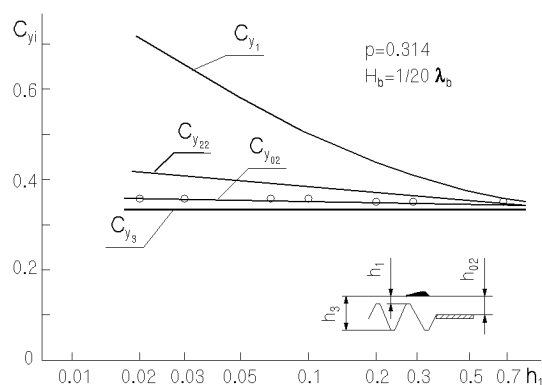


Рис. 4. Зависимость коэффициентов подъемной силы крыла C_{y1} , C_{y3} , C_{y22} и C_{y02} от расстояния крыла до экрана h_1

нии крыла над плоским экраном на уровне средней линии волны. Это обстоятельство также оказывает существенное влияние на динамику экраноплана.

На рис. 4 представлены характеристики кривой подъемной силы C_{y1} , C_{y3} и C_{y22} в зависимости от расстояния крыла до экрана h_1 .

Видно, что при $h_1 > 0,7$ влияние экрана практически отсутствует. Видно также, что при $h_1 < 0,7$ амплитуда колебаний подъемной силы над волновым экраном увеличивается при приближении крыла к гребням волн. Это увеличение происходит, в основном, за счет увеличения подъемной силы над гребнем волн (C_{y1}). Подъемная сила над подошвой волны (C_{y3}) мало зависит от расстояния

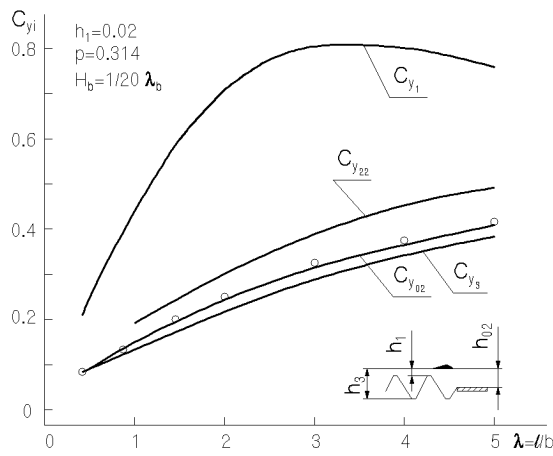


Рис. 5. Зависимость коэффициентов подъемной силы C_{y1} , C_{y3} , C_{y22} и C_{y02} от удлинения крыла λ

крыла до экрана. Прирост подъемной силы крыла над волновым экраном (по сравнению с плоским экраном на уровне средней линии волны) выражается разностью ординат ($C_{y22} - C_{y02}$). Видно, что этот прирост увеличивается при приближении крыла к гребням волн. При $h_1 \approx 0,02$ этот прирост составляет величину порядка 20%.

На рис. 5 представлены характеристики кривой подъемной силы C_{y1} , C_{y3} и C_{y22} в зависимости от удлинения крыла. Видно, что с увеличением удлинения крыла амплитуда кривой подъемной силы увеличивается и достигает максимума для крыла с удлинением $\lambda \approx 3$.

При дальнейшем увеличении удлинения крыла амплитуда уменьшается. Прирост подъемной силы крыла над волновым экраном ($C_{y22} - C_{y02}$) мало зависит от удлинения крыла.

Влияние длины волны экрана λ_b на подъемную силу крыла отражено на рис. 6. На этом графике по оси абсцисс нанесены числа Струхала P , которые являются функцией длины волны экрана. По оси ординат отложено отношение коэффициента подъемной силы крыла над гребнями волн C_{y1} к его значению над плоским экраном на уровне гребней волн C_{y01} .

При этом здесь отобраны и нанесены только те значения C_{y1} , которые соответствуют волнам различной длины λ_b , но одинаковой высоты $H_b = b$. Это дает возможность проследить влияние длины волны экрана в чистом виде. Видно, что над длинными волнами экрана ($P \approx 0.314$) C_{y1} мало отличается от C_{y01} . Но с уменьшением длины волны

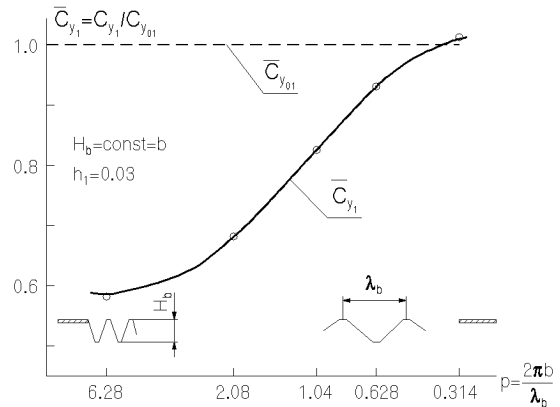


Рис. 6. Зависимость, характеризующая влияние длины волны экрана на коэффициент подъемной силы крыла над гребнями волн

