

На правах рукописи



Виндекер Александр Викторович

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА ГАЗОВЫХ  
РУЛЕЙ В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ СКЛОНЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО  
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КЛАССА «ПОВЕРХНОСТЬ – ВОЗДУХ»**

05.07.02 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: д.т.н., доцент  
Парафесь Сергей Гаврилович

Официальные оппоненты: Ветров Вячеслав Васильевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева  
Тульского государственного университета, профес-  
сор кафедры «Ракетное вооружение»

Раков Дмитрий Леонидович,  
кандидат технических наук,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Российской академии наук (ИМАШ РАН), старший  
научный сотрудник

Ведущая организация: Акционерное общество «Обнинское научно-  
производственное предприятие «Технология» имени  
А.Г. Ромашина», г. Обнинск

Защита диссертации состоится «24» февраля 2022 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», <https://mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 212.125.10,  
к.т.н., доцент

Денискина Антонина Робертовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Важнейшие тактические и эксплуатационные преимущества беспилотного летательного аппарата (БЛА) класса «поверхность – воздух» с вертикальным стартом и интенсивным склонением в необходимом направлении предопределяют их постепенное преобладание, прежде всего, среди БЛА морского базирования. Чтобы реализовать преимущества вертикального старта, БЛА должен обладать системой склонения, которая способна за минимальное время изменить направление полета от вертикального при старте до требуемого направления, ориентированного в точку встречи с целью. Для осуществления процесса склонения БЛА требуется создание относительно больших управляющих моментов. Ввиду малости аэродинамических сил в начальный момент времени управление при вертикальном старте реализуется газодинамическими способами.

Склонение современных БЛА реализуется посредством моментного газодинамического управления двумя основными способами. Первый состоит в применении системы управления вектором тяги (СУВТ) основного реактивного двигателя БЛА (применяется как при «горячем» вертикальном старте, так и при «холодном», «принудительном») и реализуется специальными устройствами, отклоняющими реактивную струю маршевого двигателя БЛА для создания управляющей силы. В качестве таких устройств широко используются газовые рули (ГР), которые осуществляют управление БЛА по всем трем каналам: тангажу, рысканью (курсу) и крену, что обеспечивает всеракурность применения БЛА.

Второй способ предполагает склонение БЛА до запуска маршевого двигателя («принудительный» или «холодный» вертикальный старт) после выброса БЛА из транспортно-пускового контейнера (ТПК) с помощью дополнительной системы (катапультирующего устройства или порохового аккумулятора давления) с последующим разворотом корпуса БЛА в процессе набора высоты и запуском маршевого двигателя по окончании разворота. Возможно включение основного двигателя в конечный момент разворота, что приведет к увеличению радиуса траектории разворота, но сократит время склонения. Для реализации склонения БЛА используются устройства, создающие реактивную управляющую силу, пропорциональную команде управления или в виде кратковременных реактивных импульсов.

Тем не менее, возможны и другие технические реализации моментного газодинамического управления, поэтому представляет интерес проведение анализа эффективности использования той или иной системы склонения с целью улучшения характеристик перспективных БЛА.

Настоящая диссертационная работа посвящена **актуальной теме** – вопросам исследования способа склонения БЛА класса «поверхность – воздух» за счет отклонения вектора тяги маршевого двигателя с помощью ГР (первый способ) в сравнении с альтернативными способами склонения с выходом на задачи проектирования блока ГР в составе системы склонения БЛА.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Проблемам исследования газодинамических способов и разработки систем газодинамического управления посвящено значительное число исследований, результаты которых опубликованы в ряде научных статей и монографий. Большая часть данных исследований посвящена вопросам газодинамического управления движением космических аппаратов в безвоздушном пространстве, меньшая часть относится к задачам управления движением БЛА на участках склонения и наведения. В них, как правило, решаются задачи исследования и моделирования траекторий движения БЛА, излагаются частные методики и модели проектирования систем склонения применительно к отдельным этапам проектирования. Анализ работ в области моделирования и проектирования БЛА с газодинамическим управлением свидетельствует, что, несмотря на достигнутый уровень исследований, актуальным остается рассмотрение вопросов комплексного проектирования систем склонения БЛА класса «поверхность – воздух» с вертикальным стартом, в числе которых проектирование блока ГР в составе системы склонения БЛА.

Первые результаты изложены в фундаментальных работах П.Д. Грушина, Д.Л. Томашевича и в последующих работах И.И. Архангельского, Е.Г. Болотова, В.А. Дунаева, В.Я. Мизрохи, В.Г. Светлова и других ученых.

### **Цель и задачи исследования.**

**Целью исследования** является разработка метода определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения на этапе формирования облика БЛА класса «поверхность – воздух».

Для достижения цели необходимо решить следующие основные **задачи**:

1. Разработать методику выбора рациональной системыклонения БЛА в условиях морского базирования с использованием «горячего» или «холодного» вертикального старта на этапе формирования облика БЛА.

2. Разработать комплексную методику проектирования блока ГР в составе системыклонения БЛА.

Решение поставленных задач обеспечит повышение качества научно-исследовательских работ по созданию перспективных БЛА на этапе формирования облика, снижение материальных и временных затрат при выполнении работ.

### **Научная новизна исследования.**

Предложен метод определения проектных параметров блока ГР в составе системыклонения на этапе формирования облика БЛА класса «поверхность – воздух», удовлетворяющий требованиям морского базирования с использованием «горячего» или «холодного» вертикального старта, для реализации которого:

– разработана методика выбора рациональной системыклонения по критерию минимума массы БЛА на этапе формирования его облика; альтернативными вариантами системклонения являются: СУВТ, реализуемая ГР, размещаемыми в сопле двигателя БЛА или за его срезом, импульсная двигательная установка (ИДУ) и автономное устройство пропорционального управления (АУПУ);

– разработана комплексная методика проектирования блока ГР системыклонения БЛА, позволяющая решать задачи: выбора эффективного конструкционного материала; определения потребной внешней геометрии ГР с учетом уноса выбранного материала; сравнительного анализа компоновочных схем и конструктивно-технологических решений блока ГР системыклонения.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

**Теоретическая значимость** состоит в развитии методов и методик исследования и проектирования системклонения БЛА класса «поверхность – воздух».

