



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.5.018.71
EDN CEZAAM

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКРАНОПЛАНА С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Н.Е. Румянцев, студент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155 Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: rnikita00@gmail.com

В.П. Морозов, канд. техн. наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155 Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: vpmorozovnn@mail.ru

Н.В. Калинина, канд. техн. наук, доцент, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603155 Россия, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

В настоящей статье предложен комбинированный вариант исследования характеристик проектируемого экраноплана, объединяющий результаты цифрового (с CAD-моделями) и физического экспериментов в целях исследования летных характеристик перспективного амфибийного экраноплана с шасси на воздушной подушке.

В статье представлены описание и параметры свободнолетающих и связанных масштабных моделей летательных аппаратов, выбран способ исследований масштабных моделей и дано краткое описание экспериментальных работ с катапультной и радиоуправляемой моделями экраноплана с шасси на воздушной подушке.

В рамках цифрового эксперимента создана цифровая модель экраноплана в формате 3D и осуществлены аэродинамические исследования этой модели в системе автоматизированного проектирования. Полученная аэродинамика CAD-моделей (визуализация обтекания поверхностей экраноплана и значения различных сил с моментами) подтвердила рациональный выбор аэрогидродинамической компоновки амфибийного экраноплана.

Ключевые слова: экраноплан, экранный эффект, аэродинамика, модельные испытания, свободнолетающие модели, кордовые испытания, испытания в системе автоматизированного проектирования.

Для цитирования: Румянцев Н.Е. Способы определения характеристик экраноплана с помощью различных видов экспериментов / Н.Е. Румянцев, В.П. Морозов, Н.В. Калинина // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 80. — С. 32 — 49. EDN CEZAAM.

METHODS FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF AN EKRANOPLAN USING VARIOUS TYPES OF EXPERIMENTS

N.E. Rumyantsev, Student, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Minina, 24, e-mail: rnikita00@gmail.com

V.P. Morozov, PhD, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Minina, 24, e-mail: vpmorozovnn@mail.ru

N.V. Kalinina, PhD, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 603155 Russia, Nizhny Novgorod, ul. Minina, 24, e-mail: nvk5133@mail.ru

In this article, an attempt is made to combine the results of a physical and digital experiment with CAD models in order to study the flight characteristics of a promising amphibious ekranoplan with an air cushion landing gear.

The article provides a general description of free-flying and associated scale models of aircraft, a method for studying scale models is selected and a brief description of experimental work with ejection and radio-controlled models of an ekranoplan with an air cushion landing gear is given.

As part of the digital experiment, a 3D digital model of an ekranoplan was created and aerodynamic studies of this model were carried out in the CAD system. The obtained results of external visual flow around CAD models confirmed the rational choice of the aerohydrodynamic layout of the amphibious ekranoplan.

Key words: *ekranoplan, ground effect, aerodynamics, model tests, free-floating models, cord tests, tests in the computer-aided design system.*

For citation: Rumyantsev N.E., Morozov V.P., Kalinina N.V. Methods for determining the characteristics of an ekranoplan using various types of experiments. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 80. P. 32 — 49. EDN CEZAAM. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Сфера экранопланостроения проходит точно такие же этапы развития, как и отрасли автомобилестроения, авиастроения, вертолетостроения и т.д. В начале «жизни» новые отрасли промышленности требуют больших финансовых вложений, то есть зачастую новые виды сложной или высокотехнологичной техники изначально экономически нецелесообразны. На данный момент наиболее актуальным способом уточнения характеристик проектируемого аппарата является сочетание теоретического метода с дорогостоящим и тем не менее необходимым экспериментальным. С целью удешевления между теоретическим проектированием и экспериментальным уточнением предлагается ввести промежуточный этап — предмодельные испытания (исследования модели в различных системах автоматизированного проектирования), что позволило бы сэкономить миллионы рублей.

Предмодельный этап позволяет уменьшить число модельных испытаний, а следовательно, расходы на постройку моделей, потребление электроэнергии на испытательные стенды, расходы на транспортировку модели (если не производится самим конструкторским бюро или институтом) и т.п. Предварительные испытания в программных обеспечениях дают возможность примерно наметить оптимальную конструкцию и выявили бы наиболее очевидные недостатки проекта.

Более того, предмодельные испытания в программных обеспечениях позволяют сэкономить время проектирования, так как постройка модели и ее испытания занимают время и проводятся (зачастую) в рабочее время, расчет в программах можно проводить 24 часа в сутки.

Стоимость всего комплекса испытаний по курсу для одного проекта экраноплана в 2016 г. составила 100 млн рублей [1, с. 103, 105]. Если учесть, что проект на этапе проектирования подвергается корректировкам, что конструкторское бюро проводит научно-исследовательские работы с целью модернизации аппаратов и разрабатывает новые концепции, то стоимость выходит в несколько сот или несколько миллиардов рублей (точно сложно сказать).

Относительно недавно экранопланы вновь стали притягивать к себе внимание. После ряда неудач в сфере советского экранопланостроения тематику окрестили опасной и неперспективной. Данное мнение тормозит развитие тематики и противодействует решению проблем в нашей стране.

История создания экранопланов описана, например, в источниках [2] и [3]. На сегодняшний день ряд стран (Германия, Франция, Великобритания, США, Китай, Южная Корея, Сингапур, Иран, ОАЭ, Япония и др.) продолжают работу в сфере экранопланостроения [4, с. 3].

Так, Сингапур с 2025 г. будет осуществлять коммерческие перевозки в Турции [5], свой экраноплан разрабатывают США [6], а Франция создает другие виды транспорта на схожем эффекте (динамическая воздушная подушка) [7].

На данный момент командой студентов НГТУ им. Р.Е. Алексеева проведены модельные испытания с катапультной моделью, свободнолетающей радиоуправляемой моделью, со стендом шасси на воздушной подушке в буксировочном бассейне Центрального конструкторского бюро по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева. Проект был продемонстрирован Фонду содействия инновациям в октябре — ноябре 2023 г. (был выделен небольшой студенческий грант на реализацию проекта), на конференции в МАИ в ноябре 2023 г., на Всемирном фестивале молодежи в Сочи в марте 2024 г., на различных конференциях в НГТУ им. Р.Е. Алексеева в 2023 — 2025 гг.

Задача исследования состоит из нескольких пунктов:

- 1) произвести анализ видов испытаний в сферах авиастроения и судостроения с целью их применения для проверки проектируемого аппарата на соответствие его заявленным и требуемым параметрам;
- 2) проверить, насколько точно программа учитывает влияние экранного эффекта на проектируемый аппарат (в данной статье сравнение производится только с теоретическими расчетом массы аппарата);
- 3) произвести анализ первого приближения (т.е. грубая оценка со значительными погрешностями) с целью оценки достоверности и точности полученных результатов;

4) произвести визуализацию аэродинамики и оценить ее оптимальность (влияние завихрений на горизонтальное оперение, наличие и число локальных завихрений, концентраторов высоких давлений, срывов потока и др.).

В дальнейшем были найдены чертежи экраноплана «Волга-2» и результаты продувок. В последующих статьях будет произведена верификация продувок в системе автоматизированного проектирования с результатами продувки модели в трубе.

1. КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СО СВОБОДНОЛЕТАЮЩИМИ МОДЕЛЯМИ

Процесс создания летательных аппаратов, к которым относятся и экранопланы, всегда опирается на обширные экспериментальные исследования.

После Второй мировой войны, в борьбе за прогресс, многие страны стали использовать свободнолетающие модели самолетов, управляемые по радио. Для них создавались специальные миниатюрные двигатели, датчики и специальное оборудование для регистрации полетных параметров.

При исследовании летных характеристик военного самолета XF фирмы «Локхид» половину всех данных получили путем испытаний управляемых моделей, сбрасываемых на большой высоте. С помощью летающих моделей были получены данные для ряда самолетов: Republic XF-91 Thunderceptor, Convair XF-92, Douglas F4D Skyray, Bell X-2, Douglas DC-8 Douglas D-558-1 Skystreak.

Вопросы, исследуемые методом свободно летающих моделей, очень разнообразны: вопросы интерференции, бафтинга, управляемость на всех режимах, работа воздухозаборников, критические режимы полета до сваливания, отработывались различные взлетно-посадочные устройства, гидролыжи, подводные крылья, различные отказы и т.д.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКРАНОПЛАНОВ И МОДЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА СТЕНДАХ. ВИДЫ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Эксперименты, проводимые на масштабных моделях, допустимо разделить на два вида: со связанными моделями и со свободнолетающими. Связанные модели каким-либо образом прикреплены к испытательному оборудованию, например, модель в аэродинамической трубе закрепляется на специальной державке (рис. 1).

