

Исследование динамических характеристик экраноплана на взлетном режиме

М. О. Латухин, Е. В. Кириллук, С. В. Антоненко, В. В. Новиков¹
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Выполнено исследование аэродинамических характеристик крыла экраноплана, движущегося над экраном при разных плотностях среды. Проведен численный эксперимент, в котором в смоделированной расчетной схеме между крылом и экраном увеличена плотность среды путем искусственного создания аэрозольной динамической воздушной подушки с целью увеличения подъемной силы. Численные расчеты выполнены с помощью программы COSMOS FIoWorks, интегрированной в программный комплекс SolidWorks. Для проведения расчетов в SolidWorks создана трехмерная модель крыла, соответствующая прототипу судна. Также были смоделированы экран в виде твердотельной протяженной поверхности под крылом и часть фюзеляжа. Выполненный анализ подтвердил предположение о том, что повышение плотности среды путем создания водно-воздушной смеси под крылом позволяет увеличить подъемную силу и аэродинамическое качество, что является особенно важным для взлетного режима экраноплана.

Ключевые слова: экраноплан, качество крыла, численный эксперимент

Research of dynamic characteristics of airfoil boat on the takeoff.

Michael O. Latuhin, Eugeny V. Kiriljuk, Sergey V. Antonenko, Valery V. Novikov. Far East Federal University, Vladivostok, Russia

There is made the investigation of aerodynamic characteristics of wing airfoil boat moving above the screen at different densities of the medium. It is made the numerical experiment in which the simulated design scheme between the wing and the screen it is increased density of the medium by creating an artificial aerosol dynamic air cushion to increase lift and reduce the path length for takeoff. Numerical calculations were performed using the program COSMOS FIoWorks, integrated into software package SolidWorks. For the calculations it is created three-dimensional model of the wing in SolidWorks, corresponding to the prototype of vessel. There were also modeled the screen as a solid surface under the extended wing and part of fuselage. The analysis is confirmed the assumption that increasing the density of the environment by creating a water-air mixture under the wing increases the lift force and aerodynamic quality, which is particularly important for takeoff airfoil boat, as well as reduce the length of the run.

Keywords: airfoil boat, wing quality, numerical experiment

Введение

Экраноплан – необычное транспортное средство, по своим техническим характеристикам занимающее промежуточное положение между скоростными судами и самолетами. Он может выполнять различные функции:

¹ Михаил Олегович Латухин, Евгений Владимирович Кириллук, Сергей Владимирович Антоненко, Валерий Васильевич Новиков. Дальневосточный федеральный университет.



при движении крыла в неограниченном потоке. Между крылом и экраном происходит интенсивное подтормаживание воздуха и, как следствие, увеличение давления на нижней поверхности профиля.

Динамическая воздушная подушка способствует увеличению *подъемной силы*, увеличивается и *лобовое сопротивление*. Одновременно растет аэродинамическое качество, определяемое как отношение подъемной силы к сопротивлению. Это способствует улучшению экономических показателей экраноплана.

Изменения в распределении давлений по хорде крыла при его движении вблизи экрана сводятся главным образом к резкому увеличению давления на его нижней поверхности и сравнительно небольшим изменениям на его верхней части.

Если вдали от земли подъемная сила крыла образуется в основном за счет разрежения над крылом, то вблизи поверхности значительную роль в создании подъемной силы играет *повышение давления под крылом*.

Помимо сил трения и разности давлений в потоке, одной из основных причин возникновения силы лобового сопротивления крыла является образование за крылом скоса потока вследствие возникновения системы вихрей. Эти вихри возникают в результате перетекания воздуха по торцам крыла из зоны повышенного давления под крылом в зону пониженного давления над крылом.

Очевидно, что часть силы лобового сопротивления, обусловленная разностью давлений впереди и сзади крыла и трением в пограничном слое крыла, зависит только от формы профиля и состояния поверхности крыла. Эту часть силы лобового сопротивления обычно называют *профильным сопротивлением крыла*.