**Практическая значимость** полученных результатов диссертации заключается в создании метода и методик определения проектных параметров блока ГР, направленных на сопровождение научно-исследовательских работ, связанных с разработкой системклонения БЛА класса «поверхность – воздух».

**Методология и методы исследования.**

Методологическую основу исследования составили научные труды отечественных и зарубежных ученых в области исследования и проектирования БЛА с системами газодинамического управления и склонения.

Информационные источники научного исследования:

- научные источники в виде данных и сведений из книг, журнальных статей, научных докладов, материалов научно-технических конференций;
- официальные документы: положения и ГОСТ;
- результаты собственных расчетов и проведенных исследований.

Для исследования альтернативных способов и систем склонения с целью обоснования выбора рациональной системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух», удовлетворяющей требованиям морского базирования с использованием «горячего» или «холодного» вертикального старта, используются алгоритмы и модели системы автоматизированного проектирования САПР ЛА кафедры 602 МАИ.

Для решения задач выбора рационального конструкционного материала; определения потребной внешней геометрии ГР с учетом уноса конструкционного материала с передней кромки руля; сравнительного анализа компоновочных схем и конструктивно-технологических решений блока ГР системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух» применяется методика, разработанная на основе экспериментальных данных по продувкам ГР в струе реактивного двигателя, опубликованных в научных изданиях.

**Положения, выносимые на защиту:**

– метод определения параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух» с вертикальным стартом, удовлетворяющий требованиям морского базирования с использованием «горячего» и «холодного» вертикального старта;

– методика решения задачи выбора рациональной системы склонения по критерию минимума массы БЛА на этапе формирования его облика из числа альтернативных систем склонения в виде: СУВТ, реализуемая ГР, размещаемыми в сопле двигателя БЛА или за его срезом, ИДУ и АУПУ;

– комплексная методика проектирования блока ГР системы склонения БЛА, позволяющая решать задачи: выбора рационального конструкционного материала; определения потребной внешней геометрии ГР с учетом уноса конструкционного материала с передней кромки руля; сравнительного анализа компоновочных схем и конструктивно-технологических решений блока ГР системы склонения.

### **Степень достоверности и апробация работы.**

**Достоверность** обеспечивается корректным применением методов исследования и проектирования системы склонения БЛА; строгостью применяемых математических моделей; сравнением получаемых результатов с известными решениями в данной области, опубликованными в фундаментальных работах коллектива авторов ГосМКБ Факел им. П.Д. Грушина и МАИ, а также в работах ТулГУ.

**Апробация работы.** Основные положения работы были представлены и обсуждены на конференциях: Гагаринские чтения – 2016 (г. Москва, МАИ); Международная научно-техническая конференция «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (г. Москва, МГТУ ГА, 2016 и 2018 г.г.); Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016, 2017, 2018». (г. Москва, МАИ, 2016-2018 г.г.); Научно-практическая конференция «Применение информационных технологий в машиностроении» (г. Москва, 2019 г.); Двенадцатая научно-техническая конференция «Львовские чтения» (г. Екатеринбург, 2020 г.).

**Внедрение результатов работы.** Основные результаты, полученные в диссертации, внедрены в учебный процесс кафедры 602 и используются при проведении лекций и лабораторных работ по дисциплинам «Инженерные методы проектирования конструкций летательных аппаратов» и «Проектирование управления летательных аппаратов».

### **Структура и объем диссертационной работы.**

Диссертация объемом 112 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 75 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** сформулированы научные задачи исследования, обозначена ее актуальность, определены цель работы и круг решаемых задач, отмечены научная

новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан обзор возможных способов и систем склонения БЛА класса «поверхность – воздух» с вертикальным стартом; рассмотрены принципы и схемы систем склонения БЛА; приведены примеры реализованных систем склонения БЛА; представлен краткий обзор работ в области исследования и проектирования систем склонения БЛА, а также патентов, посвященных конструктивным решениям ГР.

Завершается глава постановкой задачи исследования.

Объект исследования – блок ГР в составе системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух» вертикального старта.

Предметом исследования являются математические модели, методы и методики исследования и проектирования систем склонения БЛА.

Известными считаются:

- функциональные требования, предъявляемые к БЛА: дальность, диапазон высот, характеристики целей, масса и тип боевой части, метод наведения, масса бортовой аппаратуры управления и др., необходимые для решения задачи формирования облика БЛА класса «поверхность – воздух»;

- требования к системе склонения вертикально стартующего БЛА, такие как: время разворота корпуса БЛА на максимальный угол; угол наклона вектора скорости БЛА к моменту окончания участка склонения и др.

- возможные ограничения на параметры системы склонения, например, ограничение на величину поперечной перегрузки при склонении БЛА.

Требуется разработать метод определения параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух» с вертикальным стартом, удовлетворяющей требованиям морского базирования с использованием «горячего» или «холодного» вертикального старта, для реализации которого необходимо:

- разработать методику выбора рациональной из альтернативных систем склонения по критерию минимума массы БЛА на этапе формирования его облика;

- разработать комплексную методику проектирования блока ГР системы склонения БЛА, позволяющую решать задачи: выбора эффективного конструкционного материала ГР; определения потребной внешней геометрии ГР с учетом



уноса выбранного материала; сравнительного анализа компоновочных схем и конструктивно-технологических решений блока ГР системы склонения.

