

На правах рукописи

СУРЖИК Виталий Витальевич

**МЕТОДЫ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
СИНТЕЗА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭКРАНОПЛАНОВ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иркутск-2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ИрГУПС)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
заслуженный деятель науки РФ
Мухопад Юрий Федорович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Данеев Алексей Васильевич,
доктор технических наук, профессор
Петров Александр Васильевич,
доктор физико-математических
наук, доцент,
Фалалеев Михаил Валентинович.

Ведущая организация: Сибирский научный институт авиации (СибНИА) г. Новосибирск.

Защита состоится “16” декабря 2010 года в 10 часов ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения» на заседании совета по защите кандидатских и докторских диссертаций Д 218.004.01 при по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. 803. Тел./факс: (8-395-2)638311; 38-77-46.
WWW: <http://www/irgups.ru>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан “ “ 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 218.004.01
к.т.н., профессор

Тихий И.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность научной проблемы. Развитие современной промышленности, использующей высокоскоростные автоматизированные роторные линии и быстродействующие мехатронные системы, а также проектирование объектов для морских, авиационных и других видов транспорта, часто требует ввода в практику проектирования и эксплуатации технические системы, которые учитывали бы нестационарности. Эти системы работают в условиях повышенных динамических нагрузок от внешних воздействий. Анализ и синтез таких систем затруднителен при использовании классических подходов основанных, как правило, на представлении технической системы квазистационарными и квазилинейными моделями, адекватно описывающими реальные объекты лишь при малых возмущениях. Такие проблемы возникают при проектировании высокоскоростного транспорта с требованием сохранения безопасности перевозки пассажиров и особенно при создании транспортных средств с использованием новых принципов движения.

К ним относятся суда на подводных крыльях, аппараты на воздушной подушке, экранопланы и другие подобного рода объекты, которые сочетают в себе характерные особенности нескольких видов транспорта, например, свойства плавающих транспортных средств со свойствами летательных аппаратов (ЛА).

Идею модернизации водного транспорта с повышением его скорости при минимальной энерговооруженности пропагандировал великий ученый и инженер Ростислав Евгеньевич Алексеев. Под его руководством в 60-е годы прошлого столетия были созданы первые в мире суда на подводных крыльях, а затем экранопланы, выполненные по “самолетной” схеме. Однако суда с малопогруженными подводными крыльями имели ограничение по максимальной скорости движения из-за возникающего кавитационного режима на крыльях при достижении определенной скорости и, как следствие этого, резкое падение подъемной силы и торможение судна. Экранопланы на основном режиме движения не имеют контакта с водой и не имеют ограничений по скорости.

В развитие околоэкранный аэродинамики большой вклад внесли советские ученые Б.А. Ушаков, Я.М. Серебрянский, Ш.А. Биячуев, Б.Т. Горощенко, А.И. Смирнов, Ю.Л. Жилин, а также работы А.Н. Панченкова и учеников его Иркутской научной школы.

Создание экранопланов как нового скоростного вида транспорта в мировой практике на сегодняшний день находится в стадии, когда каждый конструктор выбирает компоновочную схему и геометрические параметры создаваемого экраноплана или на основании собственных разработок, или по аналогии с другими разработками. Нет общей теоретической базы, на основании которой можно было бы проектировать экраноплан с заранее заданными характеристиками по аэродинамическому качеству (аэродинамическому совершенству) и устойчивости движения. Это и послужило причиной того, что в настоящее время ни в одной из стран мира эти работы не перешли из стадии научно-исследовательских работ и создания небольших опытных экземпляров к широкому внедрению и серийному производству.

Актуальность выбора направления исследований в диссертации предопределяется многообразием конструктивных схем экранопланов. Поэтому разработка методик параметрического синтеза конструктивных схем экранопланов позволяет оценивать различные схемы по единым комплексным критериям, а учет динамической функциональности вести через адекватные математические модели экранопланов путем учета кинематической нестационарности параметров движения с возможностью экспериментальной проверки результатов исследования в реальных условиях движения.

Проблема создания экранопланов различных компоновочных схем и методы их структурно-параметрического синтеза с использованием теоретических методов системного анализа применительно к задачам проектирования экранопланов является важнейшей народно-хозяйственной проблемой создания новых скоростных видов транспорта с высокой степенью безопасности и надежности.

Таким образом, проблема теоретических и экспериментальных исследований в области создания экранопланов, несомненно, актуальна.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является применение теоретических методов системного анализа и параметрического синтеза к сложным техническим системам с динамической нелинейностью и нестационарностью применительно к задачам управления проектированием экранопланов.

Объект исследования. Объектом исследования является проблема создания экранопланов различных компоновочных схем, их математические модели движения и методы структурно-параметрического синтеза.

Методы исследований. В диссертационной работе для решения сформулированных проблем использовались следующие разделы математики: линейная алгебра, теория матриц, теория линейных дифференциальных уравнений, теория управления, математическое моделирование. Для подтверждения теоретических результатов разработана методика экспериментальных исследований динамических характеристик моделей экранопланов в реальном времени.

Научную новизну диссертации представляют следующие основные результаты, которые выносятся на защиту:

1. Результаты системного анализа уравнений движения экранопланов при взаимодействии их с внешней средой.
2. Математические модели экранопланов различных компоновочных схем с учетом нестационарности параметров движения.
3. Критерии продольной статической устойчивости экранопланов различных компоновочных схем.
4. Методика и алгоритмы параметрического синтеза математических моделей экранопланов различных компоновочных схем с учетом оптимизации по максимальным несущим свойствам крыльев экранопланов, максимальному аэродинамическому качеству и определению зон устойчивости в зависимости от геометрии компоновочной схемы.
5. Алгоритмы обеспечения самостабилизированных положений экраноплана при изменении скорости движения.
6. Развитие асимптотического метода функциональных параметров, (МФП) для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений.
7. Методика проведения натурного эксперимента испытания моделей экранопланов на открытой воде с помощью катера буксировщика с записью параметров движения в реальном времени.

Все перечисленные результаты диссертационной работы представляющие научную новизну получены впервые.

Практическая значимость. Результаты исследований диссертационной работы позволяют разработчикам экранопланов формировать в соответствии с поставленным перед ними техническим заданием адекватные модели конструктивных схем экранопланов и проектировать экранопланы с оптимальными аэродинамическими характеристиками и параметрами устойчивости. Получено три авторских свидетельства и четыре патента на изобретения по определению зон устойчивости экранопланов схем “утка”, “обратная утка” и “самолетная”

схема. Разработанные самостабилизирующиеся компоновочные схемы экранопланов не имеют аналогов в мире.

Внедрение результатов работы. Построены и успешно прошли испытания при активном участии автора экранопланы АДП-04М, АДП-05 “Орфей” и АДП-07, причем автор диссертации был одним из пилотов-испытателей. Полученные в работе результаты вошли в перспективный план развития малой авиации в Сибири, разработанный предприятием СибНИА им. Чаплыгина г. Новосибирск по поручению правительства РФ. Под руководством автора диссертации спроектирован, построен и прошел первый этап испытаний восьмиместный прототип грузопассажирского экраноплана СДП-09. Проект по созданию самостабилизирующихся экранопланов схемы “утка” победил на президентском конкурсе по поддержке малого бизнеса “Старт – 05” (занял четвертое место по Сибирскому округу). По заданию БЭФ (Байкальского экономического форума 2006 г., состоявшегося в г. Иркутске,) разработан проект и бизнес-план по созданию экранопланов компоновочной схемы “утка” опытной серии (10 экземпляров) вместимостью 15 пассажиров.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертации, базируется на сравнении экспериментальных данных параметров возмущенного движения модели экраноплана в реальном времени, полученных автором, с теоретическими расчетами параметров движения по разработанной математической модели. Расхождение по первоначальным забросам (росту) параметров при единичных возмущениях не превышает 8%.

Достоверность результатов подтверждается также материалами испытаний самоходных экранопланов АДП-04М, АДП-05 “Орфей” и СДП-09.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на *всесоюзных, всероссийских и международных конференциях*. На 24 Всесоюзной научно-технической конференции по теории корабля. Л.: 1975; на Всесоюзной конференции. Вопросы создания транспорта для Сибирского Севера. Иркутск. 1988; на V всесоюзной школе-семинаре. Иркутск. 1990; на I международной конференции по экранопланам. Иркутск. 1993; на III Евразийском симпозиуме по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. Якутск. 2006; на III международной конференции. Проблемы механики современных машин. Иркутск. 2006; в Украинском журнале “Авиация и время”. Киев. 2006; на XI международной конференции. Проблемы механики современных машин. Пенза.

2007; на международной конференции (Innovation & Sustainability of Modern Railway Proceedings of ISMR 2008. Edited by Lei. Xiaoyan China: 2008); на Байкальском экономическом форуме (БЭФ). Геополитические и социально-экономические проблемы создания международных транзитных транспортных коридоров. Иркутск. 2004, 2006 и 2008; на XIV Байкальской Всероссийской конференции. Иркутск. 2009; на I научно-практической конференции, научных работников и аспирантов. Иркутский филиал МГТУ ГА. 2009.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 44 научные работы, из которых в едином авторстве 21 работа, 9 работ опубликованы в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 3 авторских свидетельства и 4 патента на изобретения РФ.

Личный вклад автора. Все результаты, включенные в диссертацию из совместных публикаций, являются неделимыми, из которых автору принадлежит (60–70) %. Результаты диссертации, составляющие новизну и выносимые на защиту, получены лично автором.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений общим объемом 278 страниц. В том числе 19 таблиц, 57 рисунков и 7 приложений. Список используемой литературы содержит 322 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, приводится краткий обзор литературы, формулируется цель работы, кратко излагается ее содержание и перечисляются результаты, которые выносятся на защиту.

В первой главе приведены основополагающие принципы системного анализа и краткая антология создания экранопланов. Дано описание современного состояния исследований по динамике экранопланов. Приведена также система дифференциальных уравнений пространственного движения и выделена из нее система уравнений продольного движения. Исследованы существующие методы оценки продольной статической устойчивости. Отмечено, что до конца прошлого столетия Советский Союз значительно опережал все другие страны по созданию экранопланов большого тоннажа. Это убедительно подтверждено испытаниями на Каспийском море экранопланов “Орленок” и “Лунь” (главный конструктор Р.Е. Алексеев).

Исследования по созданию математической модели оптимального экраноплана, как большой многокритериальной системы, базируются на системном подходе, требующего развития применительно к конкретному техническому направлению.

Применительно к реализации цели исследований системный подход связан с изучением системы экраноплана **как целого**, то есть изучения специфики и системных качеств экранопланов, **декомпозицию** на основе части (подсистемы), связанные с продольным и боковым движениями, **интегративность** частей в их функциональной взаимосвязи, отображаемой математической моделью динамического взаимодействия подсистем.

Глобальность и полнота знаний должна обеспечиваться не только зависимостью от конструктивных параметров экранопланов, но и учетом факторов в динамических режимах движения над экраном и в безграничной среде.

Всесторонность исследований должна учитывать также историю развития и цели использования экранопланов в транспортных системах, разработку комплексных количественных критериев оценки качественных характеристик экранопланов.

При этом методики системного анализа и параметрического синтеза должны отличаться **свободой выбора, итеративностью, инвариантностью, эволюционностью и адаптивностью**.

Применительно к экранопланам необходима разработка многообразия конструктивных схем экранопланов, разработка методик параметрического синтеза, позволяющих оценивать различные схемы по единым комплексным критериям, а также необходим учет динамической функциональности через адекватные математические модели экранопланов с возможностью их экспериментальной проверки в реальных условиях движения.

В конкретном аспекте формулируются следующие задачи:

1. Провести анализ существующих математических моделей движения экранопланов, выявить неточности и расхождения этих моделей от реального физического процесса и определить дополнительные составляющие, существенно влияющие на поведение системы.
2. Разработать математические модели экранопланов различных компоновочных схем с нестационарностью параметров движения и определить геометрические параметры экранопланов, обладающих максимальным аэ-

родинамическим качеством и удовлетворяющих поставленным динамическим критериальным оценкам с определением зон устойчивости движения.

3. Разработать критерии продольной статической устойчивости экранопланов различных компоновочных схем и адаптировать асимптотический метод функциональных параметров для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений.
4. Разработать алгоритмы и программное обеспечение расчетов “посадок” (самостабилизированных положений экранопланов над экранирующей поверхностью при изменении скорости движения) для различных компоновочных схем.
5. Разработать методику проведения натурного эксперимента испытаний моделей экранопланов на открытой воде и провести эксперимент с записью параметров движения моделей экранопланов в реальном времени с последующим сравнением данных эксперимента с теоретическими результатами расчетов.
6. Провести сравнительный анализ характеристик устойчивости экранопланов различных компоновочных схем, исследовать теоретические характеристики устойчивости построенных самоходных экранопланов и сравнить их с результатами проведенных испытаний.
7. Дать оценку применения экранопланов в транспортной системе.

В первой главе диссертации в соответствии с принципами СА приведена система дифференциальных уравнений пространственного движения и выделена из нее система уравнений продольного движения. Основанием для выделения из единой системы пространственного движения экранопланов уравнений продольного движения является, во-первых, симметрия аппарата относительно продольной вертикальной плоскости, а во-вторых, независимость параметров продольного движения экраноплана при движении без крена и скольжения от параметров бокового движения. Поэтому продольное движение можно рассматривать независимо от бокового, но боковое движение от продольного отдельно рассматривать нельзя в силу существенной зависимости параметров бокового движения от параметров продольного.

