

ОТСЧЕТ_RFFI_2010

ПОЛНОТЕКСТОВЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

ОТЧЕТ ЗА 2010 ГОД ПО ПРОЕКТУ РФФИ 08-04-00358-а

Статус отчета: не подписан

Дата последнего изменения: 30.11.2010

Отчёт создал: Романенко Евгений Васильевич

Отчет распечатан: 30.11.2010

Форма 501. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

- 1.1. *Номер проекта*
08-04-00358
- 1.2. *Руководитель проекта*
Романенко Евгений Васильевич
- 1.3. *Название проекта*
Теоретическая оценка коэффициента полезного действия хвостовой лопасти дельфина как движителя
- 1.4. *Вид конкурса*
а - Инициативные проекты
- 1.5. *Год представления отчета*
2011
- 1.6. *Вид отчета*
итоговый (2008-2010)
- 1.7. *Аннотация*
Для построения математической модели работы плоского жесткого крыла различного удлинения при больших амплитудах линейных и угловых колебаний и различных положениях оси вращения крыла использованы приближенные выражения для составляющих гидродинамических сил через коэффициенты аэродинамических производных первого порядка и кинематические параметры движения. Получены общие выражения для тяги, мощности и коэффициента полезного действия (КПД), развиваемых крылом, допускающие точное численное решение. Для оперативной оценки гидродинамических характеристик крыла получены расчетные формулы для трех кинематических режимов работы крыла: 1. Гармонических линейных и угловых колебаний крыла, 2. Гармонических линейных колебаний и угла атаки крыла и 3. Гармонических изменений углов наклона крыла и атаки. Полученные формулы позволяют относительно легко (с помощью обычного калькулятора) вычислять тягу, мощность и коэффициент полезного действия крыла. Результаты расчетов по полученным формулам проверены путем сравнения с результатами численных решений и экспериментальными данными, опубликованными в отечественной и зарубежной литературе. Проверка показала, что значения, рассчитанные по формулам, хорошо согласуются с теоретическими и экспериментальными результатами при углах атаки меньше 20-25 градусов. Эти ограничения обусловлены тем, что при выводе формул использовалось условие малости угла атаки
- 1.8. *Полное название организации, где выполняется проект*
Учреждение Российской академии наук Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН

"Исполнители проекта согласны с опубликованием (в печатной и электронной формах) научных отчетов и перечня публикаций по проекту"

Подпись руководителя проекта

Форма 502. КРАТКИЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

- 2.1. *Номер проекта*08-04-00358
- 2.2. *Руководитель проекта*Romanenko Evgenii Vasilievitch
- 2.3. *Название проекта*Theoretical evaluation of functional efficiency of dolphin flukes as a mover
- 2.4. *Год представления отчета*2011
- 2.5. *Вид отчета*итоговый (2008-2010)
- 2.6. *Аннотация*The approximate expressions of hydrodynamic forces were used for to construct the mathematical model of the flat and rigid wing with different form and aspect ratio when pitch-axes location varies and heaving and pitching amplitudes are sufficiently large. A peculiarity of this model is usage of the first order aerodynamic derivatives coefficients and kinematic parameters. The general formulas were derived to calculate the wing hydrodynamic characteristics by the numerical method. To calculate promptly the thrust, power and efficiency the formulas were derived in the three cases: 1. When the heave and pitch oscillate harmonically, 2. When the heave and angle of attack varies harmonically and 3. When harmonically oscillate pitch and angle of attack. A check on the accuracy of the derived formulas was made by means of the comparison with Russian and foreign theoretical and experimental data. The results of calculation are agree satisfactorily with numerical solutions and experimental data when angle of attack is below then 20-25 degrees.
- 2.7. *Полное название организации, где выполняется проекта*A.N. Severtzov Institute of Ecology and Evolution
Подпись руководителя проекта

Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

- 3.1. *Номер проекта* 08-04-00358
- 3.2. *Название проекта* Теоретическая оценка коэффициента полезного действия хвостовой лопасти дельфина как движителя
- 3.3. *Коды классификатора, соответствующие содержанию фактически проделанной работы* 04-150
- 3.4. *Объявленные ранее (в исходной заявке) цели проекта на 2010 год* Будут получены расчетные формулы для оценки тяги, мощности и коэффициента полезного действия жесткого крыла при гармонических изменениях углов наклона крыла и атаки. Будут проведены оценки КПД крыла в зависимости от положения оси вращения. Результаты оценок будут сравнены с имеющимися в научной литературе данными.
- 3.5. *Степень выполнения поставленных в проекте задач* Все поставленные задачи выполнены
- 3.6. *Полученные за отчетный период важнейшие результаты* В научной литературе известны только две работы [1,2], в которых экспериментально исследовано плоское жесткое крыло, совершающее колебания большой амплитуды при гармонических изменениях углов наклона и атаки. Амплитуда линейных колебаний составляла 0.75 хорды крыла. Углы атаки в процессе эксперимента изменялись в диапазоне от 10 до 30 градусов при числе Струхала от 0.15 до 0.35. Ось вращения крыла находилась на расстоянии одной трети хорды от передней кромки, удлинение крыла равно 5. Работы выполнены на хорошем уровне. Теоретических работ по исследованию крыльев с такой кинематикой в литературе нет. В связи с этим возникла настоятельная потребность решить упомянутую задачу о колебаниях крыла аналитическим методом с получением расчетных формул, позволяющих проводить оперативные оценки тяги и КПД любого плоского жесткого крыла вообще и хвостовой лопасти дельфина в частности при произвольных значениях кинематических параметров (в том числе при произвольном положении оси вращения крыла) с достаточной точностью. Это тем более актуально, что в нашем распоряжении имеется уникальный экспериментальный материал по изучению кинематики хвостовой лопасти дельфина, которым не располагает ни одна исследовательская лаборатория мира [3,4]. Теоретический уровень ожидаемых результатов сопоставим с мировым. За основу принято решение плоской (двумерной) малоамплитудной задачи об установившемся движении тонкого профиля, которая была рассмотрена в частности в работах А.И. Некрасова [5] и Л.И. Седова [6]. Это решение адаптировано к случаю больших амплитуд, использовано представление подъемной силы крыла через коэффициенты гидродинамических производных [7] и получено аналитическое решение для гидродинамических сил и мощности, развиваемых крылом. Основным недостатком полученного решения является предположение о малости угла атаки. Впрочем, сравнение оценок гидродинамических сил, полученных в рамках предложенного аналитического решения, с результатами численных решений, данных в работах [8-10], показывает удовлетворительное согласие при углах атаки до 15-20 градусов, что вполне достаточно для практических целей. Аналитические выражения для коэффициентов тяги и мощности (a , следовательно, и КПД) путем несложных упрощений представлены в виде расчетных формул, которые позволяют с помощью обычного калькулятора проводить оперативные оценки тяги, мощности и КПД широкого класса жестких крыльев (бесконечных, а также прямоугольных и треугольных до удлинений, равных 4), колеблющихся с произвольной амплитудой линейных и угловых колебаний и произвольным положением оси вращения. С помощью полученных формул проведена оценка коэффициентов тяги и мощности (i , следовательно, и КПД) крыла, описанного в работах [1,2]. Результаты вычислений по формулам сравнивали с экспериментальными данными, представленным в работе [1], согласие оказалось вполне удовлетворительным при углах атаки до 20-25 градусов. Упрощение общих аналитических выражений для тяги и мощности крыла с получением расчетных формул, о котором говорилось выше, неизбежно связано с определенными допущениями, приводящими к некоторой погрешности. Эти допущения, в частности, связаны с предположением о малости угла атаки, с пренебрежением малыми членами разложения гармонических функций в ряды. С целью оценить возникающие при этом погрешности был разработан алгоритм расчета тяги и мощности (a , следовательно, и КПД) крыла по исходным аналитическим выражениям и сравнения результатов таких расчетов с результатами вычислений по расчетным формулам. Проведенные оценки погрешностей показали, что они в большинстве случаев не превышают 5% при всех вариантах кинематических параметров крыла. В редких случаях при максимальных значениях угла атаки и чисел Струхала погрешность достигает 10%. В зарубежной научной литературе совершенно не рассматривается вопрос о влиянии положения оси вращения крыла на его гидродинамические характеристики. В теоретических и экспериментальных работах рассматривается единственный случай положения оси вращения крыла на расстоянии 1/3 хорды от передней кромки. Однако это положение оси вращения не является оптимальным. Лишь в работах отечественных авторов [4,9,11,12] рассмотрена зависимость гидродинамических характеристик крыла от положения оси вращения для случая гармонических линейных колебаний крыла и угла атаки с большой амплитудой. Показано, что оптимальным является положение оси вращения вблизи задней кромки крыла. Для крыла, исследованного в работе [18], по полученным формулам рассчитана зависимость КПД от положения оси вращения. Проведенная оценка показала, что оптимальное положение оси вращения крыла действительно находится между центром крыла и его задней кромкой. Последнее обстоятельство необходимо учитывать при проектировании плавниковых движителей. Список литературы. 1. Prempraneerach P., Hover F.S. and Triantafyllou M.S. The effect of chordwise on the thrust and efficiency of a flapping foil. // 13th Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Techn., Durham, NH, Aug. 2003. 2. Hover F.S. Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion // Journal of fluids and structures. 2004. № 19. P. 37-47. 3. Романенко Е.В. Гидродинамика рыб и дельфинов. М.: КМК, 2001. 412 с. 4. Романенко Е.В. Fish and Dolphin Swimming. Pensoft. Sofia-Moscow. 2002. 430 p. 5. Некрасов А.И. Теория крыла в нестационарном потоке. М.: Издательство АН СССР. 1947. 258 с. 6. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М.: Наука. 1966. 7. Белоцерковский СМ О коэффициентах вращательных производных. // Труды ЦАГИ. 1958. Вып. 725. С. 5-28. 8. Anderson J.M., Streitlien K., Barrett D.S., Triantafyllou M.S. Oscillating foils of high efficiency. // J. Fluid Mech. 1998. V. 360. P. 41-71. 9. Шеховцов А.В. Нелинейная математическая модель работы хвостового плавника

