

УДК 629.576; 533.69.048; 533.6.013.8

## О ВОЗМУЩЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЭКРАНОПЛАНОВ НАД ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ МОРЯ

В. Г. БЕЛИНСКИЙ

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

*Получено 13.07.2005 ◊ Пересмотрено 12.03.2006*

Приведены результаты экспериментальных исследований движения моделей экранопланов над волновым экраном. Испытаны модели различных аэродинамических схем. Определены вертикальные и угловые колебания моделей при движении над волнами экрана различной длины и высоты. Установлены силы и моменты, которые вызывают эти колебания. Установлена зависимость этих величин от чисел Струхала. Определены диапазоны чисел Струхала, в которых вертикальные и угловые колебания над волнами экрана возникают и в которых они отсутствуют. Проведена оценка вертикальных перегрузок применительно к экранопланам второго поколения при их движении в крейсерском режиме над взволнованной поверхностью моря.

Наведені результати експериментальних досліджень руху моделей экранопланів над хвилювим екраном. Досліджені моделі різних аеродинамічних схем. Визначені вертикальні та кутові коливання моделей, коли вони рухаються над хвилями екрана різної довжини та висоти. Встановлені сили та моменти, які викликають ці коливання. Встановлена залежність цих величин від чисел Струхала. Визначені діапазони чисел Струхала, в яких вертикальні та кутові коливання над хвилями екрана виникають і в яких вони відсутні. Проведена оцінка вертикальних перевантажень стосовно до экранопланів другого покоління, коли вони рухаються в крейсерському режимі над схвилюваною поверхнею моря.

The results of experimental researches of movement of models ekranoplans above the wave screen are given. The models of the various aerodynamic schemes are tested. The vertical and angular fluctuations of models are determined at movement above waves of the screen of various length and height. The forces and moments are determined which cause these oscillations. The dependence of these sizes on Struchal's numbers is determined. The ranges of Struchal's numbers are determined, in which the vertical and angular oscillations above waves of the screen arise, and in which they are absent. The estimation of vertical overloads with reference to ekranoplans of the second generation is made at their movement in cruising mode above the choppy surface of the sea.

### ВВЕДЕНИЕ

Во второй половине XX века во многих странах мира получили развитие работы по созданию новых транспортных средств – экранопланов. Экранопланы – это высокоскоростные крылатые суда, движущиеся в режиме полета вблизи водной или иной поверхности с использованием так называемого экранного эффекта. Экранный эффект – это явление увеличения подъемной силы и уменьшения индуктивного сопротивления воздушного крыла при его приближении к опорной поверхности, в качестве которой в большинстве случаев подразумевается водная поверхность морей и океанов.

Благодаря этой особенности экранного эффекта появляется возможность реализовать на экранопланах существенно более высокие значения гидроаэродинамического качества по сравнению с другими скоростными судами.

Наиболее впечатляющие результаты по развитию экранопланостроения были достигнуты в СССР, где в 50–60-е годы под руководством Р. Е. Алексеева впервые разработаны и построены крупные экранопланы весом 140–400 т со ско-

ростью полета 400–500 км/час. Эти экранопланы прошли испытания в условиях реальной морской среды. Некоторые из них были включены в состав ВМФ СССР [1–3].

Созданием этих экранопланов, а их теперь принято называть экранопланами 1-го поколения, была подтверждена принципиальная возможность создания крупных экранопланов как нового вида транспортных средств. Были подтверждены многие ожидаемые положительные качества экранопланов. Однако на первых реально построенных экранопланах не были достигнуты, как ожидалось, достаточно высокие значения аэродинамического качества, они имели значительные скорости отрыва от воды, были проблемы с обеспечением продольной устойчивости движения и др. [4, 5].

Дальнейший импульс работы по созданию экранопланов получили в 80–90-х годах в России, когда последователи Р. Е. Алексеева, объединившись под руководством Д. Н. Сеницына, образовали в Нижнем Новгороде конструкторско-производственную компанию [2]. Эта компания в содружестве с учеными Москвы и Санкт-Петербурга разработала концепцию экранопланов 2-го поколения, в частности, серия малых экранопланов типа “А” весом до 100 т, со скоростью

движения до 200 км/час. Первый из этой серии экраноплан “Акваглайд-5” построен под наблюдением и сертифицирован Российским Морским Регистром Судоходства как пассажирское судно [6]. Этой же компанией разработана принципиальная аэрогидродинамическая компоновка морских пассажирских экранопланов (МПЭ), на основе которой создана сетка экранопланов типа “В” весом от 10 до 450 т со скоростью полета от 250 до 500 км/час [3, 7]. Известны также разработки крупных экранопланов-спасателей, экранопланов-разгонщиков космических аппаратов весом порядка 750 т со скоростями движения в полете 400-600 км/час и другие [8, 9]. В Украине исследования по экранопланам развивались с начала 60-х годов в Институте гидромеханики НАН Украины, где А. Н. Панченковым и его сотрудниками был выполнен большой объем теоретических исследований по аэрогидродинамике крыла вблизи поверхности раздела вода–воздух, а также по разработке аэродинамических схем экранопланов, обладающих свойством самостабилизации в полете вблизи экрана [19–21 и др.] В дальнейшем в институте проводились экспериментальные и теоретические исследования по движению крыльев и моделей экранопланов вблизи плоского и волнового экрана [11–16, 23, 24 и др.]. В последнее время в институте изучаются гидродинамические аспекты создания экранопланов, связанные с проблемой их взлета и посадки [25]. Известны также разработки по созданию экранопланов, которые проводились в Харькове, Одессе и Николаеве [26, 27] и др.

Проблеме создания экранопланов уделяется внимание во многих странах мира, о чем свидетельствует проведение в последнее время ряда международных конференций по этой теме [10].

Из приведенного, далеко не полного, перечня работ по созданию экранопланов прослеживается тенденция на создание крупных, высокоскоростных, с большим радиусом действия экранопланов, способных функционировать на огромных просторах морей и океанов. Однако взволнованная поверхность моря ограничивает возможности практического их использования. Поэтому одной из главных задач, при создании экранопланов, является обеспечение их мореходности. Для этого необходимо знать, как влияет взволнованная поверхность моря на аэродинамику экраноплана.

При устойчивом установившемся прямолинейном движении экраноплана над невозмущенной поверхностью моря на него действует подъемная сила, равная его полетному весу, и сила сопротивления, равная тяге его двигателей. Но при движении экраноплана над взволнованной поверхно-

стью моря на него будет действовать ряд дополнительных нестационарных периодических сил и моментов. В общем случае будут действовать нестационарные добавки подъемной силы и силы сопротивления, а также возникнут нестационарные сила дрейфа и моменты тангажа, дрейфа и рыскания. Величина этих сил и моментов будет зависеть, в основном, от высоты полета экраноплана над уровнем моря, от направления полета относительно фронта волн, от размеров самого экраноплана и от параметров волн, над которыми осуществляется полет.

При определенных условиях величина этих сил и моментов может достигать существенных значений. Тогда под их воздействием на основное прямолинейное движение экраноплана будут накладываться дополнительные линейные и угловые перемещения. В результате экраноплан будет совершать сложное нестационарное движение, напоминающее качку корабля при его движении по взволнованной поверхности моря.