Система уравнений продольного движения экранопланов имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
m \left(\frac{d\Delta V_{Xc}}{dt} - \Delta V_{Yc} w_{Zc}^0 + V_{Yc}^0 \Delta w_{Zc} \right) &= - \left(X_c^{ov} \Delta V + X_c^{0a} \Delta a + X_c^{o\bar{H}} \Delta \bar{H} + \right. \\
&+ X_c^{o\mathfrak{J}} \Delta \bar{\mathfrak{J}} + X_c^{oJ} \Delta J + X_c^{o\mathfrak{J}} \Delta \mathfrak{J} + X_c^{od_\epsilon} \Delta d_\epsilon + X_c^{o\Delta P} \Delta P \left. \right) + P \cos j - G \sin q; \\
m \left(\frac{d\Delta V_{Yc}}{dt} + \Delta V_{Xc} w_{Zc}^0 + V_{Xc}^0 \Delta w_{Zc} \right) &= Y_c^{ov} \Delta V + Y_c^{0a} \Delta a + Y_c^{o\bar{H}} \Delta \bar{H} + \\
&+ Y_c^{o\mathfrak{J}} \Delta \bar{\mathfrak{J}} + Y_c^{oJ} \Delta J + Y_c^{o\mathfrak{J}} \Delta \mathfrak{J} + Y_c^{od_\epsilon} \Delta d_\epsilon + Y_c^{o\Delta P} \Delta P + P \sin j + G \cos q; \\
J_z \frac{d\Delta w_{Zc}}{dt} &= M_{Zc}^{ov} \Delta V + M_{Zc}^{0a} \Delta a + M_{Zc}^{oJ} \Delta J + M_{Zc}^{od_\epsilon} \Delta d_\epsilon + \\
&+ M_{Zc}^{o\bar{H}} \Delta \bar{H} + M_{Zc}^{o\mathfrak{J}} \Delta \bar{\mathfrak{J}} + M_{Zc}^{o\bar{W}} \Delta \bar{W} - P y_p;
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{dJ}{dt} = \Delta w_{Zc} = \Delta J_1; \quad \Delta q = \Delta J - \Delta a;$$

$$\frac{d\Delta \bar{H}}{dt} = V^0 \sin \Delta q;$$

$$V \Delta V = V_{Xc} \Delta V_{Xc} + V_{Yc} \Delta V_{Yc};$$

$$\Delta a = -\frac{1}{V_0} (\sin a_0 \Delta V_{Xc} + \cos a_0 \Delta V_{Yc}).$$

После упрощений система (1) запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
\frac{d\Delta V}{dt} &= a_{11} \Delta V + a_{12} \Delta a + a_{13} \Delta J + a_{15} \Delta \bar{H}; \\
\frac{d\Delta a}{dt} &= a_{21} \Delta V + a_{22} \Delta a + a_{23} \Delta J_1 + a_{24} \Delta J_2 + a_{25} \Delta \bar{H}; \\
\frac{d\Delta J_1}{dt} &= a_{34} \Delta J_2; \\
\frac{d\Delta J_2}{dt} &= a_{41} \Delta V + a_{42} \Delta a + a_{43} \Delta J_1 + a_{44} \Delta J_2 + a_{45} \Delta \bar{H}; \\
\frac{d\Delta \bar{H}}{dt} &= a_{51} \Delta V + a_{52} \Delta a + a_{53} \Delta J_1.
\end{aligned} \tag{2}$$

$$a_{51} = m \sin q_0; a_{52} = -m \cos J_0; a_{53} = m \cos q_0; a_{54} = a_{55} = 0.$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & a_{15} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 1 & a_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{pmatrix}; \quad x = \begin{pmatrix} \Delta \bar{V} \\ \Delta a \\ \Delta J \\ \Delta \mathfrak{J} \\ \Delta \bar{H} \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Где (3) есть представление системы (2) в матричной форме $\dot{x} = Ax$.

Исследование устойчивости системы (2) основано на анализе критериев Рауса-Гурвица, полученных на базе коэффициентов характеристического уравнения системы $\dot{x} = Ax$ (3).

Критерии Рауса-Гурвица дают ответ на вопрос: устойчива система или нет. На практике же необходимо знать о том насколько устойчив экраноплан, так как условия его эксплуатации очень жесткие ввиду близости экранирующей поверхности.

В литературе существует несколько подходов к определению устойчивости экранопланов, в частности:

1. Ю.В. Разумеенко предложил критерий “техническая устойчивость” (ТУ). Из двух сравниваемых объектов тот более технически устойчив в интервале (t_0, t_3) по координате $x_k(t)$, у которого при единичном возмущении одной k – координаты само возмущение затухает в большее число раз, то есть выше декремент затухания.

2. Определять устойчивость экранопланов по условной метацентрической высоте $H = \frac{\Delta M_z}{\Delta \Psi}$, где ΔM_z – суммарное приращение момента несущих элементов экраноплана при изменении его угла дифферента на величину $\Delta \Psi$. Этот критерий применяется при проектировании водоизмещающих судов.

3. В качестве запаса продольной статической устойчивости принять запас (или фокус) статической устойчивости по углу атаки при $\bar{H} = const$ и по высоте над экраном при $a = const$ $s_a \Big|_{\bar{H}=const} = \bar{X}_{ц.т.} - \bar{X}_{Fa} = \frac{m_z^a}{C_y^a}$, $s_H \Big|_{a=const} = \bar{X}_{ц.т.} - \bar{X}_{FH} = \frac{m_z^{\bar{H}}}{C_y^{\bar{H}}}$.

Критерий устойчивости экраноплана в короткопериодическом движении в литературе представлен в виде:

$$\bar{X}_{FH} - \bar{X}_{Fa} < 0, \quad \text{или} \quad \frac{m_z^a}{C_y^a} - \frac{m_z^{\bar{H}}}{C_y^{\bar{H}}} > 0. \quad (4)$$

Этот критерий был предложен Р.Д. Иродовым.

Автором диссертации установлено, что предложенные в литературе критериальные оценки (4), разработанные на базе системы уравнений (2), не дают достаточно объективной картины по оценке устойчивости экранопланов, а в некоторых случаях дают даже неправильные результаты. Отмечено также, что поскольку основным режимом движения экраноплана является крейсерский

полет на заданной высоте, то необходимо вводить ограничения на “заброс” (дальнейший рост) параметров движения экранопланов после прекращения действия возмущений. Эти ограничения необходимы для предотвращения встречи экраноплана с экранирующей поверхностью. Реализация этих ограничений возможна или путем оснащения экранопланов системами автоматической стабилизации, или путем создания экранопланов самостабилизирующихся компоновочных схем. В диссертации дано определение понятия самостабилизации.

Под самостабилизацией понимается способность экраноплана сохранять балансировочные режимы и устойчивость движения без вмешательства органов управления во всем диапазоне полетных скоростей при действии широкого спектра эксплуатационных возмущений.

В заключение первой главы формируются цели исследований и задачи диссертационной работы.

Во второй главе проблема создания экранопланов рассматривается с позиций системного анализа, когда речь идет о создании такой компоновочной схемы и с такими параметрами, которые обеспечили бы экраноплану максимальные аэродинамические и динамические характеристики.

Приведена, разработанная автором диссертации, Граф-схема алгоритма проектирования экранопланов (рис. 1).

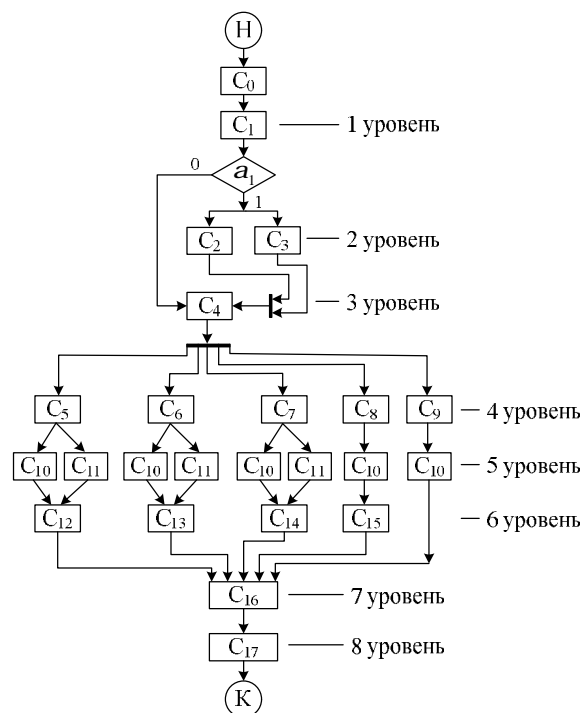


Рис. 1. Граф-схема алгоритма структурно-параметрического синтеза экранопланов

При разработке математической модели объекта проектирования в нем выделяется набор параметров, описывающих его функционирование, и структурно-параметрический набор конструктивных параметров. Такое разделение параметров единой математической модели на две части довольно условно, но оно целесообразно при разработке алгоритмического и программного обеспечения. Структурно-параметрический набор конструктивных параметров дает возможность генерировать множество альтернатив изучаемого объекта. Задачей математического моделирования процесса создания объекта является описание процессов постановки и решение задач проектирования на основе иерархии математической модели объекта.

Ниже, в соответствии с требованиями СА, приведены последовательные описания восьми уровней Граф-схемы – алгоритма структурно-параметрического синтеза экранопланов, а именно:

C_0 – главная цель – создание экранопланов в соответствии с заданными тактико-техническими требованиями (ТТТ) и условиями оптимальности;

C_1 – первый уровень – формирование математической модели пространственного движения экраноплана, проведение анализа существующих моделей на адекватность этих моделей реальным физическим процессам, происходящим при движении аппарата над экраном;

a_1 – принятие решения – 1 – выполнять пункты C_2 и C_3 (переход на второй уровень) или – 0 – переход на третий уровень;

C_2, C_3 – второй уровень – введение поправочных коэффициентов в теоретические зависимости C_y и C_x в соответствии с экспериментальными данными для крыльев пространственной геометрии – C_2 . На этом же уровне в систему уравнений движения экраноплана вводится кинематическая нестационарность параметров движения – C_3 ;

C_4 – третий уровень – выделение из пространственной модели движения экраноплана первого уровня системы уравнений продольного движения с учетом результатов второго уровня;

C_5, C_6, C_7, C_8, C_9 – четвертый уровень – уравнения продольного движения экранопланов различных компоновочных схем: схемы “утка”, схемы “обратная утка”, схемы “гибрид”, “самолетной” схемы и схемы “летающее крыло” соответственно;

C_{10} , C_{11} – пятый уровень – параметрический синтез уравнений продольного движения экранопланов различных компоновочных схем по критериальным оценкам (6) математической модели оптимального проектирования экранопланов по максимальным несущим способностям изолированного крыла в зависимости от удлинения и максимальному качеству всей компоновочной схемы – C_{10} . На этом же пятом уровне ведется расчет самостабилизированных положений экранопланов для схем “утка”, “обратная утка” и “гибрид” – C_{11} . Где самостабилизированные положения – это самосбалансированные положения экраноплана над экранирующей поверхностью при изменении скорости движения от взлетной до максимальной с сохранением устойчивости движения;

C_{12} , C_{13} , C_{14} , C_{15} – шестой уровень – ведется дальнейший параметрический синтез всех компоновочных схем экранопланов при варьировании геометрических параметров и определяются границы устойчивости этих схем;

C_{16} – седьмой уровень – анализ полученных математических моделей;

C_{17} – восьмой уровень и ниже лежащие уровни предусматривают оптимизацию экраноплана по таким критериальным оценкам, как минимизация весовых параметров конструктивных элементов экраноплана, минимизация стоимости перевозки пассажиров и груза, оценку социальной значимости внедрения экранопланов в транспортную систему и т.д.

В диссертации при проектировании оптимального экраноплана реализуются первые семь уровней приведенной Граф-схемы и выбирается та компоновка экраноплана, которая наилучшим образом отвечает заданным тактико-техническим требованиям.

Для корректности проводимых теоретических расчетов исследуемых компоновочных схем экранопланов приняты одинаковые для всех схем следующие тактико-технические требования (ТТТ) (5) и частные критерии оптимальности (6):

$$G_{\text{взл.}} = 287,6 \text{ кг.}; G_{\text{пасс+грузм}} = 100 \text{ кг.}; G_{\text{топл.}} = 10 \text{ кг.}; V_{\text{крейс.}} = 23,8_{\text{м/с}}. \quad (5)$$

$$C_{Y \max}^a; K_{\max} = \frac{C_{Y \Sigma}}{C_{X \Sigma}}; \quad (6)$$

где $G_{\text{взл.}}$ – взлетный вес экраноплана одинаковый для всех схем;

$G_{\text{пасс.+груз}} = G_{\text{плат.}}$ – перевозимая полезная (платная) нагрузка;

$G_{\text{топл.}}$ – вес топлива на борту экраноплана;

$V_{\text{крейс.}}$ – крейсерская скорость экраноплана;

$C_{Y \max}^a$ – производная по углу атаки коэффициента подъемной силы изолированного крыла экраноплана (максимальные несущие свойства крыла);

$K_{\max} = \frac{C_{Y \Sigma}}{C_{X \Sigma}}$ – аэродинамическое качество всей компоновочной схемы.

В соответствии со вторым уровнем Граф-схемы (рис. 1) приведены результаты сравнительного анализа теоретических зависимостей коэффициентов аэродинамической подъемной силы и сопротивления изолированных крыльев вблизи экрана с экспериментальными данными этих характеристик для крыльев пространственной геометрии.