- дельфина. // Прикладна гидромеханика. 1999. Т. 1(73). № 2, С. 71-88.10.Shuchi Yang, Shijun Luo, Feng Liu, Her-Mann Tsai. Computation of the Flows over Flapping Airfoil by the Euler Equations // the AIAA 43rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, Jan. 10-13, 2005.11. Зайцев А.А., Федотов А.А. Обтекание идеальной несжимаемой жидкостью тонкого крыла конечного размаха, колеблющегося с большой амплитудой // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1986. № 5. С. 75-82.12. Федотов А.А. Исследование обтекания идеальной жидкостью тонкого крыла конечного размаха, колеблющегося с большой амплитудой. 1987. Канд. дисс. Москва.
- 3.7. *Степень новизны полученных результатов* В мировой литературе известны преимущественно малоамплитудные математические модели работы крыла, имитирующего хвостовой плавник дельфина. Модели, учитывающие большие амплитуды колебаний крыла, крайне редки и относятся к разряду численных. Они не дают расчетных формул и не позволяют осуществлять оперативные оценки тяги, мощности и коэффициента полезного действия крыла. Предлагаемое решение представляет расчетные формулы, позволяющие проводить оперативные оценки. В мировой научной литературе подобные решения отсутствуют.
- 3.8. *Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем* Впервые разработана математическая модель крыла, аппроксимирующего хвостовую лопасть колеблющегося дельфина, совершающего колебания большой амплитуды при переменном положении оси вращения и трех возможных вариантах кинематических параметров. Разработка математической модели завершена получением относительно простых расчетных формул, позволяющих проводить оперативную оценку гидродинамических сил и коэффициента полезного действия, развиваемых крылом. В мировой научной литературе нет ни одной работы подобного уровня. Причина этого заключается в том, что на протяжении многих лет подобные работы за рубежом практически не велись. Такая ситуация сложилась потому, что на Западе появилось несколько ошибочных работ, которые создали в научном сообществе неверное мнение о нецелесообразности изучения гидродинамики дельфинов и механизмов работы движительного комплекса этих животных. По этой причине финансирование этой проблемы практически было прекращено в середине семидесятых годов прошлого века. Нами был проведен тщательный анализ упомянутых работ и доказана их ошибочность, о чем было доложено на международных конференциях в Англии и США в присутствии авторов этих работ. Лишь в последние годы в англоязычной научной литературе пристальное внимание уделяется плавниковым движителям. Появилось несколько хороших экспериментальных работ, выполненных в Массачусетском Технологическом Институте в США. В этих работах исследуются жесткие крылья большого удлинения при одном фиксированном положении оси вращения и различных кинематических параметрах. Главным образом применяются два набора кинематических параметров: простое гармоническое движение крыла, когда линейные и угловые колебания крыла совершаются по гармоническому закону с большой амплитудой, и более сложное движение, когда по гармоническому закону изменяются угол наклона крыла и угол атаки, в то время, как линейные колебания (также с большой амплитудой) совершаются по более сложному закону. В одной из работ кроме того исследуется влияние гибкости крыла на его характеристики как движителя. В отечественной литературе известны лишь малоамплитудные экспериментальные работы. Однако вопросам теории крыла уделяется недостаточно внимания. В лучшем случае для сравнения с экспериментальными данными используются численные решения. Но иногда вообще никакого сравнения экспериментальных результатов с теорией не проводится. Тем актуальнее становится необходимость аналитического решения задачи о колебаниях жесткого крыла с большой амплитудой линейных и угловых колебаний при различных положениях оси его вращения с получением расчетных формул для оперативной оценки развиваемых им гидродинамических сил. Именно эта задача и была решена в рамках настоящего проекта РФФИ.
- 3.9. *Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта* В ходе выполнения проекта были применены методы математического моделирования с использованием известных линейных решений в форме интегральных уравнений, содержащих сингулярные интегралы [3,4]. Особенность состоит в том, что сингулярные интегралы, входящие в интегральные уравнения, представлены через гидродинамические производные первого порядка [7].
- 3.10.1. *Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта*
- 3.10.2. *Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2010 г.*
- 3.11. *Участие в научных мероприятиях по тематике проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда*
- 3.12. *Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке Фонда*
- 3.13. *Финансовые средства, полученные от РФФИ* 250000 руб.
- 3.14. *Вычислительная техника и научное оборудование, приобретенные на средства Фонда*
- 3.15. *Адреса (полностью) ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту*
- 3.16. *Библиографический список всех публикаций по проекту* Романенко Е.В., Пушков С.Г. Гидродинамика дельфинов, рыб и ластоногих // Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук. Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики. Сборник научных трудов. 2008. №2. С. 13-28. С.Г. Пушков, Е.В. Романенко, В.Н. Лопатин. Индуктивное сопротивление жесткого крыла // Успехи современной биологии. 2009. том 129. №1. С. 104-114. Е.В. Романенко, С.Г. Пушков, В.Н. Лопатин. Гидродинамические силы, развиваемые крылом, при различных положениях оси его вращения. Тяга, мощность и КПД при гармоническом законе угловых колебаний // Успехи современной биологии. 2009. том 129. №5. С. 469-480. Е.В. Романенко, С.Г. Пушков, В.Н. Лопатин. Гидродинамические силы, развиваемые крылом, при различных положениях оси его вращения. Тяга, мощность и КПД при гармоническом законе линейных колебаний и угла атаки // Успехи современной биологии. 2010. том 130, № 5, С. 514-524. С.Г. Пушков, Е.В. Романенко, В.Н. Лопатин. Гидродинамические силы, развиваемые крылом, при различных положениях оси его вращения. Тяга, мощность и КПД при гармоническом законе изменения углов наклона крыла и атаки // Успехи