Проведенные нами ранее экспериментальные исследования влияния формы волнового экрана на гидродинамические характеристики движущегося над ним крыла [11, 12] показали, в частности, что при движении крыла над волновым экраном его подъемная сила непрерывно изменяется по закону, близкому к трохoidalному. При прохождении крыла над гребнями волн кривая подъемной силы образует резкие всплески, а при прохождении над подошвами волн образует пологие впадины. При этом размах (амплитуда) колебаний подъемной силы за время прохождения крыла между двумя гребнями волн соизмерим по величине со средним за период значением подъемной силы [11, 16]. Такие резкие и значительные по величине колебания подъемной силы на несущих крыльях экраноплана будут приводить его в колебательное движение в вертикальной плоскости с частотой, равной частоте его встречи с гребнями волн. Этим колебаниям будет противодействовать демпфирующее действие среды, обеспечиваемое аэродинамической компоновкой экраноплана. Взаимодействие этих двух процессов мало изучено. Не ясно, в какой мере возбуждаемые колебания будут гаситься демпфирующим действием среды. Какие, при этом, вертикальные перегрузки будет испытывать экраноплан. Не окажутся ли эти перегрузки способными повлиять на комфортность полета на экраноплане для членов экипажа и пассажиров. На выяснение некоторых аспектов этой проблемы направлена настоящая работа, основанная на экспериментальных результатах.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В Институте гидромеханики НАН Украины проводились экспериментальные исследования движения схематических моделей экранопланов над волновым экраном. Ниже представлены некоторые результаты этих исследований, касающиеся вертикальных и угловых колебаний экранопланов над волновым экраном.

Схематические модели экранопланов испытывались в гидродинамическом канале длиной 140 м, шириной 4.0 м и глубиной 1.2 м. Был применен гидродинамический метод исследования задач аэродинамики [11, 17]. В данном случае он сводился к тому, что схематические модели экранопланов приводились в движение в водной среде над твердым неподвижным волновым экраном, устроенным на дне канала. Замена воздушной среды водной средой в условиях данного исследования целесообразна, поскольку позволяет в эксперименте получать относительно большие силы, подлежащие измерению, что повышает точность измерений, и достигать достаточно больших чисел Рейнольдса (порядка  $10^6$ ) при относительно малых скоростях буксировки (порядка 4–5 м/с). В работе [19] теоретически показано, что при движении крыла вблизи свободной поверхности жидкости с большими числами Фруда последняя ведет себя как твердый экран. В подтверждение этому нами были проведены сравнительные эксперименты с крылом, движущимся в водной среде над твердым экраном и с подобным ему крылом, движущимся в воздухе над свободной поверхностью воды при числах Фруда порядка 8–10. И в том, и в другом случае были получены практически одинаковые результаты [11, 14]. К таким же выводам пришли авторы экспериментальной работы [22]. Учитывая это, замена водной поверхности твердым экраном в данном исследовании может быть признана допустимой. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Схематические модели экранопланов (6) буксировались в гидроканале (1) буксировочной тележкой (2) под свободной поверхностью воды (12) над волновым экраном (11). Модели (6) соединялись с буксировочной тележкой (2) посредством двух гидродинамических ножей (3) и (4), соединенных между собой шарнирным параллелограмом (5), который обеспечивал для модели (6) свободу вертикальных перемещений. Нож (3) жестко крепился к тележке (2). Нож (4) имел на своем нижнем конце шарнир (7) для крепления модели (6). Шарнир

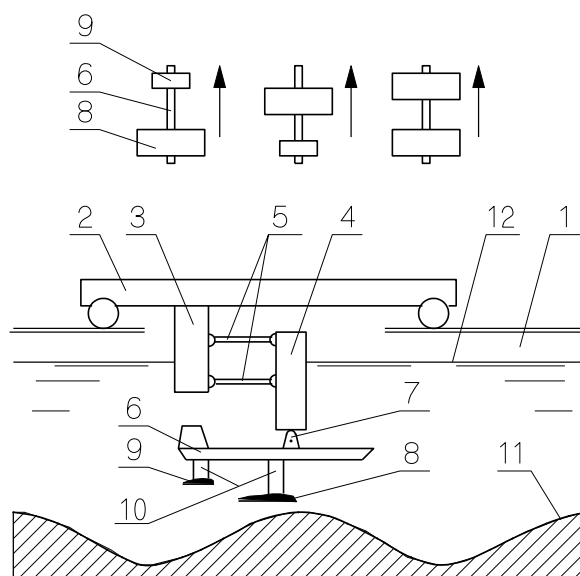


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

(7) мог быть присоединен к модели в любом ее месте по длине и обеспечивал ей свободу угловых колебаний по тангажу. Крылья большие (8) и малые (9) крепились к модели посредством обтекаемых переходников (10). Переходники также могли быть присоединены к модели в любом ее месте по длине, чем обеспечивалась возможность собрать модель по одной из возможных аэродинамических компоновок. Конструкция переходников позволяла также регулировать углы атаки крыльев.

Установка имела две системы ограничителей (на схеме не показаны), одна ограничивала перемещения ножа (4) по вертикали вверх и вниз относительно ножа (3), а другая ограничивала угловые перемещения модели (6) относительно ножа (4). Система ограничителей гарантировала во время проведения эксперимента невозможность удара модели о волновой экран, с одной стороны, и невозможность чрезмерного удаления модели от экрана, с другой стороны. Установка имела также систему фиксаторов (на схеме не показано), которая позволяла жестко фиксировать нож (4) по отношению к ножу (3) и модель (6) по отношению к ножу (4), что позволяло вести испытания модели на заданном отстоянии от экрана и с заданным углом тангажа.

На схеме также не показано, что шарнир (7) соединяется с ножом (4) посредством двухкомпонентного тензодинамометра, который вмонтирован в тело ножа (4) и позволяет измерять подъемную силу и момент тангажа при жестком закреплении

моделі.

Измерение вертикальных и угловых перемещений модели проводилось посредством электрических датчиков сопротивления реохордного типа. Оба датчика располагались выше уровня воды, передача перемещений осуществлялась с помощью стальных струн. Нож (4) в надводной части имел приспособление для крепления грузов различной величины для регулирования массы подвижной части установки.

Крылья большие (8) и малые (9) имели прямоугольную форму в плане, удлинение, равное 3, относительную толщину 6%, плоскую нижнюю поверхность и хорду соответственно 0.25 м и 0.16 м.

Устанавливая эти крылья на модели в той или иной комбинации и меняя их расположение друг относительно друга и относительно точки подвеса в шарнире (7), формировались три условные схемы аэродинамической компоновки экранопланов:

**Схема “Самолет”.** Большое крыло (несущее) и малое крыло (стабилизатор) располагались в корме от точки подвеса. Стабилизатор располагался как в одной плоскости с несущим крылом, так и в приподнятом (на высоту, равную хорде) положении, чем выводился из зоны действия экрана. Стабилизатор имел отрицательный угол атаки.

**Схема “Утка”.** Оба крыла несущие. Малое крыло располагалось в носу, а большое – в корме. Точка подвеса располагалась между крыльями ближе к большому крылу.

**Схема “Тандем”.** Оба крыла большие, несущие, расположены по концам модели. Точка подвеса располагалась между крыльями.

Дополнительно, в рамках каждой схемы формировалось несколько (не менее 3) модификаций путем варьирования расстояния между крыльями, углов атаки крыльев, расположения точки подвеса модели на шарнире (7) и др.

Эти схемы изображены в верхней части рис. 1.

При испытаниях длина моделей изменялась в пределах (1.3–1.5) м, расстояние между передними кромками крыльев составляло (0.6–1.0) м, вес моделей изменялся в пределах (50–65) кг, момент инерции моделей относительно оси вращения изменялся в пределах (0.5–0.6) кг\*·м\*·с<sup>2</sup>. Скорость буксировки моделей составляла (4.0–4.5) м/с. При испытаниях достигались числа Рейнольдса порядка 10<sup>6</sup>.

Волновой экран был устроен на дне канала и состоял из 5 волновых участков, каждый из которых, в свою очередь, состоял из серии синусоидальных волн определенной длины. Наибольшие волны имели длину 5.0 м, наименьшие – 0.25 м. Высота всех волн составляла двадцатую часть их

длины. Гребни всех волн были расположены на одном уровне по высоте и перпендикулярно к направлению движения модели. К волновому экрану в его начале и конце примыкали два плоских экрана: один на уровне средней линии примыкающей группы волн, а другой – на уровне гребней волн.