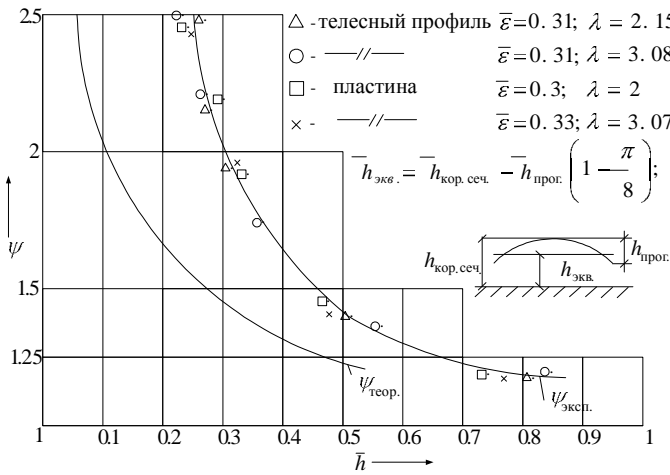


Рис. 2.

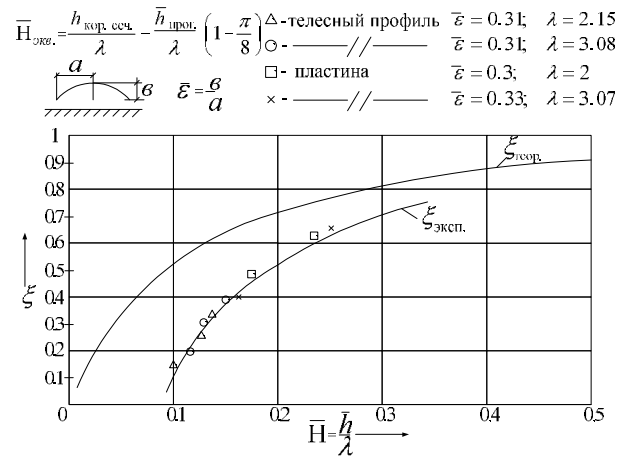


Рис. 3.

В работе показано, что аэродинамические характеристики изолированных крыльев пространственной геометрии (крыльев с эллиптической осью по размаху или крыльев с шайбами по торцам), движущихся над экраном, можно определять по теоретическим зависимостям из решения плоской задачи:

$$C_y = \frac{y a_\infty}{C_2(I) \left[1 + \frac{y a_\infty (1 + C_1(I))}{C_2(I) p l} x \right]} (a_y + a_0 - \Delta a_0), \quad \text{где}$$

$$y = 1 + t^2 + 0,5t^4 + 0,75t^6, t = \sqrt{4h^2 + 1 - 2\bar{h}}, C_1(I) = e^{-0,2599I}, C_2(I) = e^{-1/3,847I}, a_\infty = 5,45;$$

$$\text{и } C_{xi} = \frac{C_{y(\text{шайб})}^2}{pl} x_{(\text{шайб})}, \quad \text{где } x_{(\text{шайб})} = 0,769x - \frac{0,231C_2(I)pl}{y a_\infty (1 + C_1(I))}, \quad x = 1 - 0,5000 t_l^2 -$$

$$0,2500 t_l^4 - 0,0625 t_l^6 - 0,0469 t_l^8 - 0,0237 t_l^{10} - 0,0188 t_l^{12} - 0,0881 t_l^{14} + 0(t_l^{16}),$$

$t_1 = \sqrt{4(\bar{H})^2 + 1} - 2\bar{H}$; а отстояния \bar{h} и $\bar{H} = \frac{h}{l}$ для таких крыльев, на основании графиков (рис. 2 и рис. 3), определять из соотношений:

$$\bar{h}_{\text{экв.}} = \bar{h}_{\text{кор.сеч.}} - \bar{h}_{\text{праг.}} \left(1 - \frac{p}{8}\right) \quad \text{и} \quad \bar{H}_{\text{экв.}} = \frac{\bar{h}_{\text{кор.сеч.}}}{l} - \frac{\bar{h}_{\text{праг.}}}{l} \left(1 - \frac{p}{8}\right), \quad (7)$$

где эти отстояния теперь будут отстояниями эквивалентного крыла, обладающего теми же аэродинамическими характеристиками, что и крыло пространственной геометрии; $\bar{h}_{\text{экв.}}$ – относительные отстояния по хорде, а $\bar{H}_{\text{экв.}}$ – по размаху эквивалентного крыла; $\bar{h}_{\text{кор.сеч.}}$ – относительное отстояние от экрана корневого сечения крыла пространственной геометрии; $\bar{h}_{\text{прогиба}}$ – относительная величина прогиба арочного крыла в задней кромке или относительная высота нижней части шайбы крыла.

Таким образом, предложена методика для расчета аэродинамических характеристик крыльев экранопланов пространственной геометрии.

Далее в результате проведенного системного анализа выявлена неадекватность системы уравнений (1) реальным физическим процессам.

В диссертации предложено ввести в систему уравнений продольного движения экранопланов (1) **нестационарные изменения кинематических параметров** $\Delta a(t)_i$ и $\Delta \bar{H}(t)_i$, то есть зависимость параметров системы от угловой скорости w_{zc} и от вертикальной скорости $\frac{d\Delta H}{dt}$.

В общем случае продольного движения экраноплана, что наглядно видно на примере компоновочной схемы “гибрид” (рис. 4 и рис. 5), его параметры a, \bar{H}, J при действии возмущений могут меняться по любым законам. На схему экраноплана “гибрид” получено авторское свидетельство А.с. 663152, СССР.

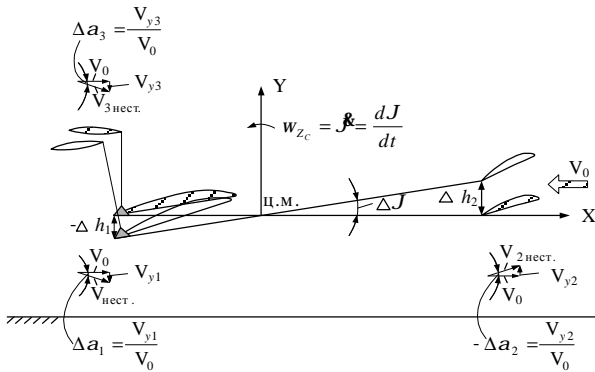


Рис.4.

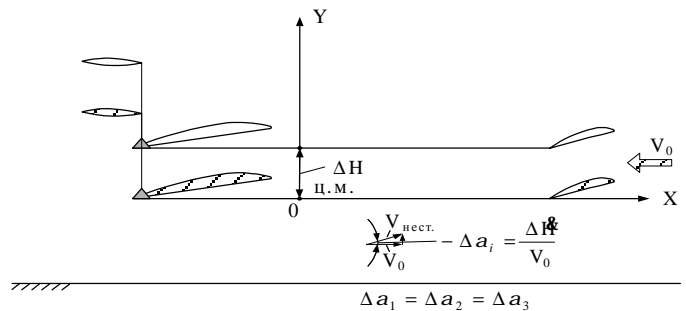


Рис. 5.

При изменении этих параметров ЦМ экраноплана совершает поступательное движение в направлении осей $0X_c$ и $0Y_c$. Все остальные материальные точки экраноплана, находясь в таком же как и ЦМ поступательном движении, совершают вращение вокруг оси $0Z_c$, проходящей через ЦМ экраноплана, с угловой скоростью $w_{Zc} = \frac{dJ}{dt}$. Вследствие чего в целом меняются высота полета крыльев над экраном \bar{h}_i , угол тангажа J , а следовательно, и угол атаки a . Эти вертикальные скорости, вызванные вращением экраноплана вокруг оси $0Z_c$, изменят углы атаки крыльев на величину $\pm(\bar{X}_{Ti} \pm \bar{X}_{Fa}) \frac{1}{m} \bar{b}_{Ai} \frac{dJ}{dt}$. При поступательном перемещении экраноплана в направлении оси $0Y_c$, вертикальная скорость $\frac{d\Delta H}{dt}$ также вызовет изменение углов атаки крыльев на одну и ту же величину, а именно на $\frac{1}{m} \frac{d\Delta \bar{H}}{dt}$.

Таким образом, нестационарные изменения углов атаки каждого крыла экраноплана компоновочной схемы “гибрид” выразятся следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\Delta a_1 &= \Delta a + (\bar{X}_{T1} + \bar{X}_{Fa}) \frac{1}{m} \frac{d\Delta J}{dt} - \frac{1}{m} \frac{d\Delta \bar{H}}{dt}; \\ \Delta a_2 &= \Delta a - (\bar{X}_{T2} - \bar{X}_{Fa}) \frac{\bar{b}_{A2}}{m} \frac{d\Delta J}{dt} - \frac{1}{m} \frac{d\Delta \bar{H}}{dt}; \\ \Delta a_3 &= \Delta a + (\bar{X}_{T3} + \bar{X}_{Fa}) \frac{\bar{b}_{A3}}{m} \frac{d\Delta J}{dt} - \frac{1}{m} \frac{d\Delta \bar{H}}{dt};\end{aligned}\tag{8}$$

где индекс 1 относится к основному крылу, индекс 2 – к носовому крылу, а индекс 3 – к стабилизатору.

Значения отстояний крыльев $\Delta \bar{h}_i$ при колебаниях экраноплана вокруг оси $0Z_c$ имеют следующий вид, (где $\Delta \bar{H}$ – относительные отстояния от экрана ЦМ):

$$\begin{aligned}\Delta \bar{h}_1 &= \Delta \bar{H} - (\bar{X}_{T1} + 1)\Delta J; \\ \Delta \bar{h}_2 &= \Delta \bar{H} + (\bar{X}_{T2} - 1)\Delta J.\end{aligned}\tag{9}$$

Подстановка (8) и (9) в выражения для коэффициентов матриц уравнений продольного возмущенного движения экранопланов (2) дает значения коэффициентов b_{ij} с учетом нестационарности изменения кинематических параметров. Например, для компоновочной схемы “гибрид”, они будут:

$$b_{11} = a_{11} - a_{12} \sin q_0;$$

$$b_{12} = a_{12} (1 + \cos q_0);$$

$$b_{13} = a_{13} - a_{12} \cos q_0;$$

$$b_{14} = [(C_{y1} \cos q_0 - C_{x1}^a)(\bar{X}_{T1} + \bar{X}_{Fa}) - (C_{y2} \cos q_0 - C_{x2}^a)\bar{S}_2 \frac{b_{A2}}{b_{A1}}(\bar{X}_{T2} - \bar{X}_{Fa}) + (C_{y_{cm.}} \cos q_0 - C_{x_{cm.}}^a)\bar{S}_3 \frac{b_{A_{cm.}}}{b_{A1}}(\bar{X}_{T_{cm.}} + \bar{X}_{Fa})] \frac{1}{m};$$

$$b_{15} = a_{15};$$

$$b_{21} = a_{21} - a_{22} \sin q_0;$$

$$b_{22} = a_{22} (1 + \cos q_0);$$

$$b_{23} = a_{23} - a_{22} \cos q_0;$$

$$b_{24} = 1 + [(C_{y1} \sin q_0 - C_{y1}^a)(\bar{X}_{T1} + \bar{X}_{Fa}) - (C_{y2} \sin q - C_{y2}^a)\bar{S}_2 \frac{b_{A2}}{b_{A1}}(\bar{X}_{T2} - \bar{X}_{Fa}) + (C_{y_{cm.}} \sin q_0 - C_{y_{cm.}}^a)\bar{S}_{cm.} \frac{b_{A_{cm.}}}{b_{A1}}(\bar{X}_{T_{cm.}} + \bar{X}_{Fa})] \frac{1}{m};$$

$$b_{25} = a_{25}; \tag{10}$$

$$b_{31} = b_{32} = b_{33} = b_{35} = 0; b_{34} = 1;$$

$$b_{41} = a_{41} - a_{42} \sin q_0;$$

$$b_{42} = a_{42} (1 + \cos q_0);$$

$$b_{43} = a_{43} - a_{42} \cos q_0;$$

$$b_{44} = -[C_{y1}^a(\bar{X}_{T1} + \bar{X}_{Fa})^2 + C_{y2}^a(\bar{X}_{T2} - \bar{X}_{Fa})^2 \bar{S}_2 \frac{b_{A2}^2}{b_{A1}^2} + C_{y_{cm.}}^a(\bar{X}_{T_{cm.}} + \bar{X}_{Fa})^2 \bar{S}_{cm.} \frac{b_{A_{cm.}}^2}{b_{A1}^2}] \frac{1}{\bar{R}_Z^2};$$

$$b_{45} = a_{45}; b_{51} = a_{51}; b_{52} = a_{52}; b_{53} = a_{53}; b_{54} = b_{55} = a_{54} = a_{55} = 0.$$

Анализируя полученные уравнения (10), отмечаем, что при введении в систему дифференциальных уравнений продольного движения экранопланов не-

стационарных значений изменения параметров размерность исходной системы (2) не увеличивается. Кроме того, отпадает необходимость “искусственного” введения в уравнения (2) для коэффициента a_{44} выражения из “гипотезы искривления” широко применяемой для изучения динамических характеристик ЛА в безграничной жидкости.

Коэффициент b_{44} формируется в результате введения в уравнения движения экранопланов нестационарных значений изменения параметров. Выполненные расчеты показали, что коэффициент a_{44} из (2) превышает коэффициент b_{44} из (10) примерно в 2 раза. Завышение демпфирующего коэффициента b_{44} в уравнении моментов, естественно, отразится на результатах расчета динамических характеристиках экраноплана.

