

УТВЕРЖДАЮ:



Заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, доктор физико-математических наук

С. В. Лебедев

« 1 » марта 2019 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук на диссертацию Степанова Кирилла Александровича «Оптимизация формы крыльев беспилотных летательных аппаратов на основе решения уравнений Навье–Стокса», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Актуальность темы диссертационного исследования определяется необходимостью разработки новых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), обладающих высоким уровнем аэродинамических характеристик, которые в настоящее время находят все более широкое гражданское и военное применение. Поиск оптимальных конструктивных решений, обеспечивающих необходимые характеристики, является одним из ключевых вопросов. Поскольку экспериментальные методы решения таких задач требуют больших затрат, математическое моделирование аэродинамики БПЛА становится особенно актуальным.

Целью диссертационной работы является разработка и апробирование методов оптимального аэродинамического проектирования формы крыльев БПЛА на базе оптимального поиска с помощью генетических алгоритмов на основе численного решения полных уравнений Навье–Стокса на суперкомпьютерных вычислительных кластерах в широком диапазоне изменений условий полета и

геометрической сложности оптимизируемых конфигураций с учетом многочисленных ограничений на форму его поверхности и на его аэродинамические характеристики.

Для достижения основной цели диссертационной работы ее автором решены следующие частные задачи: разработан новый вариант генетического алгоритма с вещественным кодированием пространства поиска, обеспечивающего большую надежность получения глобального экстремума для мультимодальных функций; разработан метод многокритериальной оптимизации формы крыльев беспилотных летательных аппаратов, позволяющий учитывать большое количество аэродинамических и геометрических ограничений на решение; проведена верификация разработанного метода на примере оптимизации крыльев летательных аппаратов для трансзвуковых режимов течения; проведено оптимальное аэродинамическое проектирование формы уединенных крыльев беспилотных летательных аппаратов и крыльев, учитывающих наличие фюзеляжа, на основе численного решения полных уравнений Навье–Стокса.

Научная новизна методов исследования и полученных автором результатов состоит в том, что предложен новый эвристический алгоритм оптимизации (вариант генетического алгоритма), обеспечивающего большую надежность получения глобального экстремума для мультимодальных функций; разработан метод оптимизации формы беспилотных летательных аппаратов, позволяющий учитывать большое количество ограничений.

При этом впервые получены и проанализированы оптимальные формы крыльев беспилотных летательных аппаратов на основе численного решения полных уравнений Навье–Стокса при низких числах Маха и больших значениях коэффициента подъемной силы и обнаружено, что начальное приближение практически не влияет на форму оптимальных крыльев.

Научная значимость работы заключается в исследовании новых постановок задач об оптимизации внешней геометрии несущих поверхностей. Важной особенностью данных постановок является использование в них уравнений Навье–Стокса для расчета целевой функции и других аэродинамических функционалов и глобальных методов оптимального поиска. Эти результаты

развивают и дополняют теоретические представления об аэродинамике БПЛА и форме их оптимальных крыльев при низких числах Маха.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные программные модули включены в пакет OPTIMENGA\_AERO компании «ОПТИМЕНГА – 777», который позволяет определять оптимальные аэродинамические характеристики дозвуковых и трансзвуковых летательных аппаратов, а также проводить их аэродинамический анализ. С помощью этого пакета были разработаны оптимальные аэродинамические формы беспилотного летательного аппарата, обладающей высоким уровнем планерного качества.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается физической и математической корректностью постановок задач и использованием соответствующего математического аппарата; исследованиями на сеточную сходимость; сравнением с точными решениями, численными и экспериментальными результатами других авторов.

Диссертация содержит введение, 4 главы, заключение и список использованной литературы из 56 источников, из которых 6 работ принадлежат автору. Общий объем работы составляет 143 страниц. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Во введении автором обоснована актуальность темы и направления исследований, сформулированы основные цель и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов, выносимых на защиту, изложено краткое содержание работы.

В первой главе дан краткий обзор литературных источников по вопросам аэродинамики и проектирования беспилотных летательных аппаратов.