Таким образом, экспериментальная установка позволяла в течение одного пробега модели вдоль канала исследовать ее характеристики при движении в безграничной жидкости (перед экраном), при движении над двумя плоскими участками экрана (расположенными на разных уровнях) и при движении над пятью группами волн разной длины. При этом, в случае свободной подвески модели, можно было измерить вертикальные и угловые (по тангажу) колебания ее, а в случае жесткой подвески – измерить подъемную силу и продольный момент, под действием которых эти колебания совершались.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ МОДЕЛЕЙ ЭКРАНОПЛАНОВ НАД ВОЛНОВЫМ ЭКРАНОМ

Испытания по определению вертикальных и угловых колебаний проводились при свободной подвеске моделей. Испытания начинались с того, что для данной аэродинамической компоновки модели методом подбора выбиралось положение шарнира (7) на корпусе модели, расположение крыльев относительно друг друга и относительно шарнира, а также выбирались углы атаки крыльев, при которых модель могла двигаться, не касаясь ограничителей угла поворота. При этом равнодействующая гидродинамических сил проходит через ось вращения шарнира (7). Затем подбирались такие скорости буксировки и устанавливалась такая нагрузка или разгрузка ножа (4), при которых при буксировке модели нож не касался ограничителей высоты. Если надлежащим образом выполнить все эти условия, то модель будет двигаться устойчиво в заданном ограничителями диапазоне изменения величины вертикальных и угловых колебаний. После этого производятся измерения колебаний модели. В результате проведенных испытаний были неоднократно реализованы устойчивые режимы движения всех трех компоновок моделей и их модификаций.

Ввиду значительной условности рассмотренных компоновок моделей, о преимуществах и недостатках каждой из них можно судить лишь приближенно. В общем, можно сказать, что труднее всего было привести в устойчивое движение модели, со-

бранные по схеме “Тандем”. Легче это достигалось на моделях, собранных по схеме “Утка”. А из моделей схемы “Самолет” более устойчивыми были схемы со стабилизатором, выведенным из зоны действия экрана.

Более важным, однако, в рамках данной работы, было выявление и измерение вертикальных и угловых колебаний моделей при их движении над волновым экраном и оценка их величины. Результаты измерений вертикальных колебаний моделей представлены следующим образом.

Амплитуда вертикальных колебаний модели зависит от

$$a = f(\nu, D, \rho, b_k, \lambda_b, \omega, h_0), \quad (1)$$

где  $\nu$  – скорость движения модели;  $D$  – вес модели;  $\rho$  – плотность среды;  $b_k$  – хорда несущего крыла;  $\lambda_b$  – длина волны волнового экрана;  $\omega$  – круговая частота;  $h_0$  – отстояние задней кромки крыла от гребней волн волнового экрана.

Анализ размерностей позволяет представить эту зависимость в безразмерном виде:

$$A = f(Sh, h) \quad (2)$$

где  $A$  – безразмерная амплитуда (полуразмах) вертикальных колебаний,

$$A = a\nu\sqrt{\frac{\rho}{D}}; \quad (3)$$

$Sh$  – число Струхала,

$$Sh = \frac{2\pi b_k}{\lambda_b}; \quad (4)$$

$h$  – относительное отстояние задней кромки крыла от гребней волн,

$$h = \frac{h_0}{b_k}. \quad (5)$$

Предварительно проведенные эксперименты показали, что амплитуда вертикальных (как и угловых) колебаний модели быстро убывает с увеличением высоты движения модели над экраном и стремится к нулю при отстоянии несущего крыла от гребней волн, соизмеримом с величиной хорды крыла.

Поэтому в данной работе рассматривается зависимость

$$A = f(Sh) \quad (6)$$

для одного заданного наперед значения  $h = 0.06$ , величина которого выбрана из соображений возможности движения модели на минимальной высоте над гребнями волн экрана без соударений с ними, что обеспечивалось соответствующим

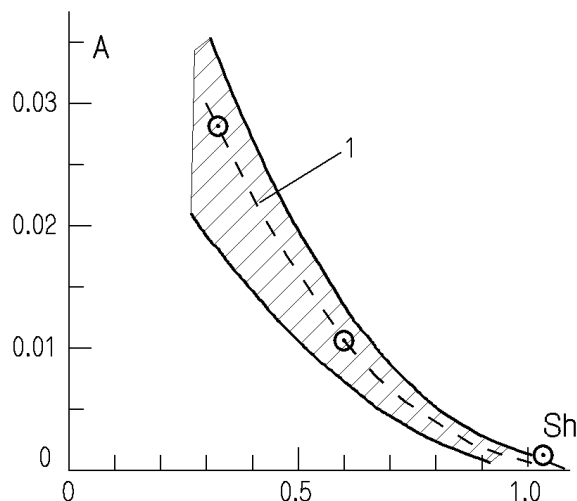


Рис. 2. Зависимость амплитуды вертикальных колебаний от числа Струхала

расположением упомянутых выше ограничителей вертикальных и угловых перемещений на экспериментальной установке. График этой зависимости представлен на рис. 2. Причем результаты приведены не для каждой в отдельности из рассмотренных схем моделей и их модификаций, а ввиду отмеченной выше условности этих схем приведены все результаты измерений вертикальных колебаний для всех испытанных моделей для всего обследованного диапазона чисел Струхала (от 0.314 до 6.28). Эти результаты на графике занимают заштрихованную область между верхней и нижней граничными кривыми. Можно предположить, что в эту область попадут аналогичные результаты для экранопланов, чьи аэродинамические компоненты подобны рассмотренным здесь схемам.

Из анализа графика можно заключить, что вертикальные колебания возникают на экранопланах при их движении над взволнованной поверхностью моря в направлении, перпендикулярном фронту волн только при таких режимах, которые соответствуют числам Струхала (4), примерно меньше единицы. При этом, с дальнейшим уменьшением числа Струхала амплитуда вертикальных колебаний увеличивается. При числе Струхала, больших единицы, вертикальные колебания экранопланов, вызванные взволнованной поверхностью моря, отсутствуют.

Эти же результаты, для большей наглядности, представлены на рис. 3 в зависимости от отношения длины волны волнового экрана к хорде несущего крыла экраноплана. Видно, что при дви-

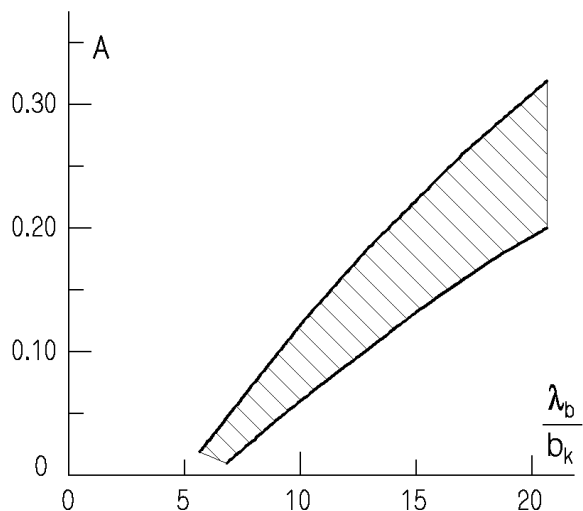


Рис. 3. Зависимость амплитуды вертикальных колебаний от отношения длины волны экрана к хорде крыла