В работе приведены новые критерии статической устойчивости, полученные в соответствии с критериями Рауса-Гурвица из характеристического уравнения системы (10), если рассматривать только короткопериодическое движение экраноплана, то есть предположить, что скорость в процессе возмущенного движения остается постоянной $\Delta \bar{V} \cong 0$, как это принято в аэродинамике ЛА. Порядок системы (10) в этом случае понизится на единицу и характеристическое уравнение примет вид:

$$I^4 + P_3 I^3 + P_2 I^2 + P_1 I + P_0 = 0. \quad (11)$$

Из условия $P_0 > 0$ получаем критерий статической устойчивости для схемы “утка” с учетом знаков при a_{52} и a_{53} :

$$\frac{a_{42} + a_{43}}{a_{22} + a_{23}} - \frac{a_{45}}{a_{25}} > 0. \quad (12)$$

Или с учетом функциональной зависимости $a_{i,j}$ от геометрии компоновочной схемы и позиционных производных, выражение (12) запишется в виде:

$$\frac{m_Z^a + m_Z^J}{C_Y^a + C_Y^J} - \frac{m_Z^{\bar{H}}}{C_Y^{\bar{H}}} > 0. \quad (13)$$

Таким образом, полученный **критерий аperiодической статической устойчивости** для компоновочной схемы “утка” (13) существенно отличается от

известного критерия (4) $\frac{m_Z^a}{C_Y^a} - \frac{m_Z^{\bar{H}}}{C_Y^{\bar{H}}} > 0$.

Это отличие объясняется тем, что при составлении уравнений продольного движения впервые учитываются изменения подъемной силы крыльев от колебания экраноплана вокруг ЦМ и приближением при этом или удалением крыльев от экрана. Не выявление и не использование в расчетах этого фактора приводил других авторов к ошибочным выводам о том, что компоновочная схема “утка” вблизи экрана неустойчива.

Первое слагаемое в (13) есть *запас статической устойчивости по углу тангажа* J , а второе слагаемое – *запас статической устойчивости по отстоянию* \bar{H} . Критерий статической устойчивости схемы “утка” или “раздвижка фокусов”, таким образом, будет:

$$\Delta \bar{X}_F = S_J \Big|_{\bar{H}=\text{const.}} + S_{\bar{H}} \Big|_{J=\text{const.}} > 0. \quad (14)$$

Потеря экранопланом колебательной или динамической устойчивости наступит, когда изменит знак с положительного на отрицательный детерминант Рауса–Гурвица $R_t = P_1 P_2 P_3 - P_0 P_3^2 - P_1^2$. Запишем его в более удобном для анализа виде

$$\frac{P_2}{P_3} - \frac{P_0}{P_1} - \frac{P_1}{P_3^2} > 0. \quad (15)$$

В качестве меры эксплуатационной устойчивости экранопланов предлагается *критерий самостабилизации* (12). Этот критерий гарантирует отсутствие в характеристическом уравнении (11) положительных действительных корней, а детерминант Рауса–Гурвица (15) – отсутствие положительных вещественных частей комплексных корней. Но условия устойчивости (12) и (14) могут не обеспечить динамическую безопасность экраноплана в реальном возмущенном движении на малых отстояниях из-за встречи аппарата с экраном при наличии значительных забросов выходных величин $d(\Delta J)$ и $d(\Delta \bar{H})$. Поэтому анализ динамических характеристик экранопланов необходимо вести не только по условиям (12) и (14), а изучать весь переходный процесс возмущенного движения и проектировать такую компоновочную схему, у которой забросы выходных параметров $d(\Delta J)$ и $d(\Delta \bar{H})$ стремились бы к нулю.

В конце второй главы приведены выражения для определения коэффициентов уравнений продольного движения экранопланов следующих компоновочных схем: “обратная утка”, “самолетная” схема, модифицированная схема “утки” – “гибрид”, схема “гибрид” с основным крылом на сверхмалых отстояниях и схема “летающее крыло”. Эти коэффициенты приведены как для уравнений без учета нестационарностей так и с учетом нестационарностей измене-

ния кинематических параметров. Приведены также критерии статической устойчивости для экранопланов этих схем.

В третьей главе приведены методы параметрического синтеза, которые обычно основаны на разработке допусков на вариации параметров системы и на отклонения этих параметров от расчетных.

Создание экранопланов как нового скоростного вида транспорта в мировой практике на сегодняшний день находится в стадии, когда каждый конструктор выбирает компоновочную схему и геометрические параметры создаваемого экраноплана или на основании собственных разработок, или по аналогии с другими разработками. Нет общей теоретической базы, на основании которой можно было бы проектировать экраноплан с заранее заданными характеристиками по аэродинамическому качеству (аэродинамическому совершенству) и устойчивости движения.

В диссертационной работе в третьей главе разработана методика параметрического синтеза уравнений продольного движения экранопланов различных компоновочных схем по частным критериальным оценкам (6). Предложена методика параметрического синтеза экранопланов различных схем по определению оптимальных удлинений его крыльев при которых значения производных подъемных сил этих крыльев были бы максимальными, $C_{y\max}^a$ – первое условие частных критериальных оценок (6). В этой главе приводится также методика определения значения хорды основного крыла экраноплана при максимальном аэродинамическом качестве компоновочной схемы и методика определения зон устойчивости экранопланов в зависимости от конструктивных параметров \bar{S}_2 и \bar{L}_2 ; где \bar{S}_2 – отношение площади носового крыла (или стабилизатора) к площади основного крыла, а \bar{L}_2 – отношение расстояния от центра тяжести до центра давления носового крыла (или стабилизатора) к расстоянию от центра тяжести до центра давления основного крыла.

Математическая задача структурно-параметрического синтеза технической системы в детерминированной постановке в общей проблематике параметрического синтеза и в соответствии с принципами системного анализа формулируется следующим образом.

Пусть варианты технической системы (альтернативы) описываются набором (вектором параметров) $x \in X \subset R^N$ размерности N. Параметры x есть проектные или конструктивные параметры этого множества. Задание множеств

ва X диктуется требованиями вытекающими из технического задания и структурно-параметрического описания системы.

На основании анализа поведения пар альтернатив проектируемого объекта на множестве конструктивных параметров X по **бинарному отношению сравнительной эффективности** Φ альтернатива x эффективнее альтернативы y тогда и только тогда, когда $(x, y) \in \Phi$ или, в иной записи, $x\Phi y$.

Таким образом, под **задачей структурно-параметрического синтеза** понимается задача выделения ядра – множества максимальных или минимальных элементов из X по бинарному отношению Φ :

$$X^* \subset \max(\min)(X). \quad (16)$$

Предполагается, что решение задачи (16) существует, т.е. множество X^* непустое. Более того, в задачах структурно-параметрического синтеза, сформулированных в “замкнутой” форме считают, что решение (множество X^*) может состоять из одного элемента. Формально это означает, что бинарное отношение Φ , которым оперирует проектировщик, таково, что $|X^*| = 1$.

Часто при исследовании сложных динамических объектов предпочтительной бывает схема декомпозиции задачи структурно-параметрического синтеза, приводящая к иерархической структуре изучаемой системы. При этом решаемые на различных уровнях иерархии **частные задачи**, также формализуются в виде (16) и содержательно связаны с выбором подсистем объекта и имеют собственные частичные бинарные отношения Φ .

Учитывая все вышесказанное в применении к параметрическому синтезу экранопланов, перейдем к определению максимальных значений производных от подъемной силы изолированного крыла экраноплана при движении его на различных высотах над экраном в соответствии с первым частным критерием в (6) – $C_{y \max}^a$.

В этом случае решается частная задача структурно-параметрического синтеза, формализованная в виде (16) по определению максимальных несущих свойств изолированного крыла экранопланов и имеющая **бинарное отношение сравнительной эффективности** Φ в форме $C_{y \max}^a$,

$$X \rightarrow X^* = \max(X),$$

На рис. 6 приведены конфигурации значений производных крыла C_y^a вблизи экрана, построенных в зависимости от удлинения крыла:

$$C_y^a = y_1 = \frac{y a_\infty}{C_2(l) \left[1 + \frac{y a_\infty (1 + C_1(l))}{C_2(l) p l} x \right]}, \quad C_y^a = y_2 = \frac{1}{\bar{H}_s \sqrt{l}} \left(1 - \frac{1}{l} \right), \quad (17)$$

где $\bar{H}_s = \text{const}$ при одном отстоянии от экрана, но его величина зависит от высоты крыла над экраном. Из графика (рис. 6) видно, что оптимальное удлинение, обеспечивающее максимальные значения C_y^a (или y_1 и y_2), будет при $l \approx 4$.

По материалам расчета оптимального удлинения крыла получено авторское свидетельство (А. с. 708639 СССР), в котором на основании графиков (рис. 6) и дополнительных конструктивных соображений принято $l_{\text{опт.}} \approx 2,5$.

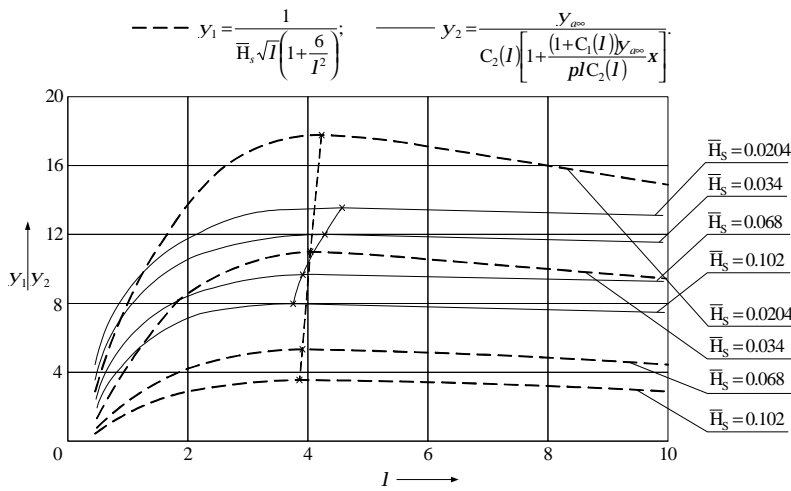


Рис. 6.

Определение оптимального значения удлинения крыла, движущегося вблизи экрана, справедливо для любой компоновочной схемы экраноплана и на любой высоте движения экраноплана над экранирующей поверхностью.

В третьей главе диссертации приведена также методика параметрического синтеза компоновочных схем экранопланов по обеспечению максимального аэродинамического качества всей компоновочной схемы в соответствии со второй критериальной оценкой в (6) — $K_{\max} = \frac{C_{y\Sigma}}{C_{x\Sigma}}$ (где $K_{\max} = \frac{C_{y\Sigma}}{C_{x\Sigma}} = \Phi$ — **бинарное отношение сравнительной эффективности**). Максимальное значение аэродинамического качества будет при условии равенства суммарного профильного и индуктивного сопротивлений экраноплана.

Для схемы “утка” это условие имеет вид:

$$\sum_{i=1}^k C_{x_{\text{пр}i}} \bar{S}_i = \frac{C_{y1}^2}{p} \left(\frac{2,25 \bar{S}_2}{l_2} x_{u.2} + \frac{x_{u.1}}{l_1} \right),$$

где i — количество агрегатов экраноплана.

Из условия установившегося горизонтального полета, $Y_\Sigma = G$

$$C_{y\Sigma} = \frac{2G}{rV_0^2 S_1},$$

где $C_{y\Sigma} = C_{y1}(1 + 1,5\bar{S}_2)$, следовательно, при условии, что $S_1 = I_1 b_{A_1}^2$,

$$C_{y1} = \frac{2G}{rV_0^2 I_1 b_{A_1}^2 (1 + 1,5\bar{S}_2)}.$$

Если выразить сопротивление агрегатов экраноплана через хорду основного крыла, то получим уравнение для экраноплана схемы “утка” в виде;

$$\begin{aligned} & \frac{0,1500(1 + 3\bar{C}_1) \left(1 + \bar{C}_1 \frac{V_0}{a}\right)}{\sqrt[5]{\frac{V_0}{v}}} b_{A_1}^3 \sqrt[5]{b_{A_1}^4} + \left[\frac{2,5800\bar{S}_2 (1 + 3\bar{C}_2) \left(1 + \bar{C}_2 \frac{V_0}{a}\right)}{\sqrt{\frac{V_0}{v}} b_{A_2}^2 S_1} + \right. \\ & \left. + \frac{2,5800\bar{S}_\kappa (1 + 3\bar{C}_\kappa) \left(1 + \bar{C}_\kappa \frac{V_0}{a}\right)}{\sqrt{\frac{V_0}{v}} b_{A_\kappa}^2 S_1} \right] b_A^4 - \frac{0,2330 D_\phi L_\phi}{\sqrt[5]{\frac{V_0}{v}} L_\phi S_1} b_{A_1}^2 \sqrt[5]{b_{A_1}^2} - \\ & - \frac{1,2740 G^2 x_{u.1}}{r^2 V_0^4 S_1^3 (1 + 1,5\bar{S}_2)^2} b_{A_1}^2 - \frac{2,8665 G^2 \bar{S}_2 x_{u.2}}{r^2 V_0^4 S_1^2 (1 + 1,5\bar{S}_2) I_2} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{Или} \quad f(b_{A_1}) = a_1 b_{A_1}^{19/5} + a_2 b_{A_1}^4 + a_3 b_{A_1}^{12/5} - a_4 b_{A_1}^2 - a_5 = 0. \quad (19)$$

Для нахождения значения b_{A_1} (корня) алгебраического уравнения (19) с дробными степенями использован метод последовательных приближений Ньютона-Рафсона.