**Во второй главе** изложен метод определения параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух» с вертикальным стартом, удовлетворяющей требованиям морского базирования с использованием «горячего» или «холодного» вертикального старта.

Основными требованиями технического задания (ТЗ) на разработку БЛА класса «поверхность – воздух», относящимися к управлению склонением при вертикальном старте, являются: 1) обеспечение ближней границы зоны поражения и 2) возможности применения (пуска) БЛА по всем азимутальным направлениям без углов запрета. Первое основное требование ТЗ к склонению БЛА, инвариантное по отношению к любым типам БЛА вертикального старта, конкретизируется требованиями к двум параметрам: времени разворота корпуса БЛА на максимальный угол и углу наклона вектора скорости БЛА к моменту окончания участка склонения. Второе основное требование актуально для БЛА морского базирования, запуск которых производится с кораблей, и сводится к одному из двух вариантов: а) в случае «холодного» старта БЛА запуск его двигателя должен быть произведен в полете после окончания склонения на высоте, превышающей высоту надстроек корабля; б) в случае «горячего» старта должно выполняться условие, чтобы высота начала склонения превышала высоту корабельных надстроек.

Обычно общими начальными условия выхода БЛА класса «поверхность – воздух» из ТПК являются: скорость выброса БЛА; углы ориентации осей связанной системы координат БЛА; угловые скорости относительно поперечных осей БЛА; скорость ветрового потока. Для БЛА класса «поверхность – воздух» морского базирования при формировании начальных условий выхода из ТПК следует дополнительно учитывать условия, создаваемые ходом и качкой самого корабля.

Предлагаемый в диссертационной работе метод определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА должен составить научно-методическую основу итерационного процесса проектирования системы склонения БЛА с ГР. Метод в виде блок-схемы представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Блок-схема метода определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА

Первый этап определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА связан с исследованием и сравнительным анализом альтернативных систем склонения. На этом этапе должна быть подтверждена сама целесообразность использования СУВТ, реализуемая ГР, в качестве системы склонения проектируемого БЛА с вертикальным стартом. Необходимость решения задачи формирования облика БЛА связана с потребностью в получении основных массовых и геометрических характеристик БЛА, обеспечивающих выполнение его основной целевой задачи. Определение проектных параметров блока ГР возможно только в тесной увязке с определением основных параметров облика БЛА.

Для реализации метода определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА на данном этапе проектирования разработана методика выбора рациональной системы склонения по критерию минимума массы БЛА, которая подробно рассматривается в третьей главе диссертации.

Второй этап определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА связан с выбором эффективного конструкционного материала и определением потребной внешней геометрии ГР с учетом уноса конструкционного материала с передней кромки руля газовым потоком реактивной струи двигателя. На этом же этапе уточняются проектные параметры системы склонения БЛА с ГР, полученные при формировании облика БЛА. Потребность такого уточнения связана с приближенностью расчета геометрических параметров ГР, в частности отсутствия учета обгорания ГР при их работе в реактивной струе газов двигателя. В качестве критерия выбора рационального материала ГР на данном этапе проектирования блока ГР может быть принято отношение полной площади ГР (с учетом унесенной площади руля в процессе его работы) к минимальной площади, необходимой для создания потребной управляющей силы.

Третий этап определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА состоит в конструкторско-технологической проработке ГР и их размещении в сопловом блоке или за его пределами на пилонах. Задачи на данном этапе носят во многом неформальный характер, а успешность их решения может быть оценена по рациональности компоновки блока ГР.

Задачи, решаемые при определении проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА на втором и третьем этапах, тесно увязаны между собой. В этой связи для реализации предлагаемого метода разработана единая комплексная методика проектирования блока ГР системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух», позволяющая решать задачи: выбора рационального конструкционного материала; определения потребной внешней геометрии ГР с учетом уноса конструкционного материала с передней кромки руля; сравнительного анализа компоновочных схем и конструктивно-технологических решений блока ГР системы склонения. Подробное изложение методики дается в четвертой главе.

**В третьей главе** дана методика выбора рациональной системы склонения на этапе формирования облика БЛА класса «поверхность – воздух»; представлены результаты исследования альтернативных способов и систем склонения БЛА с целью обоснования целесообразности применения системы склонения с ГР.

Задача сравнительного анализа альтернативных способов и систем склонения БЛА решается на этапе формирования облика БЛА. Облик БЛА – это концеп-

туальная характеристика, отражающая его схему, общий вид, структуру, принципы устройства и функционирования. Формирование облика БЛА с вертикальным стартом связано, в том числе, с выбором способа склонения, т. е. выбором способа создания сил и моментов на участке склонения, и с выбором устройства, осуществляющего склонение БЛА, а также определением его основного энергетического параметра – значения управляющей силы и ее механизма создания.

Методика в виде блок-схемы представлена на рисунке 2. Центральную часть методики составляют задачи формирования облика БЛА с альтернативными системами склонения (БЛА 1... БЛА N), включающие в себя взаимосвязанные задачи баллистического проектирования БЛА, определения его массовых и геометрических параметров. Так как БЛА с альтернативными системами склонения должны удовлетворять единым требованиям и ограничениям, как в части, выполнения целевой задачи (тактико-технические характеристики (ТТХ)), так и в части выполнения требований, предъявляемых к склонению, правомочным является критерий минимума массы БЛА для выбора БЛА с рациональной системой склонения.