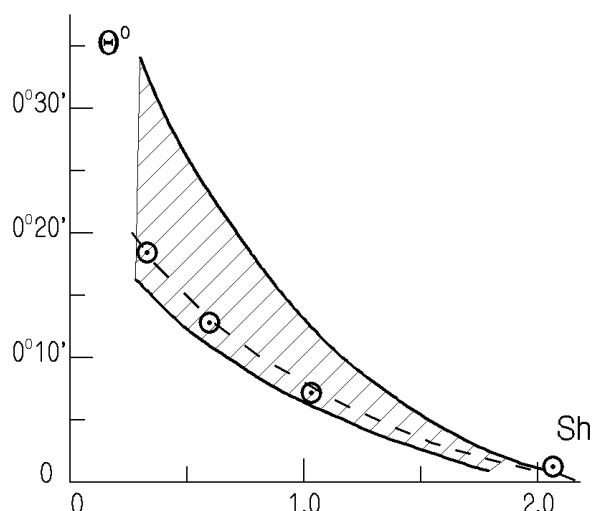


Рис. 4. Зависимость амплитуды угловых колебаний от числа Струхалия

жении экраноплана над относительно короткими волнами, длина которых меньше пяти хорд несущего крыла, вертикальные колебания отсутствуют. В этом случае экраноплан как бы перескакивает от одного гребня волны до гребня другой без изменения своей траектории. Но при преодолении этого барьера в сторону увеличения длины волны возникают вертикальные колебания и амплитуда их в дальнейшем растет. По этим данным можно оценить порядок амплитуды вертикальных колебаний экраноплана при его полете в крейсерском режиме над взволнованной поверхностью моря.

Результаты измерений угловых колебаний моделей над волновым экраном представлены в виде зависимости амплитуды этих колебаний от числа Струхалия на рис. 4, из которого следует, что для угловых колебаний также существует барьер, разделяющий по числам Струхалия зоны наличия и отсутствия угловых колебаний. Только, в отличие от вертикальных колебаний, это явление наступает при больших числах Струхалия. В данном эксперименте угловые колебания возникали при числах Струхалия, примерно равных двум, и амплитуда их увеличивалась с дальнейшим уменьшением чисел Струхалия.

Как следует из графика на рис. 5, это явление наступает при отношении длины волны экрана к хорде крыла примерно равном трем. Необходимо отметить, что графики рис. 4 и 5, полученные для моделей, могут быть применены к натурным экранопланам в том случае, если распределение

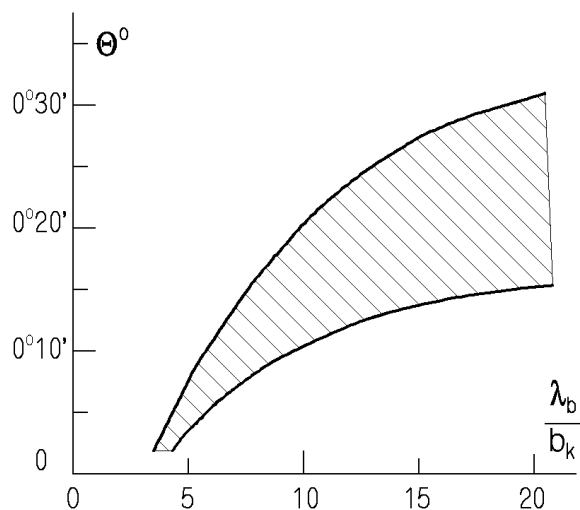


Рис. 5. Зависимость амплитуды угловых колебаний от отношения длины волны экрана к хорде крыла

масс по длине натуре будет подобно распределению масс по длине модели. Диапазон изменения моментов инерции моделей указан выше.

Таким образом, из рассмотрения приведенных результатов следует, что при движении экраноплана над волновым экраном существуют три зоны, примерно характеризующиеся числами Струхалия в виде (4). В первой зоне ( $Sh \geq 2$ ) вертикальные и угловые колебания отсутствуют. Во второй зоне ( $1 \leq Sh \leq 2$ ) экранопланы испытывают только угловые колебания. В третьей зоне ( $Sh \leq 1$ ) экра-

нопланы испытывают и вертикальные, и угловые колебания.

Вертикальные и угловые колебания, когда они действуют совместно, имеют одинаковую частоту, равную частоте встречи с гребнями волн, но, в общем случае, они не совпадают по фазе. Сдвиг по фазе между этими колебаниями находится в сложной зависимости от аэродинамической компоновки, от числа Струхаля и от других факторов и систематизировать эти данные оказалось затруднительным.

Необходимо также отметить, что резонансные явления при испытаниях моделей не наблюдались и в настоящей работе не рассматривались.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩИХ СИЛ И МОМЕНТОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА МОДЕЛЬ ЭКРАНОПЛАНА НАД ВОЛНОВЫМ ЭКРАНОМ

Испытания по определению возмущающих сил и моментов проводились при жесткой подвеске моделей. Испытания велись при тех зафиксированных положениях шарнира (7) (см. рис. 1) и переходников (10) и при тех значениях углов атаки крыльев, отстоящих от экрана и скоростях буксировки, при которых ранее эти же модели двигались устойчиво, не касаясь ограничителей высоты и углов тангажа, в случае их испытаний при свободной подвеске. Одновременно велось непрерывное измерение мгновенных значений подъемной силы и продольного момента, действующих на модели при их движении над волновым экраном. Таким образом устанавливалась связь между вертикальными и угловыми колебаниями моделей, движущихся над волновым экраном, и силами и моментами, которые эти колебания вызывают.

На рис. 6–8 представлены результаты измерения возмущающей подъемной силы и момента тангажа для трех наиболее характерных реализаций компоновок моделей по схемам “Самолет”, “Утка” и “Тандем”.

Коэффициент мгновенных значений возмущающей подъемной силы  $C_{yb}$  представлен в виде

$$C_{yb} = \frac{C_y - C_{y_{ср}}}{C_{y_{ср}}}, \quad (7)$$

где  $C_y$  – коэффициент мгновенных значений подъемной силы модели при прохождении передней кромкой большого крыла над текущей ординатой профиля волны;  $C_{y_{ср}}$  – коэффициент среднего за период значения подъемной силы. Коэффициент  $C_{yb}$  выражает, таким образом, текущую величину

возмущающей подъемной силы в долях средней за период подъемной силы.

Коэффициент момента тангажа  $C_{mz}$  измерен относительно центра тяжести модели.

В нижней части каждого рисунка представлен профиль волны экрана (вертикальный масштаб изменен) и схема расположения модели в момент, когда производилось измерение мгновенных значений подъемной силы и момента тангажа над гребнем волны.

На рис. 6 представлены кривые  $C_{yb}$  и  $C_{mz}$  для компоновки типа “Самолет” для случая, когда стабилизатор (малое крыло) расположен вне зоны действия экрана. Характер этих кривых соответствует, в общем, аналогичным кривым для изолированного крыла над волновым экраном [12, 14]. Кривые имеют экстремальные значения при прохождении модели над гребнями и впадинами волн. Кривые несимметричны относительно вертикалей, проходящих через экстремальные точки.

Амплитуда колебаний коэффициента возмущающей подъемной силы при движении модели от одного гребня волны до другого с увеличением числа Струхаля уменьшается. В соответствии с этим, как видно из рис. 2, уменьшается и амплитуда вертикальных колебаний модели. Однако, в силу инерционности модели и демпфирующего действия среды, вертикальные колебания модели уменьшаются быстрее, чем колебания возмущающей подъемной силы, и при числах Струхаля  $Sh \approx 1$  практически затухают.

Амплитуда колебаний коэффициента момента тангажа, под действием которого возникают угловые колебания модели, меньше зависит от числа Струхаля. Вследствие этого угловые колебания модели (см. рис. 4) реализуются до более высоких значений чисел Струхаля (примерно до  $Sh \approx 2$ ), после чего также затухают.

Кривые  $C_{yb}$  и  $C_{mz}$  для компоновок типа “Утка” (рис. 7) и типа “Тандем” (рис. 8) отличаются от рассмотренных выше не только величиной самих коэффициентов, но и формой над различными участками профиля волны экрана. Ввиду того, что в этих компоновках в зону действия экрана введено еще одно крыло (в первом случае малое, а во втором еще одно большое), форма кривых рассматриваемых коэффициентов значительно усложнилась. Появились дополнительные точки перегиба, точки экстремумов, выпуклости и вогнутости. Все это является результатом сложного взаимодействия системы из двух крыльев с волнами экрана различных параметров.