Весь вышеприведенный расчет ведется для одного начального значения удлинения носового крыла и нескольких значений отстояний основного крыла от экрана, а затем повторяется для следующих удлинений.

В диссертации приведены алгоритмы для определения хорды основного крыла b_{A_1} для всех компоновочных схем.

В четвертой главе приведены алгоритмы и комплексы программ для задач принятия решений относительно определения зон устойчивости экранопланов различных компоновочных схем. Приведены также сведения о применении метода функциональных параметров (МФП) для решения широкого класса задач механики, начиная с решения гидродинамических задач обтекания несущей по-

верхности вблизи экрана и до задач интегрирования дифференциальных уравнений.

Рассмотрен один из вариантов метода пространства малого времени, получивший развитие в теории нестационарных процессов.

Для системы обыкновенных, линейных, однородных, дифференциальных уравнений

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t), \quad t \in J, \quad x(0) = x_{(0)}, \quad (20)$$

где $A - (k * k)$ – постоянная матрица, $x_{(0)} - k$ – мерный вектор начальных условий. Решения с использованием МФП можно представить в виде ряда

$$x = \sum_{n=0}^N x_n t^n, \quad (21)$$

где $t = 1 - e^{-qt}$.

Число членов ряда N в (21) определяется по заранее задаваемой точности ϵ представления приближенного асимптотического решения (21) задачи (20).

Для определения коэффициентов ряда (21) записывается система рекуррентных соотношений. Для i -ой компоненты вектора $\mathbf{x}_{(i)}$ оказывается справедливой рекуррентная формула

$$x_{i,n} = (1 - 1/n)x_{i,n-1} + 1/qn \sum_{j=1}^k a_{i,j} x_{j,n-1}, \quad (22)$$

где $a_{i,j}$ – соответствующий элемент матрицы A . Значение параметра q предлагается определять по следующей зависимости

$$q = \frac{2S_p}{K(K+3)}, \quad (23)$$

где S_p – след матрицы A ; K – размерность системы.

При интегрировании систем дифференциальных уравнений продольного возмущенного движения экранопланов методом функциональных параметров восстановить решение на всем физическом временном интервале функционирования системы $J \subseteq [0 \div \infty)$ не удастся. Это может быть объяснено жесткостью системы уравнений, описывающих возмущенное движение экранопланов. Рассмотрен вопрос о влиянии параметра q и количества членов разложения N в формуле (22) на решения системы. Показано, что решение восстанавливается

на некотором временном интервале от $t=0$ до t_1 . При $t > t_1$ метод функциональных параметров дает неустойчивые алгоритмы.

Предложен следующий алгоритм решения задачи Коши, восстанавливающий решение на физическом временном интервале $J \subseteq [0 \div \infty)$.

Система уравнений решается с двумя значениями параметра q : q_1 и $q_2 = q_1 + C$. Где $(0 < C < q_1)$ выбирается в конкретных задачах в соответствии со структурой матрицы A . Момент времени t_1 определяется путем сравнения в каждый момент времени интегрирования системы суммы модулей значений фазовых координат по, найденных с параметрами q_1 и q_2 . Расхождение значений регламентируется заранее заданной точностью e_1

$$\left| \sum_{i=1}^k |x_i|_{q_1} - \sum_{i=1}^k |x_i|_{q_2} \right| \leq e_1. \quad (24)$$

Момент времени, когда расхождение станет больше заданной точности, и принимается за время t_1 . Таким образом, предложенная в диссертации модификация метода функциональных параметров (алгоритм построения решения) заключается в построении асимптотических решений в интервале $J \subseteq [0 \div t_1)$ и дальнейшем пошаговом движении по временному интервалу $J \subseteq [0 \div \infty)$ “большими шагами”. За начальные значения фазовых координат для следующего шага берутся значения координат предыдущего шага во времени t_1 . Таким образом, получаем решение на всем временном интервале функционирования системы. Интегрирование МФП конечномерных линейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих асимптотически устойчивые процессы, имеет преимущества по быстродействию при сравнении с численным методом Рунге-Кутты.

В четвертой главе в соответствии с пятым уровнем концептуальной модели (Граф-схема рис. 1) ведется расчет самостабилизированных положений экранопланов схем “утка”, “обратная утка” и схемы “гибрид” в полетном диапазоне скоростей от скорости отрыва экраноплана до максимальной скорости. Самостабилизирующимися свойствами при полете над экраном обладают только эти схемы экранопланов. Самостабилизированные положения экранопланов получили название “**посадки**”. Термин “посадки” введен Р.Е. Алексеевым.

Ниже приведен алгоритм расчета “посадок” экранопланов компоновочной схемы “утка”.

Под посадками (для упрощения кавычки в слове посадки убраны) понимаются квазиустановившиеся сбалансированные положения экраноплана в продольном движении в диапазоне скоростей от скорости отрыва до крейсерской или максимальной скорости, что будет соответствовать посадкам при взлете, и от максимальной скорости до скорости касания взлетно-посадочной полосы (ВПП) – посадкам при торможении. При этом подразумевается отсутствие вмешательства органов управления во всем диапазоне скоростей и сохранение устойчивости движения.

В основу предложенной в работе методики расчета посадок экранопланов заложено условие постоянства нагрузок несущего комплекса во всем диапазоне полетных скоростей.

Из алгебраической системы уравнений балансировки для установившегося прямолинейного равномерного движения ЛА без крена и скольжения

$$\sum_{i=1}^K X_i = P; \quad \sum_{i=1}^K Y_i = G; \quad \sum_{i=1}^K M_i = 0, \quad (25)$$

справедливых для всего полетного диапазона скоростей экраноплана, путем несложных преобразований, можно определить выражение для отношения нагрузок основного несущего комплекса, например, для схемы “утка”.

Система уравнений (25) в развернутом виде для схемы “утка” будет:

$$\begin{aligned} (C_{Xnp.1} + C_{Xi1}) + (C_{Xnp.2} + C_{Xi2})\bar{S}_2 + \sum_{i=1}^{K-N} C_{Xi} \bar{S}_i &= \frac{2P}{rV^2 S_1}; \\ (C_{Y1} + C_{Y2} \bar{S}_2)V^2 &= \frac{2G}{rS_1}; \\ C_{Y1}L_1 + \frac{2P}{rV^2 S_1} &= C_{Y2} \bar{S}_2 L_2, \end{aligned} \quad (26)$$

где K – количество агрегатов ЛА, создающих сопротивление;

N – количество несущих поверхностей в компоновочной схеме;

L_1 и L_2 – расстояние от ЦМ аппарата до центров давления соответственно основного и носового крыльев.

Блок-схема алгоритма расчета посадок и алгоритма решения задачи Коши экранопланов приведена на рис. 7.

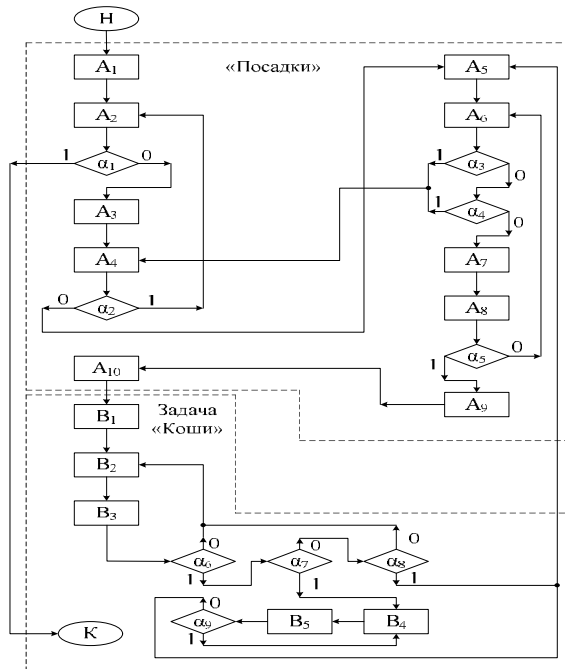


Рис. 7.

Ниже в таблице дана расшифровка операторов A_i , B_i и a_i .

A_1	Ввод ТТД ($H_{кр}$; $V_{кр}$; G ; l_i ; \bar{S}_i ; b_i ; m ; r_z^2 ; $\bar{X}_{\partial i}$; \bar{X}_{Fai} ; L ; x_0 ; DT)
A_2	Ввод значений несущих свойств стабилизатора $Y_{ст} = (0 - 300)$ кг.
a_1	Условный оператор $Y_{ст} > 300$. Если меньше, то рассчитываются посадки экраноплана. Если больше, то конец расчетов.
A_3	По заданным $H_{кр}$, G и $V_{кр}$ определение установочных углов атаки крыльев при $J = 0$.
A_4	Задание значений центровки экраноплана $\bar{L}_i = (0,2022 - 0,4113)$
a_2	Условный оператор $\bar{L}_i > 0,4113$. Если меньше, то рассчитываются посадки экраноплана. Если больше, то переход на расчет следующего значения $Y_{ст}$.
A_5	Уменьшается отстояние ЦТ от экрана на ΔH и определяются $\bar{h}_1 = \frac{H - \Delta H}{b_1}$, $\bar{h}_2 = \frac{H - \Delta H}{b_2}$ – отстояния крыльев от экрана.
A_6	Определение итерационных значений отстояний крыльев $\bar{h}_{1i} = \frac{H - \Delta H}{b_1} + (\frac{L_1}{b_1} + 1 + \bar{X}_{\partial 1})J_i$, и $\bar{h}_{2i} = \frac{H - \Delta H}{b_2} + (\frac{L_2}{b_2} - 1 + \bar{X}_{\partial 2})J_i$ в зависимости от итерационного значения угла тангажа
a_3 a_4	Условные операторы касания крыла ВПП $\bar{h}_1 \leq \bar{h}_{1зад}$ и $\bar{h}_2 \leq \bar{h}_{2зад}$. Если меньше или равно, то расчет посадок для следующей цен-

	тровки. Если больше, то переход на расчет следующего приближения для J_i .
A_7	Определение новых значений C_{y1} , C_{y2} , C_{y1}^a , C_{y2}^a , $C_{y1}^{\bar{h}}$, $C_{y2}^{\bar{h}}$ для значений отстояний крыльев оператора A_6 .
A_8	Определение $J_2 = J_1 - \frac{-C_{y1}L_1 + C_{y2}\bar{S}_2L_2 - C_pV_p}{C_{y1}^aL_1 - C_{y2}^a\bar{S}_2L_2}$ – угла тангажа следующего приближения
a_5	Условный оператор $\ J\ - \ J_1\ \leq e$ сравнения найденного значения J_i с предыдущим значением итерации J_{i-1} . При выполнении условного оператора – переход на оператор A_9 . При невыполнении – расчет J_{i+1} , угла тангажа следующей итерации.
A_9	Определение $V = \sqrt{\frac{2G}{rS_1[C_{y1}^a(a_1 + J_2) + C_{y2}^a(a_2 + J_2)\bar{S}_2]}}$ – потребная скорость полета для данной посадки.
A_{10}	Определение коэффициентов матрицы дифференциальных уравнений, собственных значений характеристического полинома.
B_1	Задача Коши $q = \frac{2S_p}{K(K+3)}$ – параметр отображения.
B_2	Определение безразмерного времени $t_1 = \frac{trS_1V_{9,81}}{2G}$ в параметре отображения $t = 1 - e^{-qt_1}$.
B_3	Определение фазовых координат $x_i = \sum_{n=0}^N x_{i,n} t^n$ и коэффициентов ряда $x_{i,n} = (1 - 1/n)x_{i,n-1} + 1/qn \sum_{j=1}^k a_{i,j} x_{j,n-1}$.
a_6	Условный оператор $\sum_{i=1}^K x_{i,n} \leq e_1$ – определение количества членов ряда разложения. Если сумма фазовых координат меньше заданной точности e_1 , то переход на a_7 . Если больше, то переход на B_2 .
a_7	Условный оператор $\left \sum_{i=1}^k x_i _{q_1} - \sum_{i=1}^k x_i _{q_2} \right \leq e_2$ – определение момента времени t_i появления неустойчивости алгоритма на временной шкале (расхождения значений сумм фазовых координат, найден-

	ных по двум значениям q и q_1).
a_8	Условный оператор $t_{1,i} = (t_1 + \Delta t) > t_{\text{зад}}$.– определения времени следующего шага интегрирования. Если меньше, то на B_2 . Если больше, то на A_7 .
B_4	Определение фазовых координат $x_i = \sum_{n=0}^N x_{i,n} t^n$ и коэффициентов ряда $x_{i,n} = (1 - 1/n)x_{i,n-1} + 1/qn \sum_{j=1}^k a_{i,j} x_{j,n-1}.$
B_5	Определение шага интегрирования $t_{1,i} = 2t_1$.
a_9	Условный оператор $t_{1,i} < t_{\text{зад}}$. Если меньше, то на B_4 . Если больше, то на A_7 .

Приведенная на рис. 7 блок-схема алгоритма расчета посадок и алгоритма решения задачи Коши экранопланов используется для расчета посадок экранопланов компоновочных схем “утки”, “обратной утки” и схемы “гибрид” с учетом специфической особенности каждой схемы.

