

УДК 629.7.022

Е.А. Українець

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## РОТАТИВНАЯ МАШИНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКРАНОПЛАНОВ

*Обоснованы варианты ротативной машины для определения основных аэродинамических характеристик экранопланов. Показано, что определение аэродинамических характеристик экранопланов в аэродинамических трубах требует больших энергетических мощностей, высокой квалификации исследователя, при этом методики проведения модельного эксперимента с экранирующими поверхностями имеют ряд ограничений. Сделан взвод о том, что снижение затрат на модельный эксперимент, учет волнового экрана могут быть достигнуты использованием ротативной машины.*

**Ключевые слова:** ротативная машина, аэродинамическая труба, аэродинамические характеристики, модельный эксперимент, экранирующая поверхность.

### Введение

Проблема увеличения скорости кораблей для достижения тактических преимуществ является одной из ключевых проблем развития Военно-Морских Сил. Водоизмещающие корабли, плавание которых основано на использовании гидростатических сил, достигают скорости около 30 узлов (55 км/ч) для самых больших военных кораблей, оснащенных двигателями огромной мощности. Глиссирующие катера способны развивать 110 км/час благодаря тому, что на ходу корпус их поддерживается не всем днищем, а лишь частью его – двумя небольшими "пяточками", расположенными в районе редана (уступ и днище) и кормы. Однако быстроходные реданные глиссирующие корабли обладают невысокой боевой ценностью из-за крайне низкой мореходности. Дальнейшее увеличение скорости связано с переводом надводных судов из традиционного водоизмещающего режима плавания на режим движения над водой, используя для того различные динамические принципы поддержания:

– путем подъема корпуса над поверхностью воды за счет подъемной гидродинамической силы, развиваемой при больших скоростях хода на глубокопогруженных (подводных) управляемых крыльях судов (СПК – суда на подводных крыльях),

– путем подъема корпуса над поверхностью воды за счет воздушной подушки, то есть, слоя сжатого воздуха, нагнетаемого под днище судна для отделения его от воды (СВП – суда на воздушной подушке);

– путем подъема корпуса над поверхностью воды за счет эффекта резкого повышения подъемной силы корпуса-крыла и улучшения его аэродинамических качеств при движении вблизи опорной поверхности (экранопланы) [1].

СПК присущи все недостатки глиссирующих кораблей, поэтому их военное использование ограничено в той же степени. СВП также обладают ря-

дом недостатков, затрудняющих их военное использование. Так, большое волнение моря, крутые склоны берегов и пересеченная местность остаются для СВП непреодолимыми. Предельная высота волн, над которыми могут двигаться существующие СВП, не превышает 1,8 метра. Поднимаемые вентиляторами облака водяной, снеговой или грунтовой пыли демаскируют корабль и усложняют управление им.

Наибольшей ценностью в военном смысле обладают экранопланы – аппараты, предназначенные для полета вблизи опорной (в основном водной) поверхности. Принципиальное различие между двумя принципами движения СВП и экранопланов состоит в том, что поддерживающая экраноплан "воздушная подушка" создается не вентилятором, а скоростным напором воздуха, набегающего на аппарат. В результате повышается подъемная сила крыла и его аэродинамическое качество при движении у водной поверхности, так называемый "эффект экрана". Это дает экраноплану определенные преимущества:

– возрастание скорости движения (до 550 км/час) при сравнительно небольших затратах мощности;

– высокая мореходность и способность менять высоту полета в зависимости от обстановки;

– способность двигаться не только над водной поверхностью, но и над снегом, льдом и отмелями, преодолевать препятствия высотой в несколько метров;

– большая, чем у обычных самолетов, экономичность и дальность полета;

– высокая скрытность, не свойственная обычным надводным кораблям. У экраноплана нет гидроакустического поля, поскольку он не имеет контакта с водной поверхностью [1].

Следует отметить, что близость экранирующей поверхности оказывает существенное нелинейное влияние на аэродинамические характеристики экранопланов, определение которых является нетривиальной проблемой [1 – 6].

**Целью статьи** является обоснование возможности создания ротативной машины для определения основных аэродинамических характеристик экранопланов, разработка методики проведения модельного эксперимента на ротативной машине.

### Основной раздел

Несмотря на прогресс в области теоретической аэродинамики определение аэродинамических характеристик (АДХ) летательных аппаратов (в том числе, экранопланов) по испытаниям его моделей в аэродинамических трубах (АДТ) остается основным и самым надежным средством при разработке новых аэродинамических компоновок и совершенствовании уже существующих [2].