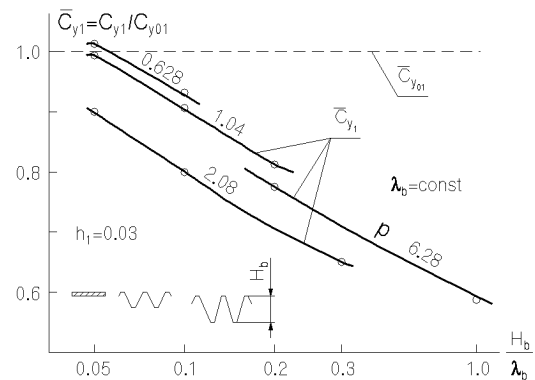


Рис. 7. Зависимость коэффициента подъемной силы крыла над гребнями волн от высоты волн экрана для различных чисел Струхала

($P \rightarrow 6,28$) подъемная сила крыла над гребнями волн C_{y1} существенно уменьшается.

Влияние высоты волны H_b на подъемную силу крыла отражено на рис. 7. Здесь на оси абсцисс нанесена шкала отношений высоты волн H_b к длине волны λ_b . Крайнее левое значение на этой шкале соответствует стандартной волне, принятой в судостроительных расчетах, для которой $H_b/\lambda_b = 1/20$.

Крайнее правое значение соответствует тому случаю, когда высота волны равна длине волны. На графике нанесены линии равных значений числа Струхала P , что аналогично равным значениям длины волны экрана.

На графике видно, что при фиксированном значении числа Струхала подъемная сила над гребнями

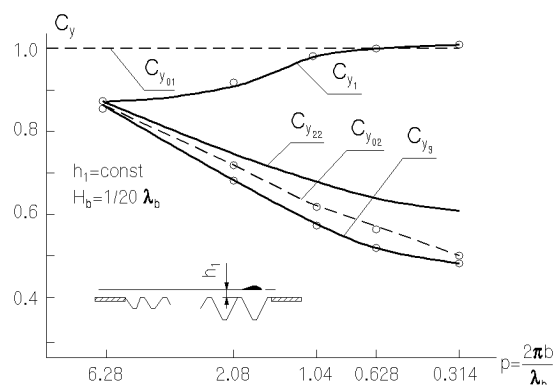


Рис. 8. Зависимость коэффициентов подъемной силы крыла C_{y1} , C_{y3} , C_{y22} и C_{y02} от числа Струхали. Сравнение с данными для плоского экрана на уровне гребней волн

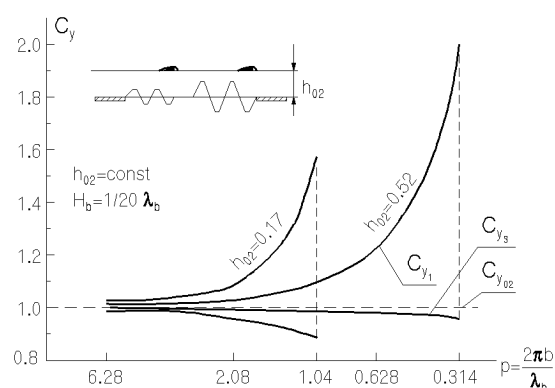


Рис. 10. Зависимость коэффициентов подъемной силы крыла C_{y1} , C_{y3} и C_{y02} от числа Струхали при движении крыла на постоянной высоте над средней линией волн различной высоты

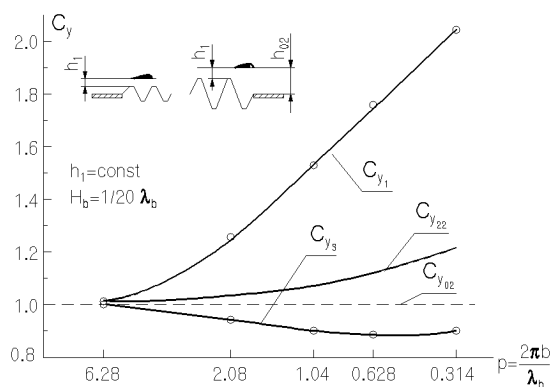


Рис. 9. Зависимость коэффициентов подъемной силы крыла C_{y1} , C_{y3} , C_{y22} и C_{y02} от числа Струхали. Сравнение с данными для плоского экрана на уровне средней линии волн

ми волн уменьшается, когда высота волны экрана увеличивается.