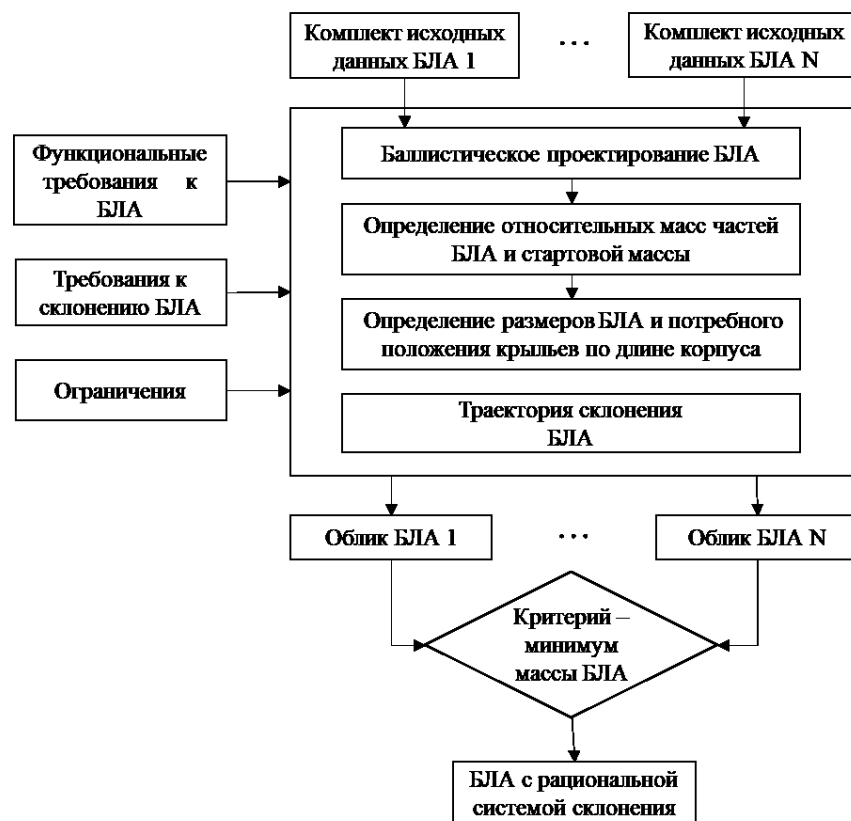


Рисунок 2 – Блок-схема методики выбора рациональной системы склонения на этапе формирования облика БЛА

Для оценки ближней границы зоны поражения, реализуемой БЛА после окончания участка склонения, используются известные кинематические соотношения для начального и обрабатываемого промахов. Начальный промах, появляющийся к моменту начала наведения,  $h_0$ , определяется отклонением вектора скорости БЛА в конце участка разворота  $t_2$  от направления в точку встречи с целью:

$$h_0 = (\theta(t_2) + \Delta\theta)(r_{6.г} - x(t_2)) + (y(t_2) - y_{ц}); \quad (1)$$

$$r_{6.г} = x(t_2) + V_x(t_2)t_H; \quad t_H = t_B - t_2,$$

где  $r_{6.г}$  – дальность до ближней границы;  $t_H$  – длительность участка наведения;  $t_B$  – время полета БЛА до встречи с целью;  $y_{ц}$  – высота полета низколетящей цели;  $x(t_2)$ ,  $y(t_2)$ ,  $\theta(t_2)$ ,  $V_x(t_2)$  – параметры траектории БЛА в конце участка разворота (момент времени  $t_2$ ): дальность, высота и угол наклона траектории, горизонтальная проекция вектора скорости БЛА, соответственно;  $\Delta\theta$  – разброс углового положения вектора скорости БЛА в конце участка разворота.

После начала наведения БЛА с предельно допустимой боковой перегрузкой обрабатывает начальный промах  $h_0$ . Условием встречи с целью на ближней границе является своевременная отработка  $h_0$  по меньшей мере за  $\Delta t = (0,8 \div 1)$  секунд до точки встречи. Все необходимые параметры БЛА, используемые в выражении (1) для определения начального промаха  $h_0$ , могут быть получены из решения уравнений движения БЛА в плоскости склонения. Полная система уравнений, описывающая движение БЛА на участке склонения, приведена в диссертации.

В качестве альтернативных способов и систем склонения БЛА класса «поверхность – воздух» вертикального старта рассматриваются: СУВТ, реализуемая ГР; АУПУ; специальное газодинамическое устройство в виде ИДУ.

Рассмотрим задачу сравнительного анализа альтернативных способов и систем склонения на примере гипотетического БЛА класса «поверхность – воздух» средней дальности и скоростями полета 3 – 4 Маха. БЛА выполнен по нормальной аэродинамической схеме, имеет ракетный двигатель твердого топлива. Основные характеристики БЛА приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Тактико-технические характеристики БЛА

Параметр	Значение
Дальность [м]	100000
Диапазон высот [м]	0 – 25000
Масса аппаратуры [кг]	50
Масса полезной нагрузки (БЧ) [кг]	40
Время склонения корпуса БЛА [с]	1
Начало склонение: высота [м] / время [с]	50/1
Угол тангажа БЛА в момент начала склонения [°]	115
Угол тангажа БЛА после окончания склонения [°]	-5
Начальная угловая скорость [град/с]	50

Сравниваемые БЛА (рисунок 3) предназначены для выполнения одной и той же целевой задачи, имеют одинаковые ТТХ, полезную нагрузку, основное бортовое оборудование, двигатель и применяемые конструкционные материалы.