Результаты испытаний в АДТ моделей, предназначенных для исследовательских целей, используются для сравнительного анализа АДХ различных компоновок и их элементов. Для расчета летно-технических и маневренных характеристик ЛА результаты испытаний в АДТ их геометрически подобных моделей приводятся к натурным условиям путем введения поправок. Величины поправок, их точность и методы определения зависят и от характеристик АДТ, и от особенностей компоновки ЛА. В конечном итоге сопоставление АДХ, полученных в результате испытаний моделей в АДТ, приводит к установлению АДХ ЛА, которые в сочетании с характеристиками двигателя принимаются за основу всех последующих анализов и расчетов [2]. Однако эксплуатация АДТ требует больших энергетических мощностей, высокой квалификации исследователя, сохранения существующих и разработки новых методик проведения модельного эксперимента.

Работоспособная лабораторная база кафедры аэродинамики и динамики полета Харьковского университета Воздушных Сил состоит из:

- дозвуковой АДТ малых скоростей Т-1;
- дозвуковой учебной АДТ УТ-1, малых учебных дозвуковых АДТ, малого винтового прибора, малой учебной сверхзвуковой АДТ. Эти АДТ могут использоваться исключительно в учебных целях, модельный эксперимент при наличии экранирующих поверхностей на них невозможен.

Аэродинамическая труба малых дозвуковых скоростей Т-1 – замкнутого типа с открытой рабочей частью имеет сечение в виде восьмигранника, снабжена трехкомпонентными весами ЗКТ-1. Основные технические данные Т-1 представлены в работе [3] и сведены в табл. 1.

В работе [4] представлена экспериментальная методика определения аэродинамических характеристик летательных аппаратов, в том числе, экранопланов, с учетом экранного эффекта в АДТ Т-1.

Таблица 1

Основные технические данные трубы малых дозвуковых скоростей Т-1

Размеры рабочей части:	
ширина	1,0 м
высота	0,7 м
длина	1,3 м
Степень поджатия сопла	5
Диаметр вентилятора	1,5 м
Число оборотов вентилятора /максимальное/	1000 об/мин
Мощность приводного электромотора	30 кВт
Скорость потока в рабочей части:	
максимальная	50 м/с
минимальная	1,5 м/с
Аэродинамическое качество	2,7

В качестве объекта экспериментального аэродинамического исследования выбрана модель экраноплана типа «Орленок», экранирующая поверхность представляла собой гладкий экран, выполненный из дерева (рис. 1). В результате обработки опытных данных для модели экраноплана получены зависимости коэффициентов подъемной силы от угла атаки.



Рис. 1. Фотография модели экраноплана типа «Орленок» в рабочей части АДТ Т-1

Анализ полученных в [4] зависимостей позволил сделать следующие выводы:

- наличие экранирующей поверхности существенно влияет на величину коэффициента подъемной силы и производной коэффициента подъемной силы по углу атаки самолета;
- АДТ Т-1 обеспечивает проведение экспериментальных исследований аэродинамических характеристик сложных компоновок экранопланов только вблизи плоской экранирующей поверхности.

Хотя прямолинейное движение (воздуха или исследуемой модели) при проведении аэродинамического эксперимента в АДТ или на ракетной тележке имеет несомненное преимущество по сравнению с криволинейным движением, оно требует для реализации опыта высоких эксплуатационных затрат. Так, штатное про-

ведение эксперимента в АДТ Т-1 требует наличие четырех экспериментаторов, тщательнейшей подготовки и строгого соблюдения методики проведения весового эксперимента, при этом расходуется до 60 кВт электроэнергии в час. Поэтому в методике аэродинамического эксперимента ограниченно применяется и криволинейное, главным образом круговое движение модели. Одним из основных прибором, на котором осуществляются такого рода опыты, следует считать ротативную машину [5, 6].

Ротативная машина представляет собой вращающийся брус, на конце которого укрепляется исследуемая модель (рис. 2). Брус и модель уравновешиваются противовесом, постоянство скорости движения обеспечивается равномерностью вращения бруса, приводимого во вращение от специального мотора.