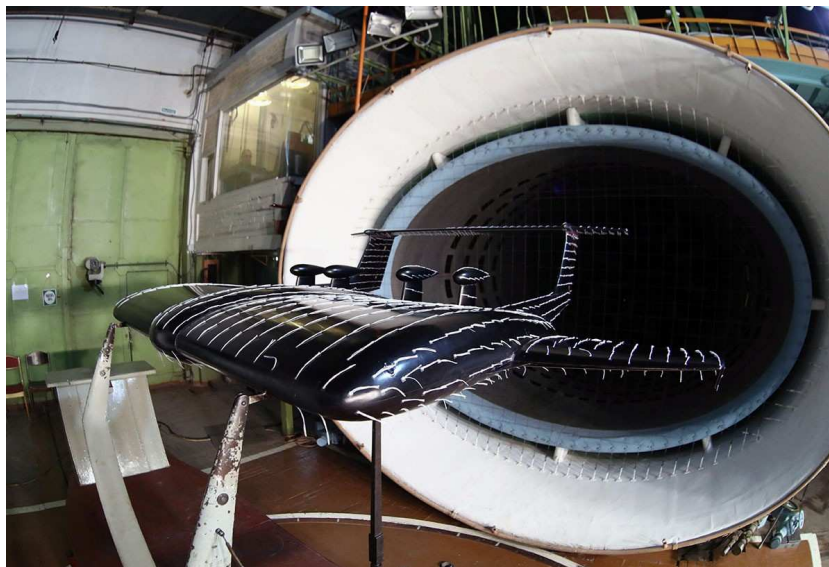


Рис. 1. Модель экраноплана, продуваемая из трубы¹

¹Изображение из открытого источника в сети интернет: <https://www.ridus.ru/vtoroe-prishestvie-kaspijskih-monstrov-299940.html> (дата обращения 09.02.2025).

Связанные модели для гидродинамических испытаний могут буксироваться в опытовом бассейне на специальной державке (рис. 2).



Рис. 2. Модель самолета с шасси на воздушной подушке в опытовом бассейне

За рубежом и в Центральном конструкторском бюро по судам на подводных крыльях (Россия) широко использовался метод буксировки гидродинамических моделей на специальной штанге, закрепленной на скоростном катере (рис. 3). Модель, двигаясь на расстоянии от штанги, имела возможность свободного перемещения по высоте и тангажу.



Рис. 3. Буксировка модели за скоростным катером на штанге²

²Изображение из открытого источника в сети интернет: <https://cz.pinterest.com/pin/test-model-of-the-ekranoplan-302726406211051635/> (дата обращения 09.02.2025).

В закрытых бассейнах часто проводились исследования на моделях или даже стендах, моделирующих нижнюю гидродинамическую часть летательного аппарата. Такой стенд показан на рис. 4 [8, 9].

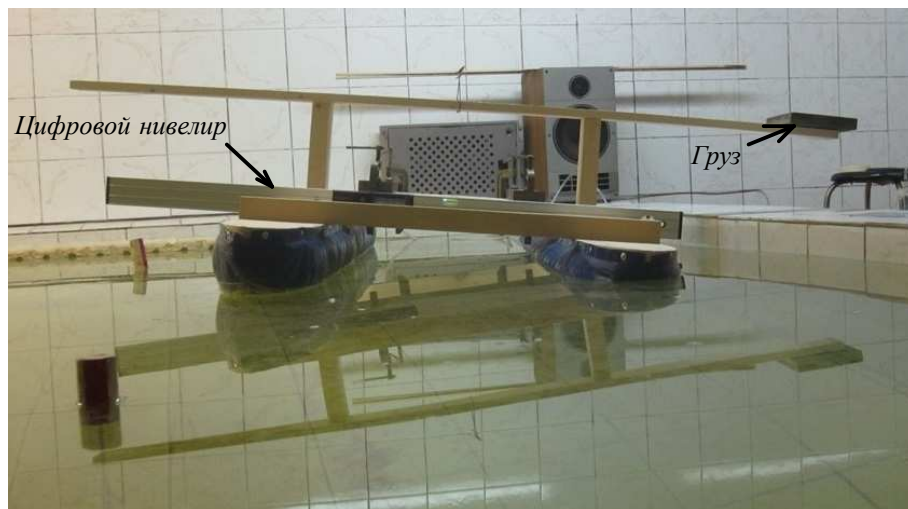


Рис. 4. Исследование остойчивости пневмобаллонного шасси на воде в бассейне

2.1. Достоинства и недостатки экспериментов и получаемых результатов при испытаниях связанных моделей.

К связанным моделям можно отнести:

- а) трубные модели;
- б) буксируемые модели (как в опытовом бассейне, так и на свободной привязке на штанге скоростного катера);
- в) кордовые модели (модели, движение которых в полете по кругу ограничивается кордом, или вращающейся в горизонтальной плоскости балкой).

Испытания в аэродинамических трубах позволяют достаточно быстро получать все безразмерные аэродинамические характеристики модели. Для испытаний моделей экранопланов в трубе устанавливается подвижный перфорированный экран с отсосом пограничного слоя или зеркальная ему модель.

Гидродинамические характеристики моделей оцениваются в опытовом бассейне с достаточной точностью для построения зависимостей, для соблюдения требований нормативных документов при создании техники подобного рода.

Кордовые модели, так же как буксируемые катером, могут быть двух видов: свободнолетающая на корде (струне) и жестко привязанная к консольной балке-крылу. Достоинства и недостатки связанных моделей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Достоинства и недостатки связанных моделей экранопланов

Параметры	Трубная модель	Буксируемая в опытовом бассейне модель	Кордовая свободная модель
Ограничения по массе модели	По прочностным ограничениям державок	По прочностным ограничениям державок телеги	Согласно масштабу модели
Ограничения по габаритам модели	По размерам рабочей части трубы	По нормам РДК-11 и согласно правилам в опытовом бассейне	Пропорционально длине корды
Ограничения по скорости полета	Не более скорости потока в трубе	Не более скорости буксировочной телеги	Зависят от мощности двигателей модели
Питание модели от внешних источников энергии	Возможность подвода энергии от внешних источников	Возможность подвода энергии от внешних источников	Нет, в основном от автономных бортовых источников
Съем информации	Максимально полный	Полный	Ограниченный
Точность информации	Точная	Точная	Качественная ограниченная
Стоимость модели	Высокая	Средняя	Низкая
Стоимость оборудования	Высокая	Высокая	Низкая
Возможность видео-фото съемки	Есть	Есть	Есть

2.2. Достоинства и недостатки экспериментов и получаемых результатов при испытаниях свободнолетающих моделей.

Свободнолетающие модели — это модели, способные осуществлять полет без связи с любым видом носителя, буксировщика или конструкцией аэродинамической трубы.

К свободнолетающим моделям можно отнести катапультные и радиоуправляемые модели самолетов, гидросамолетов и экранопланов.

Катапультные исследовательские модели экранопланов, как правило, не имеют маршевых двигателей. Задача этих моделей заключается в предварительном определении центровки при определенном сочетании балансирующих углов крыла и оперения. На рис. 5 показана легкая катапульта простейшего арбалетного типа с резиновым силовым жгутом в качестве силового элемента.

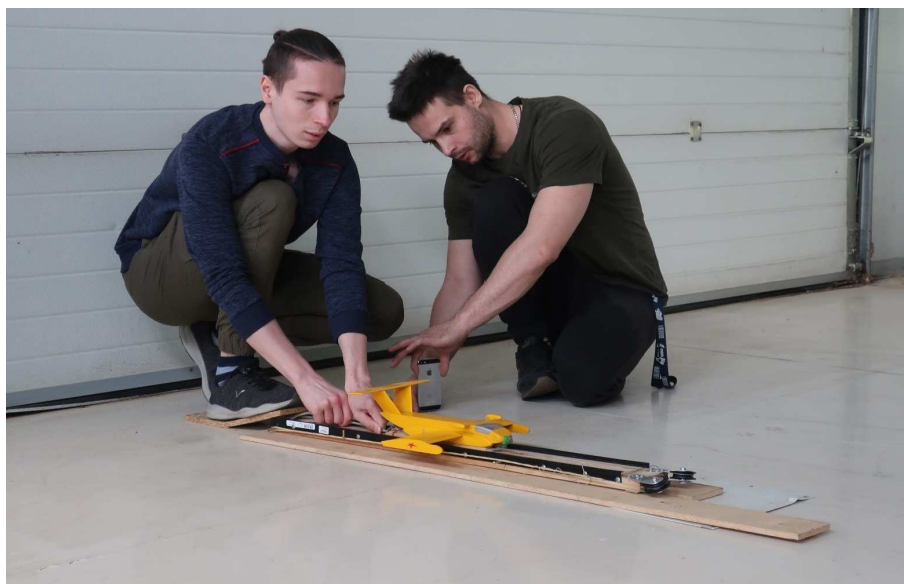


Рис. 5. Катапульта с легкой моделью экраноплана

Запуск катапультных моделей происходит в помещении для исключения влияния порывов ветра на модель.

