

## Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук Сетухи Алексея Викторовича  
на диссертационную работу Арувелли Сергея Витальевича «Методика определения  
облика управляемой планирующей парашютной грузовой системы под параметры  
транспортной операции», представленную на соискание учёной степени кандидата  
технических наук по специальности 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и  
производство летательных аппаратов»

Диссертационная работа связана с проблемой разработки методик, математических моделей и комплексов программ для автоматизированного проектирования планирующих парашютов.

**Актуальность темы.** Планирующие парашюты представляют собой чрезвычайно сложную техническую систему, разработка которой требует одновременного учета большого числа факторов. Основная сложность проектирования парашютных систем связана с тем, что в отличие от жестких летательных аппаратов, таких как самолеты, форма, которую примет парашют с заданными раскройной формой и конфигурацией стропной системы после раскрытия, заранее неизвестна. В значительной степени здесь ограничены возможности экспериментов в аэродинамических трубах. Надо иметь в виду, что парашют, помещенный в аэродинамическую трубу будучи закрепленным за коуши, принимает определенное балансирующее положение. Без специальных приспособлений невозможно, например, получить зависимость аэродинамических характеристик от угла атаки. Кроме того, условия балансировки парашюта, закрепленного за коуши, и парашюта в свободном полете различаются. Поэтому при проектировании парашютов и доводке конструкции значительный упор делается на летный эксперимент.

Весьма перспективным и эффективным инструментом при проектировании и оптимизации конструкции парашютов должны стать методы математического моделирования и вычислительный эксперимент. Здесь, например, есть возможность разделить анализ аэродинамических и упругих характеристик, провести виртуальные эксперименты по зависимости аэродинамических характеристик от углов атаки и скольжения, выработать рекомендации по оптимальным форме купола, углу установки крыла, а затем осуществить, опять же в вычислительном эксперименте, подбор раскройной формы и стропной системы, обеспечивающие найденные форму купола и его положение потоке. Основная трудность применения таких методов, это сложность математических моделей аэродинамики и аэроупругости парашюта на основе прямого моделирования. Однако, здесь уже имеются полуэмпирические инженерные модели,

позволяющие с той или степенью достоверности оценивать не только аэродинамические характеристики и характеристики напряженно-деформированного состояния конструкции парашюта, но и динамические нагрузки, возникающие при раскрытии.

В диссертации предпринята попытка на основе анализа и отбора таких существующих моделей создать единую модель для оптимизации основных параметров парашюта при некоторых заданных его характеристиках и ограничениях. Это, в общем то, и является одной из конечных целей математического моделирования на этапе проектирования планирующего парашюта. Поэтому такая задача безусловно является актуальной.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложений.

Во введении дается общая характеристика работы, формулируются основные результаты, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена анализу основных требований, предъявляемых к планирующим парашютам исходя из целей их применения, анализ существующих методов проектирования планирующих парашютов. Также в этой главе автором выделяются основные параметры планирующей парашютной системы, которые при математическом моделировании призваны задать его конфигурацию, конструктивные характеристики, ограничения. Ставится в общем виде задача оптимизации.

Глава 2 посвящена анализу и выбору частных математических моделей, описывающих различные аспекты функционирования парашютной системы. Так здесь выделены следующие модели:

- модель построения геометрической формы парашюта по основным определяющим параметрам. В эту же модель входит расчет распределенных нагрузок в элементах конструкции при заданной суммарной аэродинамической силе на основе эмпирических формул;

- модель раскрытия парашюта, которая на основе эмпирических формул позволяет определить зависимость от времени суммарной аэродинамической силы в процессе раскрытия парашюта и оценить пиковое значение этой силы;

- модель аэродинамики наполненного парашюта, на основе теории несущей линии Прандтля;

- модель динамики полета.

Далее эти модели komponуются в единую модель функционирования парашютной системы.