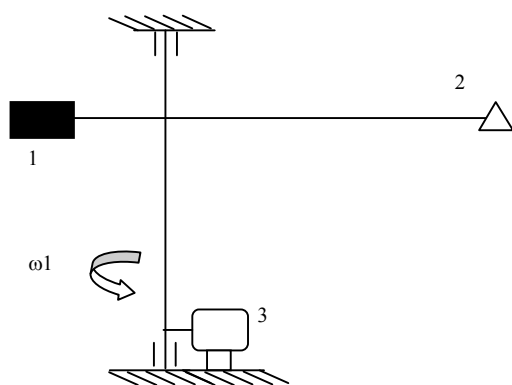


Рис. 2. Схема ротативной машины:  
1 – противовес; 2 – исследуемая модель; 3 – мотор

Ввиду равномерности движения, а следовательно, и постоянства скорости движения исследуемого объекта ротативная машина может применяться для тарировки приборов, измеряющих скорость течения воздуха, при эталонных измерениях на небольших скоростях [6].

Ротативная машина, при всей ее простоте и экономичности, разумеется, не лишена недостатков. Так, из-за криволинейности траекторий отдельных частей исследуемой модели частицы воздуха, находящиеся с ней в непосредственном соприкосновении, подвергаются влиянию центробежной силы. Эта сила вызывает смещение центра давления модели в сторону действия центробежной силы и, кроме того, изменяет величину аэродинамической силы из-за проскакивания потока под действием центробежной силы – лобовое сопротивление, в частности, возрастает [6]. Существенное осложнение возникает также вследствие появления спутной струи, то есть, дополнительного потока воздуха, увлеченного как самой моделью, так и брусом машины. Этот поток приобретает установившийся характер, равномерно завихренный, причем скорость его при значительных скоростях вращения может достигнуть большой величины [6].

Недостатки ротативной машины сказываются тем сильнее, чем меньше размеры машины и чем выше скорость ее вращения. Для минимизации этих недостатков приходится использовать метод поправок, то есть, вносить поправки после измерения скорости спутной струи.

Кроме того, для высоких окружных скоростей, а скорости известных ротативных машин доходили до 100 м/с при диаметре 3,5 м, используются специальные экраны, через прорези в которых проходит брус.

Анализ достоинств и недостатков АДТ и ротативных машин позволяет сделать вывод о рациональности использования ротативной машины для определения аэродинамических характеристик экранопланов, других летательных аппаратов вблизи экранирующей поверхности (например на взлете и посадке боевых самолетов). При этом схема ротативной машины несколько изменяется (рис. 3), а роль экрана для уменьшения влияния спутной струи выполняет собственно экранирующая поверхность, что является существенным преимуществом.

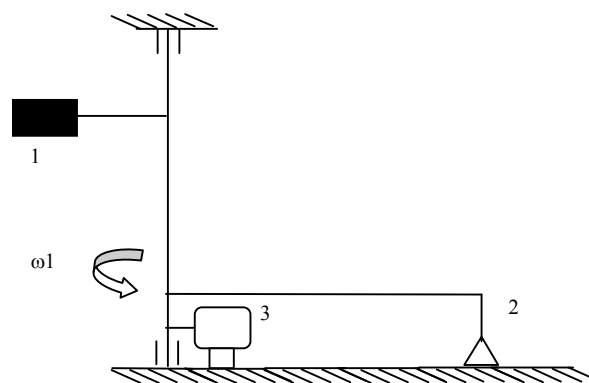


Рис. 3. Схема ротативной машины для моделей экранопланов:  
1 – противовес; 2 – исследуемая модель; 3 – мотор

Как известно, наличие волнового экрана оказывает существенное нелинейное влияние на аэродинамические характеристики экранопланов. Степень этого влияния оценивается при помощи числа Струхала, характеризующего движение крыла относительно подвижного волнового экрана [7]:

$$St = P^* \frac{v_0 \pm c}{v_0},$$

где  $P^* = 2\pi b/\lambda_b$  – число Струхала, характеризующее движение крыла относительно неподвижного экрана;  $b$  – хорда крыла;  $\lambda_b$  – длина волны;  $v_0$  – скорость крыла;  $c$  – скорость волны.

При числах Струхала, отличных от нуля, наибольшую сложность представляет обеспечение устойчивости экраноплана в продольном канале и по высоте. Так, экраноплан "Орленок" был оснащен системой стабилизации по высоте полета и углу

тангажа "Смена-4", полеты без которой осложнены из-за потери устойчивости. Для исследования устойчивости экраноплана предлагается использовать следующую схему ротативной машины (рис. 4).