На рис. 6 показана радиоуправляемая модель экраноплана с шасси на воздушной подушке в полете на корде. Модель имеет два маршевых электромотора с воздушными винтами и одним электроклапаном для создания воздушной подушки под фюзеляжем. Установка свободнолетающей модели на корду позволяла более точно замерять скорость, тангаж и высоту полета.



Рис. 6. Радиоуправляемая модель экраноплана с шасси на воздушной подушке

Преимущества получаемых результатов со свободнолетающей моделью по сравнению со связанной заключаются в следующем:

- 1) масштаб модели может быть больше по сравнению с трубными испытаниями, а приведение результатов испытаний к натурным, вследствие этого, достовернее;
- 2) можно без особого труда решать многие вопросы (безопасности, управляемости на различных режимах, аэродинамических характеристик, вибрации и др.), возникающие в действительном полете, например, определение летных характеристик и т.п.;
- 3) на динамически подобных моделях можно исследовать нестационарные процессы;
- 4) исследования на свободнолетающих моделях позволяют изучить спектр перекрестных проблем (например, влияние нагнетателя воздушной подушки на моментные характеристики, проходимость и пр.), которые можно выявить только на различных специализированных стендах и невозможно получить ни в трубе, ни в бассейне.

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ СО СВОБОДНОЛЕТАЮЩЕЙ РАДИОУПРАВЛЯЕМОЙ МОДЕЛЮ

Основными объектами экспериментальных исследований были катапультная модель, выполненная в масштабе 1:96 к натурному экраноплану, и радиоуправляемая модель в масштабе 1:24. Основные характеристики моделей даны в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры моделей

№	Основные параметры	Катапультная модель	Радиоуправляемая модель
1	Длина модели	360 мм	1450 мм
2	Размах крыла модели	250 мм	1000 мм
3	Площадь крыла	312 см ²	5000 см ²
4	Площадь воздушной подушки	Нет воздушной подушки	1408 см ²
5	Масса модели	92 г	3700 — 3900 г
6	Маршевые двигатели	нет	2 э/д по 300 Вт
7	Двигатель воздушной подушки	нет	1 э/д 300 Вт

Испытания катапультной модели позволили определить сбалансированные углы атаки крыла и оперения при предполагаемом диапазоне рабочих центровок.

Испытания радиоуправляемой модели делятся на три типа: статические, динамические и кордовые.

К статическим испытаниям относятся замеры стартовой тяги винтов в зависимости от положения регулятора пульта управления, давление, создаваемое вентилятором воздушной подушки в зависимости от положения пульта управления, связь тяги маршевых двигателей и давления в камере воздушной подушки с оборотами винтов и вентилятора, оценка взлетной массы и центровки, влияние вентилятора на моментные характеристики.

К динамическим испытаниям относится определение крейсерской скорости, скорости отрыва, оценка дистанции разбега с выпущенными и убранными закрылками, влияние угла атаки (подрыва экраноплана) на подъемную силу и длину разбега; определение маневренности экраноплана на различных скоростях; изучение влияния тяги воздушных винтов на дистанцию разбега и др.

Статические испытания проводились на специальном стенде, рис. 7.

Взвешивание и определение центровки проводилось с помощью динамометров № 1 и № 2 с неработающим вентилятором воздушной подушки. Центровка вычислялась по результатам взвешивания по формуле:

$$X = \frac{P_2}{P_1 + P_2} L - A,$$

где P_1 — показания динамометра № 1;

P_2 — показания динамометра № 2;

L — фиксированное расстояние между динамометрами (770 мм);

A — расстояние от носка крыла и вертикальной оси динамометра № 1 (77 мм).

Масса модели полная определялась формулой:

$$m_0 = P_1 + P_2.$$

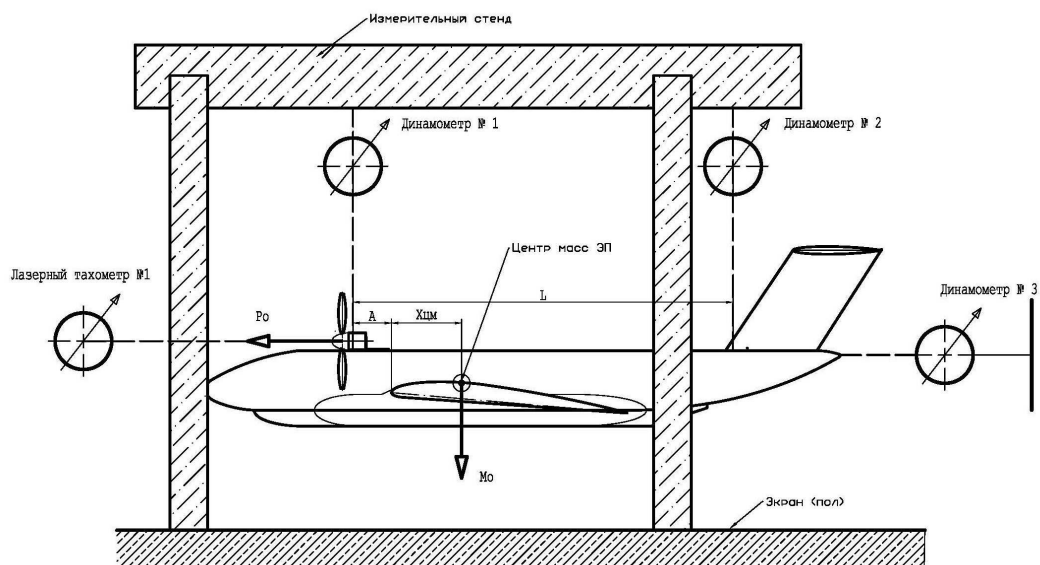


Рис. 7. Стенд для замера стационарных характеристик

При работающем вентиляторе разность между взвешиванием модели без воздушной подушки и с работающей воздушной подушкой позволяла определить вертикальную реакцию вентилятора вдали от экрана.

Динамометром № 3 определялась стартовая тяга маршевых двигателей в зависимости от положения регулятора на пульте управления, при этом лазерным бесконтактным тахометром определялись обороты воздушных винтов (рис. 8).



Рис. 8. Устройство для замеров массы, центровки и тяги экраноплана

Испытания радиоуправляемой модели проводились на снегу и асфальте. Схема испытания показана на рис. 9.

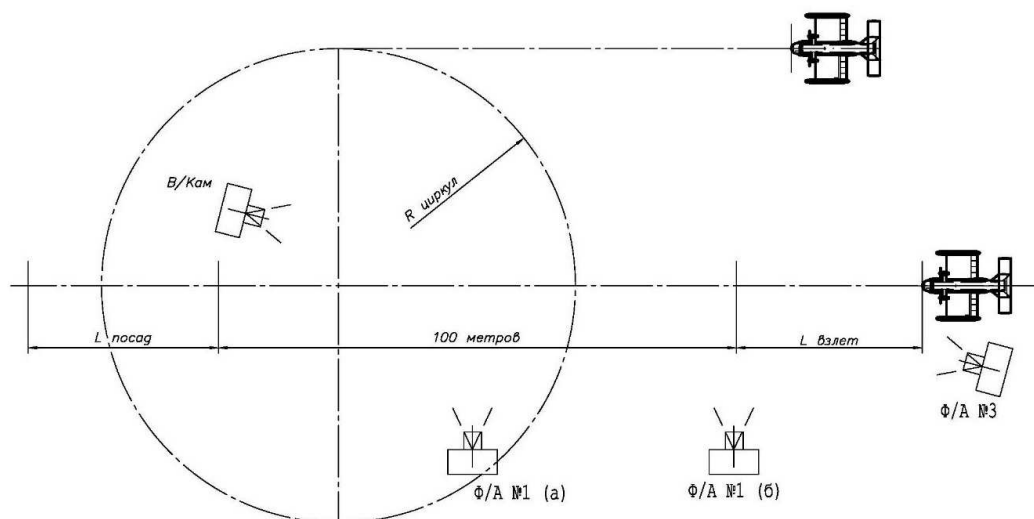


Рис. 9. Обобщенная схема испытаний радиоуправляемой модели по прямой и по хорде

Свободный полет модели при различных центровках позволил оценить устойчивость, характеристики маневрирования, скорость полета, дистанцию разбега. При стартовой тяговооруженности около 0,5 разбег модели на снегу составлял около 15 — 20 м, скорость полета, замеренная GPS-трекером, — около 55 км/ч. Устойчивый полет модели на экране на высоте 0,3 — 0,5 хорды крыла осуществлялся при снижении стартовой тяговооруженности примерно вдвое.