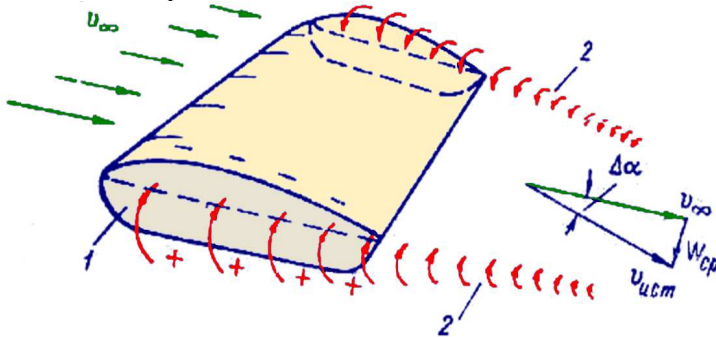


Рис. 2. Схема образования вихревого следа за крылом. 1 – концевая шайба; 2 – свободные концевые вихри крыла; W_{cp} – средняя вертикальная составляющая скорости потока за крылом; $\Delta\alpha$ – угол скоса потока

Завихренный поток на концах крыла вызывает индуктивное сопротивление крыла, которое вместе с профильным составляет лобовое сопротивление (рис. 2). И профильное, и лобовое составляющие сопротивления крыла вблизи экрана изменяются.



Весьма интересной в этой связи является количественная оценка влияния условий движения крыла на аэродинамические характеристики с учетом экрана. Как видно из структуры классических формул, определяющих динамику крыла (табл. 1), аэродинамические силы зависят от скорости потока, геометрических характеристик крыла и плотности среды.

Таблица 1
Основные формулы

Формула	Обозначение	Примечание
$F=c_F S \rho v^2/2$	Полная аэродинамическая сила	c_F, c_y, c_R – коэффициенты полной аэродинамической силы, подъемной силы, лобового сопротивления крыла соответственно, определяемые продувками модели; S – площадь крыла; v – скорость обтекания; ρ – плотность среды
$Y=c_y S \rho v^2/2$	Подъемная сила	
$R=c_R S \rho v^2/2$	Лобовое сопротивление	

1

Поверхность воды является наиболее неблагоприятным видом экрана, значительно усложняющим взлет и посадку экранопланов, что и определяет достаточно жесткие требования к мореходности.

Решение этой проблемы заключается в создании действенных взлетно-посадочных устройств.

В настоящее время известны и апробированы следующие их типы.

1. Система поддува струи стартовых двигателей под крыло позволяет экраноплану отрываться практически без разгона, но требует колоссальных энергозатрат. На современном этапе признана, по меньшей мере, неэффективной в большинстве случаев.

2. Использование стартовых подводных крыльев показывает положительные результаты по энергозатратам, однако задачи согласования динамически изменяющихся моментов подъемных сил от надводных и подводных крыльев, влияющих на устойчивость экраноплана в режиме взлета, до сих пор являются трудно решаемыми.

3. Создание воздушной подушки эффективно обеспечивает взлет экраноплана. Однако в силу громоздкости конструктивных элементов (которые необходимо размещать на участках, наиболее пригодных для грузов и пассажиров) в целом воздушная подушка не является полноценным решением представленной проблемы.

4. Применение глассирующих поверхностей, гидролыж, продольных реданов считается наиболее перспективным направлением. Данные конструктивные решения повсеместно используются, однако они не дают существенной экономии энергоресурсов судна и требуют установки дополнительных двигателей.

В виде альтернативы представленным способам или в качестве их дополнения возможна иная концепция взлетного устройства – искусственное



изменение плотности среды под воздушным крылом путем подачи под него аэрозоля.

Идея увеличения плотности среды под крылом в виде аэрозольной динамической подушки возникла на основании другого, аналогичного метода разряжения водной среды – за счет воздушной каверны.

Суть предлагаемого решения заключается в том, чтобы увеличить подъемную силу крыла, изменяя плотность воздушной среды под ним. По предварительным оценкам, подъемная сила в этом случае должна изменяться прямо пропорционально изменению плотности. Однако при увеличении плотности среды, в которой работает крыло, должно возрасти и аэродинамическое сопротивление его движению (см. табл. 1).

