

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора –  
начальник центра аэрогидродинамики  
ФАУ «ЦАГИ», д-р физ.-мат. наук, доц.

С.В. Ляпунов

2024 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Духновского Дениса Аскольдовича «Разработка методики определения рационального размерно-весового облика беспилотного самолёта с электрической силовой установкой», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов»

**Актуальность темы диссертационной работы.** Тема диссертационной работы Духновского Дениса Аскольдовича является актуальной и соответствующей современным задачам развития авиационной техники. Диссертационная работа направлена на разработку методики определения рационального размерно-весового облика беспилотного самолёта с электрической силовой установкой. Применение электрических силовых установок в авиационной технике и разработка беспилотных самолётов, отвечающих требованиям технического задания, – это новые задачи проектирования летательных аппаратов. Этим обусловлена необходимость методологического и методического развития процесса проектирования новых беспилотных самолётов с электрической силовой установкой.

**Научная новизна.** Предложена новая методика определения рационального размерно-весового облика беспилотного самолёта с электрической силовой установкой массой от 5 кг до 30 кг. Разработана новая методика расчёта относительных масс беспилотного самолёта с электрической

силовой установкой, в том числе относительной массы аккумуляторных батарей с учётом набора высоты и скорости крейсерского полёта, дальности крейсерского полёта. Разработана новая методика определения массы электрических силовых установок.

**Практическая значимость** диссертации заключается в разработке методики определения рационального размерно-весового облика беспилотного самолёта с электрической силовой установкой от 5 кг до 30 кг, которая позволяет проводить расчёты на ранних этапах проектирования новых авиационных комплексов, содержащих в себе беспилотные самолёты с электрической силовой установкой. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании, при проведении научно-исследовательских и поисковых работ, а также в образовательном процессе. Разработанная методика определения рационального размерно-весового облика беспилотных самолётов массой от 5 кг до 30 кг с электрической силовой установкой обладает высокой практической значимостью для проектирования и создания новых летательных аппаратов. Разработанная Духновским Денисом Аскольдовичем методика позволяет снизить неопределённости в процессе проектирования беспилотных летательных аппаратов и повысить вероятность выполнения требований технического задания. Результаты диссертации могут быть использованы при разработке новых беспилотных самолётов с электрической силовой установкой на ранних этапах проектирования.

**Достоверность результатов** обеспечена расчётно-экспериментальным методом. По разработанным в ходе исследования методикам спроектирован, произведен и испытан экспериментальный беспилотный самолёт с электрической силовой установкой. Испытания экспериментального беспилотного самолёта с электрической силовой установкой подтвердили достоверность разработанных методик.

**Содержание работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений и двух приложений. Общий объём диссертации составляет 175 страниц, работа содержит 85 рисунков, 30 таблиц. Список публикаций и использованных источников включает 89 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность исследования, представлена степень разработанности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект исследования и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, представлены положения, выносимые на

защиту, степень достоверности результатов, личный вклад соискателя, апробация работы, структура и объём диссертации.

**В первой главе** диссертационной работы приведен анализ работ отечественных и зарубежных авторов. Проведен обзор работ по определению размерно-весового облика летательных аппаратов с электрической силовой установкой.

**Во второй главе** диссертационной работы представлена разработанная методика определения массы аккумуляторных батарей (АКБ). Выявлена неприменимость методик определения массы летательных аппаратов с двигателями внутреннего сгорания для самолётов с электрической силовой установкой, в части определения массы АКБ. Предложено выражение для определения относительной массы АКБ при выполнении требований по дальности полёта беспилотного самолёта с электрической силовой установкой учитывающее участок набора высоты и скорости крейсерского полёта. Учтено влияние потребления электроэнергии бортовым оборудованием беспилотного самолёта с электрической силовой установкой. Разработаны выражения для расчёта массы АКБ, требуемой для обеспечения работы оборудования в ходе полёта.

**В третьей главе** диссертационной работы предложена методика определения массы электрической силовой установки беспилотного самолёта категории от 5 кг до 30 кг. Проанализированы современные компоненты электрических силовых установок, применимые для авиационной техники. Выявлены зависимости массы электрической силовой установки от мощности двигателя и относительной массы ЭСУ от энерговооруженности беспилотного самолёта с электрической силовой установкой. Учтены характеристики двигателя, контроллера, воздушного винта. С применением методов регрессионного анализа разработаны уравнения оценки массы электрической силовой установки в зависимости от мощности двигателя и оценки относительной массы электрической силовой установки в зависимости от энерговооруженности беспилотного самолёта с электрической силовой установкой.

**В четвёртой главе** представлено расчётно-экспериментальное подтверждение достоверности разработанных методик. В рамках расчётно-экспериментального подтверждения достоверности, по разработанным методикам спроектирован, изготовлен и испытан экспериментальный беспилотный самолёт с электрической силовой установкой (летающая лаборатория). Степень достоверности разработанных методик определена с помощью сопоставления экспериментальных данных с данными, полученными по разработанным методикам. В качестве обобщающей характеристики степени достоверности методик выбрана дальность полёта

самолёта. По предложенным методикам разработан и создан экспериментальный беспилотный самолёт с электрической силовой установкой. Дальность полёта самолёта составила 15.8 км, взлётная масса самолёта составила 5.77 кг. Результаты расчётно-экспериментального обоснования достоверности разработанных методик показали сходимость расчётного значения дальности полёта с экспериментальными данными в пределах 3%. Этим была обоснована достоверность разработанных методик и их применимость на ранних этапах проектирования.

