

29
269

Т. Х. Ахмедов • А. К. Бродский
И. Ф. Галанин • Р. М. Зелеев

АППАРАТЫ С МАШУЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ И ИХ ПРИРОДНЫЕ АНАЛОГИ

2-е издание



(i)
«Инфра-Инженерия»

АППАРАТЫ С МАШУЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ И ИХ ПРИРОДНЫЕ АНАЛОГИ

Монография

2-е издание

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2025

УДК 533.6

ББК 39.54

А95

Авторы:

Ахмедов Т. Х., Бродский А. К., Галанин И. Ф., Зелесв Р. М.

Рецензенты:

заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан,

доктор технических наук, профессор *С. А. Михайлов*;

заслуженный работник высшей школы Российской Федерации,

доктор физико-математических наук, профессор *В. А. Самсонов*;

доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ЗИН РАН *В. А. Кривохатский*

A95

Аппараты с машущими движителями и их природные аналоги :
монография / [Ахмедов Т. Х. и др.]. – 2-е изд. – Москва ; Вологда : Инфра-
Инженерия, 2025. – 360 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2612-1

Изложены результаты исследований в области машущих движителей, аналогами которых являются природные объекты – аэробионты (птицы и насекомые), а также гидробионты (рыбы, китообразные, пингвины и жуки-плавунцы). Рассматриваются принципы действия и теоретические основы машущих движителей. Разработана механическая модель быстромашущего движителя «Автомат супинации». Проведён кинематический анализ этого механизма, который может быть использован в качестве привода быстромашущих крыльев на беспилотных летательных аппаратах. Компьютерное моделирование позволило провести исследование векторных полей ускорений и скоростей течений в пограничном слое быстромашущих крыльев насекомых и энтомоптера. Разработаны действующие механические модели аппаратов с машущими движителями. Представлены технические облики беспилотных летательных и подводных аппаратов, а также судов с машущими движителями. Представлены доступные сведения об эволюции, морфологии и анатомии аэро- и гидробионтов: насекомых, птиц, рыб и китообразных. Знакомство со строением и работой органов движения в сплошной среде (крыльев, плавников и пр.) позволяет ближе подойти к пониманию закономерностей машущих движений и обогащает труд конструктора новыми решениями.

Для ученых, конструкторов, инженеров, изобретателей при разработке летательных и подводных аппаратов с машущими движителями.

554738

УДК 533.6

ББК 39.54

ISBN 978-5-9729-2612-1

БИБЛИОТЕКА

©Приложение «Инфра-Инженерия», 2025

Сибирский федеральный

университет

©Сибирский федеральный университет

Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Часть 1. Летательные и подводные аппараты с машущими движителями	11
Словарь терминов	11
Введение	12
Глава 1.1. Обзор теоретических и экспериментальных исследований машущих движителей аэробионтов	14
1.1.1. Уравнение Эйлера, интегралы Бернулли и Лагранжа	15
1.1.2. Движение тела в идеальной жидкости, присоединённая масса ...	16
1.1.3. Отрывные течения, теория струй	19
1.1.4. Математическое моделирование вихревых структур при отрывном обтекании профилей	22
1.1.5. Теория машущего движителя В.В. Голубева, основное уравнение машущего движителя	26
1.6. Механическая модель быстромашущего движителя аэробионтов	36
1.1.7. Результаты экспериментальных исследований кинематики машущего крыла насекомого из отряда двукрылых, полученные В. Нахтигалием	38
1.1.8. Компьютерное моделирование винта вертолёта с использованием численного метода дискретных вихрей	44
Глава 1.2. Обзор теоретических и экспериментальных исследований машущих движителей гидробионтов	52
1.2.1. Китообразные и рыбы	52
1.2.2. Волнообразный способ плавания животных. Волновой движитель	56
1.2.3. Теоретические исследования волнового движителя	50
1.2.4. Квазистационарная теория машущего плавникового движителя	59
1.2.5. Экспериментальные исследования машущего крыла	62
1.2.6. Классификация способов плавания гидробионтов с учётом направления движения их плавников	63
Глава 1.3. Машущие движители летательных аппаратов и их природных аналогов. Классификация движителей аэро- и гидробионтов	68
1.3.1. Летательные аппараты с машущими крыльями	68
1.3.2. Летательный аппарат природных аналогов с быстромашущими крыльями	74
1.3.3 Классификация движителей аэро- и гидробионтов	79
Глава 1.4. Механическая модель быстромашущего движителяля	88
1.4.1. Кинематическая схема наклонно-махового способа маховых движений крыла аэробионта	88