Постановка задачи и расчётная модель

С целью оценки эффективности данного метода исследованы динамические характеристики крыла вблизи экрана путем проведения численного эксперимента. Исследовался взлетный режим экраноплана со следующими характеристиками (табл. 2)

Таблица 2. Основные характеристики экраноплана

Взлетная масса	350 t
Расстояние от нижней кромки крыла до экрана	0,5 m
Размах крыла	40 m
Хорда средняя	12 m
Площадь проекции крыла	268 m ²

Для анализа выбрана программа COSMOS FloWorks, интегрированная в SolidWorks. Для проведения расчетов в SolidWorks создана трехмерная модель крыла по материалам прототипа судна. Также были смоделированы экран в виде твердотельной протяженной поверхности под крылом и часть фюзеляжа.

При описании численного эксперимента был принят тип задачи как внешний (задача обтекания твердого тела жидкостью или газом); в качестве газа принимался воздух плотностью $\rho = 1,22 \text{ кг/м}^3$; теплопередача внутри крыла отсутствует; в качестве исходных условий эксперимента приняты нормальные условия (давление 101,3 кПа, температура 293,2 К).

Задача исследования состояла в сопоставлении взлетных характеристик экраноплана, использующего и не использующего введение воды в смеси с воздухом под крыло. При этом необходимо было учесть падение тяги двигателей экраноплана по мере роста скорости.

Поскольку нам не удалось найти в литературе соответствующую зависимость, для численного анализа был принят некоторый закон изменения ускорения при движении экраноплана, показанный на рис. 3. Погрешность сравнительной оценки, связанная с принятием указанной зависимости, по



нашему мнению, не должна существенно сказаться на окончательном результате.

В ходе численного эксперимента скорость обтекания варьировалась от 10 до 110 м/с. Взлет экраноплана при обычном режиме движения, как показал предварительный анализ, происходит при скорости 110 м/с, когда подъемная сила достигает величины, равной весу экраноплана.

Расчетная сетка была сгенерирована автоматически, форма конечного элемента выбрана в виде параллелепипеда, минимальный размер конечного элемента составлял 0,005 м, минимальный размер учитываемых твердотельных элементов - также 0,005 м. В расчетах установлен уровень точности 4 из 8 возможных.

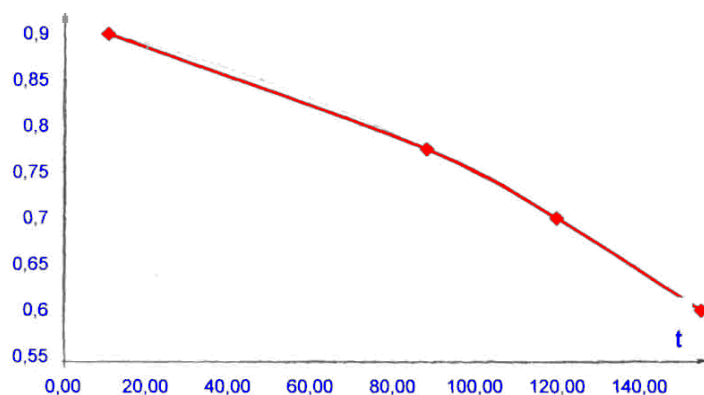


Рис. 3. Расчетный закон изменения ускорения $a = f(t)$

Надо отметить, что в случае оценки подъемной силы и сопротивления среды (при работе крыла с аэрозольной смесью между экраном и нижней поверхностью) необходимо разделять силы, действующие на верхнюю и нижнюю поверхности крыла. Над верхней поверхностью крыла воздушная среда не изменяется, и динамические характеристики остаются прежними. На нижней кромке из-за изменения плотности воздуха возрастают и подъемная сила, и сопротивление. По этой причине затруднительно использовать традиционные подходы, подразумевающие определение коэффициентов подъемной силы и сопротивления для крыла в целом.