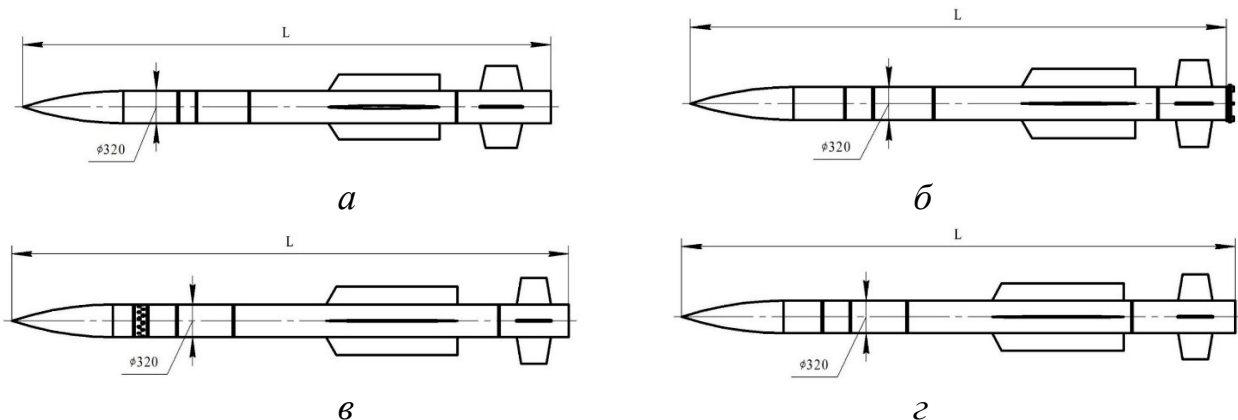


Рисунок 3 – Общий вид БЛА класса «поверхность – воздух» средней дальности

БЛА-1 и БЛА-2 оснащены СУВТ, реализуемой ГР. На БЛА-1 (рисунок 3,а) ГР размещены внутри сопла и после окончания склонения сгорают; на БЛА-2 (рисунок 3,б) – ГР размещены на торце хвостового отсека и после участка склонения сбрасываются. БЛА-3 (рисунок 3,в) оснащен ИДУ, расположенной в передней части БЛА. БЛА-4 (рисунок 3,г) оснащен АУПУ, размещенным в хвостовом отсеке.

Расчет параметров облика БЛА с рассматриваемыми альтернативными системами склонения выполнялся в программной среде «САПР ЛА», разработанной

на кафедре 602 МАИ. В САПР ЛА реализованы алгоритмы баллистического и массово-геометрического проектирования БЛА, включающие как алгоритмы расчета массы и геометрии БЛА в целом, так и алгоритмы расчета его отдельных подсистем, в частности, применительно к рассматриваемому типу БЛА алгоритмы расчета массы исследуемых систем склонения. Основные параметры сравниваемых БЛА представлены в таблице 2. Полученные БЛА-1, БЛА-2, БЛА-3 и БЛА-4 отличаются массой и геометрическими размерами. Отличия в массах вариантов облика рассматриваемого БЛА обусловлены в основном различной массой альтернативных систем склонения, а также дополнительным расходом топлива основного двигателя при склонении (для СУВТ, реализуемой ГР). Сравнение полученных обликов БЛА показывает, что более предпочтительными в массовом отношении являются БЛА с СУВТ двигателя (БЛА-1 и БЛА-2) по сравнению с БЛА с устройствами автономного управления (БЛА-3 и БЛА-4).

Таблица 2 – Параметры БЛА с альтернативными системами склонения

Параметр	БЛА-1	БЛА-2	БЛА-3	БЛА-4
Стартовая масса ла [кг]	457,2	459,1	512,1	475,7
Диаметр корпуса БЛА [м]	0,320	0,320	0,320	0,320
Длина БЛА [м]	5,191	5,191	5,509	5,446
Управляющая сила, необходимая для разворота корпуса БЛА [Н]	2915	2803	2021 (12 ИД)	3035,2
Масса системы склонения [кг]	7,1	7,1	8,95	8,7
Расстояние от носового обтекателя до системы склонения [м]	5,107	5,395	1,280	5,200

В дальнейшем были проведены исследования альтернативных систем склонения при варьировании важнейшего параметра из требований ТЗ на разработку системы склонения БЛА с вертикальным стартом – *времени склонения*, во многом определяющим ближнюю границу зоны поражения БЛА. Результаты исследования представлены в диссертации.

**В четвертой главе** дана комплексная методика проектирования блока ГР системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух»; представлены результаты решения задачи выбора конструкционного материала и внешних геометрических

параметров ГР с учетом уноса материала с передней кромки ГР с оценкой эффективности применяемого материала, а также сравнительного анализа компоновочных схем и конструктивно-технологических решений блока ГР.

Минимальная площадь ГР, при которой будет обеспечиваться необходимая управляющая сила  $P_{уп}$  дляклонения БЛА:

$$S_{\min} = \frac{P_{уп}}{0,5P_{уп}^{\delta}\delta\rho_a W_a^2}, \quad (2)$$

где  $P_{уп}^{\delta}$  – производная коэффициента управляющей силы в газовом потоке (подъемной силы по аналогии с воздушным потоком);  $\delta$  – угол отклонения ГР;  $\rho_a$ ,  $W_a$  – плотность и скорость газового потока, соответственно.

Плотность газового потока может быть определена через массовый секундный расход топлива, равный отношению массы топлива  $m_T$  к времени работы двигателя  $\tau_{дв}$ , скорость газового потока  $W_a$  и площадь среза сопла  $S_{ср}$ :

$$\rho_a = \frac{m_T / \tau_{дв}}{W_a S_{ср}}. \quad (3)$$

При выборе материала ГР воспользуемся соотношениями, полученными на основании обработки экспериментальных данных воздействия газовых струй на рули, выполненные из разных конструкционных материалов. Результаты экспериментальных исследований (полученных в ГосМКБ «Факел» им. П.Д. Грушина) в виде графиков представлены на рисунке 4 (СТП – стеклопластик; УП – углепластик, УМП – углеметаллопластик; ВДНС – вольфрам-никелевый двухфазный сплав; УУКМ – углерод-углеродные конструкционные материалы; W – вольфрам).