современной биологии. 2010. (в печати).Е.В.Романенко, С.Г. Пушков. Об одном методе расчета гидродинамических характеристик крыла при нестационарном движении // Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук. Научный совет по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики. Сборник научных трудов. 2010 (в печати).

- 3.17. *Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта* транспортные, авиационные и космические системы
- 3.18. *Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты данного проекта* технологии создания новых видов транспортных систем и управления ими

Подпись руководителя проекта

Форма 506. ФИНАНСОВЫЙ ОТЧЕТ

- 6.1. *Номер проекта* 08-04-00358
- 6.2.1. *Объем финансирования, полученный от РФФИ в 2010 г.* 250000
- 6.2.2. *Фактические расходы, всего* 212500
 - 6.2.2.1. *Заработная плата* 112916
 - 6.2.2.2. *Прочие выплаты* 0
 - 6.2.2.3. *Начисления на фонд оплаты труда* 29584
 - 6.2.2.4. *Услуги связи* 0
 - 6.2.2.5. *Транспортные услуги* 0
 - 6.2.2.6. *Арендная плата за пользование имуществом* 0
 - 6.2.2.7. *Услуги по содержанию имущества* 0
 - 6.2.2.8. *Прочие услуги* 60000
 - 6.2.2.9. *Прочие расходы* 0
 - 6.2.2.10. *Увеличение стоимости основных средств* 0
 - 6.2.2.11. *Увеличение стоимости материальных запасов* 10000
- 6.3.1. *Список всех исполнителей с указанием суммы выплат каждому* Романенко Е.В. - 74916 Лопатину В.Н. - 10000 Герасимовой Р.И. - 20000 Савинкину О.В. - 5000 Костиной Г.Н. - 3000
- 6.3.2. *Перечень оборудования и материалов, приобретенных на средства проекта* Картриджи 35A к принтерам HP LaserJet P1006 (3 шт), писчая бумага - 10000
- 6.3.3. *Расходы на услуги сторонних организаций* 0
- 6.3.4. *Расшифровка командировочных расходов* 0
- 6.3.5. *Расшифровка прочих услуг* Пушкову Сергею Георгиевичу по договору подряда 60000
- 6.3.6. *Расшифровка прочих расходов* 0