В главе 3 описывается модель оптимизации облика планирующего парашюта на основе методов многокритериальной оптимизации с учетом ограничений. В этой же главе проводится тестирование разработанной математической модели путем решения тестовых задач оптимизации, в том числе в случаях, когда ставится задача построения парашютной системы, к которой предъявляются требования, как к уже существующим парашютным системам. При этом осуществляется сравнение рассчитанных параметров парашюта с параметрами существующего аналога.

В главе 4 приведены примеры проектирования парашютных систем, предназначенных для решения для решения некоторых практических задач.

В заключении сформулированы основные выводы по работе.

В приложениях приведены копии документов о внедрении результатов работы.

**Научная новизна.** Если говорить о научной новизне, то здесь существенным является уже выбор наборов параметров, которые описывают форму парашюта и подлежат оптимизации, выбор конструктивных параметров и параметров, задающих ограничения. Следующим шагом, требующим научного анализа, стал выбор математических моделей, описывающих отдельные аспекты функционирования парашютной системы. При этом, естественно, потребовалась их корректировка, исходя из необходимости оперировать с ранее указанным списком параметров, а также исходя из необходимости согласования этих моделей. Ну и наконец новым результатом является создание общей модели оптимизации, в которой все указанные частные модели собраны воедино и адаптированы к работе с методами оптимизации.

**Достоверность** разработанной методики оптимизации подтверждается, во-первых, анализом достоверности и тестированием выбираемых частных моделей, описывающих отдельные элементы функционирования парашютной системы. Во-вторых, тестами, проведенными уже для всей комплексной модели оптимизации, в частности тестированием на предмет создания аналогов уже существующих парашютных систем.

**Научная значимость** работы видится в создании единой математической модели функционирования парашютной системы и включении этой модели в модель оптимизации.

**Практическая значимость.** В диссертации построена и реализована в виде комплекса программ методика построения облика планирующей парашютной системы на основе заданных требований, что безусловно представляет интерес точки зрения практического применения в процессе проектирования новых планирующих парашютов.

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах, в том числе в 3-х статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при

Министерстве науки и высшего образования РФ, по специальности 05.07.02 и 1-й статье в рецензируемом научном издании, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, по другим специальностям.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

#### **Вопросы и замечания.**

1. Все используемые частные математические модели функционирования парашютной системы основаны на существенных упрощающих предположениях. Автор совершенно правильно указывает на это в диссертации. Более того, я в целом согласен с осуществленным им выбором математических моделей, поскольку более точные модели либо ибo имеют неприемлемую вычислительную сложность, либо просто отсутствуют. Но, тем не менее, в качестве замечания хочу обратить внимание на некоторые наиболее важные, на мой взгляд допущения, которые нужно иметь в виду с точки зрения оценки области применимости разработанной методики.

- Модель раскрытия парашюта в действительности оценивает суммарную аэродинамическую силу при раскрытии в предположении, что наполнение парашюта идет в штатном режиме. При этом единственным критерием наличия самого факта нормального наполнения и раскрытия парашюта является выполнение ограничения на удлинение парашюта. Не учитывается, что на процесс наполнения парашюта большое влияние могут оказывать стропная система, структура нервюр и, особенно, форма и место расположения воздухозаборников.

- Модель расчета аэродинамики основана на теории несущей линии Прандтля. При этом в нее заложены характеристики базового профиля крыла, выбранного как раскройная форма для нервюр. В тексте диссертации я не нашел ответа на вопрос, учитывается ли при записи уравнения несущей линии увеличение относительной толщины профиля при образовании воланов в промежутках между воланами. Кроме того, нужно иметь в виду, что в этих промежутках меняется не только толщина, но и форма самого профиля, что делает сам факт точного задания формы профиля в рамках такой модели мало актуальным. Более того, большой вклад в распределение аэродинамических нагрузок вносит наличие воздухозаборника. В используемой математической модели все влияние воздухозаборника отражено только в эмпирической добавке к коэффициенту сопротивления, зависящей только от отношения высоты воздухозаборника к хорде крыла. Не учитываются положение воздухозаборника и его форма (имеется в виду раскрытие отверстия в промежутках между нервюрами). В современных планирующих парашютах стараются сместить воздухозаборник в сторону нижней поверхности крыла, что, с одной стороны, существенно улучшает аэродинамические характеристики, но с, другой стороны,



чревато проблемами с раскрытием парашюта. Оптимизация с этих позиций формы и положения воздухозаборника данной моделью на затрагиваются.