В четвертой главе диссертации и в соответствии принципами СА решается также частная задача по определению зон устойчивости экранопланов, имеющая бинарное отношение сравнительной эффективности Φ в форме условий устойчивости Рауса-Гурвица:

$$\begin{aligned} \Phi = \{ & P_0 > 0; P_1 > 0; P_2 > 0; P_3 > 0; P_4 > 0; \\ & R_2 = (P_4 P_3 - P_2) > 0; R_3 = [R_2 P_2 - P_4 (P_4 P_1 - P_0)] > 0; \\ & R_4 [R_3 (P_4 P_1 - P_0) - R_2^2 P_0] > 0; R_5 = R_4 R_2 P_0 > 0 \}. \end{aligned} \quad (27)$$

Алгоритм определения зоны устойчивости экраноплана основывается на отыскании ядра

$$X \rightarrow X^* = \min(X), \quad (28)$$

где $X \in (\bar{S}_2 = 0,1 \div 1,0; \bar{L}_2 = 0,5 \div 5,0)$ – множество конкурирующих конструктивных параметров экраноплана, Φ – вектор бинарного отношения сравнительной эффективности (27) на X . Если одно из условий Рауса-Гурвица (вектора бинарного отношения Φ) в (27) станет отрицательным, при вариации конструктивных параметров экраноплана, то это соответствует потере устойчивости при данном значении конструктивных параметров.

Алгоритм определения границ устойчивости экранопланов реализован в электронных таблицах Microsoft Excel для контроля промежуточных значений расчетов при варьировании вектора конструктивных параметров X .

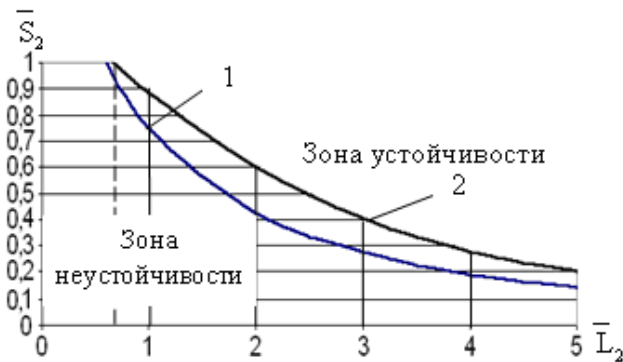


Рис. 8.



Рис. 9.



Рис. 10.

На рис. 8 отражена зона устойчивости экраноплана схемы “утка”, где кривая 1 справедлива для экранопланов с удлинением носового крыла $I = 2,5$, а кривая 2 для экранопланов с удлинением носового крыла

$$I_2 = \frac{S_2 \cdot I_1}{S_1}.$$

По материалам параметри-

ческого синтеза экранопланов компоновочной схемы “утка” получено два патента (№ 2224671 и № 2362693). Далее в четвертой главе ведется параметрический синтез математических моделей экранопланов компоновочных схем: “обратной утки”, схемы “гибрид” и “самолетной” схемы. Алгоритм оптимизации схем по определению максимальных несущих свойств изолированного крыла, максимального качества схемы и определение зон устойчивости аналогичен алгоритму, приведенному для расчета схемы “утка”. На рис. 9 приведена зона устойчивости для экранопланов компоновочной схемы “обратная утка”, а на рис. 10 зона устойчивости для “самолетной” схемы. Получены патенты на определение зон устойчивости для экранопланов “обратная утка” (№ 2368522) и “самолетной” схемы (№ 2368521).

В пятой главе диссертации приведены материалы по постановке эксперимента исследования динамических характеристик моделей экранопланов в реальном времени.

Для проверки математической модели возмущенного продольного движения экраноплана с учетом кинематической нестационарности, которая была получена во второй главе, автором диссертации построена и испытана модель экраноплана компоновки “летающая платформа”, являющаяся модификацией схемы “гибрид” с оптимальным удлинением крыльев.

Для регистрации параметров возмущенного движения модели использована самолетная аппаратура МСРП-12 с некоторыми изменениями и упрощениями. Данная измерительная система регистрации режимов полета записывала на фотоленте (рис. 11) следующие параметры полета модели:

- 1) вертикальные ускорения ЦМ и носовой части модели;
- 2) угловую скорость вращения вокруг оси OZ_c ;
- 3) аэродинамическое сопротивление модели;
- 4) величину возмущающей силы.

Буксировка модели экраноплана катером-буксировщиком производилась за уздечку, которая крепилась к датчику сопротивления, расположенного в районе центра давления носового крыла. При таком способе буксировки на модель действуют дополнительные демпфирующие силы и моменты, которые были учтены при формировании теоретической модели.

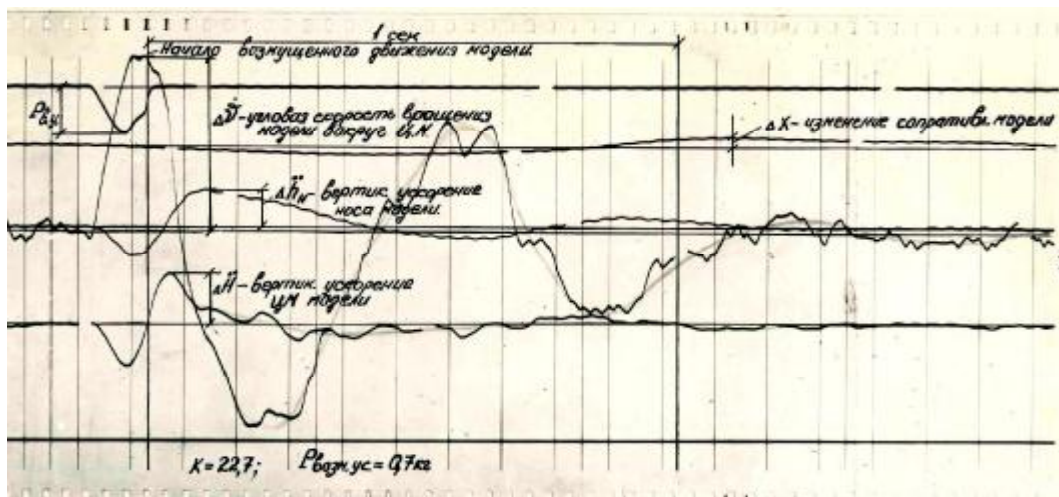


Рис. 11.

Обработка информации данных эксперимента и сравнение их с теоретическими расчетами проводилась по переходным процессам $\Delta \dot{J}$, $\Delta \ddot{H}$, ΔJ и $\Delta \bar{H}$.

Для получения теоретической зависимости $\Delta \ddot{H}$ ЦМ составлено уравнение в добавление к системе дифференциальных уравнений (2).

$$m\Delta\ddot{H} = \Delta Y \text{ или } \frac{d^2\Delta\bar{H}}{dt^2} = \frac{V_0}{t} (a_{21}\Delta\bar{V}V_0 + a_{22}\Delta a + a_{23}\Delta J + a_{25}\Delta\bar{H}). \quad (29)$$

Это уравнение в размерной форме и дает вертикальное ускорение ЦМ модели. Матрица коэффициентов системы $\dot{x} = Ax$ модели экраноплана в квазистационарной постановке с учетом влияния буксировочного тросика и кинематической нестационарности параметров движения имеет вид:

$$A = \begin{vmatrix} -0,0921 & -0,7200 & -0,1185 & -0,0010 & 0,2353 \\ -2,6980 & -22,2800 & 6,7759 & 1,2690 & 10,8536 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 15,7690 & -91,9900 & -99,6270 & -11,4400 & -53,1250 \\ 0 & -27,3900 & 27,3900 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Результаты расчетов переходных процессов с учетом нестационарности изменения параметров движения представлены на рис. 12.

На этих рисунках показаны также переходные процессы модели экраноплана $\Delta\dot{J}$, $\Delta\ddot{H}$, полученные из эксперимента, а также ΔJ и $\Delta\bar{H}$, путем численного интегрирования экспериментальных значений $\Delta\dot{J}$ и $\Delta\ddot{H}$. Начальные возмущения для расчета переходных процессов теоретических матриц взяты из интегральных кривых экспериментальных графиков значений $\Delta\dot{J}$ и $\Delta\ddot{H}$.

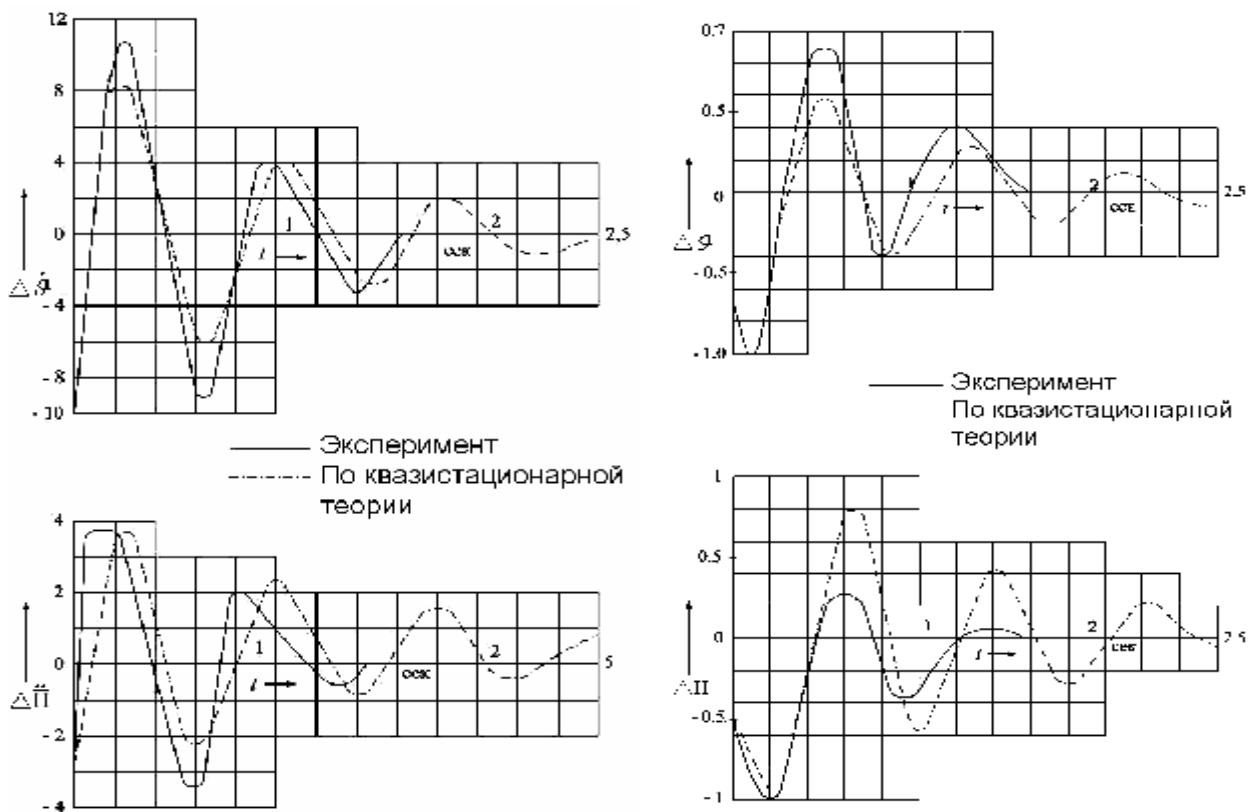


Рис. 12.

Как видно из рис. 12 переходные процессы имеют ярко выраженный колебательный характер и наблюдается совпадение с экспериментом с незначительным расхождением. Отличие результатов теоретических расчетов переходных процессов возмущенного движения модели экраноплана “летающая платформа” от экспериментальных кривых по первоначальным забросам параметров движения наблюдается только для параметра $\Delta \mathfrak{J}$ и ΔJ и не превышает 8%.

Созданию экспериментального самоходного экраноплана АДП-05 “Орфей” предшествовали два этапа обширных теоретических и экспериментальных исследований. На универсальное взлетно-посадочное устройство экраноплана АДП-05 “Орфей” получено авторское свидетельство (А.с. 915372, СССР). Первый этап работ характеризуется исследованием моделей экранопланов различной геометрии путем буксировки за уздечку катером на подводных крыльях типа “Волга”. На втором этапе при участии автора диссертации был построен и успешно прошел испытания самоходный пилотируемый экраноплан АДП-04М. Аппарат был выполнен по схеме “утка”. Матрица коэффициентов уравнений продольного движения экраноплана “Орфей” $\mathfrak{A} = A_5 x$ имеет вид:

$$A_5 = \begin{vmatrix} -0,1332 & 0,5860 & -1,0880 & 0 & -0,0822 \\ -2,2460 & -6,4830 & -1,7580 & 1 & 10,8536 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 3,0260 \\ -1,0350 & -121 & -403 & -23,3200 & -12,3400 \\ 0 & -41 & 41 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Собственные значения матрицы A_5 :

$$x_{1,2} = -13,0203 \pm i20,3306; x_{3,4} = -1,8587 \pm i10,8002; x_5 = -0,1782.$$

Результаты расчета коэффициентов характеристического уравнения экраноплана “Орфей” и критерии устойчивости сведены в (табл. 5.1).

Таблица 5.1.

Характеристика устойчивости экраноплана АДП-05 “Орфей”

P_3	P_2	P_1	P_0	P_t	$S_J \big _{\bar{H}=const}$	$S_H \big _{J=const}$	$\Delta \bar{X}_{F(4 \times 4)}$	$\Delta \bar{X}_{F(5 \times 5)}$
29,8	799,8	5292,	69245,3	7,1	1,168	-0,075	1,243	1,48

Из (табл. 5.1) видно, что критерий самостабилизации $\Delta\bar{X}_F$ “Орфей”, найденный из условия постоянства скорости в его возмущенном движении, меньше запаса устойчивости без этого ограничения

$$\Delta\bar{X}_{F(4 \times 4)} < \Delta\bar{X}_{F(5 \times 5)}.$$

Этот факт означает, что исследование устойчивости продольного возмущенного движения экранопланов схемы “утка” и ее модификаций по упрощенной математической модели (системы размерности 4x4 без уравнения проекции сил на ось ОХ) дает ошибку, которая не завышает оценку эксплуатационной устойчивости $\Delta\bar{X}_F$, а занижает ее. Это позволяет в первом приближении вести исследование устойчивости компоновочной схемы “утка” и ее модификаций – “гибрида” и “летающей платформы” по упрощенной математической модели движения четвертого порядка.