Различия трех рассмотренных компоновок моделей можно в определенной мере characterize-

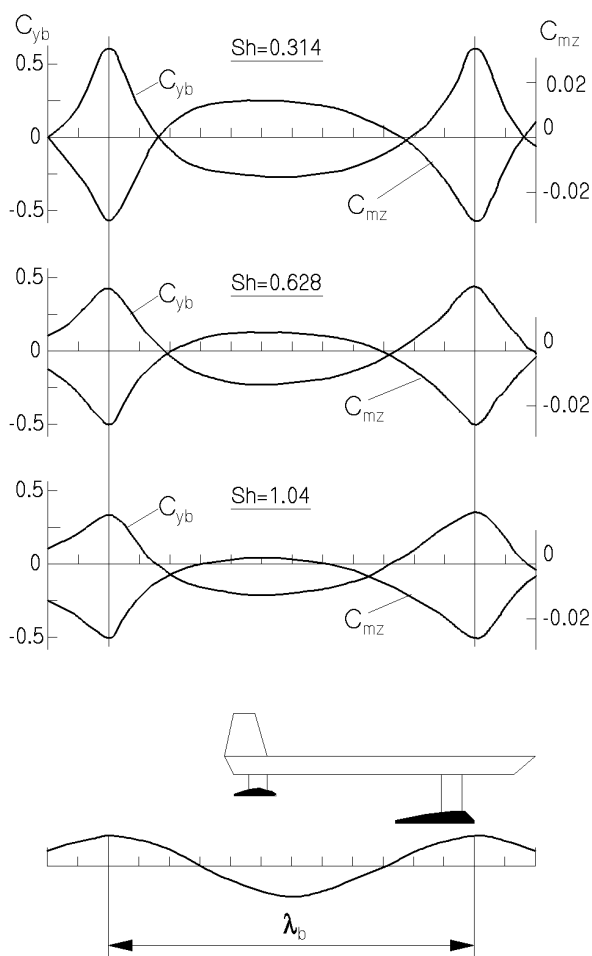


Рис. 6. Изменения коэффициентов возмущающей подъемной силы и момента тангажа над волновым экраном для компоновки “Самолет”

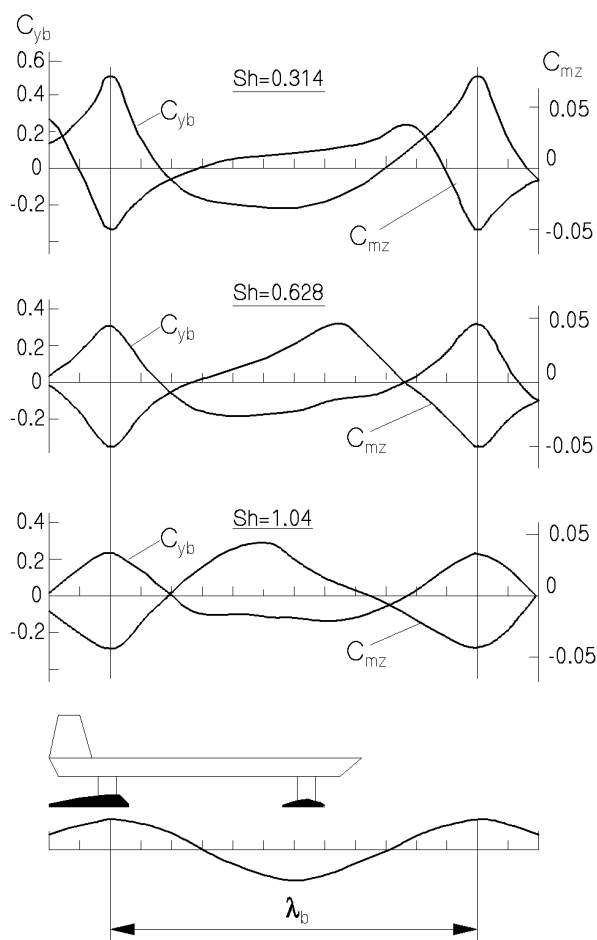


Рис. 7. Изменения коэффициентов возмущающей подъемной силы и момента тангажа над волновым экраном для компоновки “Утка”

вать графиком на рис. 9. на котором представлены амплитуды колебаний значений коэффициентов возмущающей подъемной силы и момента тангажа для каждой компоновки при движении моделей над волновым экраном при различных числах Струхалия:

$$A_y = C_{yb_{max}} - C_{yb_{min}}, \quad (8)$$

$$A_m = C_{mz_{max}} - C_{mz_{min}}. \quad (9)$$

Для каждой компоновки эти амплитуды уменьшаются с ростом чисел Струхалия, что связано с уменьшением длин волн экрана и увеличением средней за период подъемной силы. Но при переходе от схемы “Самолет” к схеме “Тандем” амплитуда колебаний возмущающей подъемной силы уменьшается, а амплитуда колебаний момента тангажа увеличивается. Это связано с введением во второй схеме в зону действия экрана второго большого

крыла. Схема “Утка” в этом смысле занимает промежуточное положение, так как в зону действия экрана вводится малое крыло.

В целом, сравнивая данные, представленные на рис. 6–9, с данными на рис. 2 и 4, можно заключить следующее. Связь между колебаниями возмущающей подъемной силы и момента тангажа моделей над волновым экраном, с одной стороны, и вызванными ими вертикальными и угловыми колебаниями моделей, с другой стороны, выражается в уменьшении всех этих величин с увеличением числа Струхалия. Однако эта связь реализуется практически до значения числа Струхалия  $Sh \approx 1.0$  для вертикальных колебаний и  $Sh \approx 2.0$  для угловых колебаний. Выше этих предельных значений числа Струхалия колебания возмущающей подъемной силы и момента тангажа над волновым экраном не вызывают соответствующих им вертикаль-



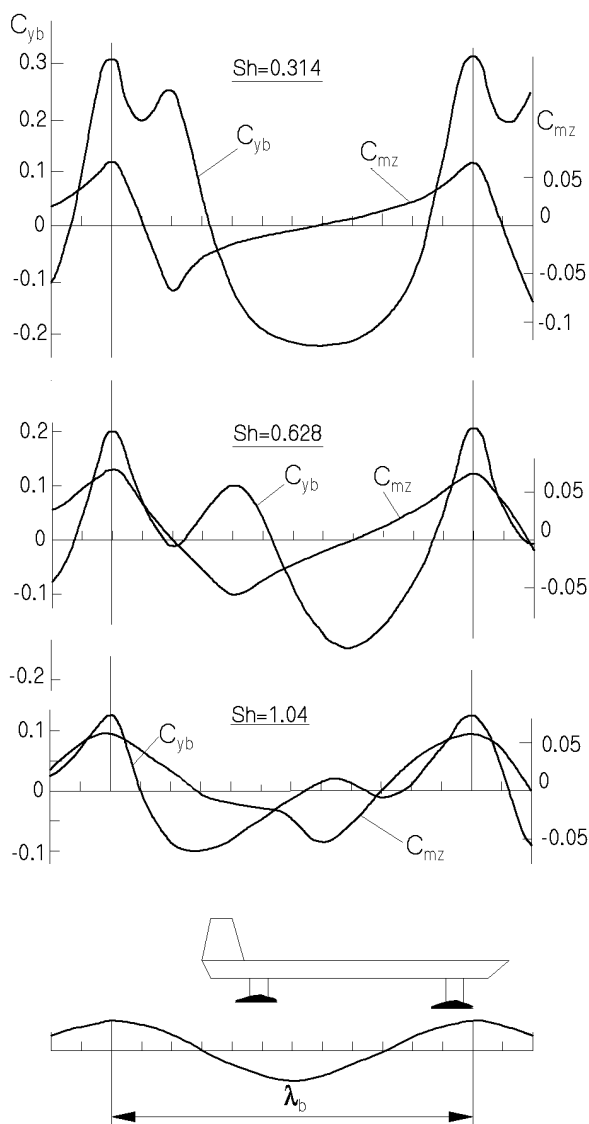


Рис. 8. Изменения коэффициентов возмущающей подъемной силы и момента тангажа над волновым экраном для компоновки типа "Тандем"

ных и угловых колебаний.