1.4.2. Механическая модель быстромашущего движителя «Автомат супинации»	89
1.4.3. Кинематические параметры цепи зубчатое колесо-водило.....	91
1.4.4. Кинематические параметры цепи водило-стуница	92
1.4.5. Соотношение кинематических параметров автомата супинации в I фазе маховых движений крыла.....	94
1.4.6. Соотношение кинематических параметров автомата супинации во II фазе маховых движений крыла	96
1.4.7. Соотношение кинематических параметров автомата супинации в III фазе маховых движений крыла	98
1.4.8. Соотношение кинематических параметров автомата супинации в IV фазе маховых движений крыла	100
1.4.9. Определение линейных и угловых скоростей и ускорений звеньев автомата супинации	102
1.4.10. Алгоритм расчета кинематических параметров автомата супинации.....	103
<i>Алгоритм 1.1. Расчет кинематических параметров автомата супинции.....</i>	106
Глава 1.5. Аэродинамика отрывных течений при ускоренных движениях машущих крыльев	112
1.5.1. Схемы образования вихрей и течений при ускоренном движении крыльев с различными углами атаки	112
1.5.2. Расчёт эквивалентной тяги и мощности быстромашущего движителя аэробионта, функционирующего в режиме висения.....	123
1.5.3. Расчет тяги и мощности быстромашущих движителей летательных аппаратов, функционирующих в режиме висения	129
Глава 1.6. Расчёт кинематических параметров пограничного слоя быстромашущего крыла	137
1.6.1. Физическая модель, уравнения движения, расчётные схемы	137
1.6.2. Результаты моделирования. Особенности течения в пограничном слое быстромашущих крыльев.....	141
1.6.3. Углы отклонения относительных скоростей частиц воздуха в пограничном слое крыла комара при его махово-супинационном движении.....	151
1.6.4. Компьютерное моделирование векторных полей ускорений на поверхности и в пограничном слое быстромашущего крыла	157
1.6.5. Компьютерное моделирование векторных полей скоростей, возникающих в пограничном слое быстромашущего крыла	164
Глава 1.7. Технические модели, летательные и подводные аппараты с машущими движителями	168
Глава 1.8. Машущие ветряные и водяные двигатели	180

Заключение	186
Литература	193
Часть 2. Природные аналоги летательных	
и подводных аппаратов с машущими движителями	198
Словарь терминов.....	198
Введение.....	200
Глава 2.1. Эволюция аэро- и гидробионтов (Р.М. Зелеев).....	202
2.1.1. Геохронология и развитие способов локомоции.....	202
2.1.2. Особенности эволюционных процессов	
развития аэробионтов	204
2.1.3. Эволюция летательных аппаратов аэробионтов	
(Т.Х. Ахмедов, И.Ф. Галанин).....	235
2.1.4. Эволюция гидробионтов (И.Ф. Галанин)	240
2.1.5. Завоевание воздушной среды и машущие движители	
(А.К. Бродский)	244
Глава 2.2. Биомеханика и полёт позвоночных (И.Ф. Галанин).....	247
2.2.1. Полёт птиц.....	247
2.2.2. Строение крыла птицы	256
2.2.3 Строение хвоста птицы	268
2.2.4. Полёт в других группах позвоночных	269
2.2.5. Особенности кинематики маховых движений	
крыльев птиц (Т.Х. Ахмедов).....	277
Глава 2.3. Устройство и работа крылового аппарата	
насекомых (А.К. Бродский).....	279
2.3.1. Строение крылового аппарата насекомых	279
2.3.2. Особенности функционирования крылового	
аппарата насекомых	288
2.3.3. Увеличение частоты взмаха крыльев	297
Глава 2.4. Морфофункциональные особенности водной	
локомоции рыб (И.Ф. Галанин)	303
2.4.1 Форма тела	303
2.4.2. Плавники.....	305
2.4.3. Покровы	318
2.4.4. Скелет и мускулатура	323
2.4.5. Особенности гидродинамики рыб (Т.Х. Ахмедов)	330
Глава 2.5. Локомоторные особенности китообразных	
(И.Ф. Галанин, Т.Х. Ахмедов).....	333
Заключение	346
Литература	348
Послесловие	358

ПРЕДИСЛОВИЕ

Задолго до появления человека на Земле в воздухе и в воде уже существовали живые существа – птицы, насекомые, рыбы, китообразные. Для перемещения в пространстве у них были машущие движители, которые, развиваясь в ходе длительной эволюции, впоследствии достигли высокой степени совершенства и стали объектом глубоких теоретических исследований для учёных, а также для экспериментаторов и изобретателей.