- Автор выдвигает гипотезу о том, что точка приложения аэродинамической силы в каждом сечении крыла находится в середине хорды. Такая ситуация соответствует обтеканию прямоугольной пластины, помещенной поперек потока. Применение такой гипотезы к крылу парашюта мне представляется сомнительным. Это находит отражение в неправильном расчете производной момента тангажа по углу атаки (см., например, таблица 4, стр 101) и, по-видимому, может привести к ошибкам при расчете балансирующего угла установки парашюта в потоке. Не понятно, почему не было взято положение точки приложения аэродинамической силы, соответствующее базовому профилю крыла. Кроме того, существуют и экспериментальные данные по распределению давления по поверхности крыла для реальных парашютов, позволяющие уточнить положение этой точки.

2. Список выбранных геометрических параметров парашюта, подлежащих оптимизации, приведен в формуле (3). Соглашаясь с доводами автора о том, что он рассматривает только прямоугольное крыло, хочу спросить, почему не вводится геометрическая крутка крыла (разный угол установки нервюр в корневом и концевых сечениях) - оптимизация крутки позволяет влиять на аэродинамическое качество.

3. Списки параметров, задающие конструктивные требования и ограничения, приведены в формулах (7) и (8). Почему в этих формулах есть параметры, отвечающие за устойчивость по тангажу, и нет параметров, отвечающих за устойчивость в боковом канале? В требованиях к парашютной системе (стр. 56) один пункт - приемлемые показатели управляемости. Какие параметры в формулах (7)-(8) отвечают за управляемость?

4. На стр. 164 при анализе результатов одной из серий расчетов автор пишет:

"- с увеличением средней аэродинамической хорды крыла до точки  $b = 4$  м увеличение аэродинамического качества обусловлено сопутствующим увеличением удлинения крыла в связи с необходимостью сохранения удлинения крыла в заданном диапазоне ( $1 \leq \lambda \leq 4$ ); "

Получается, что при уменьшении хорды от 4м до 1м при заданной массе груза удлинение должно уменьшаться. Если при этом причина уменьшения величины аэродинамического качества действительно есть уменьшение удлинения, то удлинение должно уменьшиться существенно. Возникает вопрос: до каких значений уменьшается удлинение и в силу каких ограничений?

В заключение хочу также отметить, что большое количество замечаний связано с чрезвычайно высокой сложностью задач, связанных с моделированием

функционирования планирующих парашютов, и что несмотря на значительные ограничения, имеющиеся у разработанных в диссертации моделей, продвижение автора я считаю существенным.

Диссертационная работа Арувелли С.В. является законченной научно-исследовательской работой, результаты которой можно квалифицировать как решение актуальной научной задачи. Диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор Арувелли Сергей Витальевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов».

Ведущий научный сотрудник  
научно-исследовательского вычислительного центра  
МГУ имени М.В. Ломоносова,  
доктор физико-математических наук

  
Сетуха А.В.

Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ  
им. М.В. Ломоносова  
Адрес: 119234, г. Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, стр. 4  
Тел.: +7 (917) 544-34-97  
setuhaav@rambler.ru

25 ноября 2020г.

Личную подпись доктора физико-математических наук Сетухи А.В. удостоверяю:

Директор научно-исследовательского  
вычислительного центра  
МГУ имени М.В. Ломоносова  
чл.-корр. РАН



Воеводин В.В.