Необходимо также отметить, что рассматриваемые колебания подъемной силы и момента тангажа при полете экранопланов над волновым экраном оказывают влияние не только на динамику экранопланов, но и являются существенным фактором, влияющим на прочность их конструкции.

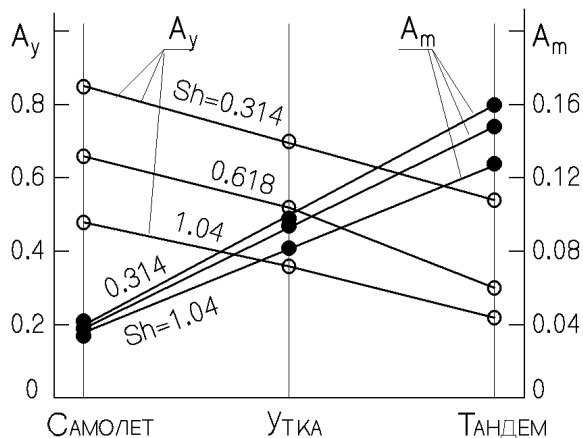


Рис. 9. Зависимости амплитуды значений  $C_{yb}$  и  $C_{mz}$  для трех компоновок моделей от числа Струхалия

#### 4. О ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПЕРЕГРУЗКАХ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЭКРАНОПЛАН, НАД ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ МОРЯ

Вопрос о перегрузках, возникающих на экранопланах при их движении вблизи взволнованной поверхности моря, как отмечалось выше, мало изучен, хотя имеет важное практическое значение. Величина и характер перегрузок определяют комфортность полета на экраноплане для членов экипажа и пассажиров.

Вертикальные перегрузки на экранопланах можно приближенно оценить на основе использования полученных на моделях экранопланов данных о величинах вертикальных колебаний над волновым экраном. Эти данные, выражающие зависимость безразмерной амплитуды вертикальных колебаний (3) от числа Струхалия (4), представлены на рис. 2. На этом графике, как отмечалось, в заштрихованную область внесены все результаты измерений вертикальных колебаний над волновым экраном для трех типов компоновок моделей экранопланов и многих их модификаций.

Поскольку безразмерная амплитуда вертикальных колебаний (3) и число Струхалия (4) являются критериями подобия, то можно рассмотреть некий гипотетический натурный экраноплан, для которого зависимость (6) будет выражена кривой, расположенной внутри заштрихованной области на графике рис. 2. Тогда по этой кривой для принятых для этого экраноплана значений веса, величины хорды несущего крыла и скорости полета, можно определить величину его вертикальных колебаний над волновым экраном в зависимости от

числа Струхаля.

В качестве такого гипотетического экраноплана можно рассмотреть, для примера, морской пассажирский экраноплан весом 200 т (МПЭ), основные характеристики которого, как и характеристики сетки подобных ему экранопланов, приведены в работах [3, 7, 18]. Эти экранопланы их разработчики относят к экранопланам 2-го поколения. Все они имеют подобную аэрогидродинамическую компоновку типа “Самолет” с одним несущим крылом и высокорасположенным стабилизатором, находящимся вне зоны влияния экрана. Схематические модели такой компоновки испытывались нами над волновым экраном и результаты этих испытаний были использованы при построении графиков на рис. 2–6 и 9. Данные о вертикальных и угловых колебаниях, полученные при испытании одной из конкретных моделей такой компоновки, обозначены на графиках рис. 2 и 4 отдельными точками и кривой 1, а на графике рис. 6 представлены для такой модели кривые коэффициентов возмущающей подъемной силы и момента тангажа.

Результаты пересчета амплитуд вертикальных колебаний с модели на натурный гипотетический экраноплан (весом 200 т, скоростью полета 400 км/ч, с хордой крыла 12.3 м), близкий к МПЭ-200, представлены на рис. 10. Здесь же даны кривые частоты этих колебаний. Эти результаты получены с учетом изменения кажущейся частоты встречи с гребнями волн при движении экраноплана навстречу бегу волн или при движении вдоль бега волн. В связи с этим при пользовании графиком на рис. 2 число Струхаля корректировалось [14] по формуле

$$Sh = \frac{2\pi b_k (\nu \pm c)}{\lambda_b \nu}, \quad (10)$$

где  $c$  – скорость бега волн.

По заданным для рассматриваемого экраноплана величин хорды несущего крыла, скорости его полета, длины волны экрана и скорости бега волн по формуле (10) определяются значения чисел Струхаля для случаев движения навстречу бегу волн и вдоль бега волн. Для этих данных по графику на рис. 2 (в данном случае по кривой 1 на этом графике) определяются значения безразмерной амплитуды вертикальных колебаний  $A$ . Затем для заданной величины веса экраноплана, его скорости и найденных значений  $A$ , исходя из формулы (3), определяется амплитуда вертикальных колебаний натурального экраноплана в размер-

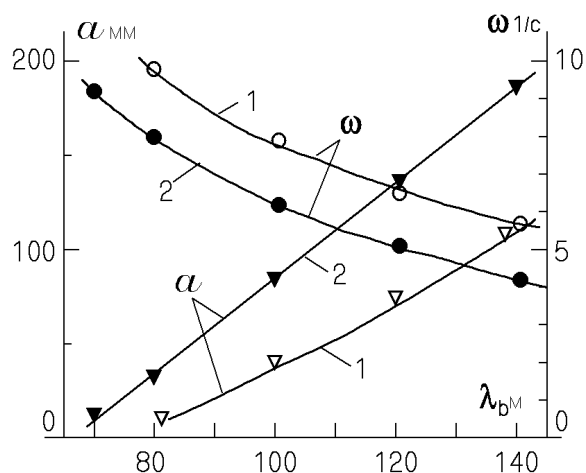


Рис. 10. Зависимости амплитуды вертикальных колебаний и частоты встречи с гребнями волн для экраноплана весом 200 т от длины волны экрана: 1 – движение навстречу бегу волн; 2 – движение вдоль бега волн

ном выражении:

$$a = \frac{A \sqrt{D}}{\nu \sqrt{\rho}}. \quad (11)$$

Круговая частота вертикальных колебаний при полете вдоль и навстречу бегу волн будет

$$\omega = \frac{2\pi(\nu \pm c)}{\lambda_b}. \quad (12)$$

Как видно из графика на рис. 10, вертикальные колебания на рассматриваемом экраноплане не возникают при полете над волнами длиной меньше 70 м. Но над более длинными волнами они возникают и их амплитуда увеличивается тем больше, чем длиннее волна. Интересно, что при полете вдоль бега волн амплитуда вертикальных колебаний существенно увеличивается по сравнению с полетом навстречу бегу волн, что объясняется увеличением кажущейся длины волны экрана (уменьшением числа Струхаля). Естественным является зафиксированное на графике уменьшение круговой частоты с увеличением длины волн экрана.