Первые сведения о попытках полёта человека с машущими крыльями историки относят к трудам Леонардо да Винчи [Леонардо да Винчи, 1955]. Попытки создания летательных аппаратов и моделей с машущими крыльями продолжаются и в настоящее время.

За последние два столетия проведён также большой объём теоретических исследований. Краткий перечень учёных и их публикаций на эту тему выглядит следующим образом.

Начиная с известных трудов нашего соотечественника профессора Н.Е. Жуковского, проведены обширные фундаментальные исследования в области теории крыла [Жуковский Н.Е., 1948].

Исследования по теории машущего крыла были проведены профессором Московского университета В.В. Голубевым. Им была разработана математическая модель для вычисления силы тяги машущим крылом. Результаты исследований по колеблющемуся с большой амплитудой крылу были изложены в его трудах, опубликованных в 1942-1957 гг. [Голубев В.В., 1957].

Важным этапом при проведении теоретических работ было изучение аэродинамических эффектов вибрирующего крыла. В ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского академиками АН СССР М.В. Келдышем и М.А. Лаврентьевым были проведены исследования применительно к проблеме флаттера крыла [Келдыш М.В., 1985].

М.А. Лаврентьевым была предложена идея плоских сечений к расчёту сил, действующих на колеблющееся тело удлинённого водного животного. На её основе членом-корр. АН СССР Г.В. Логгиновичем была разработана одна из математических моделей. Им были получены формулы для вычисления тянувшей силы, мощности, затрачиваемой на формирование тянувшей силы, гидродинамического коэффициента полезного действия хвостового плавника рыбы [Козлов, Л.Ф., 1983].

Известны монографии по биологической гидродинамике Л.Ф. Козлова [Л.Ф. Козлов, 1983] и С.В. Першина [С.В. Першин, 1988].

Представляют интерес также труды отечественных учёных биологов – Н.А. Холодковского, Г.Я. Бей-Биенко, А.В. Мартынова, Б.Н. Шванвича, Б.Б. Родендорфа, Ю.Г. Алеева, В.Л. Свидерского, А.К. Бродского, Н.В. Кокшайского.

Большой вклад в теорию машущих движителей внесён зарубежными учёными: Д. Бетчелором, Д. Принглом, Т. Вейс-Фо, А. Александером, Н. Нахтигальем, Д. Греем, М. Лайтхиллом, Т. Ву, А. Маньянном, Т. Карманом.

В Советском Союзе теоретические и экспериментальные исследования в области биогидродинамики проводились в Институте эволюционной морфологии и экологии животных им. А.Н. Северцова АН СССР, а также в Институте гидромеханики АН УССР. Издавался научный журнал «Бионика», АН УССР.

Перечисленные факты свидетельствуют о масштабе проводившихся в СССР и за рубежом теоретических и экспериментальных исследований. Поэтому не случайно следующее высказывание о проблемах, с которыми столкнулись учёные при изучении аэродинамики машущего крыла: «ведутся исследования полёта насекомых и как чисто академическая тема» [Часть I, Кокшайский Н.В., 1974]. Однако, несмотря даже на государственное финансирование, не были созданы не только летательные и подводные аппараты с машущими движителями, но даже удачные варианты механических самоходных моделей. Поэтому интерес к этим проблемам начал угасать. В нашей стране этот процесс усилился с развалом СССР и бедственным положением, в котором оказалась отечественная наука. Острота проблемы снизилась также за рубежом. Связано это было с увеличением более чем на порядок мощностей двигателей для авиации и судостроения, что позволило, впоследствии создать крупные скоростные летательные аппараты и подводные суда.

Однако с появлением беспилотных летательных и подводных аппаратов интерес к машущим движителям возродился. Тема эта вновь стала актуальной. Тем более что по таким параметрам, как габариты, массы, скорости полёта и плавания, летательные и подводные аппараты и их природные аналоги сблизились.

Но неудачи прошлых лет продолжаются. Причины заключаются в том, что, исследования ранее проводились по узким частным направлениям; а экспериментальные аппараты по-прежнему разрабатывались и создаются методом проб и ошибок.

В монографии [Ахмедов Т.Х., 2014] использован другой метод.