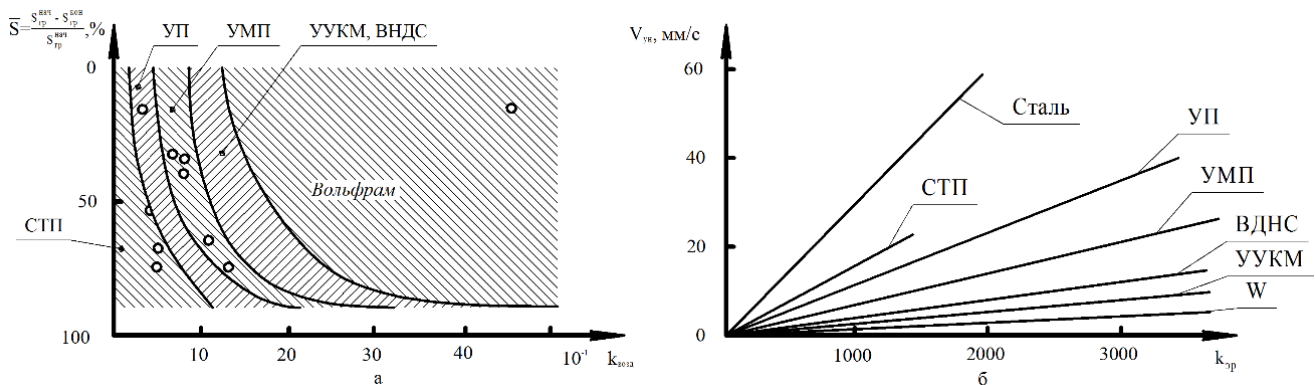


Рисунок 4 – Эмпирические данные, используемые при выборе материала ГР:

*a* – области применения различных материалов в конструкции лопатки ГР;

*б* – зависимость скорости уноса материала передней кромки ГР  $V_{э}$  от  $k_{э}$ :



Определяющим параметром, комплексно характеризующим газовый поток в зоне руля, является критериальный показатель  $k_{\text{эр}}$ , значение которого определяет эрозионное воздействие потока на материал передней кромки ГР:

$$k_{\text{эр}} = z_{\text{kf}} P_{\text{kmax}} q(\lambda_{\text{kf}}) \lambda_{\text{kf}}^2 \sqrt{T_{\text{k}}}, \quad (4)$$

где  $z_{\text{kf}}$  – весовая доля частиц К-фазы в продуктах сгорания топлива в зоне установки ГР;  $P_{\text{kmax}}$  – максимальное давление в камере двигателя в период работы ГР;  $\lambda_{\text{kf}}$  – приведенная скорость К-фазы;  $q(\lambda_{\text{kf}})$  – приведенная плотность потока массы К-фазы;  $T_{\text{k}}$  – температура продуктов сгорания.

Коэффициент воздействия газовой струи на материал ГР:

$$k_{\text{воз}} = k_{\text{эр}} t_{\text{раб}}, \quad (5)$$

где  $t_{\text{раб}}$  – время работы ГР. Исходя из условий работы газовых рулей БЛА рассматриваемого класса:  $k_{\text{воз}} < (5000 \div 7000)$ .

По коэффициенту  $k_{\text{воз}}$  по графикам зависимостей, представленным на рисунке 4,а, выбираем подходящий материал ГР. Для выбранного материала ГР по графику, приведенному на рисунке 4,б, с учетом величины  $k_{\text{эр}}$  находим скорость уноса материала передней кромки руля  $V_{\text{ун}}$ . Толщина и площадь материала, унесенного с передней кромки ГР, за время его работы определяются выражениями:

$$\delta_{\text{пер}} = V_{\text{ун}} t_{\text{раб}}; S_{\text{ун}} = \delta_{\text{пер}} L_{\text{k}}, \quad (6)$$

где  $L_{\text{k}}$  – размах лопатки руля.

Фактическая площадь ГР  $S_{\text{г.р}}$  определяется выражением:

$$S_{\text{г.р}} = S_{\text{min}} + S_{\text{ун}}. \quad (7)$$

Опыт проектирования и применения ГР показывает, что выбор материала был проведен корректно, если отношение  $S_{\text{г.р}}$  и  $S_{\text{min}}$  лежит в интервале

$$2 < \frac{S_{\text{г.р}}}{S_{\text{min}}} < 3. \quad (8)$$

Зная безразмерные параметры, характеризующие форму руля в плане: удлинение  $\lambda_{\text{k}}$  и сужение  $\eta_{\text{k}}$ , по известным соотношениям найдем геометрические параметры ГР: размах  $L_{\text{г.р}}$ , бортовую хорду  $b_{\text{б}}$  и концевую хорду  $b_{\text{k}}$ :

$$L_{гр} = \sqrt{S_{гр} \lambda_k}; \quad b_b = 2 \frac{S_{гр}}{L_{гр}} 2 \frac{\eta_k}{\eta_{k+1}}; \quad b_k = \frac{b_b}{\eta_k},$$

а, зная относительную толщину профиля и плотность материала ГР, – массу ГР.

Описанный выше алгоритм выбора рационального конструкционного материала и определения потребной внешней геометрии ГР с учетом уноса материала по критерию (8) представлен в виде блок-схемы на рисунке 5.



Рисунок 5 – Блок-схема выбора рационального конструкционного материала и определения потребной внешней геометрии ГР

Рассмотрим решение задачи выбора рационального конструкционного материала и внешней геометрии ГР системы склонения гипотетического БЛА класса «поверхность – воздух» средней дальности, параметры которого были получены в результате решения задачи сравнительного анализа альтернативных систем склонения при формировании облика БЛА. ГР имеет форму в плане в виде трапеции с прямоугольной задней кромкой и безразмерными параметрами: удлинение  $\lambda_k = 1$ , сужение  $\eta_k = 1,4$ , тангенс угла наклона по передней кромке  $\chi_0 = 0,3$ .