Аналогичные данные пересчета были получены также для ряда гипотетических экранопланов весом 10, 80 и 450 т, со скоростями полета соответственно 250, 320 и 500 км/ч, с площадью несущего крыла 50, 200 и 624 м<sup>2</sup>, сходных с приведенными в работах [3, 7, 18]. Поскольку эти экранопланы (совместно с рассмотренным выше весом 200 т) составляют ряд подобных экранопланов, то данные пересчета для них аналогичны представленным на рис. 10 и отличаются друг от друга только

количественно. Поэтому эти данные здесь не приводятся, но они используются далее при расчетах вертикальных перегрузок экранопланов.

Имея данные по амплитудам вертикальных колебаний, по частотам встречи с гребнями волн, и зная закон, по которому реализуются вертикальные колебания, можно приближенно определить вертикальные ускорения, действующие на экраноплан при его полете над волновым экраном.

Поскольку, как показали эксперименты, амплитуды вертикальных колебаний экранопланов во много раз меньше (менее 0.5%) длины волн экрана, их порождающих, то уместно эти колебания считать гармоническими. Тогда будем полагать, что вертикальные колебания реализуются по закону

$$y = a \cos \omega t, \quad (13)$$

а максимальные вертикальные ускорения будут определяться по формуле

$$\ddot{y}_{max} = -\omega^2 a, \quad (14)$$

где  $y$  – текущая ордината колебаний;  $\ddot{y}$  – вторая производная по времени;  $a$  – максимальная амплитуда колебаний;  $\omega$  – кажущаяся круговая частота.

Вертикальные перегрузки, таким образом, определяются как частное от деления максимальных вертикальных ускорений на ускорение силы тяжести:

$$n = \frac{\ddot{y}_{max}}{g}. \quad (15)$$

По такой схеме были определены вертикальные перегрузки для четырех упомянутых выше гипотетических экранопланов весом от 10 до 450 т для условий выполнения ими крейсерского полета над волновым экраном. Результаты представлены на рис. 11. Как видно из графика при длинах волн экрана меньше шести хорд несущего крыла вертикальные перегрузки на этих экранопланах не возникают. С увеличением длины волны экрана по отношению к хорде крыла вертикальные перегрузки возникают и растут по величине, но не беспредельно. Они достигают наибольших значений порядка 0.4 при длинах волн экрана, составляющих 10 ~ 13 хорд крыла. При дальнейшем увеличении длин волн экрана вертикальные перегрузки проявляют тенденцию к снижению своей величины.

Важно отметить, что вертикальные перегрузки при полете в направлении, совпадающем с направлением бега волн, превышают свои значения при полете против бега волн. Аналогичный эффект уже отмечался ранее по отношению к вертикальным колебаниям и связан он с изменением

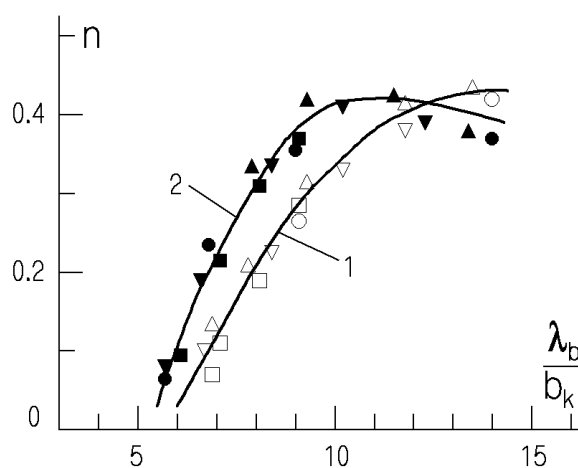


Рис. 11. Зависимости вертикальных перегрузок экранопланов весом 10 – 450 т от отношения длины волны экрана к хорде крыла: 1 – движение навстречу бегу волн; 2 – движение вдоль бега волн

кажущейся частоты встречи с гребнями волн экрана при переходе от одного направления движения к другому.

Подчеркнем, что данные по всем рассмотренным экранопланам на графике представлены двумя общими кривыми 1 и 2 для случаев полета навстречу и вдоль бега волн. Это объясняется тем, что, как следует из [7, 18], эти экранопланы являются масштабной серией однотипных экранопланов. Поэтому амплитуды вертикальных колебаний для них определялись по одной и той же кривой 1 на графике рис. 2, что и служит причиной отмеченной особенности. Для экранопланов с другой аэродинамической компоновкой и с другими характеристиками вертикальные перегрузки будут отличаться от представленных на рис. 11 в той мере, в какой кривая, характеризующая зависимость вертикальных колебаний от числа Струхаля для этих экранопланов, будет отличаться от принятой нами кривой 1 на графике рис. 2. Можно предположить, однако, что эта новая кривая не выйдет за пределы заштрихованной области (рис. 2) и результаты не будут значительно отличаться от приведенных на рис. 11.

Те же данные по вертикальным перегрузкам экранопланов, но в зависимости от высоты волны экрана, представлены на графике рис. 12. По этому графику можно также оценить, какой высоты волну может преодолеть в крейсерском полете данный экраноплан при заданном значении вертикальных перегрузок. Например, в работе [7] приведено, что экраноплан весом 450 т будет способен в

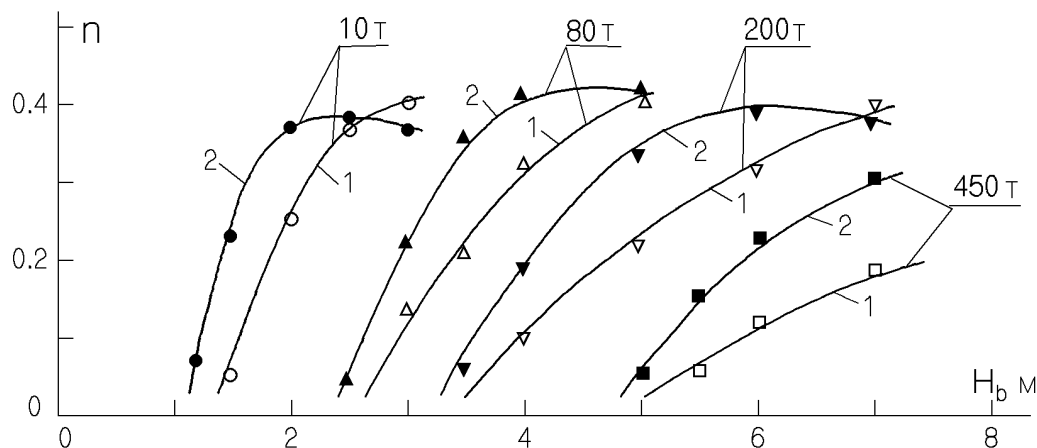


Рис. 12. Зависимости вертикальных перегрузок экранопланов весом 10–450 т от высоты волны экрана: 1 – движение навстречу бегу волн; 2 – движение вдоль бега волн

крейсерском полете преодолевать морские волны высотой 6.0 м. Из графика рис. 12 следует, что такой экраноплан при этом будет испытывать вертикальные перегрузки порядка 0.2 при полете вдоль бега волн и порядка 0.1 при полете навстречу бегу волн.

Для приближенной оценки на ранних стадиях проектирования величины амплитуды колебаний и вызванных этими колебаниями вертикальных перегрузок экранопланов, компоновка которых близка к самолетной схеме, могут быть предложены следующие эмпирические формулы, основанные на результатах обработки описанных выше экспериментов.

Для амплитуды вертикальных колебаний

$$a = 0.056 \frac{\sqrt{D}}{\nu \sqrt{\rho}} (0.95Sh^2 - 1.93Sh + 1). \quad (16)$$

Для вертикальных перегрузок

$$n = 0.056 \frac{\nu \sqrt{D}}{gb_k^2 \sqrt{\rho}} Sh^2 (0.95Sh^2 - 1.93Sh + 1). \quad (17)$$

Эти формулы применимы при числах Струхалиа  $Sh \leq 1$ . Числа Струхалиа должны быть определены по формуле (10) с учетом направления движения экраноплана по отношению к направлению бега волн (знак плюс при движении против бега волн; знак минус при движении вдоль бега волн).