Были созданы механические модели, принцип действия движителей которых был подобен принципу действия движителей их природных аналогов. Это подобие достигалось схожестью течений (в том числе и вихревых) около крыльев и плавников механических моделей и их природных аналогов с помощью механизмов-приводов, которые воспроизводили кинематику крыльев и плавников моделей аналогично их природным аналогам.

Дальнейшие исследования в области машущих движителей трудно представить без учёта тех теоретических исследований, которые были проведены отечественными и зарубежными учёными (в том числе действительными членами и членами-корреспондентами академий наук) в предыдущие годы в области аэрогидродинамики.

Следует отметить также тот факт, что за прошедшие десятилетия произошли существенные изменения в вычислительной технике. Появились компьютеры, а вместе с ними и численные методы моделирования сложных процессов. Нанотехнологии способствовали появлению прочных лёгких материалов. Поэтому процессы создания летательных аппаратов с машущими

движителями могут быть подобны тем событиям, которые произошли прежде в авиации при переходе к использованию алюминия вместо дерева.

Таким образом, учитывая разнообразие животных с машущими крыльями и плавниками; большой объём проведённых в прошлом и предстоящих в будущем теоретических и экспериментальных работ по механике и аэрогидродинамике машущих движителей; глубину исследований морфологических, анатомических, физиологических, биохимических особенностей летающих и плавающих животных; а также перспективы создания принципиально новых аппаратов с машущими движителями – представляется возможным формулирование в перечне разделов прикладной науки бионики нового раздела «Механика, аэрогидродинамика летательных и подводных аппаратов с машущими движителями и их природных аналогов».

В итоге, «секреты» машущих движителей природных аналогов следует считать рассекреченными. Наука об аэро- и гидробионтах становится открытой книгой. В перспективе дорога к летательным и подводным аппаратам с машущими движителями открыта.

Монография состоит из 2 частей:

Часть 1. ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ И ПОДВОДНЫЕ АППАРАТЫ С МАШУЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ (Т.Х. Ахмедов). В этой части изложены следующие материалы:

- проведён обзор публикаций теоретических и экспериментальных исследований машущих движителей аэро- и гидробионтов;
- рассматривается принципиально новый механизм «Автомат супинации», созданный на основе аксиллярного аппарата быстромашущих насекомых из отрядов двукрылых и перепончатокрылых, проведён кинематический анализ этого механизма, который может быть использован в качестве привода быстромашущих крыльев на беспилотных летательных аппаратах;
- впервые в истории отечественной и зарубежной науки на основе визуализации рассматривается аэрогидродинамика отрывных вихревых течений при ускоренных движениях машущих крыльев и плавников на закритических углах атаки в импульсном режиме;
- разработана методика расчёта тяги и мощности быстромашущего движителя, установлено, что зависимость тяги движителя от частоты маховых движений крыльев носит квадратичный характер, а мощность – кубический;
- рассматривается новая классификация способов плавания и полёта аэро- и гидробионтов;
- разработана методика визуализации течений и расчёта кинематических параметров пограничного слоя быстромашущего крыла;
- даны описания технических моделей летательных и подводных аппаратов с машущими движителями, машущие ветряные и водяные двигатели.

Представлен технический облик возможных перспективных летательных и подводных аппаратов с машущими движителями, изображённых на рисунках: Часть I рис. 1.7.1, 1.7.2, рис. 1.7.3; рис. 1.7.5; рис. 1.7.6; рис. 1.7.7.

Получены авторские свидетельства и патенты на полезные модели:

Аvt. свид. СССР 800028, приоритет: 16.04.79.

Аvt. свид. СССР 880881. приоритет: 14.01.80.

Аvt. свид. СССР 1.253.020, приоритет 23.03. 84.

Патент RU 43532 на полезную модель приоритет: 16.08.2004.

Патент RU 45363 на полезную модель приоритет: 23.11.2004.

Патент RU 45980 на полезную модель приоритет: 10.12.2004.

Патент RU 71106 на полезную модель , приоритет: 17.09.2007.

Часть 2. ПРИРОДНЫЕ АНАЛОГИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ И ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С МАШУЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ.

Глава 2.1 Эволюция аэро- и гидробионтов (Р.М. Зелеев).