В диссертации отмечено, что одним из путей увеличения степени устойчивости экранопланов схемы “утка” и ее модификаций является нейтрализация дестабилизирующего момента носового крыла. Этого можно достигнуть, применением для носового крыла специальных профилей, у которых $C_y^a \cong 0$ или даже $C_y^a < 0$, или установкой стабилизатора в хвостовой части экраноплана под нулевым или положительным углом атаки, что было осуществлено на экраноплане “Орфей”. Если принять для носового крыла $C_{y_2}^a \cong 0$, то запас статической устойчивости по тангажу экраноплана “Орфей” будет $S_J \Big|_{\bar{H} = const} = 1,813$, что на 55% выше значения $S_J \Big|_{\bar{H} = const}$ при $C_{y_2}^a > 0$.

Эксплуатационная устойчивость “Орфей” в этом случае увеличивается.

В пятой главе в соответствии с требованиями СА исследовано также влияние конструктивных параметров (удлинения основного крыла l_1 и величины подъемной силы стабилизатора – Y_3 , при его установке) на критерий статической устойчивости – раздвижку фокусов $\Delta\bar{X}_F$ и на величину действительной части минимального корня характеристического уравнения свободного движения экраноплана “Орфей” – W_R .

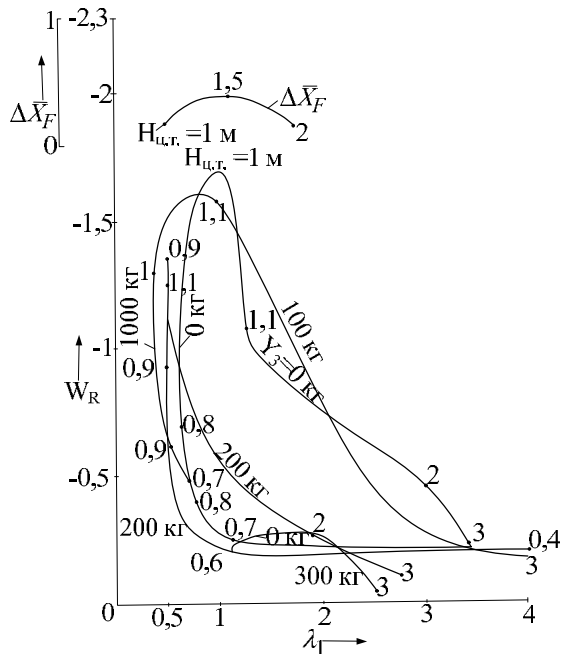


Рис. 13.

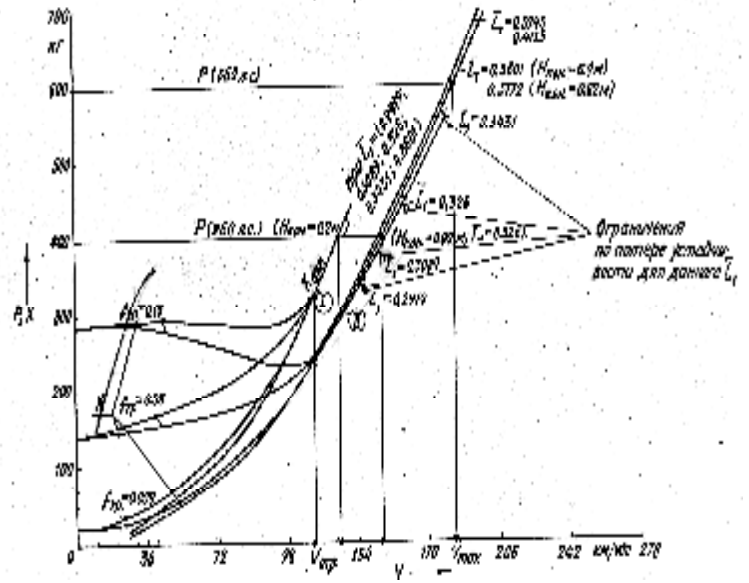


Рис. 14.

На рис. 15 приведены значения параметров экраноплана “Орфей” (J – угла тангажа, $H_{ц.т.}$ – расстояния центра масс от экрана и $\Delta\bar{X}_F$ – критерия статической устойчивости) в зависимости от скорости движения, которые определяют положение экраноплана в пространстве в процессе разгона от $V_{отр.}$ до V_{max} , то есть его “посадки” и степень самостабилизации при $Y_3=300$ кг.

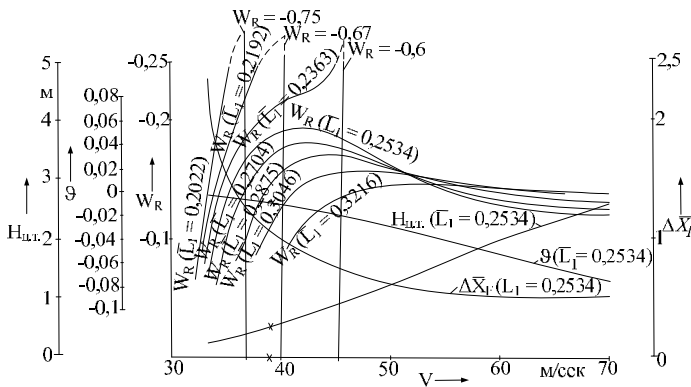


Рис. 15.



Рис. 16.

Максимальное значение критерия статической устойчивости $\Delta\bar{X}_F$ имеет при удлинении $I_1 = 1$, и расстоянии $H_{ц.т.} = 1$ м, что не противоречит, а совпадает с оптимальным значением I_{1opt} , найденным из условия максимума по модулю значения минимального корня характеристического полинома, являющегося критерием динамического совершенства (это хорошо видно на графиках рис. 15). Следовательно, анализ самостабилизирующих свойств экраноплана

“Орфей” по критерию самостабилизации – $\Delta\bar{X}_F$ (рис. 13), одновременно анализирует его и по критерию динамического совершенства – W_R (рис. 15), что важно в предварительном анализе при предэскизном проектировании. Для экраноплана “Орфей” проведен расчет балансировочных режимов (посадок) при различных несущих свойствах стабилизатора, различных центровках и для различных скоростей от скорости отрыва до максимальной скорости. При этом несущие свойства основного крыла не менялись, а балансировка аппарата, при изменении центровки и несущих свойств кормового стабилизатора, осуществлялась за счет изменения установочных углов атаки носового крыла. Расчет балансировочных режимов проводился по алгоритму приведенному на рис. 7.

На основании расчетов, приняв значение центровки экраноплана “Орфей” $\bar{L}_1 = 0,2875$ и не меняя ее при увеличении несущих свойств стабилизатора от $Y_3 = 0$ кг до $Y_3 = 300$ кг, получим уменьшение скорости отрыва с увеличением Y_3 от $V_{отр.} = 141,8$ км/час до $V_{отр.} = 120,9$ км/час.

Результаты теоретических расчетов согласуются с результатами испытаний экраноплана “Орфей” по скоростям $V_{отр.}$ и V_{max} при использовании на аппарате двигателя АИ-14. Установка на экраноплане “Орфей” модифицированного двигателя М-14 РС с мощностью $N = 360$ л.с. и кабины самолета ЯК-12П увеличила максимальную скорость и высоту полета экраноплана АДП-05М, но при этом предельно задняя центровка должна быть не менее $\bar{L}_1 = 0,3601$.

На рис. 14 приведены расчеты суммарного сопротивления экраноплана АДП-05 “Орфей” без кормового стабилизатора при разбеге и в полете в зависимости от различного состояния ВПП: (мягкий снег $f_{mr.} = 0,12$, утрамбованный снег $f_{mr.} = 0,06$, лед $f_{mr.} = 0,009$) и различной центровке аппарата \bar{L}_1 при использовании двух видов кабин: кабины от аэросаней К-30 (кривая 1) и фюзеляжа самолета ЯК-12П (кривая 2).

В соответствии с теоретическими рекомендациями диссертационной работы по определению оптимальных характеристик экранопланов компоновочной схемы “утка” автором диссертации был спроектирован и построен на Иркутском авиаремонтном предприятии прототип 8-ми местного пассажирского экраноплана СДП-09 (рис. 16). Экраноплан СДП-09 в настоящее время прошел предварительные испытания на льду Иркутского водохранилища.

В табл. 5.2 приведены технические характеристики масштабного ряда экранопланов схемы “утка”.

Таблица 5.2.

Масштабный ряд экранопланов схемы “утка”

Характеристики	СДП-10	СДП-11	СДП-12	СДП-13
Взлетный вес, т	4,8	8	30	70
Пассажирских мест	15	40	100	200
Дополнительный груз, т	0,1	0,4	2,5	10
Двигатель	автомоб. Toyota 3S-GTE	автомоб. BMW V-10	Д-436	Д-436
Мощность max, л.с.	2x240	2x507	–	–
Тяговые характеристики, кг	–	–	2x7500	2x7500
Запас топлива, т	0,8	2,5	10	20
Скорость крейсерская, км/ч	250	390	400	580
Высота полета, м	1	2	2,6	3

Коммерческий результат от внедрения экранопланов в транспортную систему может превзойти любые смелые прогнозы. Возможная схема применения экранопланов в транспортной системе:

– экранопланы взлетного веса от 1 до 150 т могут выполнять экскурсионно-туристические, санитарные и почтовые рейсы, доставку грузов в труднодоступные регионы, разведку полезных ископаемых, операции по спасению терпящих бедствие на воде; “экономическая” высота полета – 0,7-7 метров;

– экранопланы взлетного веса от 150 до 1000 т могут выполнять межконтинентальные грузовые и грузопассажирские перевозки, спасательные операции на воде и перевозку негабаритных, сыпучих и жидких грузов, а также экранопланы можно использовать в качестве мобильных баз-складов и центров; “экономическая” высота полета – 7-20 метров.

Как видно из табл. 5.3 – таблицы сравнения характеристик проекта экраноплана СДП-13 на 200 пассажиров с самолетами Ту-154М и Бе-200, стоимость перевозки 1т полезного (платного) груза на 1 км пути для экраноплана СДП-13 в 3,7 раза ниже, чем на самолете Ту-154М и более чем в 11 раз ниже, чем на Бе-200.

Таблица сравнения экраноплана СДП-13 на 200 пассажиров с самолетами
Ту-154М и Бе-200

№ п/п	Характеристики	Ту-154М	Бе-200	СДП-13	Примечания
1	Взлетный вес $G_{\text{взл}}$ (т)	104	41	70	
2	Вес полезной нагрузки $G_{\text{пол.нагр.}}=(G_{\text{пасс.}}+G_{\text{груза}})(\text{т})$	18	6	30	
3	Количество пассажиров $N_{\text{пасс.}}(\text{чел.})$	160	44	200	
4	Вес топлива максимально $G_{\text{топл.}}(\text{т})$	39,75	12,5	20	
5	Относительный вес полезной (платной) загрузки $\bar{G}_{\text{платн.}}$	0,173	0,146	0,43	
7	Крейсерская скорость $V_{\text{крейс.}}(\text{км/час})$	900	520	400	
8	Дальность полета $L_{\text{пол.максим.}}(\text{км})$	5395	1500	5021	
9	Стоимость перевозки 1т полезного груза на 1 км пути $C_{\text{перев.платн. груза}}(\text{руб.})$	8,865	26,7	2,4	По ценам на сентябрь 2009 года

В период с 1979 г. по 2008 г. в Иркутске было построено и испытано несколько моделей и самоходных экранопланов компоновочной схемы “утка”. Автор диссертации принимал активное участие в строительстве и испытаниях этих экранопланов АДП-01, АДП-02, АДП-03, АДП-04, АДП-05, АДП-06, АДП-07 и СДП-09 (рис. 16). Аббревиатура АДП означает – аппарат на динамической подушке, а СДП – судно на динамической подушке. Все экранопланы показали хорошие результаты, летали устойчиво, имели хорошую курсовую управляемость.

Байкальские экономические форумы (БЭФ), состоявшиеся в сентябре 2004 г., 2006 г. и 2008 г. в Иркутске, убедительно показали необходимость создания в России глобальной транспортной системы, объединяющей все существующие виды транспорта, в том числе и экранопланы, в единую функциональную систему для обеспечения национальной безопасности, для решения экономических и социальных проблем. По заданию БЭФ 2006 г. разработан бизнес

план по созданию экранопланов опытной серии (10 экземпляров) вместимостью 15 пассажиров компоновочной схемы “утка”.