Исследования показали, что во время включения воздушной подушки экраноплан полностью разгружался и сила трения на асфальте отсутствовала.

При неработающей воздушной подушке модель при максимальной тяге не могла взлететь с асфальта.

На рис. 10 представлен полет модели в работающем вентиляторе, который работает на нагнетание воздушной подушки.



Рис. 10. Полет модели на экране с работающим вентилятором

Производились исследования длины и времени разбега. Модельные испытания показали лучший результат, чем теоретические расчеты (в частности, аэродинамические характеристики на различных режимах эксплуатации подтвердили отсутствие существенного влияния вихрей от скегов на горизонтальное оперение и др.). Итоги дают возможность полагать, что длина и время разбега натурного экраноплана будут значительно меньше расчетных.

На снегу и асфальте оценивалась управляемость экранопланом на рулежных режимах и в полете. На верхнюю плоскость крыла дополнительно были установлены пластины-интерцепторы и оценивалось влияние их дифференцированного выпуска на управляемость модели. Ожидаемого эффекта получено не было.

Кордовые испытания этой же модели оказались более информативными. Практически перед каждым полетом модель взвешивалась и контролировалась центровка. Этот вид испытания позволял точно определять скорость, дистанцию разбега с выпущенными и убранными закрылками, скорость отрыва, тангаж, высоту полета и в отдельных случаях влияние центровки и качества радиоуправления оператором на динамику полета.

4. МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

После внесения всех поправок и согласования изменений с научным руководителем началось проектирование новой 3D-модели в системе автоматизированного проектирования. Темой исследований являлся четырехмоторный экраноплан взлетной массой 642 т, выполненный по аэродинамической схеме, подобной исследуемой на радиоуправляемой модели. Итоговый вид экраноплана представлен на рис. 11.

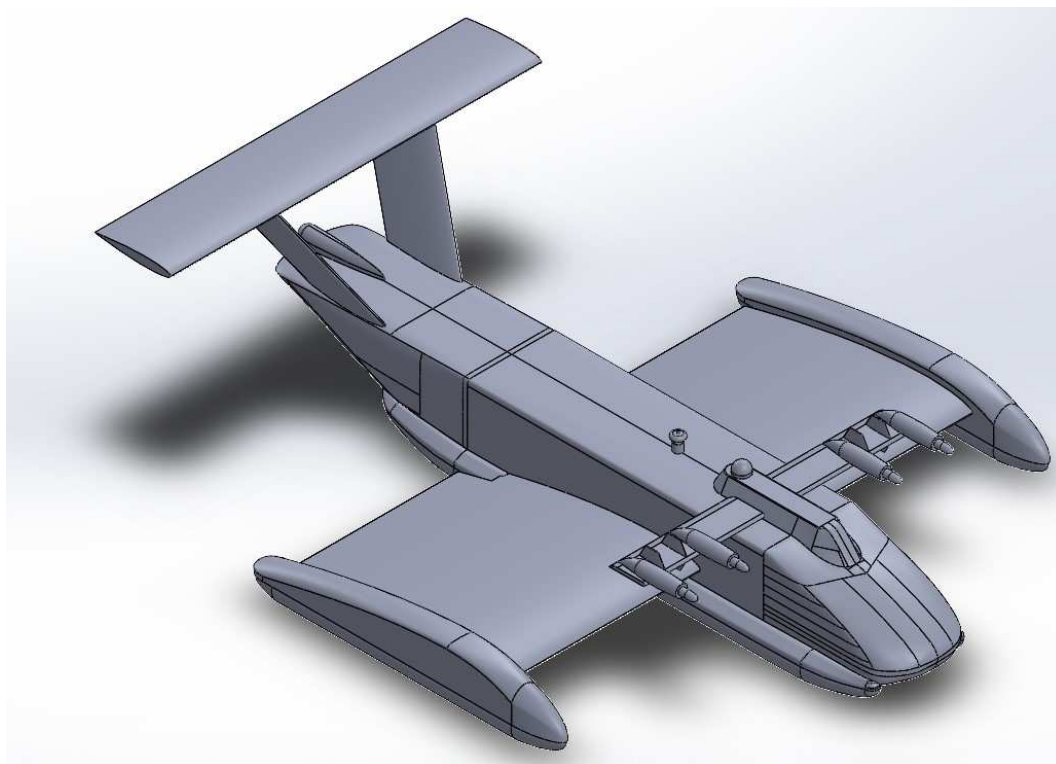


Рис. 11. Вид ¾-й проекции экраноплана

4.1. Продувка и результаты расчетов по результатам продувки моделей.

Результаты расчета представлены в табл. 3. Оценивались только параметры сопротивления и подъемной силы, так как проверялась возможность программы учитывать экранный эффект, а также исследовалась оптимальность аэрогидродинамической компоновки.

Таблица 3

Значения, полученные при продувке модели экраноплана

Случай продувки	Подъемная сила, Н	Сила сопротивления, Н
Вблизи экрана ($h=4,5$ м; $\alpha=0^\circ$)	$3,943 \cdot 10^6$	$6,520 \cdot 10^5$
Вблизи экрана ($h=4,5$ м; $\alpha=4^\circ$)	$8,077 \cdot 10^6$	$1,126 \cdot 10^6$

По полученным значениям можно судить о том, что экранный эффект данный модуль учитывает. В случае тангажа в 4 градуса аппарат имеет подъемную силу примерно 8,1 МН, а вес в 6,5 МН, то есть при скорости 100 м/с и тангаже в 4 градуса аппарат будет набирать высоту. Можно уменьшать тангаж (что снизит лобовые сопротивления примерно в 1,5 раза) либо же лететь на большей высоте.

Визуализация аэродинамики представлена на рис. 12 — 14.

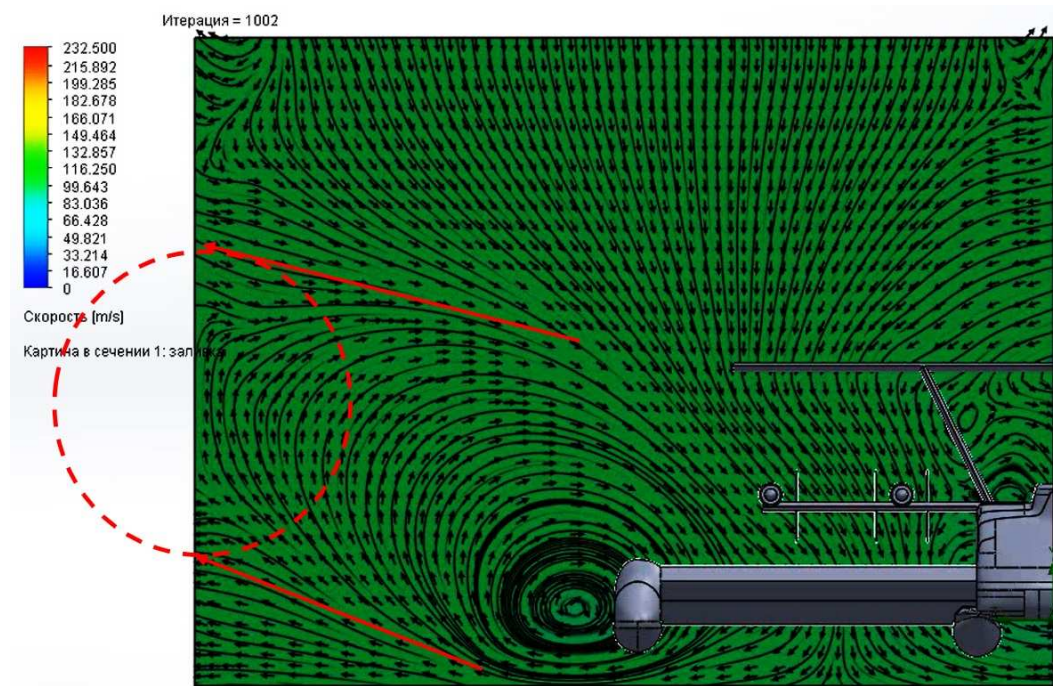


Рис. 12. Фронтальный вид на экраноплан при оценке образования завихрений

На данном рисунке отчетливо виден стеночный эффект, так как вихрь у концевой шайбы настолько большой, что его влияние распространяется до пределов расчетной области. При последующих продувках расчетная область была увеличена.