В качестве альтернативных конструкционных материалов рассматривались три материала: сталь, углеметаллопластик (УМП) и вольфрам. Такой выбор конструкционных материалов был продиктован существенно разными физическими свойствами данных материалов: эрозионно-стойкими свойствами и плотностью, существенно влияющими на массу ГР. Результаты расчета ГР по приведенной выше методике с учетом уноса материала с передней кромки представлены в таблице 3. Они свидетельствуют, что для различных времен склонений рациональными, т.е. отвечающими условию эффективности материала (8), являются различные материалы, так, при времени склонения  $t_{\text{раб}}$ , равном 1,5с рациональным конструкционным материалом оказалась сталь, а при  $t_{\text{раб}}$ , равном 3с – УМП.

Таблица 3 – Массовые характеристики ГР из различных материалов при различном времени склонения БЛА

Параметр Материал	Время склонения [с]	Управляющая сила $P_{\text{уп}}$ , [Н]	Масса четырёх ГР <sup>1</sup> , [кг]	Начальная масса четырёх ГР <sup>2</sup> [кг]	Масса (САПР) четырёх ГР <sup>3</sup> [кг]	Показатель эффективности $S_{\text{г.р}}/S_{\text{min}}$
Сталь	1	2803,1	7,72	10,56	7,1	1,368
Вольфрам			14,66	14,78	14,2	1,008
УМП			1,26	1,36	2,2	1,082
Сталь	1,5	1362,3	3,27	6,98	3,1	<b>2,137</b>
Вольфрам			5,01	5,13	5,5	1,025
УМП			0,46	0,58	1,4	1,253
Сталь	2	833,2	1,99	6,93	2,1	3,478
Вольфрам			2,43	2,56	3,2	1,055
УМП			0,24	0,38	1,2	1,551
Сталь	2,5	576,6	1,44	7,89	1,6	5,476
Вольфрам			1,43	1,57	2,3	1,099
УМП			0,16	0,32	1,2	1,995
Сталь	3	430,9	1,14	9,31	1,4	8,187
Вольфрам			0,95	1,1	1,8	1,16
УМП			0,12	0,31	1,1	<b>2,597</b>

<sup>1</sup> Приведена масса руля, соответствующая  $S_{\text{min}}$  необходимой для создания силы  $P_{\text{уп}}$

<sup>2</sup> Приведена масса руля, соответствующая исходной площади  $S_{\text{г.р.}}$  до начала работы двигателя

<sup>3</sup> Приведена масса руля, рассчитанная в САПР ЛА без учета конструкции размещения

В соответствии с предлагаемой комплексной методикой проектирования системы склонения БЛА с ГР заключительный этап определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА (этап 3, рисунок 1) состоит в конструкторско-технологической проработке ГР и их размещения в сопловом блоке или за его пределами. На основании полученных результатов были спроектированы блоки ГР, представленные на рисунках 6 и 7. В блоке ГР (рисунок 6) рули выполнены из стали ( $t_{\text{раб}} = 1,5$  с), в блоке ГР (рисунок 7) – из УМП ( $t_{\text{раб}} = 3$  с), рама в обоих блоках ГР стальная, массой 5,53 кг. Из представленных 3D-моделей блоков ГР видно, что ГР из УМП оказались существенно меньшими по размерам, чем стальные рули даже несмотря на вдвое большее время работы. Это объясняется существенно более высокой стойкостью УМП к разрушению под воздействием струи ракетного двигателя по сравнению со сталью.

Анализ рациональности компоновочных решений блоков ГР, выполненных из стали, (рисунок 6) и УМП (рисунок 7,а) показывает, что в случае газовых рулей из УМП, блок ГР не удовлетворяет требованиям высокой плотности компоновки. Изменив форму в плане руля (увеличив удлинение руля), была повторно решена задача выбора рационального конструкционного материала и определения потребной внешней геометрии ГР с учетом уноса материала с передней кромки. В результате решения данной задачи удалось найти проектные параметры блока ГР системы склонения БЛА, удовлетворяющие критерию эффективности материала (8) и обеспечивающие выполнение требования рациональной компоновки блока ГР. 3D-модель блока с новыми ГР представлена на рисунке 7,б.

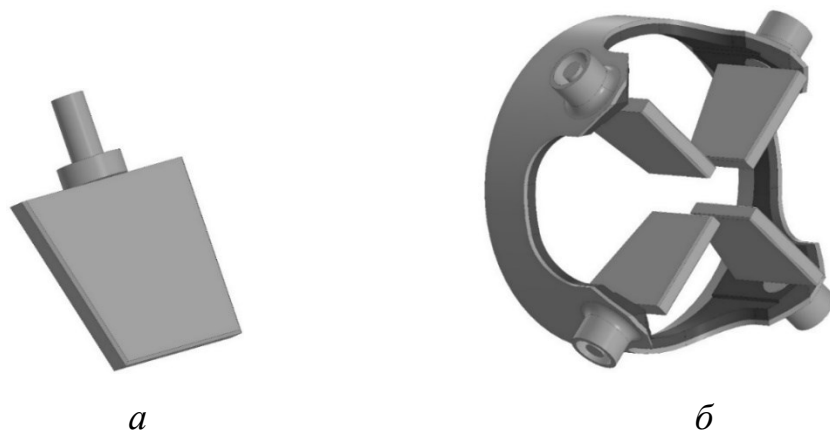


Рисунок 6 – 3D-модели блока ГР, выполненных из стали: *а* – ГР; *б* – блок ГР



Рисунок 7 – 3D-модели блока ГР, выполненных из УМП:  
*a* – исходная геометрия ГР; *б* – оптимизированная геометрия ГР

При изменении компоновки блока ГР следует также учитывать интерференционное влияние каждого ГР друг на друга, особенно в зоне их взаимного действия (наименьшее расстояния между каждым рулем). Данное влияние можно оценить в специализированных программах газодинамического моделирования, зная конкретные параметры струи газового потока. Есть работы, посвященные этому вопросу, приведенные диссертационной работе.