Самостабилизирующиеся экранопланы компоновочной схемы “утка” являются уникальными аппаратами, **не имеющими аналогов в мире.**

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выполнен системный анализ математических моделей и методов проектирования экранопланов различных компоновочных схем, что позволило выявить нерешенные проблемы в теории и практике экранопланостроения.
2. Разработана математическая модель продольного движения экранопланов в виде системы обыкновенных, однородных, линейных, с постоянными коэффициентами дифференциальных уравнений пяти компоновочных схем и введена кинематическая нестационарность параметров движения.
3. Предложена методика расчета аэродинамических характеристик крыльев экранопланов пространственной геометрии.
4. Разработана методика и алгоритм управления проектированием экранопланов по частным критериям оптимальности с использованием методов и средств системного анализа и структурно-параметрического синтеза, определены также зоны устойчивости экранопланов схем “утка”, “обратная утка” и “самолетной” схемы в зависимости от конструктивных параметров.
5. Разработан алгоритм применения метода пространства малого времени для интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши, обладающий лучшей вычислительной эффективностью по временным затратам относительно существующих численных методов.
6. Получены новые критерии продольной статической устойчивости для экранопланов различных компоновочных схем.
7. Разработан алгоритм расчета “посадок” для самостабилизирующихся экранопланов и разработана методика проектирования экранопланов для пяти схем с оптимизацией по частным критериям – максимальным несущим свойства крыла и максимальному качеству всего экраноплана.
8. Разработана методика проведения эксперимента по исследованию динамических характеристик буксируемых моделей экранопланов в натурных условиях на открытой воде с записью и обработкой информации полученных параметров движения в реальном времени. Отличие результатов расчетов пара-

метров движения от экспериментальных кривых по первоначальным забросам параметров движения не превышает 8%.

9. Исследованы самостабилизирующие свойства и динамические характеристики продольного движения опытного самоходного экраноплана АДП-05М “Орфей”.

10. Получены авторские свидетельства на оптимальное удлинение крыла экраноплана, на компоновочную схему “гибрид”, на универсальные взлетно-посадочные устройства экраноплана “Орфей” и четыре патента на компоновочные схемы “утка”, “обратная утка” и “самолетная” схема по определению зон устойчивости этих схем в зависимости от конструктивных параметров.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Суржик, В.В.** Проблемы динамики экранопланов [Текст] / В.В. Суржик // Вестник ИрГТУ, серии Кибернетика. – Иркутск : – 2006. – Вып. 2. – С. 155-158.
2. **Суржик, В.В.** Критерии оценки устойчивости экранопланов [Текст] / В.В. Суржик // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – Новосибирск : Изд. НГТУ. – 2007. Вып. 1(26). – С. 167-176.
3. **Суржик, В.В.** Некоторые особенности динамики экранопланов [Текст] / В.В. Суржик // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – Новосибирск : Изд. НГТУ. – 2007. – Вып. 2(27). – С. 59-68.
4. **Суржик, В.В.** Системный анализ динамики экранопланов [Текст] / В.В. Суржик // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск : ИрГУПС. – 2008. – Вып. 2(18). – С. 99-101.
5. **Суржик, В.В.** Перспективы развития транспортных сетей для Евро-Азиатского коридора [Текст] / В.В. Суржик, Ю.Ф. Мухопад // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск : ИрГУПС. – 2008. – Вып. 3(19). – С. 171-173.
6. **Суржик, В.В.** Системные преимущества самостабилизирующихся экранопланов [Текст] / В.В. Суржик, Ю.Ф. Мухопад // Мир транспорта. – 2008. – Вып. 3. – С. 32-37.
7. **Суржик, В.В.** Экранопланы Сибири [Текст] / В.В. Суржик // Мир транспорта. – М. : 2009. – Вып. 2. – С. 34-39.

8. **Суржик, В.В.** Проектирование экранопланов различных компоновочных схем [Текст] / В.В. Суржик, Ю.Ф. Мухопад // Журн. “Полет” – М. : Машиностроение. – 2010. – Вып. 1. – С. 55-60.
9. **Суржик, В.В.** Определение зон устойчивости конструктивных схем экранопланов [Текст] / В.В. Суржик // Журн. “Полет” – М. : Машиностроение. – 2010. – Вып. 2. – С. 28-32.

Авторские свидетельства и патенты

10. **А. с. 663152 СССР, М. Кл.2 В 60 V 1/08.** Самостабилизирующийся экраноплан [Текст] / В.В. Суржик, А.Н. Панченков, В.И. Орищенко, В.Я. Уризченко (СССР). – № 2201912/40-23; заявл. 05.04.1976. – 4 с. : ил.
11. **А.с. 708639 (СССР). М. Кл.2 В 60 V 1/08.** Самостабилизирующийся экраноплан [Текст] / В.В. Суржик, А.Н. Панченков, А.К. Харковенко (СССР). – № 2601673/27-1; заявл. 7.04.1978. – 5 с. ил.
12. **А.с. 915372 (СССР). М. Кл.2 В 60 V 1/08.** Самостабилизированный экраноплан по схеме “Утка” [Текст] / В.В. Суржик, А.Н. Панченков, В.Я. Уризченко, В.И. Орищенко, А.К. Мартынов, К.Б. Попов, А.П. Стерхов, А.К. Харковенко (СССР). – № 2895857/40-23; заявл. 19.03.1980. – 8 с. ил.
13. **Пат. № 2224671 Российская Федерация, МПК7 В 60V 1/08.** Самостабилизирующийся экраноплан [Текст] / Суржик В.В., Скороходов П.А., Таранушенко В.В., Ремизов С.М., Взяткин Г.А. Иркутск. Закрытое акционерное общество “Технологии СДП. – № 2003100793; заявл. 09.01.2003; опубл. 27.02.2004, Бюл. № 6. – 1 с.
14. **Пат. № 2362693 Российская Федерация, МПК В 60V1/08.** Самостабилизирующийся экраноплан [Текст] / Суржик В.В., Мухопад Ю.Ф., Ремизов С.М.; заявитель и патентообладатель Иркутск. ООО Байкальский научно-инженерный центр. – № 2007111299; заявл. 27.03.2007; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 21. – 2 с.
15. **Пат. № 2368521 Российская Федерация, МПК В 60V1/08.** Экраноплан “самолетной” схемы [Текст] / Суржик В.В., Мухопад Ю.Ф.; заявитель и патентообладатель Иркутск. ООО Байкальский научно-инженерный центр. – № 2007129448 ; заявл. 31.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 27. – 2 с.
16. **Пат. № 2368522 Российская Федерация, МПК В 60V1/08.** Самостабилизирующийся экраноплан [Текст] / Суржик В.В., Мухопад Ю.Ф., Величко И.И.; заявитель и патентообладатель Иркутск. ООО Байкальский научно-

инженерный центр. – № 2007129449; заявл. 31.07.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 27. – 2 с.

Публикации в ведущих журналах и на конференциях

17. **Суржик, В.В.** Некоторые подходы к решению задач оптимальной стабилизации летательных аппаратов, использующих влияние близости экрана [Текст] / В.В. Суржик. // Иркутск : Труды ИПИ, 1974. – Вып. 2. – С. 137-144.
18. **Суржик, В.В.** Стохастическая устойчивость быстроходных транспортных аппаратов, движущихся вблизи опорной поверхности [Текст] / В.В. Суржик, Г.М. Ружников // Материалы 24-ой Всесоюзной научно-технической конференции по теории корабля. – Л. : 1975. – С. 120-124.
19. **Суржик, В.В.** Влияние параметра отображения в асимптотическом методе пространства малого времени на решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / В.В. Суржик, Т.Н. Суржик // Асимптотические методы в теории систем. – Иркутск : 1975. – Вып. 8. – С. 167-174.
20. **Суржик, В.В.** Исследование статистической динамики летательных аппаратов / В.В. Суржик, Г.М. Ружников // Методы возмущений в механике. – Иркутск : Изд-во ВСФ СО АН СССР, 1982. – С. 122-125.
21. **Суржик, В.В.** Учет дополнительных кинематических связей в динамике транспортного аппарата, движущегося вблизи опорной поверхности [Текст] / В.В. Суржик // Методы возмущений в механике. – Иркутск : Изд-во ВСФ СО АН СССР, 1984. – С. 188-195.
22. **Суржик, В.В.** Результаты испытаний экранопланов серии АДП и перспективы создания транспортных экранопланов для круглогодичной эксплуатации на реках Сибири [Текст] / В.В. Суржик и др. // Вопросы создания транспорта для Сибирского Севера. – Иркутск : Изд-во ВСФ СО АН СССР, 1988. – С. 38-44.
23. **Суржик, В.В.** Особенности аэродинамики экранопланов компоновочной схемы типа “Утка” [Текст] / В.В. Суржик // Вопросы создания транспорта для Сибирского Севера. – Иркутск : Изд-во ВСФ СО АН СССР, 1988. – С. 50-58.
24. **Суржик, В.В.** Особенности устойчивости экранопланов компоновочной схемы “Утка” [Текст] / В.В. Суржик // Материалы V всесоюзной школы-семинара.
– Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 1990. – С. 87-71.

25. **Суржик, В.В.** Проект экскурсионно-прогулочного экраноплана схемы “Утка” [Текст] / В.В. Суржик, В.Г. Семенов // Труды 1 международной конференции по экранопланам. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 1993. – С. 50-55.
26. **Суржик, В.В.** Анализ устойчивости экранопланов различных компоновочных схем [Текст] / В.В. Суржик // Асимптотические методы в задачах аэродинамики и проектирования летательных аппаратов. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 1995. – С. 37-41.
27. **Суржик, В.В.** Проект экскурсионно-прогулочного экраноплана схемы “Утка” взлетной массы 1200 кг. [Текст] / В.В. Суржик, Т.В. Шкурихина // Асимптотические методы в задачах аэродинамики и проектирования летательных аппаратов. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, СО РАН, 1996. – С. 38-42.
28. **Суржик, В.В.** Самостабилизированный экраноплан – новый вид транспорта [Текст] / В.В. Суржик // АэроМастер 0/98. Научно-популярный альманах о легкомоторной авиации. – Новосибирск : Изд-во Авиационная корпорация, 1998. – С. 116-117.
29. **Суржик, В.В.** Будем летать как “утки” [Текст] / В.В. Суржик, А.В. Коршуков // Журнал “Да Триумф”. – Иркутск : 2003. – Вып. 2.
30. **Суржик, В.В.** О возможности внедрения в транспортную систему экранопланов компоновочной схемы “Утка” [Текст] / В.В. Суржик // Геополитические и социально-экономические проблемы создания международных транзитных транспортных коридоров. Монография Байкальского Экономического Форума. – Иркутск : 2004. – Т. 1. – С. 383-386.
31. **Суржик, В.В.** А.Н. Панченков физик, математик, инженер [Текст] / В.В. Суржик. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2005. – С. 254-262.
32. **Суржик, В.В.** Проблемы динамики экранопланов [Текст] / В.В. Суржик // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, ИДСТУ СО РАН, 2006. – Вып. 14. – С. 62-71.
33. **Суржик, В.В.** Определение динамических характеристик экранопланов различных схем [Текст] / В.В. Суржик // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, ИДСТУ СО РАН, 2006. – Вып. 14. – С. 72-79.
34. **Суржик, В.В.** Экранопланы в условиях сибирского климата [Текст] / В.В. Суржик, Ю.Ф. Мухопад, И.И. Орлов // Труды III Евразийского симпозиума

по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата. – Якутск : 2006. – Часть VI. – С. 10-20.

35. **Суржик, В.В.** От стариц Днепра до берегов Байкала [Текст] / В.В. Суржик, С.Г. Вахрушев // Журн. “Авиация и время”. – Киев : 2006. – № 3.
36. **Суржик, В.В.** Экранопланы – перспективный транспорт для просторов Сибири [Текст] / В.В. Суржик, Ю.Ф. Мухопад, И.И. Орлов // Современные технологии, системный анализ, моделирование. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2006. – Вып. 3(11). – С. 144-150.
37. **Суржик, В.В.** Проблемы динамики экранопланов [Текст] / В.В. Суржик // Материалы третьей международной конференции. Проблемы механики современных машин. – Иркутск: Изд-во ВСГТУ, 2006. – Т. 2. – С. 254-258.
38. **Суржик, В.В.** Определение зоны устойчивости экранопланов [Текст] / В.В. Суржик. // Материалы XI Международной научно–практической конференции. Современные технологии в машиностроении. – Пенза : 2007. – С. 214-217.
39. **Суржик, В.В.** Оценка характеристик устойчивости экранопланов [Текст] / В.В. Суржик // Материалы XI Международной научно-практической конференции. Современные технологии в машиностроении. – Пенза : 2007. – С. 217-219.
40. **Surzhik, V.V.** Integration way of development of the transportation network for EURO-ASIAN corridor [Текст] / Y.F. Mukhopad and V.V. Surzhik. // Innovation & Sustainability of Modern Railway Proceedings of ISMR 2008. – Edited by Lei. Xiaoyan China : 2008. – P. 427-430.
41. **Surzhik, V.V.** The second-generation ekranoplans [Текст] / V.V. Surzhik and Y.F. Mukhopad // Innovation & Sustainability of Modern Railway Proceedings of ISMR 2008. Edited by Lei. – Xiaoyan China: 2008. – P. 597-601.
42. **Суржик, В.В.** Интеграция евро-азиатских транспортных систем [Текст] / В.В. Суржик, Ю.Ф. Мухопад // Труды Байкальской Всероссийской конференции. Информационные и математические технологии в науке и управлении. – Иркутск : Изд-во ИСЭ им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2009. –Том 1. – С. 185-189.
43. **Суржик, В.В.** Перспективы развития транспортной системы в Сибирском регионе [Текст] / Ю.Ф. Мухопад, В.В. Суржик // Сборник докладов I-й научно-практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов. – Иркутск : ИФ МГТУ ГА, 2009. – С. 5-15.

44. **Суржик, В.В.** Испытания моделей экранопланов на открытой воде с записью параметров движения [Текст] / В.В. Суржик // Сборник докладов I-й научно-практической конференции преподавателей, научных работников и аспирантов. – Иркутск : ИФ МГТУ ГА, 2009. – С. 67-76.