На других видах заметно образование еще трех завихрений за корпусом, они являются результатом завихрений от гондол двигателей, мест стыков фюзеляжа с вертикальным оперением и вертикального оперения с горизонтальным оперением. Проблема частично решается с помощью обтекателей, но их не удалось реализовать на этой модели, так как данной системе автоматизированного проектирования тяжело обрабатывать уже имеющуюся модель. На рис. 13 представлено завихрение, которое получается от гондол двигателей.

Был произведен отдельный расчет движения частиц и их реальное взаимодействие с корпусом экраноплана. Результат представлен на рис. 14.



Рис. 13. Вид сзади на экраноплан при оценке образования завихрений от гондол двигателей

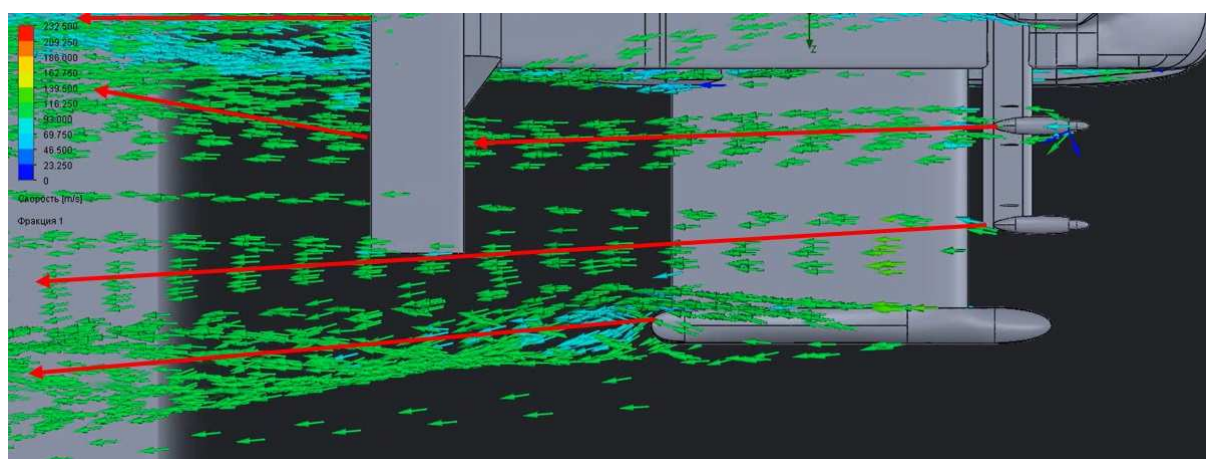


Рис. 14. Объемная картина реального движения частиц, вид сверху

Другие визуализации аэродинамики экраноплана представлены на рис. 15 — 17.

Источники [1] и [10] подтвердили оптимальность выбранных параметров расчета (расчетная область, оптимальное число расчетных ячеек, граничные условия и др.). Дальнейшие расчеты осуществлялись по аналогичному методу.

Стоит отметить, что не все удалось реализовать подобно источникам, в частности гексаэдрическую сетку. Для расчетов использовалась сетка из тетраэдров, она усложняет расчет (делает его дольше и требует больше вычислительных ресурсов), а также снижает точность полученных результатов (зачастую косвенно, так как приходится уменьшать число ячеек или конечных объемов, если расчет ведется по методу конечных объемов, а не по методу конечных элементов).