Подпись руководителя проекта

Подпись главного бухгалтера организации

Печать организации

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта* 08-04-00358
- 9.2.1. *Первый автор* Романенко Е.В.; 1; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН;
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Романенко Е.В.
- 9.3.1. *Другие авторы* Пушков С.Г.; 1; Россия; Летно-исследовательский институт им. М.М.Громова Миавиапрома;
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)* Пушков С.Г.
- 9.4. *Название публикаций* Гидродинамика дельфинов, рыб и ластоногих
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Фундаментальная и прикладная гидрофизика
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в продолжающемся издании
- 9.8. *Завершенность публикации* принято в печать
- 9.9. *Год публикации* 2008
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания* (2)
- 9.11. *Страницы* 13-28
- 9.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Санкт-Петербург
- 9.13. *Краткий реферат публикации* Проведен критический анализ исследований гидродинамики дельфинов, рыб и ластоногих в мире за последние 70 лет. Показано в сравнительном плане развитие биогиродинамических работ в бывшем СССР, России и других странах (в том числе в США). В СССР большое внимание уделялось изучению тонкой структуры пограничного слоя дельфинов и ластоногих. Такой подход наиболее информативен при получении биогиродинамической информации. В западных странах и США таких исследований до сих пор не проводилось. Представлены математические преобразования, с помощью которых получен набор расчетных формул для оперативной оценки гидродинамических сил и коэффициента полезного действия, развиваемых крылом, моделирующим хвостовую лопасть дельфина.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи* <>@1 Gray J. @2 Studies of Animal Locomotion @3 J. Exp. Biol. @4 1933 @5 10,,88. <>@1 Parry D.A. @2 The swimming of whales and a discussion of Gray's paradox @3J. Exp. Biol. @4 1949 @5 26,(1),24. <>@1 Lang T.G. @2 Porpoise, Whales and fish. Comparision of predicted and observe speeds @3 Naval Eng.J. @4 1963 @5 75,(2),437. <>@1 Webb P.W. @2 Hydrudynamics and energetic of fish propulsion @3 Bull.Fish.Res.Bd Can. @4 1975 @5 190,,1. <>@1 Fish F.E. and Hui C.A. @2 Dolphin swimming - a review @3 Mamm.Rev. @4 1991 @5 21,,181. <>@1 Романенко Е.В. @2 Теория плавания рыб и дельфинов @3 Наука @4 1986 @5 ,,148. <>@1 Романенко Е.В. @2 Гидродинамика рыб и дельфинов @3 КМК @4 2001 @5 ,,412. <>@1 Романенко Е.В. @2 Основы статистической биогиродинамики @3 Наука @4 1976 @5 ,,168. <>@1 Романенко Е.В. @2 Экспериментальные исследования кинематики дельфинов @3 ДАН СССР @4 1980 @5 253, (3),741. <>@1 Романенко Е.В. @2 Некоторые вопросы теории плавания рыб и дельфинов @3 ДАН СССР @4 1980 @5 253, (5), 1082. <>@1 Romanenko E.V. @2 Fish and Dolphin Swimming @3 Sofia-Moscow PENSOFT @4 2001 @5 ,,430.
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 71

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта* 08-04-00358
- 9.2.1. *Первый автор* С.Г. Пушков; 1; Россия; Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова Минавиапрома;
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* С.Г. Пушков
- 9.3.1. *Другие авторы* Е.В. Романенко; 1; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН В.Н. Лопатин; 1; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)* Е.В. Романенко В.Н. Лопатин
- 9.4. *Название публикации* Индуктивное сопротивление жесткого крыла
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Наука
- 9.6.2. *ISSN издания* 0042-1324
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2009
- 9.10.1 *Том издания* 129
- 9.10.2 *Номер издания* (1)
- 9.11. *Страницы* 104-114
- 9.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *Краткий реферат публикации* Выполнены оценки индуктивного сопротивления плоского и жесткого крыла, совершающего гармонические колебания достаточно большой амплитуды при произвольном положении оси вращения. В плоской задаче для силы тяги и мощности получены аналитические выражения составляющих индуктивного сопротивления через коэффициенты гидродинамических производных.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи* <>@1 Белоцерковский СМ. @3 Тр. ЦАГИ @4 1958 @5 ,725, 5 <>@1 Некрасов А.И. @2 Теория крыла в нестационарном потоке @3 Изд-во АН СССР @4 1947 @5 „258 <>@1 Пушков С.Г., Романенко Е.В. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2000 @5 120,(2),207 <>@1 Пушков С.Г., Романенко Е.В. Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем, биологии @4 2006 @5 126,(3),318 <>@1 Романенко Е.В. @2 Гидродинамика рыб и дельфинов @3 КМК @4 2001 @5 „412 <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г. @3 Докл. РАН @4 1998 @5 358, (2),274 <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г. @3. Фундаментальная и прикладная гидрофизика @4 2008 @5 (2) 13 <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем, биологии @4 2005 @5 125,(5),478. <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем, биологии @4 2007 @5 127,(3),299. <>@1 Седов Л.И. @2 Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики @3 Наука @4 1966 @5 448 <>@1 Romanenko E.V. @2 Fish and Dolphin Swimming @3 Sofia-Moscow. Pensoft @4 2002 @5 „430
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 11