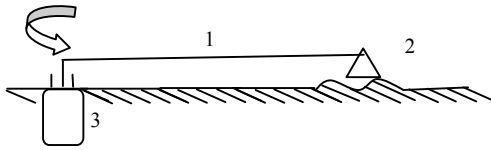


Рис. 4. Схема ротативной машины для моделей экранопланов на волновом экране: 1 – струна; 2 – исследуемая модель; 3 – мотор

В этой схеме модель закрепляется на струне и движется параллельно экранирующей поверхности под действием центробежной силы. Поверхность экрана может быть волновой, при этом из влажного песка могут быть сформированы волны заданной формы, соответствующие заданному числу Струхала. Следует отметить, что использование подвижного волнового экрана в АДТ проблематично, особенно при проведении параметрических исследований. Простота реализации волнового экрана в ротативной машине является ее самым существенным преимуществом.

### Вывод

Таким образом, в статье проведен анализ некоторых экспериментальных методов определения аэродинамических характеристик экранопланов. Показано, что определение аэродинамических характеристик экранопланов в аэродинамических трубах требует больших энергетических мощностей, высокой квалификации исследователя, при этом методики проведения модельного эксперимента с экранирующими поверхностями имеют ряд ограничений. Снижение затрат на модельный эксперимент могут быть достигнуты использованием ротативной машины, при этом простота реализации волнового

экрана в ротативной машине является существенным преимуществом перед модельным экспериментом в аэродинамической трубе.

В дальнейшей работе предполагается обоснование основных технических характеристик ротативной машины.

### Список литературы

1. Белавин Н.И. Экранопланы (по данным зарубежной печати) / Н.И. Белавин. – Ленинград: Судостроение, 1977. – 228 с.
2. Анипко О.Б. Аэродинамический облик, радиолокационная и инфракрасная заметность самолетов военного назначения при их обнаружении: моногр. / О.Б. Анипко, В.Г. Башинский, Е.А. Украинец. – Запорожье: АО Моторсiч, 2013. – 250 с.
3. Украинец Е.А. Модернизация сверхзвуковой аэродинамической трубы Харьковского университета Воздушных Сил / Е.А. Украинец // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУПС, 2014. – № 4(17). – С. 31-37.
4. Определение аэродинамических характеристик модели экраноплана в аэродинамической трубе Т-1 Харьковского университета Воздушных Сил / Е.А. Украинец, А.П. Корниенко, В.А. Зимин [та ін.] // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 1. – С. 57-60.
5. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента: [учебн.] / А.М. Харитонов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – Ч. 1: Аэродинамические трубы и газодинамические установки. – 220 с.
6. Мартынов А.К. Экспериментальная аэродинамика: [учебн.] / А.К. Мартынов. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1950. – 480 с.
7. Белинский В.Г. Экспериментальные исследования движения крыла вблизи плоских и взволнованных границ раздела / В.Г. Белинский, П.И. Зинчук // Гидромеханика. – Вып. 72. – 1998. – С. 30-45.

Поступила в редколлегию 15.05.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.В. Логинов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### РОТАТИВНА МАШИНА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕКРАНОПЛАНІВ

Є.О. Українець

*Обґрунтовані варіанти ротативної машини для визначення аеродинамічних характеристик экранопланів. Показано, що визначення аеродинамічних характеристик экранопланів в аеродинамічних трубах вимагає великих енергетичних потужностей, високої кваліфікації дослідника, при цьому методики проведення модельного експерименту з поверхнями екрану мають обмеження. Зроблено висновок, що зниження витрат на модельний експеримент, врахування хвильового екрану можуть бути досягнуті використанням ротативної машини.*

**Ключові слова:** ротативна машина, аеродинамічна труба, аеродинамічні характеристики, модельний експеримент, поверхня екрану.

### ROTATIVE MACHINE FOR DETERMINING THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AERODYNAMIC AIR-CUSHION VEHICLES

E.A. Ukrainets

*Are substantiated the versions of rotative machine for determining the primary aerodynamic characteristics of aerodynamic air-cushion vehicles. It is shown that the determination of the aerodynamic characteristics of aerodynamic air-cushion vehicles in the wind tunnels requires large energy power, high qualification of researcher, in this case the procedures of simulation experiment with the shielding surfaces have of limitations. Made conclusion about the fact that reduction in the expenditures for simulation experiment, calculation of wave screen they can be achieved by the use of a rotative machine.*

**Keywords:** rotative machine, wind tunnel, aerodynamic characteristics, technical characteristics, a model experiment.