На рис. 8 – 10 представлены характеристики кривой подъемной силы C_{y1} , C_{y3} и C_{y22} в зависимости от числа Струхали P . Впервые эта зависимость была исследована экспериментально в работе [9].

Во всех трех случаях рассматривается движение крыла над волновым экраном, который состоит из стандартных волн различной длины $H_b = 1/20\lambda_b$.

Общим для этих рисунков является то, что амплитуда колебаний кривой подъемной силы ($C_{y1} - C_{y3}$) увеличивается при уменьшении числа Струхали. Прирост подъемной силы крыла над волновым экраном ($C_{y22} - C_{y02}$) также увеличивается при уменьшении числа Струхали, что видно на

рис. 8 и 9. Различие трех упомянутых рисунков состоит в следующем. На рис. 8 характеристики C_{y1} , C_{y3} и C_{y22} сравниваются с подъемной силой крыла над плоским экраном на уровне гребней волн C_{y01} . Рассматривается случай, когда крыло движется на постоянной высоте над гребнями волн h_1 . Видно, что все эти характеристики меньше, чем C_{y01} . Исключение составляет подъемная сила крыла над гребнями волн, которая в диапазоне чисел Струхали $P \approx 0,628 \div 0,314$ может несколько превышать подъемную силу над плоским экраном на уровне гребней волн.

На рис. 9 характеристики (C_{y1} , C_{y3} и C_{y22}) сравниваются с подъемной силой крыла над плоским экраном на уровне средней линии волны экрана. Здесь также рассматривается случай, когда крыло движется на постоянной высоте над гребнями волн h_1 . Видно, что C_{y1} и C_{y22} превышают C_{y02} . Естественно, что значение подъемной силы над подошвой волн C_{y3} меньше, чем C_{y02} .

На рис. 10 рассматривается случай, когда крыло, которое вначале двигалось над плоским экраном, начинает затем двигаться над волновым экраном. Вначале под крылом появляются малые волны (большие числа Струхали), а затем размеры волн увеличиваются (движение в сторону малых чисел Струхали). При этом расстояние от крыла до средней линии волнового экрана все время остается постоянным. Такое движение возможно до тех пор, пока крыло не начнет касаться гребней волн. Например, при $h_{02} = 0,5$ такой момент наступит при $P = 0,314$, а при $h_{02} = 0,15$ – при $P = 1,04$. На рисунке для этих двух случаев показано, как увеличивается амплитуда ко-

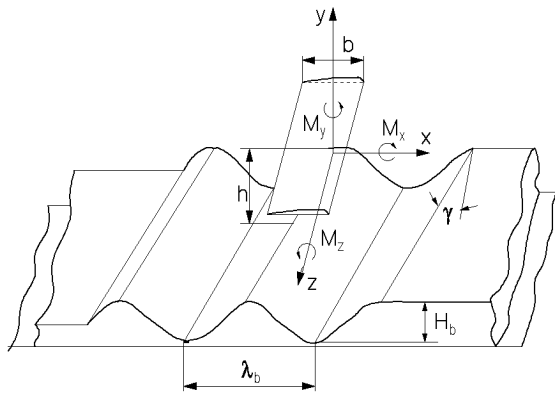


Рис. 11. Схема экспериментальной установки при испытаниях крыльев над косыми волнами

лебаний подъемной силы ($C_{y_1} - C_{y_3}$) при увеличении размеров волн экрана (при уменьшении чисел Струхала). Видно, что в первом случае амплитуда колебаний подъемной силы в пределе достигает величины примерно в два раза большей, чем подъемная сила крыла над плоским экраном на уровне средней линии волны. Во втором случае это увеличение составляет величину порядка 60%. Результаты, представленные на этом рисунке, еще раз дают наглядное представление о масштабах воздействия волнового экрана на аэродинамику экраноплана. Приведенные выше результаты по движению крыла над волновым экраном относятся к тому случаю, когда крыло движется перпендикулярно к направлению гребней волн. Ниже рассматривается также случай движения крыла над косыми волнами, когда крыло движется не перпендикулярно к направлению гребней волн.

На рис. 11 дана схема экспериментальной установки для исследования движения крыла над косыми волнами.

Эта установка позволяла изменять угол γ между направлением гребней волн и осью z в пределах $\gamma = 0 \div 30^\circ$.

Можно отметить следующие особенности влияния угла γ на аэродинамические характеристики крыла, движущегося над косыми волнами. При увеличении угла γ коэффициент подъемной силы C_y и продольного момента C_{m_x} уменьшаются.