Полученные проектные решения блока ГР согласуются с известными решениями систем склонения перспективных БЛА класса «поверхность – воздух».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод определения проектных параметров блока ГР в составе системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух» с вертикальным стартом, позволяющий:

- исследовать альтернативные способы и системы склонения БЛА вертикального старта на этапе формирования его облика по критерию минимума массы;
- обоснованно выбирать конструкционный материал и внешние геометрические параметры ГР с учетом уноса материала ГР с передней кромки с оценкой эффективности применяемого конструкционного материала.

1. Разработана методика выбора рациональной системы склонения БЛА в условиях морского базирования с использованием «горячего» или «холодного» вертикального старта на этапе формирования облика БЛА.

Альтернативными вариантами систем склонения являются:

- СУВТ, реализуемая ГР, размещаемые в сопле двигателя БЛА или сразу за его срезом на специальных пилонах;
- ИДУ, создающая момент склонения БЛА посредством реактивных струй микродвигателей, включаемых по специальному алгоритму;
- автономное устройство пропорционального управления.

Методика верифицирована, результаты верификации отражены в диссертационной работе. Выполнены исследования альтернативных систем склонения, найдены их параметры. Проведено сравнение альтернативных систем склонения по критерию минимума массы БЛА.

2. Разработана комплексная методика проектирования блока ГР системы склонения БЛА класса «поверхность – воздух», позволяющая решать ряд задач, в числе которых:

- выбор рационального конструкционного материала;
- определение потребной внешней геометрии ГР;
- сравнительный анализ компоновочных схем и конструктивно-технологических решений ГР системы склонения.

Методика верифицирована, результаты верификации отражены в диссертационной работе. Найдены основные компоновочные и конструктивно-технологические параметры блока ГР системы склонения для БЛА класса «поверхность – воздух» средней дальности.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых научных изданиях

- 1. Виндекер А.В.,** Парафесь С.Г. Выбор конструкционного материала и внешней геометрии газового руля системы склонения беспилотного летательного аппарата. Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Том 21(1). С. 67-76. DOI:[10.26467/2079-0619-2018-21-1-67-76](https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-1-67-76).
- 2. Виндекер А.В.** Исследование способов склонения при формировании облика беспилотного летательного аппарата с вертикальным стартом. Научный вестник МГТУ ГА. 2021. Том 24, № 3. С 57-70. DOI: [10.26467/2079-0619-2021-24-3-57-70](https://doi.org/10.26467/2079-0619-2021-24-3-57-70).

## Другие публикации

### Статьи в сборнике:

**1. Виндекер А.В.** Рассмотрение материала и геометрии газового руля системы склонения БЛА // Сборник НИРС МАИ - 2016. – М.: Издательство «Перо», 2017. С. 26-37.

### Тезисы докладов:

**1. Виндекер А.В.** (научный руководитель Парафесь С.Г.). Исследование материала и формы газового руля системы склонения БЛА. // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. Т. 2: М.: Моск. авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. С. 70 – 71.

**2. Парафесь С.Г., Виндекер А.В.** Выбор материала и геометрических параметров газового руля системы склонения беспилотного летательного аппарата // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Сборник тезисов докладов участников Международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию Университета. 18-20 мая 1916 г. М.: МГТУ ГА, 2016. С. 91.

**3. Виндекер А.В., Парафесь С.Г.** Выбор конструкционного материала и формы газового руля системы склонения беспилотного летательного аппарата // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». 14–18 ноября 2016 года. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2016. С. 98 – 99.

**4. Виндекер А.В., Парафесь С.Г.** Методика выбора конструкционного материала и внешней геометрии газового руля системы склонения беспилотного летательного аппарата // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». 20–24 ноября 2017 г. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2017. С. 259-260.

**5. Виндекер А.В.** (научный руководитель Парафесь С.Г.). Анализ систем аэродинамического управления беспилотными летательными аппаратами // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Том 1. 2018. С. 40 – 41.

- 6. Виндекер А.В.,** Парафесь С.Г. Анализ вариантов обеспечения аэрогазодинамического управления беспилотными летательными аппаратами // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов. – М.: ИД Академии Жуковского, 2018. С. 86.
- 7. Виндекер А.В.,** Парафесь С.Г. Анализ вариантов аэрогазодинамического управления при формировании облика беспилотного летательного аппарата // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018». 19–23 ноября 2018 года. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2018. С. 292.
- 8. Виндекер А.В.,** Парафесь С.Г. Выбор рациональной системы склонения беспилотного летательного аппарата класса «поверхность – воздух» с вертикальным стартом // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019». 18-22 ноября 2019 г. Москва. Тезисы. – Типография «Логотип», 2019. С. 133-134.
- 9. Виндекер А.В.** Анализ возможности применения стыков для маневренного беспилотного летательного аппарата класса «поверхность – воздух» средней дальности // Научно-практическая конференция «Применение информационных технологий в машиностроении», 2019.
- 10. Виндекер А.В.** Исследование систем склонения при формировании облика БЛА с вертикальным стартом // Двенадцатая межрегиональная отраслевая научно-техническая конференция «Люльевские чтения», 2020. 24-26 марта 2020 года. Екатеринбург. Тезисы – Издательский центр ЮУрГУ, 2020. С.152-153.