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта* 08-04-00358
- 9.2.1. *Первый автор* Е.В. Романенко; 1; Россия; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Е.В. Романенко
- 9.3.1. *Другие авторы* С.Г. Пушков; Россия; Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова Минавиапрома В.Н. Лопатин; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)* С.Г. Пушков В.Н. Лопатин
- 9.4. *Название публикации* Гидродинамические силы, развиваемые крылом, при различных положениях оси его вращения. Тяга, мощность и КПД при гармоническом законе угловых колебаний
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Успехи современной биологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 0042-1324
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2011
- 9.10.1 *Том издания* 129
- 9.10.2 *Номер издания* (5)
- 9.11. *Страницы* 481-492
- 9.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *Краткий реферат публикации* С использованием приближенных выражений для составляющих гидродинамических сил через коэффициенты аэродинамических производных первого порядка и кинематических параметров движения построена математическая модели работы плоского жесткого крыла различного удлинения при больших амплитудах линейных и угловых колебаний и различных положениях оси вращения крыла. Получены расчетные формулы для вычисления тяги, мощности и КПД в случае гармонических изменений амплитуды колебаний и угла наклона крыла к горизонтальной оси. Показано хорошее согласие результатов расчета по полученным формулам с соответствующими известными численными решениями, а также экспериментальными данными.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи* <>@1 Белоцерковский СМ. @3 Тр. ЦАГИ, @4 1958, @5 ,725,5 <>@1 Зайцев А.А., Федотов А.А. @3 Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа @4 1986, @5 ,5,75 <>@1 Некрасов А.И. @2 Теория крыла в нестационарном потоке @3 Изд-во АН СССР @4 1947 @5 „258 <>@1 Пушков С.Г., Романенко Е.В. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2000 @5 120,2,207. <>@1 Пушков С.Г., Романенко Е.В. Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2006 @5 126,3,318 <>@1 Романенко Е.В. @2 Гидродинамика рыб и дельфинов @3 КМК @4 2001, @5 „412 <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г. @3 Фундаментальная и прикладная гидрофизика, (в печати) <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2005 @5 125,5,478 <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2007 @5 127,3,299 <>@1 Седов Л.И. @2 Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики @3 Наука @4 1966 @5 „448 <>@1 Федотов А.А. @2 Исследование обтекания идеальной жидкостью тонкого крыла конечного размаха, колеблющегося с большой амплитудой @3 Канд. дисс. Москва @4 1987 <>@1 Шеховцов А.В. @3 Прикладна протомехан^а @4 1999 @5 1(73),2,71 <>@1 Anderson J.M., K. Streitlien, D.S. Barret, M.S. Triantofillou @3 J. Fluid Mech. @4 1998 @5 360,41 <>@1 G. Pedro, A. Suleman, N. Djalali. @3 Int. J. Numer. Meth. Fluids. @4 2003 @5 42,493 <>@1 Romanenko E.V. @2 Fish and Dolphin Swimming @3 Sofia-Moscow. Pensoft @4 2002 @5 „430 <>@1 Shuchi Yang, Shijun Luo, Feng Liu, Her-Mann Tsai. @3 The AIAA 43rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, @4 2005 <>@1 С.Г. Пушков, Е.В. Романенко, В.Н. Лопатин. @3 Успехи современной биологии @4 2008 @5 128,6,18
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 17