При увеличении угла γ нарушается симметричность распределения подъемной силы по размаху крыла. Это является причиной возникновения на крыле момента крена M_x , который меняет свое направление каждый раз, когда крыло проходит над гребнем или над подошвой волны. Он может оказать влияние на поперечную устойчивость движе-

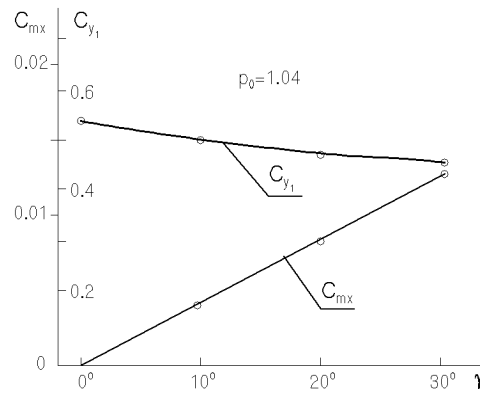


Рис. 12. Зависимость коэффициентов подъемной силы крыла C_{y_1} и момента крена C_{m_x} от угла наклона гребней волн γ

ния экраноплана.

На рис. 12 представлена зависимость коэффициента подъемной силы крыла над гребнями волн C_{y_1} и коэффициента момента крена C_{m_x} от угла наклона гребней волн γ .

Эти результаты получены для крыла с удлинением $\lambda = 2$ при числе Струхала $P_0 = 1,04$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты представляют необходимые сведения о влиянии взволнованной поверхности моря на аэродинамику экраноплана. Эти результаты получены для всего реально мыслимого диапазона соотношений между параметрами крыла и волнового экрана. В каждом конкретном случае они позволяют судить о том, является ли влияние волнового экрана существенным и в какой мере, или этим влиянием можно пренебречь. Вместе с более ранними нашими публикациями [7 – 12] приведенные здесь результаты являются практически единственными известными нам опубликованными экспериментальными данными по рассматриваемой проблеме. Результаты этих работ могут быть использованы при проектировании экранопланов и при исследовании их динамики при полете над взволнованной поверхностью моря.

1. Белавин Н.И. Сверхбольшие экранопланы главного конструктора Р.Е.Алексеева // Судостроение. – 1993. – 1. – С. 3–7.
2. Белавин Н.И. Экранопланы. – Л: Судостроение, 1977. – с.230
3. Stephan F. Hooker A review of current technical knowledge necessary to develop large scale wing - in - surface effect craft // Intersociety advanced marine

- vehicles conference, Arlington.– 1989.– VA/June 5 - 7.– С. 367–429.
4. *Ollila R.G.* Historical Review of WIG Vehicles // *J. of Hydronautics.*– 1980.– 14.– С. 65 – 77.
 5. *Prandolini L.J.* Proc. of a Workshon on Twenty – First Century Flying Ships, The University of New South Wales // Sydney, Australia.– 1995.– Nov. 7 and 8.– С. 244.
 6. *Гребешов Э.П. и др.* Аэродинамические характеристики профиля крыла вблизи плоского и волнового экрана // М., Труды ЦАГИ.– 1976.– 1725.– С. 31 – 58.
 7. *Белинский В.Г. и др.* Максимальные и средние значения гидродинамических характеристик крыла, движущегося над неплоским экраном // *Гидромеханика.*– 1974.– 29.– С. 43 – 45.
 8. *Белинский В.Г. и др.* Влияние формы неплоского экрана на гидродинамические характеристики движущегося над ним крыла // *Гидромеханика.*– 1975.– 31.– С. 28 – 32.
 9. *Белинский В.Г. и др.* О влиянии числа Струхала на характеристики крыла вблизи волнового экрана // *Гидромеханика.*– 1975.– 31.– С. 32 – 35.
 10. *Belynsky V.G.* About Movement of a Wing Above Wavy Surface of Water // AGARD Report 827.– Workshop on "High Speed Body Motion in Water".– Kiev, 1-3 September 1997.– С. 17.1 – 17.9.
 11. *Белинский В.Г., Зинчук П.И.* Экспериментальные исследования движения крыла вблизи плоских и взволнованных границ раздела // *Гидромеханика.*– 1998.– 72.– С. 30 – 45.
 12. *Byelinsky V.G., Zinchuk P.I.* Hydrodynamical Characteristics of an Ekranoplane Wing Flying Near the Wavy Sea Surface // RTO Meeting Proceedings 15, "Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating Near or in the Air – Sea Interface".– Amsterdam, Netherlands, 5 - 8 October 1998.– Published February 1999.– С. 18.1 – 18.12.
 13. *Эпштейн Л.А.* Гидродинамические методы исследования задач аэродинамики // М., Труды ЦАГИ.– 1980.– 2035.– С. 28.