Во второй главе приведена математическая постановка задачи оптимального аэродинамического проектирования, которая сводится к решению задачи минимизации целевой функции (коэффициента полного аэродинамического сопротивления  $C_x$  летательного аппарата) при заданном значении коэффициента подъемной силы  $C_y$  с учетом многочисленных (на практике исчисляемых многими десятками) линейных и нелинейных аэродинамических и геометрических ограничений различного типа. В качестве математической модели течения используются уравнения Навье–Стокса, описывающие с необходимой для практических приложений точностью обтекание летательного аппарата потоком

сжимаемого газа с учетом эффектов молекулярного переноса и турбулентностью. Описывается метод оптимального глобального поиска в пространстве большой размерности при решении задачи минимизации с учетом нелинейных ограничений на оптимальное решение различного типа. Предлагается модификация генетического алгоритма, обеспечивающего большую надежность получения глобального экстремума для мультимодальных функций.

В третьей главе диссертации приводятся результаты верификации метода оптимизации на примере изолированных трехмерных крыльев различной формы в плане для трансзвуковых режимах полета. На многочисленных примерах показано, что используемый метод оптимального аэродинамического проектирования обладает необходимой для практических приложений точностью и высокой вычислительной эффективностью.

В четвертой главе работы приводятся результаты оптимального аэродинамического проектирования трехмерного крыла БПЛА. Проведены систематические численные расчеты аэродинамических характеристик полной трехмерной компоновки крыло–фюзеляж планера БПЛА начальной формы и оптимальное аэродинамическое проектирование крыла БПЛА в полной трехмерной компоновке крыло–фюзеляж с учетом конструктивных параметров и конструктивных ограничений.

В заключении перечислены основные результаты и выводы по диссертационной работе, намечены пути развития разработанного метода.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации. Результаты диссертационной работы могут послужить основой для проектирования перспективных БПЛА различных классов (в диссертации был рассмотрен только средний класс БПЛА). Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с усложнением формы фюзеляжа БПЛА, оптимизацией обтекателя крыла и оптимизации конфигурации «крыло–обтекатель». Усложнение геометрии оптимизируемой области приводит к увеличению размерности пространства поиска и усложнению рельефа функционала. Поэтому успех продвижения в этом направлении связан с дальнейшим совершенствованием используемых программных пакетов и улучшением используемых в них численных методов

Несмотря на отмеченные достоинства в работе имеют место следующие недостатки:

1. В диссертации не указано, откуда бралась начальная геометрия крыльев самолетов, рассмотренных в Главе 3.

2. В работе при численном решении задачи используются параллельные вычисления, при этом нет информации на скольких процессорах проводились расчеты. Уместны были бы также сведения о времени, затраченном на каждый расчет.

3. Есть замечания к оформлению работы. Например, в обзоре литературы на некоторых графиках приведены обозначения, не расшифрованные в тексте диссертации.

4. Чем вызван тот факт, что при решении задачи оптимизации формы крыла беспилотного летательного аппарата рассмотрен фактически один вариант?

5. Все результаты представлены в безразмерном виде, но характеристики сетки в пристеночной области почему-то приведены в миллиметрах.

Указанные недостатки, однако, не носят принципиального характера и не снижают высокую научную и практическую значимость работы. Автореферат соответствует содержанию диссертации. По содержанию работы опубликовано шесть статей, из них 3 статьи в изданиях из Перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России. Результаты работы неоднократно обсуждались на научных семинарах и международных конференциях.

Диссертация обсуждалась 20 февраля 2019 года на объединенном семинаре сектора численного моделирования и лаборатории физической газовой динамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, протокол № 2019/1.

Таким образом, диссертационная работа «Оптимизация формы крыльев беспилотных летательных аппаратов на основе решения уравнений Навье–Стокса», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы соответствует требованиям п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней. В ней решена научная задача, имеющая значение для развития теории оптимального аэродинамического проектирования летательных аппаратов. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы и выбранной физико-математической отрасли наук, а ее

автор, Степанов Кирилл Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
лаборатории физической газовой динамики

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
заведующий сектором численного моделирования



Бобашев Сергей Васильевич



Шмидт Александр Александрович

27 февраля 2019 г.

Сведения об организации:

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Электронная почта: [post@mail.ioffe.ru](mailto:post@mail.ioffe.ru)

Телефон: (812) 297-2245, факс: (812) 297-1017

Сайт: <http://www.ioffe.ru>