**В пятой главе** диссертационной работы представлены общие рекомендации к определению размерно-весового облика беспилотного самолёта с электрической силовой установкой. Рассмотрены вопросы подготовки исходных данных, выбора схемы самолёта и количества двигателей, определения основных проектных параметров (параметров завязки), определения взлётной массы самолёта и определения основных размерных характеристик планера.

**В заключении** приведены и чётко сформулированы основные результаты диссертационной работы и перспективы дальнейших исследований.

**В приложениях** к диссертационной работе представлена классификация пилотируемых летательных аппаратов с электрической силовой установкой и Акт внедрения результатов диссертационной работы в АО «ЦНИИ «Циклон».

**Апробация результатов исследования.** Результаты, изложенные в диссертации, доложены и обсуждены на трёх международных и всероссийских научных конференциях, в трёх статьях, из них две – в изданиях Перечня ВАК. Одна статья опубликована в международном журнале «Aerospace Systems», индексируемом в международных реферативных базах Scopus.

#### **Общие замечания по диссертационной работе.**

1. При расчете относительной массы аккумуляторных батарей (стр. 8 автореферата, и стр. 57 диссертации) считается, что дополнительная энергия в наборе высоты расходуется только на изменение потенциальной и кинетической энергии аппарата, а изменение силы аэродинамического сопротивления по сравнению с крейсерским полетом не учитывается.
2. В автореферате (стр. 13) и в диссертационной работе (стр. 113) написано, что КПД силовой установки выбран статистическим методом и равен 0.437, однако статистические данные по КПД силовой установки в работе не представлены, а значения КПД составных частей (электродвигатель, винт, контроллер), приведенные в таблице 4.8, не согласуются с итоговым значением

КПД силовой установки (КПД ошибочно возведен в квадрат, по причине наличия двух двигателей, двух контроллеров и двух винтов).

3. В диссертации рассмотрено изменение аэродинамического качества от угла атаки летательного аппарата, однако способ расчета «среднего аэродинамического качества» в полете описан недостаточно подробно. Причина существенного отличия максимального аэродинамического качества от среднего полетного также не проанализирована.

4. Расчетное значение максимального аэродинамического качества летательного аппарата, спроектированного по авторской методике, составляет  $K=8.9$ , что является очень низким значением для данного класса летательных аппаратов, а «среднее аэродинамическое качество» в полете указано  $K=5.33$ . Причина столь низкого аэродинамического совершенства, заложенного при проектировании летательного аппарата не указана.

5. На странице 107 диссертационной работы приведен график угла тангажа, подписанный как график угла атаки (рисунок 4.17). При этом на рисунке 4.18 видно, что в то же время высота аппарата по GPS существенно изменялась – полет не являлся горизонтальным.

6. Параметры расчетной сетки для проведения аэродинамических расчетов и настройки решателя OpenFOAM выбраны не лучшим образом (расчетная область – куб со стороной 1.2 км избыточна для модели размахом 1.56 м, а 3.45 млн. ячеек слишком мало для такой большой расчетной области).

7. С учетом изложенных выше замечаний весьма удивительно выглядит сходимость результатов расчетной и экспериментальной полетной дальности аппарата в пределах 3%, приведенная в таблице 6 автореферата (таблица 4.11 диссертации).

8. В формулах 76 и 77 (страница 132 диссертации) присутствует ошибочный безразмерный коэффициент  $2.465 \cdot 10^{-3}$ .

9. Расчетные значения массы элементов летательного аппарата получены с учетом данных, недоступных на ранних этапах проектирования (масса конструкции получена из 3D модели), и не отражают точность определения масс по предложенной автором методике на этих этапах. То же самое касается и проверки дальности полета.

Указанные замечания не снижают ценности работы и могут быть учтены в дальнейших работах автора. Автореферат соответствует содержанию диссертации и раскрывает её основные положения. Диссертационная работа Духновского Дениса Аскольдовича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для развития отрасли связанной с проектированием беспилотных летательных аппаратов.

Диссертационная работа соответствует требованиям пунктов 9-14 Положения ВАК о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842. Выбор ведущей организации соответствует пункту 24 Положения ВАК о присуждении учёных степеней.

Автор диссертации, Духновский Денис Аскольдович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.13. «Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов».


Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании НТС отделения аэродинамики протокол № 2412 от «09» 12 2024 г.

Отзыв подготовили:

Заместитель начальника отделения аэродинамики–начальник отдела ФАУ «ЦАГИ» (140180, Московская область, г. Жуковский ул. Жуковского 1. Служебный телефон 8(495)-556-36-46, e-mail: [aleksandr.kornushenko@tsagi.ru](mailto:aleksandr.kornushenko@tsagi.ru)), кандидат технических наук

  
Корнушенко Александр Вячеславич  
«09» 12 2024г.

Научный сотрудник ФАУ «ЦАГИ» (140180, Московская область, г. Жуковский ул. Жуковского 1. Служебный телефон 8(495)-556-37-11, e-mail: [oleg.kudryavtsev@tsagi.ru](mailto:oleg.kudryavtsev@tsagi.ru)), кандидат технических наук

  
Кудрявцев Олег Валентинович  
«09» 12 2024г.

Ведущая организация:  
140180, Московская область, г. Жуковский ул. Жуковского 1. Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

8 (495) 556-42-88