Была выполнена серия расчётов при различных концентрациях воды в смеси. На основании полученных результатов численного эксперимента были найдены зависимости для оценки аэродинамических характеристик крыла в зависимости от скорости в воздухе и в водно-воздушной смеси с концентрацией воды 1 % под крылом с учетом экрана.

В соответствии с принятым законом движения (см. рис. 3) получены расчетные формулы подъемной силы и силы сопротивления в зависимости от времени. Задача решалась в квазистатической постановке с шагом по времени 5 секунд.

Было учтено, что подъем жидкости для разбрызгивания под крыло требует затрат энергии. Очевидно, что эта энергия прямо пропорциональна



требуемому удельному массовому расходу воды и высоте, на которую ее нужно поднять, и представляет собой реактивную силу засасывания. В итоге расчетного анализа получена зависимость подъемной силы от времени с учетом реактивных потерь. Также учтены составляющие вязкостного сопротивления нижней кромки крыла в водно-воздушной смеси, аэродинамическое сопротивление крыла при движении в воздухе, а также приближительные потери на сопротивление устройств забора жидкости от времени.

В целом получена картина полного сопротивления движению экраноплана в смеси с учетом дополнительных факторов сопротивления.

Основные результаты

На рис. 4-6 показано графическое изменение аэрогидродинамических характеристик крыла во времени при движении экраноплана в воздушной и в водно-воздушной средах. Объем воды в этих расчетах составлял 1 % от объема смеси.

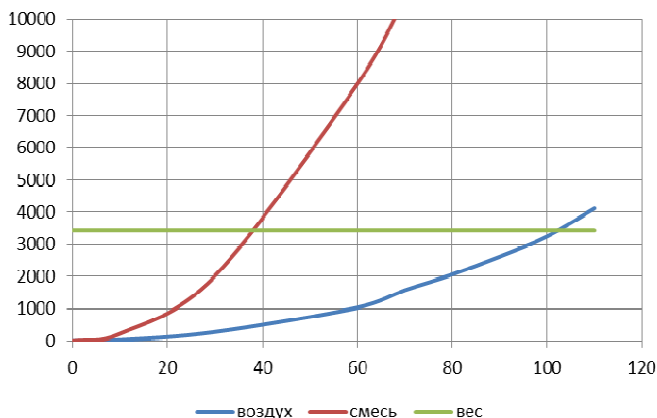


Рис. 4. Изменение подъемной силы крыла P_Y (кН) при движении в водно-воздушном потоке (смесь) и в воздухе

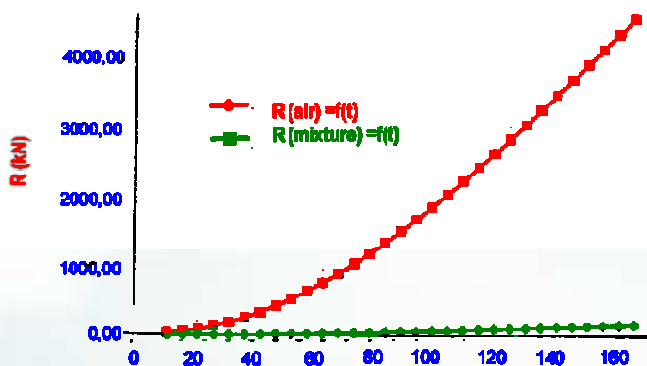


Рис. 5. Изменение сопротивления крыла R при движении в водно-воздушном потоке и в воздухе



Горизонтальная линия на рис. 4 показывает вес экраноплана, а точки пересечения ее с кривыми – скорость в момент отрыва от воды. Как можно увидеть, увеличение плотности среды под крылом за счет разбрызгивания воды в примере уменьшает скорость при взлете в 2,5 раза.

Как видно, искусственное создание водно-воздушной динамической подушки существенно увеличивает и подъемную силу, и полное сопротивление крыла. В результате аэродинамическое качество (отношение подъемной силы к сопротивлению $K = P_Y / R$) остается постоянным и достаточно высоким ($K \cong 8$) для рассматриваемой плотности аэрозольной смеси (рис. 6).