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта* 08-04-00358
- 9.2.1. *Первый автор* С.Г. Пушков; 1: Россия; Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова Миавиапрома
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* С.Г. Пушков
- 9.3.1. *Другие авторы* Е.В. Романенко; 1; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН В.Н. Лопатин; 1; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)* Е.В. Романенко; В.Н. Лопатин
- 9.4. *Название публикаций* Гидродинамические силы, развиваемые крылом, при различных положениях оси его вращения. Тяга, мощность и КПД при гармоническом законе изменения угла атаки.
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Успехи современной биологии
- 9.6.2. *ISSN издания* 0042-1324
- 9.7. *Вид публикации* статья в журнале
- 9.8. *Завершенность публикации* опубликовано
- 9.9. *Год публикации* 2010
- 9.10.1 *Том издания* 130
- 9.10.2 *Номер издания* 5
- 9.11. *Страницы* 514-524
- 9.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Москва
- 9.13. *Краткий реферат публикации* С использованием приближенных выражений для составляющих гидродинамических сил через коэффициенты аэродинамических производных первого порядка и кинематических параметров движения построена математическая модели работы плоского жесткого крыла различного удлинения при больших амплитудах линейных и угловых колебаний и различных положениях оси вращения крыла. Получены расчетные формулы для вычисления тяги, мощности и КПД в случае гармонических изменений амплитуды колебаний и угла атаки крыла. Показано хорошее согласие результатов расчета по полученным формулам с соответствующими известными численными решениями, а также экспериментальными данными.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи*
 <>@1 Белоцерковский СМ. @3 Тр. ЦАГИ, @4 1958, @5 ,725,5 <>@1 Зайцев А.А., Федотов А.А. @3 Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа @4 1986, @5 ,5,75 <>@1 Некрасов А.И. @2 Теория крыла в нестационарном потоке @3 Изд-во АН СССР @4 1947 @5 „258 <>@1 Пушков С.Г., Романенко Е.В. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2000 @5 120,2,207. <>@1 Пушков С.Г., Романенко Е.В. Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2006 @5 126,3,318 <>@1 Романенко Е.В. @2 Гидродинамика рыб и дельфинов @3 КМК @4 2001, @5 „412 <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г. @3 Фундаментальная и прикладная гидрофизика, (в печати) <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2005 @5 125,5,478 <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии @4 2007 @5 127,3,299 <>@1 Седов Л.И. @2 Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики @3 Наука @4 1966 @5 „448 <>@1 Федотов А.А. @2 Исследование обтекания идеальной жидкостью тонкого крыла конечного размаха, колеблющегося с большой амплитудой @3 Канд. дисс. Москва @4 1987 <>@1 Шеховцов А.В. @3 Прикладна аэромехан^а @4 1999 @5 1(73),2,71 <>@1 Anderson J.M., K. Streitlien, D.S. Barret, M.S. Triantofillou @3 J. Fluid Mech. @4 1998 @5 360,,41 <>@1 G. Pedro, A. Suleman, N. Djilali. @3 Int. J. Numer. Meth. Fluids. @4 2003 @5 42,,493 <>@1 Romanenko E.V. @2 Fish and Dolphin Swimming @3 Sofia-Moscow. Pensoft @4 2002 @5 „430 <>@1 Shuchi Yang, Shijun Luo, Feng Liu, Her-Mann Tsai. @3 The AIAA 43rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, @4 2005 <>@1 С.Г. Пушков, Е.В. Романенко, В.Н. Лопатин. @3 Успехи современной биологии @4 2008 @5 128,6,18
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 19

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. Номер проекта 08-04-00358
- 9.2.1. Первый автор Е.В. Романенко; 1; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН;
- 9.2.2. Первый автор (для издания библиографических сборников) Е.В. Романенко
- 9.3.1. Другие авторы С.Г. Пушков; 1; Россия; Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова Миавиапрома; В.Н. Лопатин; 1; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН;
- 9.3.2. Другие авторы (для издания библиографических сборников) С.Г. Пушков В.Н. Лопатин
- 9.4. Название публикации Гидродинамические силы, развиваемые крылом, при различных положениях оси его вращения. Тяга, мощность и КПД при гармоническом законе изменения углов наклона и атаки.
- 9.5. Язык публикации русский
- 9.6.1. Полное название издания Успехи современной биологии
- 9.6.2. ISSN издания 0042-1324
- 9.7. Вид публикации статья в журнале
- 9.8. Завершенность публикации принята в печать
- 9.9. Год публикации 2011
- 9.10.1 Том издания
- 9.10.2 Номер издания
- 9.11. Страницы
- 9.12.1. Полное название издательства Наука
- 9.12.2. Город, где расположено издательство Москва
- 9.13. Краткий реферат публикации С использованием приближенных выражений для составляющих гидродинамических сил через коэффициенты аэродинамических производных первого порядка и кинематических параметров движения построена математическая модель работы плоского жесткого крыла различного удлинения при больших амплитудах линейных и угловых колебаний и различных положениях оси вращения крыла. Получены расчетные формулы для вычисления тяги, мощности и КПД в случае гармонических изменений углов наклона и атаки крыла. Показано хорошее согласие результатов расчета по полученным формулам с известными экспериментальными данными.
- 9.14. Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи <>@1 Белоцерковский С.М. @3 Тр. ЦАГИ. @4 1958. @5 ,, (725), 5. <>@1 Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К., Табачников В.Г. @2 Крыло в нестационарном потоке газа. @3 Наука. @4 1971 @5 ,, 768. <>@1 Д.Н. Горелов. @2 Методы решения плоских краевых задач теории крыла. @3 Новосибирск. Изд. СО РАН. @4 2000. @5 ,, 215. <>@1 Зайцев А.А., Федотов А.А. @3 Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. @4 1986. @5 ,, (5), 75. <>@1 Пушков С.Г., Романенко Е.В. @3 Успехи соврем. Биологии. @4 2000. @5 120, (2), 207. <>@1 Пушков С.Г., Романенко Е.В. Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии. @4 2006. @5 126, (3), 318. <>@1 С.Г. Пушков, Е.В. Романенко, В.Н. Лопатин. @3 Успехи современной биологии. @4 2009 @5 129, (1), 104. <>@1 Романенко Е.В. @2 Гидродинамика рыб и дельфинов. @3 М.: КМК. @4 2001 @5 ,, 412. <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г. @3 Фундаментальная и прикладная гидрофизика. (в печати). <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии. @4 2005. @5 125, (5), 478. <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. @3 Успехи соврем. Биологии. @4 2007. @5 127, (3), 299. <>@1 Шеховцов А.В. @3 Прикладна гідромеханіка. @4 1999. @5 1, (2), 71 <>Anderson J.M., K. Streitlien, D.S. Barret, M.S. Triantofillou @3 J. Fluid Mech. @4 1998. @5, 360,, 41. <>@1 Garrick I.E. @2 Propulsion of a flapping and oscillating airfoil @3 NACA Report 567 @4 1936,, 419. <>@1 Heathcote S. and I. Gursul @3 AIAA Journal @4 2007 @5 45, (5), 1066.
- 9.15. Общее число ссылок в списке использованной литературы 21