Рассмотрены основные этапы эволюции локомоции в соответствии с современными представлениями геохронологии. На примере крылатых насекомых показано присутствие морфологически совершенных форм с самого начала их эволюции. Обосновывается вывод о **закономерных изменениях возможностей их полёта, спровоцированных перестройками экосистем**. Рассматриваются также типы крыловых аппаратов с точки зрения времени их появления, выраженности у разных групп насекомых и возможностей взаимных переходов. Представлены рефрены жилкования и вариантов взаимопревращений формы крыла насекомых, позволяющие приблизиться к пониманию закономерностей их формообразования. Сформулированы представления о направлениях и этапах эволюции **аксиллярных аппаратов** и принципы, которые могут быть положены в основу для целенаправленных разработок беспилотных летающих аппаратов на основе идеи энтомоптера. Отдельным параграфом выделены этапы эволюции гидробионтов из позвоночных животных от рыбообразных форм до птиц и млекопитающих, что также демонстрирует общие закономерности оптимизации локомоции в условиях действия законов гидродинамики.

Глава 2.2. Биомеханика и полёт позвоночных (И.Ф. Галанин).

В главе рассматриваются самые крупные активно летающие животные – позвоночные. Данные сведения имеют особый интерес, поскольку эти животные должны были решить проблемы, пренебрегаемые существами с малой массой (сопротивление воздуха, развитие подъемной силы и т.д.). Птицам, как наиболее эффективно летающим животным, в главе отведено ключевое место. Вместе с птицами рассмотрены и другие летающие позвоночные. Приводится краткий очерк организации птиц с особым акцентом на полетные адаптации. Разобрано строение перьев, скелета и вопросы энергетики полета. Поскольку особое значение имеет устройство крыла, рассмотрены его скелет и вариации в зависимости от режима полета. Затронуты уникальные механизмы управления пограничным слоем крыла путем его сдува и отсоса. Отражено строение и многообразие хвоста.

Глава 2.3. Устройство и работа крылового аппарата насекомых (А.К. Бродский).

В главе рассматриваются основные черты строения и функционирования крылового аппарата насекомых: крыльев, мускулатуры крылоносных сегментов, сцепочного механизма крыльев с грудью. Показано своеобразие механизма приведения крыльев в движение. Особое внимание уделено кинематике крыловых движений, а также сделана попытка объяснить природу сил, возникающих при взмахах крыльев, с позиции квазистационарного подхода. Рассмотрены механизмы, обеспечивающие высокую частоту взмахов крыльев. Показано, что полёт насекомых, возникший как машущий, послужил основой для освоения широкого спектра различных режимов полёта. Впервые в истории отечественной и зарубежной науки, на основе экспериментов по визуализации следа за летящим насекомым, показана роль вихрей при изучении аэродинамических процессов, происходящих около машущих крыльев во время полёта насекомых. Математически эти явления были описаны В.В. Голубевым в его теории машущего крыла [Часть 1, 1.1.5].

Глава 2.4. Морфофункциональные особенности водной локомоции рыб (И.Ф. Галанин).

В главе рассмотрено телосложение рыб как первичноводных животных. Приведена классификация формы тела рыб, согласно которой, их особенности далеко не всегда обусловлены лишь с гидродинамической оптимизацией движения. Отдельно даны основные черты оптимизации формы тела при скоростной локомоции. Значительная доля внимания уделена специальным органам водного перемещения рыб – плавникам. Их строение и вариации разобраны в связи с историческим и индивидуальным развитием. Показано, что дифференциация непарных плавников, особенно хвостового, сопряжена с переходом от классической ундуляции к скомбройдному её варианту и увеличением скорости локомоции. В главе отражено функциональное значение плавников в зависимости от их положения, строения, характера подвижности. Поскольку эффективное водное перемещение неразрывно связано со строением покровов, разобрано строение кожи, желез и твердых образований, как элементов, действующих на пограничный слой. Характер подвижности рыб во многом и с особенностями строения других частей опорно-двигательной системы. Показано строение скелетных элементов, в первую очередь важного при ундуляции осевого скелета, и метамерной мускулатуры.

Глава 2.5 Локомоторные особенности китообразных (И.Ф. Галанин).

Дан краткий очерк организации китообразных как специализированной группы высокоорганизованных вторичноводных животных. Также как и у рыб рассматриваются особенности формы тела и вторичное возникновение плавников. Особое внимание уделено ключевым адаптациям к скоростному передвижению у самых быстрых представителей группы – дельфинов. Это управляемые демпферные свойства покровов и автоматически изменяющаяся жесткость плавников, особенно хвостового. Последний рассматривается как аналогичная рыбам структура с совершенно иными принципами организации. Эти сведения могут быть использованы при проектировании подводных аппаратов с машущими движителями.