Здесь рассмотрены перегрузки от вертикальных колебаний экранопланов. Угловые колебания, данные о которых представлены на рис. 4 и 5, также будут вызывать определенного вида перегрузки на

эканопланах. Определить эти перегрузки можно, если распределение масс по длине натуральных экранопланов будет подобно распределению масс по длине модели. Этот вопрос в данной работе не рассматривается.

Необходимо еще раз отметить, что все данные, представленные в этой работе, относятся к высоте полета над гребнями волн экрана, которая, в соответствии с выражением (5), равна 0.06.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В гидродинамическом канале Института гидромеханики НАН Украины проводились экспериментальные исследования движения моделей экранопланов различных аэродинамических компоновок над волновым экраном. Использовался гидродинамический метод исследования аэродинамических величин. Испытания моделей проводились в два этапа. На первом этапе исследовалось устойчивое движение моделей над экраном в свободной подвеске с двумя степенями свободы: по вертикали и вокруг поперечной оси, проходящей через центр тяжести модели. При этом измерялись вертикальные и угловые колебания моделей над волнами экрана различной длины и высоты. Определена зависимость этих величин от числа Струхалиа. Установлены диапазоны чисел Струхалиа, в которых реализуются вертикальные и угловые колебания, и в которых эти колебания не возникают.

На втором этапе исследовалось движение моделей над волновым экраном в жесткой подвеске. В

этом случае измерялись нестационарные подъемная сила и момент тангажа, под действием которых возникают вертикальные и угловые колебания моделей. Установлена связь между колебаниями моделей над волновым экраном и силами, их вызывающими.

На основе пересчета результатов экспериментов с модели на натуре произведена оценка величины вертикальных колебаний и вертикальных перегрузок для ряда гипотетических экранопланов второго поколения при их полете в крейсерском режиме над взволнованной поверхностью моря. В рамках принятых допущений показано, при каких реальных размерах экранопланов и параметрах волн экрана могут возникнуть существенные вертикальные перегрузки.

1. Маскалик А. И., Синицын Д. Н. Экранопланы. Основы теории и проектирования // СПб.: Судостроение.-2000.-С. 198.
2. Итоги работ в области внедрения отечественных научно-технических разработок по высокоскоростным судам-экранопланам в практику судоходства // Судостроение.-2002.- Вып. 4.- С. 9-10.
3. Sinitsyn D. N., Maskalik A. I. The first commercial ekranoplan "Amphistar" and prospects for the development of passenger ekranoplans // Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating Near or in Air-Sea Interface. The Research and Technology Organization (RTO) of NATO. Meeting Proceedings 15.- Amsterdam.- 1988.- October 5-8.- p. 24.1-24.18.
4. Волков Л. Д., Русецкий А. А. Экранопланы: проблемы и перспективы // Судостроение.- 1995.- 1.- С. 3-6.
5. Рождественский К. В. Особенности аэродинамики экраноплана в зоне сильного экранного эффекта // Судостроение.- 1995.- 1.- С. 6-9.
6. Правила классификации и постройки малых экранопланов типа А. - РМРС. - 1998.
7. Маскалик А. И. Экранопланы - транспорт ХХІ века // Судостроение.- 2002.- 5.- С. 9-16.
8. Афрамеев Э. А. Глобальная международная система морской безопасности на основе тяжелых экранопланов // Судостроение.- 2001.- 4.- С. 9-11.
9. Афрамеев Э. А., Небылов А. В., Савищенко Н. П. Морской старт многоразовых космических аппаратов с использованием тяжелых экранопланов // Судостроение.- 2001.- 5.- С. 13-16.
10. Международные конференции по экранопланам: Сидней, 1995, 1996, 1998; Лондон, 1997; Санкт-Петербург, 1993, 2000; Амстердам, 1998, 2001.
11. Белинский В. Г., Зинчук П. И., Путилин С. И. и др. Максимальные и средние значения гидродинамических характеристик крыла, движущегося над неплоским экраном // Гидромеханика.- 1974.- Вып. 29.- С. 43-45.
12. Белинский В. Г., Зинчук П. И., Путилин С. И. и др. Влияние формы неплоского экрана на гидродинамические характеристики движущегося над ним крыла // Гидромеханика.- 1975.- Вып. 31.- С. 28-32.
13. Byelinsky V. G. About Movement of a Wing Above Wavy Surface of Water // Workshop on High Speed Body Motion in Water. AGARD Report 827.- Kyiv.- 1997, September 1-3.- P. 17.1-17.9.
14. Белинский В. Г., Зинчук П. И. Экспериментальные исследования движения крыла вблизи плоских и взволнованных границ раздела // Гидромеханика.- 1998.- Вып. 72.- С. 30-45.
15. Byelinsky V. G., Zinchuk P. I. Hydrodynamical Characteristics of an Ekranoplane Wing Flying Near the Wavy Sea Surface // Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating Near or in Air-Sea Interface. The Research and Technology Organization (RTO) of NATO. Meeting Proceedings 15.- Amsterdam.- 1998, October 5-8.- P. 18.1-18.12.
16. Белинский В. Г., Зинчук П. И. Влияние параметров волнового экрана на мгновенные значения подъемной силы движущегося над ним крыла // Прикладная гидромеханика.- 2001.- Том 3(75), N 1.- С. 5-11.
17. Эшштейн Л. А. Гидродинамические методы исследования задач аэродинамики // Труды ЦАГИ.- 1980.- Вып. 2035.- С. 1-28.
18. Maskalik A. I., Rozhdestvensky K. V., Sinitsyn D. N. A View of the Present State of Research in Aero-and Hydrodynamics of Ekranoplans // Fluid Dynamics Problems of Vehicles Operating Near or in Air-Sea Interface. The Research and Technology Organization (RTO) of NATO. Meeting Proceedings 15.- Amsterdam.- 1998, October 5-8.- P. 25.1-25.11.
19. Панченко А. Н. Гидродинамика подводного крыла.- Киев: Наукова думка, 1965.- 552 с.
20. Гидродинамика больших скоростей. //Сборник Института гидромеханики АН УССР. - 1965 - Вып. 1. - С. 174; 1966 - Вып. 2. - С. 170; 1967 - Вып. 3. - С. 123; 1968 - Вып. 4. - С. 137; 1968 - Вып. 5. - С. 176.
21. Под редакцией Ивченко В. М. и Панченкова А. Н. Задачи и методы гидродинамики подводных крыльев и винтов.- Киев: Наукова думка, 1966.- 160 с.
22. Гребешов Э. П. и др. Аэродинамические характеристики профиля крыла вблизи плоского и волнового экрана // Труды ЦАГИ.- 1976.- Вып. 1725.- С. 31-58.
23. Горбань И. Н., Горбань В. А., Салтанов Н. В. Гидродинамические характеристики тонкого профиля, движущегося вблизи неплоского экрана // Докл. АН УССР, Сер.А.- 1987.- 4.- С. 37-40.
24. Королев В. И., Костин А. Г., Салтанов Н. В. Некоторые современные тенденции и подходы в решении научно-технических проблем создания экранопланов // Гидромеханика.- 1998.- Вып. 72.- С. 46-71.
25. Grinchenko V., Moroz V. Hydrodynamic Aspects of Wing-in-Ground Crafts Designing // The 1st International Symposium on WIG Crafts. - Conference Proceedings.- Seoul, Korea.- November 8, 2005.- P. 15-25.
26. Шувалов А. А., Зинченко А. Г., Удовенко В. А. Решение проблемы устойчивости летательного аппарата над экраном как путь создания высокоэффективного транспортного средства // Технологии в машиностроении: Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сборник трудов.- 2000.- Вып. 95.- С. 117-123.
27. Макаров Ю. Экранопланы Украины // Авиация общего назначения.- Харьков.- 2000.- 5.- С. 10-15.