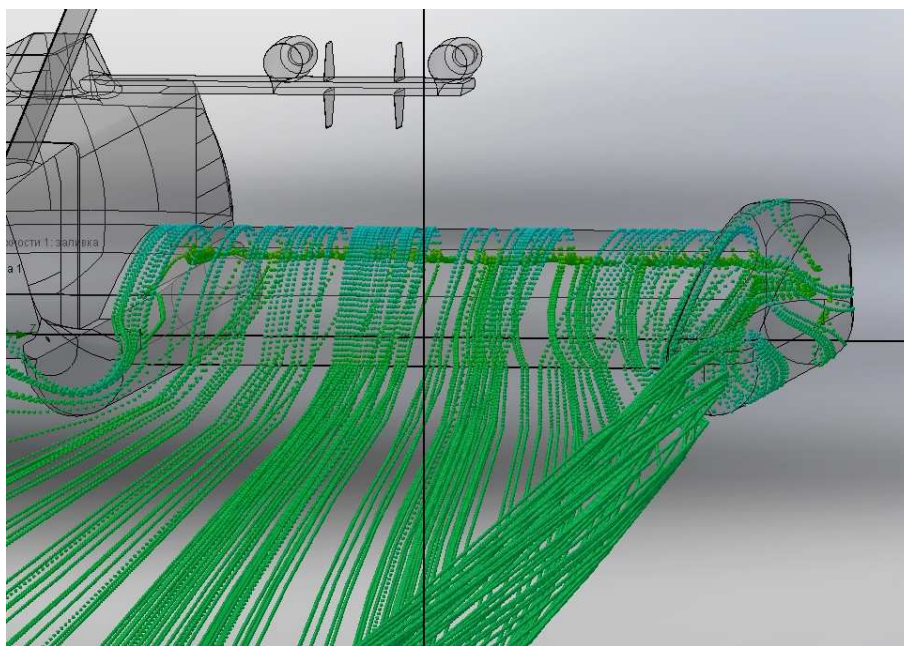


Рис. 15. Визуализация движения потока между баллоном и концевой шайбой

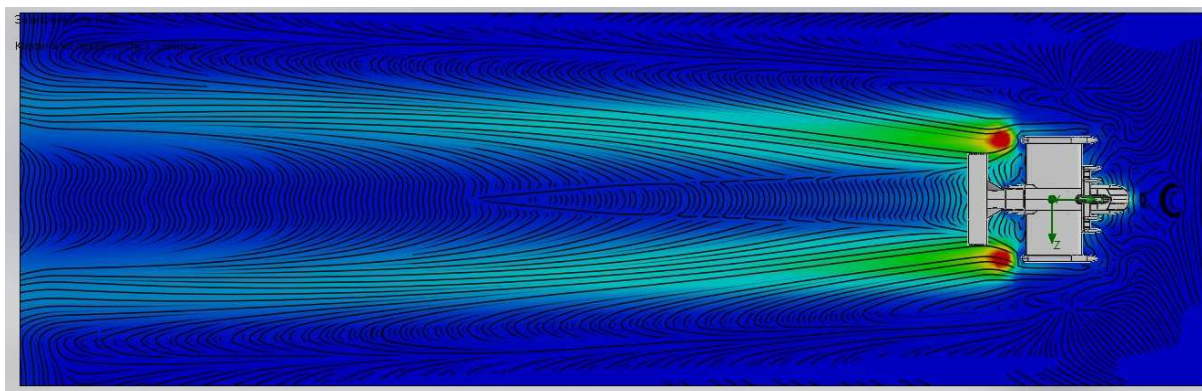


Рис. 16. Визуализация движения потоков и их возмущающее воздействие, вид сверху

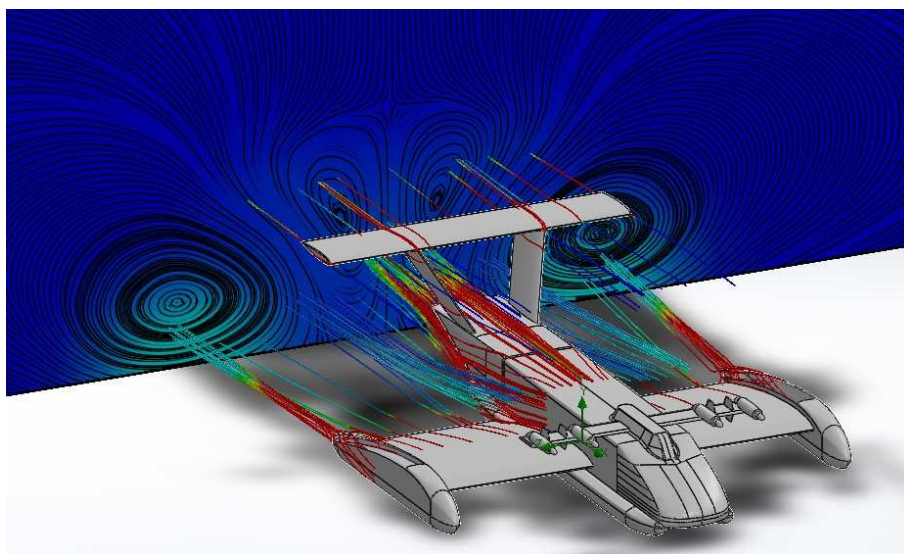


Рис. 17. Визуализация завихрений экраноплана

Взлетная масса исследуемого аппарата составляет 642 т. Аэродинамическая схема аналогична схеме радиоуправляемой модели. В табл. 4 представлены результаты продувки в системе автоматизированного проектирования. На рис. 18 — 23 представлены другие виды визуализации аэродинамики экраноплана.

Таблица 4

Результаты продувки с новыми граничными условиями

Случай продувки	Подъемная сила, Н	Сила сопротивления, Н
Вблизи экрана ($h=4,5$ м; $\alpha=0^\circ$)	$3,543 \cdot 10^6$	$5,727 \cdot 10^5$
Вблизи экрана ($h=4,5$ м; $\alpha=4^\circ$)	$7,992 \cdot 10^6$	$1,440 \cdot 10^6$
Вне экрана ($h=60$ м; $\alpha=0^\circ$)	$2,071 \cdot 10^6$	$3,236 \cdot 10^5$

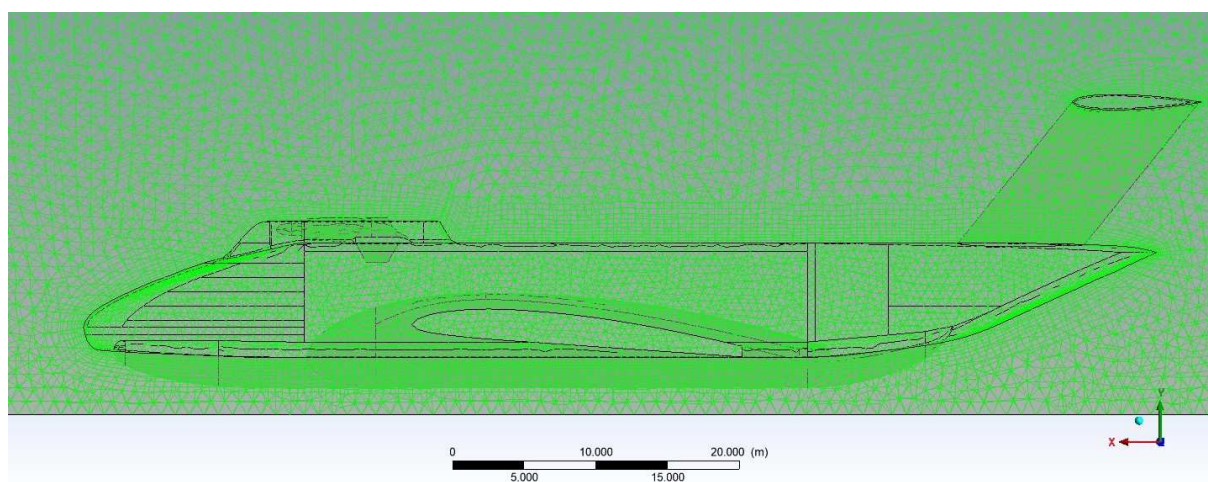


Рис. 18. Расчетная сетка экраноплана и окружающей области

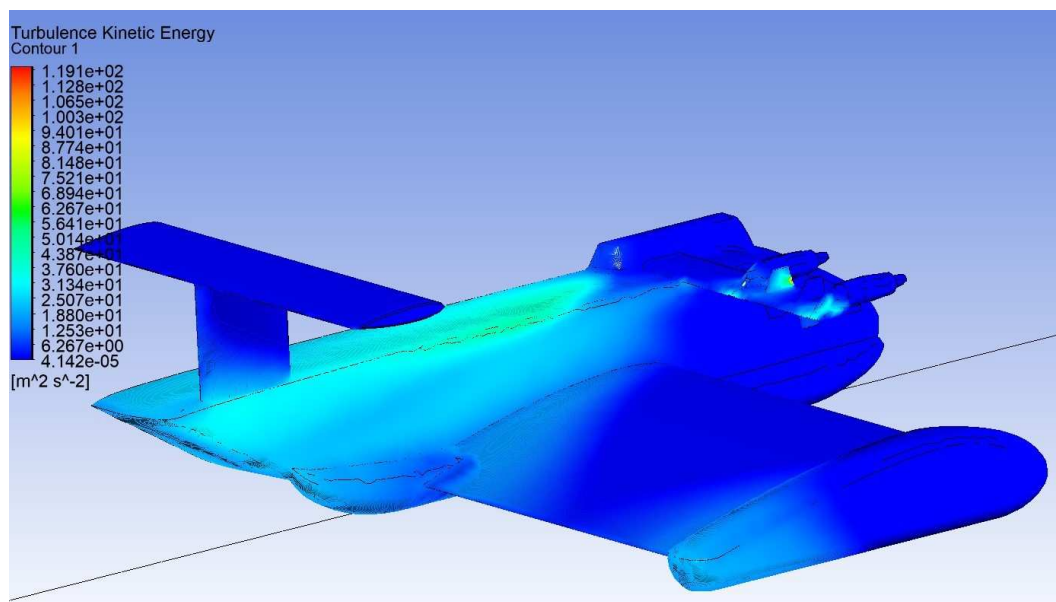


Рис. 19. Визуализация наибольших сопротивлений от завихрений (чем ярче оттенок, тем больше сопротивления)