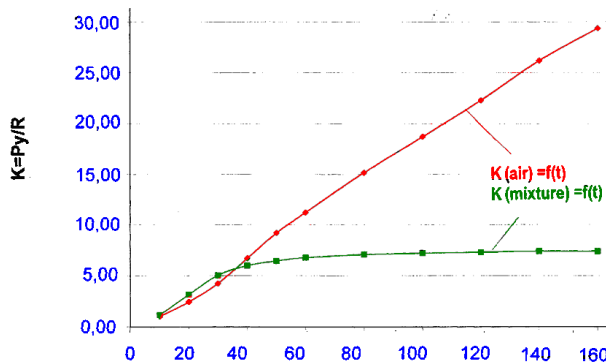


Рис. 6. Изменение аэродинамического качества крыла экраноплана во взлетном режиме

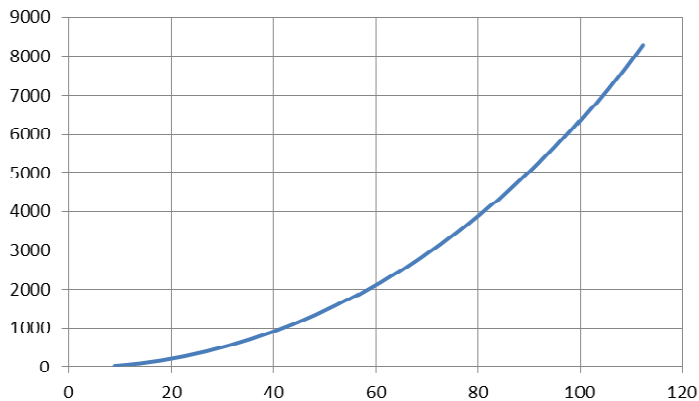


Рис. 7. Зависимость пройденного пути от времени движения

Рис. 7 показывает зависимость пройденного пути (в метрах) от времени движения (в секундах) при принятом законе изменения ускорения. Нужно иметь в виду, что реальное ускорение будет в 2-3 раза больше принятого в данном расчете и взлетная дистанция соответственно уменьшится.

Для взлетных режимов одинаковых экранопланов ($P=350$ т), движущихся по одинаковому закону ускорения, подсчитаны следующие характеристики (табл. 3).



Таблица 3. Сравнительные результаты расчётов

Характеристика	Водно-воздушная смесь	Воздух
Время взлета (с)	50	125
Взлетная скорость (м/с)	45	110
Взлетная дистанция (м)	1115	6674
Максимальное аэродинамическое сопротивление без учета корпуса (кН)	548	110

Заключение

На основании проведенного расчетного анализа можно заключить, что повышение плотности среды путем создания водно-воздушной смеси под крылом позволяет значительно увеличить подъемную силу при сравнительно низких энергозатратах на устройство забора воды и разбрызгивание смеси. Соответственно, взлетная скорость экраноплана снижается, что дает возможность, в свою очередь, уменьшить мощность стартовой энергетической установки и длину пробега при взлете.

Также использование водно-воздушной смеси позволяет увеличить маневренность и безопасность экраноплана, позволяя проходить сложные участки маршрута на меньшей скорости без посадки на воду. Использование данного способа может также увеличить грузоподъемность.

На предложенный способ подана заявка в Роспатент [4], которая на момент написания работы находилась в стадии рассмотрения.

Литература

1. *Панченков А.Н., Драчев Н.Г., Любимов В.И.* Экспертиза экранопланов. Н. Новгород. ООО Типография «Поволожье». 2006. 656 с.
2. *Ашик В.В.* Проектирование судов. Л.: Судостроение. 1985. 320 с.
3. *Справочник по теории корабля. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания.* Под редакцией *Я.И. Войткунского*. Л.: Судостроение, 1985. 544 с.
4. *Латухин М.О., Кириллюк Е.В., Антоненко С.В., Китаев М.В.* Способ улучшения взлётных характеристик экраноплана. Заявка на патент № 2012127018, приоритет от 27.06.2012.