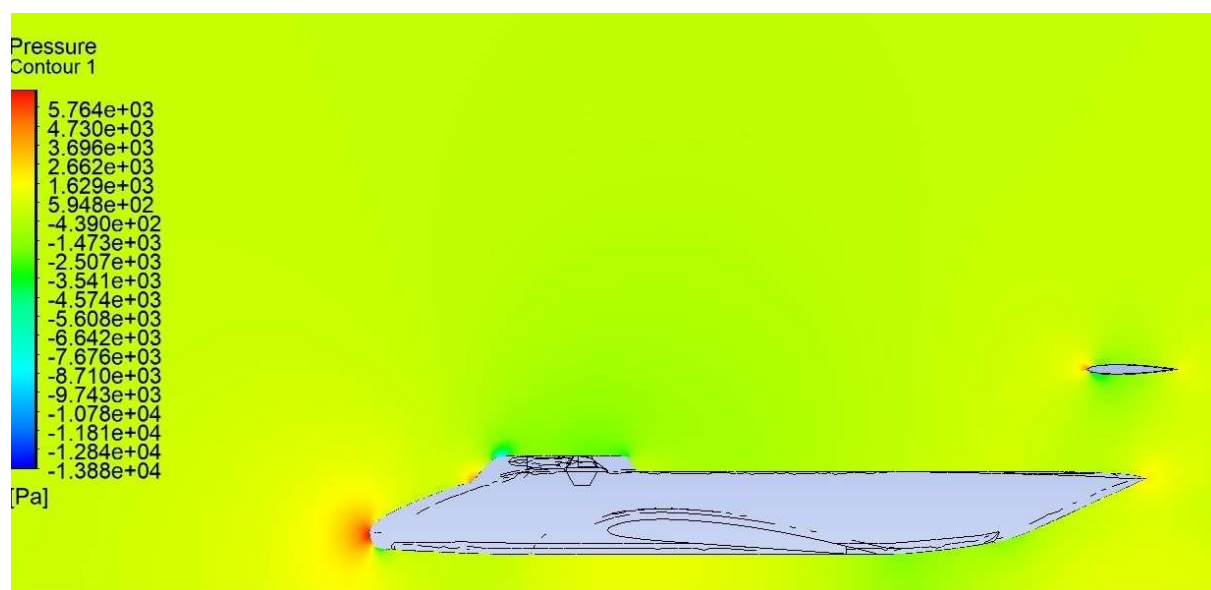


Рис. 20. Визуализация распределения давлений по контуру экраноплана

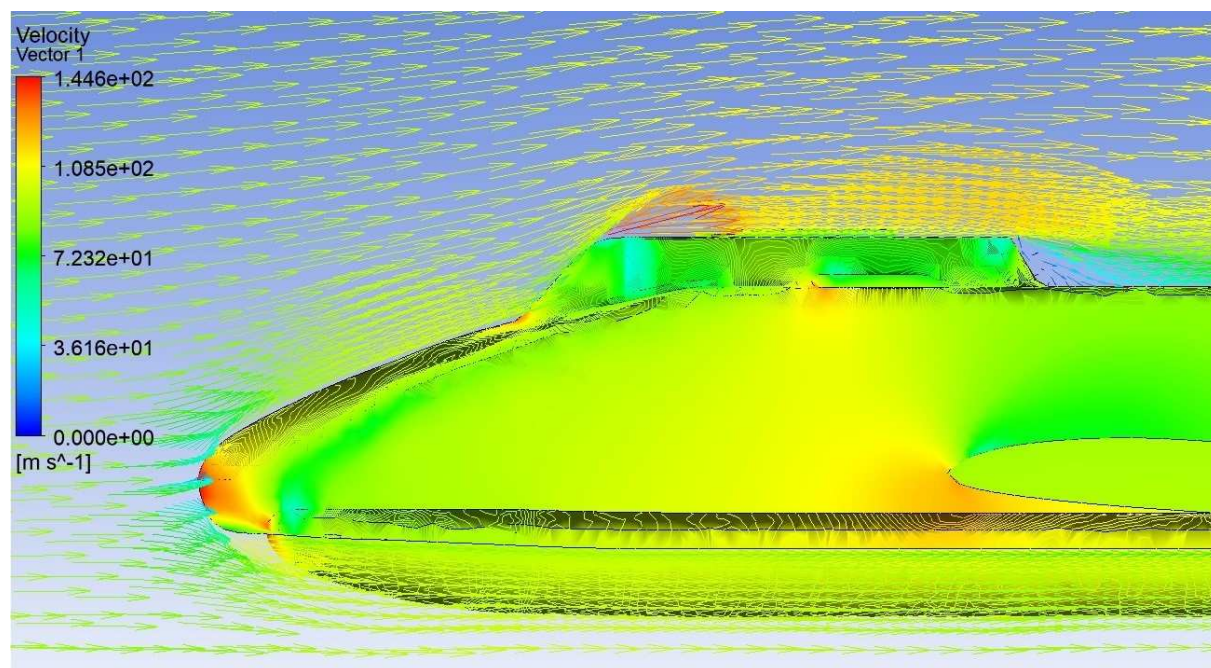


Рис. 21. Визуализация траекторий движения потоков

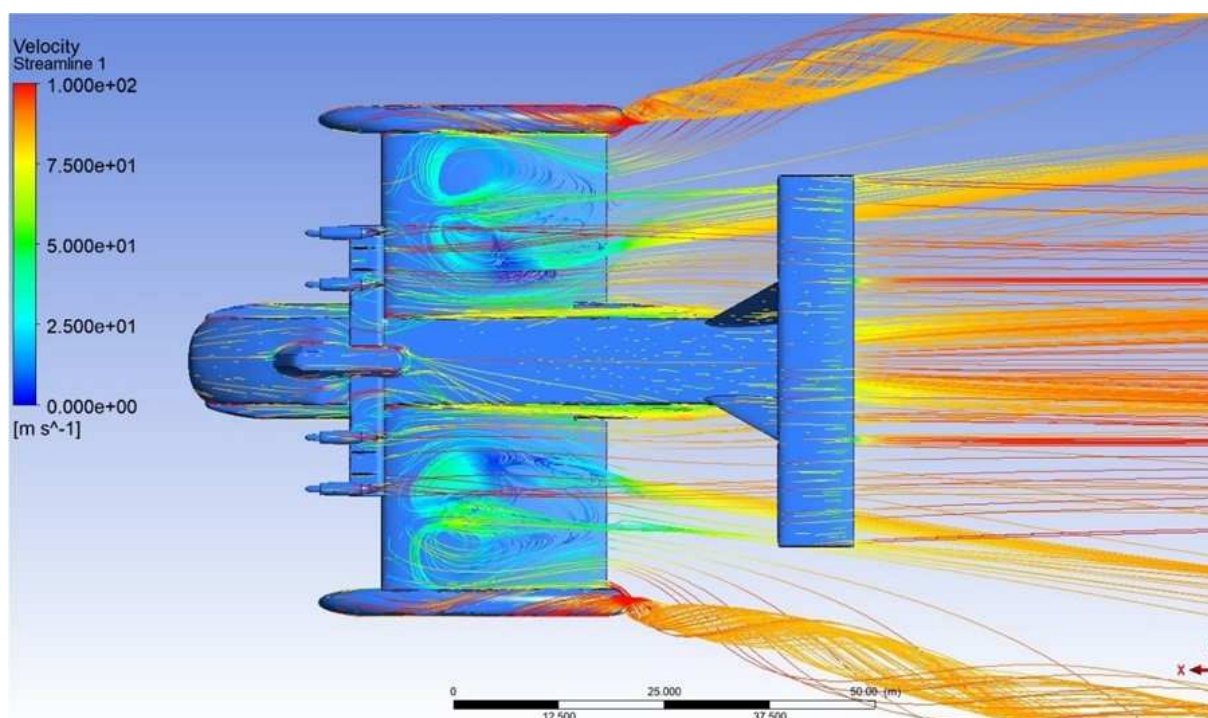


Рис. 22. Визуализация завихрений и срыва потока на крыле экраноплана

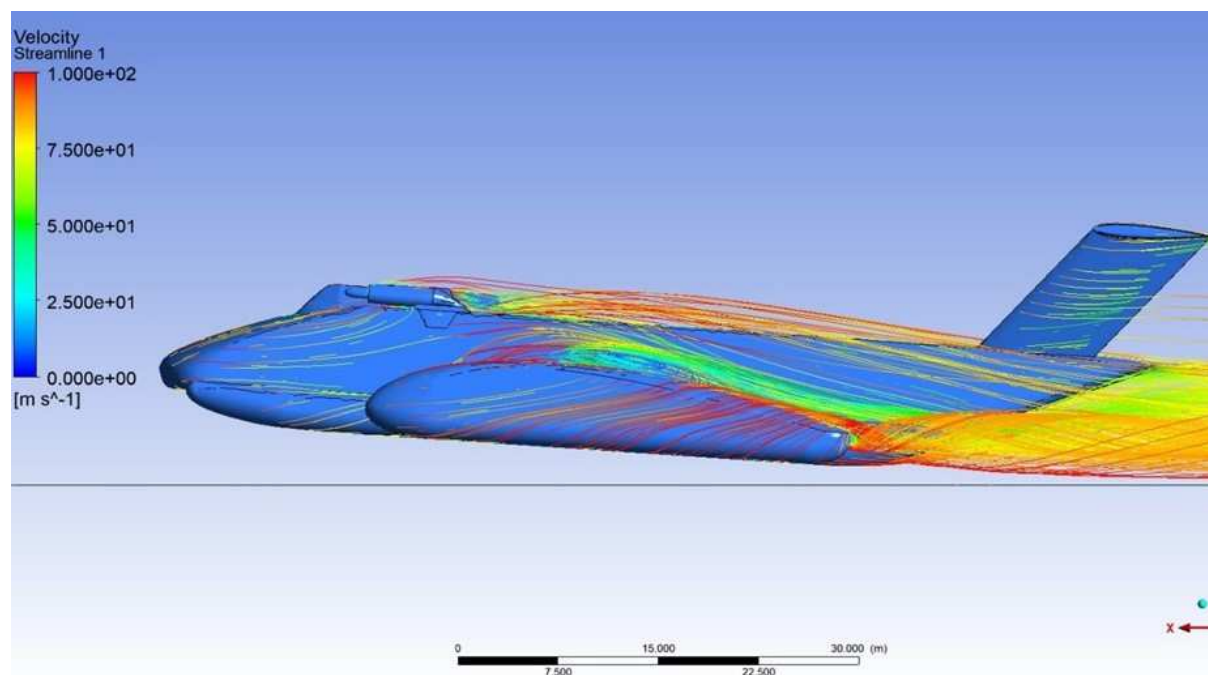


Рис. 23. Визуализация завихрений, вид сбоку

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания моделей на стендах, корде, катапульте и испытания свободнолетающей модели можно сочетать с испытаниями САД-моделей в системе автоматизированного проектирования, они дополняют друг друга, помогая получить недостающую информацию на начальных этапах (аванпроект, эскизный проект). Визуализация обтеканий позволяет заранее обнаружить проблемные зоны (срывы потоков, завихрения и их контакт с несущими поверхностями, явное избыточное сопротивление в местах контакта корпуса с обтекающей средой и др.), с которыми далее надо работать, чтобы оптимизировать аэродинамическую поверхность экраноплана и усовершенствовать его эксплуатационные характеристики.

Полученные данные и результаты исследований, представленные в источниках [1], [9], [10], свидетельствуют о том, что применение систем автоматизированного проектирования на начальных этапах проектирования позволяет определить первичные характеристики проектируемого аппарата (в данном случае речь идет об экранопланах, но данная методика может быть применима и к другим видам судов). На начальных этапах проектирования применение систем автоматизированного проектирования ускоряет и удешевляет доработку аппарата, что подтверждает исследования из источника [1, с. 103, 105], где представлена экономическая оценка применения систем автоматизированного проектирования (закупка лицензий, обучение персонала, постройка виртуальных моделей для испытаний) по отношению к модельным экспериментам (путь от постройки к экспериментам).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Февральских А.И. Разработка методики проектирования аэрогидродинамической компоновки амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на основе численного моделирования: дис. ... канд. техн. наук / А.И. Февральских. — Н. Новгород, 2017. — 175 с.
2. Кирилловых В.Н. История ЦКБ по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева. Т. 1. Ростислав Евгеньевич Алексеев в истории создания ЦКБ по судам на подводных крыльях / В.Н. Кирилловых, Т.Р. Алексеева, Ю.П. Чернигин. — Н. Новгород: Кварц, 2015. — 336 с.
3. Кирилловых В.Н. История ЦКБ по судам на подводных крыльях им. Р.Е. Алексеева. Т. 2. Боевые экранопланы конструктора Алексеева / В.Н. Кирилловых, А.А. Беляев, О.В. Салахова. — Н. Новгород: АО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева»; Кварц, 2020. — 304 с.
4. Ильин В.Е. Экранопланы / В.Е. Ильин // Техническая информация. — 2011. — Вып. 4 — 5. — 80 с. (Новости зарубежной науки и техники. Серия: Авиационная и ракетная техника.)
5. ST Engineering clinches launch customer for Wing-In-Ground AirFish // FlightGlobal. [Электронный ресурс] URL: <https://www.flightglobal.com/aerospace/st-engineering-clinches-launch-customer-for-wing-in-ground-airfish/157035.article> (дата обращения: 09.02.2025).
6. Экраноплан как конкурент Евростару. Старая идея обретает ренессанс и потенциал коммерческого применения в Европе. 20.06.2021 // Зелёная точка старта. [Электронный ресурс] URL: <https://greenstartpoint.ru/ekranoplan-kak-konkurent-evrostaru-staraya-ideya-obretaet-renessans-i-potenczial-kommercheskogo-primeneniya-v-evrope/> (дата обращения: 09.02.2025).
7. Во Франции построили катамаран, который взлетает над водой и почти не потребляет топлива. 24.07.2021 // novate [Электронный ресурс] URL: <https://novate.ru/blogs/240721/59890/> (дата обращения: 09.02.2025).
8. Болотин А.А., Попов А.Н., Чеботаев В.Ф. Изучение аэродинамических характеристик модели экраноплана / А.А. Болотин, А.Н. Попов, В.Ф. Чеботаев. — Н. Новгород: НГТУ, 2001. — 18 с.
9. Демешко Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке: в 2 кн. / Г.Ф. Демешко. — СПб.: Судостроение, 1992. — 269 с.
10. Блохин В.Н. Применение методов вычислительного эксперимента для определения аэродинамических характеристик экраноплана на крейсерском режиме движения / В.Н. Блохин, В.М. Прохоров, П.С. Кальясов, А.К. Якимов и др. // Математическое моделирование. Оптимальное управление методами вычислительного эксперимента для определения. — 2012. — № 3. — С. 147 — 154.
11. Wang H. Computational aerodynamics and flight stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft / H. Wang, C.J. Teo, B.C. Khoo, C.J. Goh // Procedia Engineering. — 2013. — Vol. 67. — P. 15 — 24.

REFERENCES

1. Fevralskikh A.I. Razrabotka metodiki proektirovaniya aerogidrodinamicheskoi komponovki amfibiinogo sudna na vozduшной podushke s aerodinamicheskoi razgruzkoi na osnove chislennogo modelirovaniya [Development of a methodology for designing the aerohydrodynamic layout of an amphibious hovercraft with aerodynamic unloading based on numerical modeling: PhD thesis]. Nizhny Novgorod, 2017. 175 p.
2. Kirillov V.N., Alekseeva T.R., Chernigov Yu.P. Istoriya TsKB po sudam na podvodnykh kryl'yakh im. R.E. Alekseeva. T. 1. Rostislav Evgen'evich Alekseev v istorii sozdaniya TsKB po sudam na podvodnykh kryl'yakh [The history of the Central design bureau for hydrofoil vessels named after R.E. Alekseev. Vol. 1. Rostislav Evgenievich Alekseev in the history of the creation of the Central design bureau for hydrofoil vessels]. Nizhny Novgorod: Quartz, 2015. 336 p.
3. Kirillov V.N., Belyaev A.A., Salakhova O.V. Istoriya TsKB po sudam na podvodnykh kryl'yakh im. R.E. Alekseeva. T. 2. Boevye ekranoplany konstruktora Alekseeva [The history of the Central design bureau for hydrofoils named after R.E. Alekseev. Vol. 2. Combat ekranoplans designed by Alekseev]. Nizhny Novgorod: JSC Central design bureau for SEC named after R.E. Alekseev; Quartz, 2020. 304 p.
4. Ilyin V.E. Ekranoplany [Ekranoplans]. *Tekhnicheskaya informatsiya [Technical Information]*. 2011. No. 4-5. 80 p. (News of foreign science and technology. Series: Aviation and rocket technology.)
5. ST Engineering clinches launch customer for Wing-In-Ground AirFish. *FlightGlobal*. URL: <https://www.flightglobal.com/aerospace/st-engineering-clinches-launch-customer-for-wing-in-ground-airfish/157035.article> (accessed 09.02.2025).
6. Ekranoplan kak konkurent Evrostaru. Staraya ideya obretaet renessans i potentsial kommercheskogo primeneniya v Evrope [Ekranoplan as a competitor to Eurostar. An old idea is gaining a renaissance and the potential for commercial application in Europe]. 20.06.2021. *Green Starting Point*. URL: <https://greenstartpoint.ru/ekranoplan-kak-konkurent-evrostaru-staraya-ideya-obretaet-renessans-i-potenczial-kommercheskogo-primeneniya-v-evrope/> (accessed 09.02.2025).
7. Vo Frantsii postroili katamaran, kotoryi vzletaet nad vodoi i pochti ne potrebyaet topliva [In France, they built a catamaran that takes off above the water and consumes almost no fuel]. 24.07.2021. *novate*. URL: <https://novate.ru/blogs/240721/59890/> (accessed 09.02.2025).
8. Bolotin A.A., Popov A.N., Chebotaev V.F. Izuchenie aerodinamicheskikh kharakteristik modeli ekranoplana [Studying the aerodynamic characteristics of the ekranoplan model]. Nizhny Novgorod: NGTU, 2001. 18 p.
9. Demeshko G.F. Proektirovanie sudov. Amfibiinye suda na vozduшной podushke [Ship design. Amphibious hovercraft: in 2 books]. St. Petersburg: Shipbuilding, 1992. 269 p.
10. Blokhin V.N., Prokhorov V.M., Kalyasov P.S., Yakimov A.K. et al. The application of computer simulation for the determination of wig craft aerodynamic characteristics in a cruising regime // Mathematical modeling. Optimal control of computational experiment methods to determine. 2012. No. 3. P. 147 — 154. (In Russ.)
11. Wang H., Teo C.J., Khoo B.C., Goh C.J. Computational aerodynamics and flight stability of Wing-In-Ground (WIG) Craft. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 67. 15 — 24.