Подпись руководителя проекта

Форма 509. ПУБЛИКАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОЕКТА (ДЛЯ ИТОГОВЫХ ОТЧЕТОВ)

- 9.1. *Номер проекта* 08-04-00358
- 9.2.1. *Первый автор* Е.В. Романенко; 1; Россия; Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
- 9.2.2. *Первый автор (для издания библиографических сборников)* Е.В. Романенко
- 9.3.1. *Другие авторы* С.Г. Пушков; 1; Россия; Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова Минавиапрома
- 9.3.2. *Другие авторы (для издания библиографических сборников)* С.Г. Пушков
- 9.4. *Название публикации* Об одном методе расчета гидродинамических характеристик крыла при нестационарном движении
- 9.5. *Язык публикации* русский
- 9.6.1. *Полное название издания* Фундаментальная и прикладная гидрофизика
- 9.6.2. *ISSN издания*
- 9.7. *Вид публикации* статья в продолжающемся издании
- 9.8. *Завершенность публикации* принято в печать
- 9.9. *Год публикации* 2011
- 9.10.1 *Том издания*
- 9.10.2 *Номер издания*
- 9.11. *Страницы*
- 9.12.1. *Полное название издательства* Наука
- 9.12.2. *Город, где расположено издательство* Санкт-Петербург
- 9.13. *Краткий реферат публикации* С использованием приближенных выражений для составляющих гидродинамических сил через коэффициенты аэродинамических производных первого порядка и кинематических параметров движения построена математическая модель работы плоского жесткого крыла различного удлинения при больших амплитудах линейных и угловых колебаний и различных положениях оси вращения крыла. Получены формулы для вычисления тяги, мощности и КПД в случае гармонических колебаний крыла. Показано хорошее согласие результатов расчета по полученным формулам с соответствующими известными численными решениями.
- 9.14. *Список литературы (библиография), использованной при подготовке данной научной статьи* <>@1 Некрасов А.И. @2 Теория крыла в нестационарном потоке @3 М.: Изд-во АН СССР @4 1947 @5 ,,258 <>@1 Седов Л.И. @2 Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики @3 М.: Наука @4 1966 @5 ,,448 <>@1 Lighthill M. J. @2 Hydrodynamics of Aquatic Animal Propulsion @3 Ann.Rev. Fluid Mech. @4 1969 @5 ,(4),413 <>@1 Wu T.Y.-T. @2 Hydrodynamics of swimming propulsion. Pt. 1. Swimming of a two-dimensional flexible plate at variable forward speeds in an inviscid fluid @3 J. Fluid Mech. @4 1971 @5 46,(2),337 <>@1 Garrick I.E. @2 Propulsion of a flapping and oscillating airfoil @3 NACA Report 567 @4 1936 @5 ,,419 <>@1 Белоцерковский С.М. @2 О коэффициентах вращательных производных @3 Тр. ЦАГИ. @4 1958 @5 ,(725),2 <>@1 Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К., Табачников В.Г. @2 Крыло в нестационарном потоке газа @3 М.: Наука @4 1971 @5 ,,768 <>@1 Д.Н. Горелов @2 Методы решения плоских краевых задач @3 Новосибирск Изд. СО РАН @4 2000 @5 ,,215 <>@1 Романенко Е.В. @2 Гидродинамика рыб и дельфинов @3 М.: КМК @4 2001 @5 ,,412 <>@1 Romanenko E.V. @2 Fish and Dolphin Swimming @3 Sofia-Moscow. Pensoft @4 2002 @5 ,,430 <>@1 P. Prempraneerach, F.S. Hover, and Triantafyllou @2 The effect of chordwise flexibility on the thrust and efficiency of a flapping foil @3 in 13rd Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Techn., Durham, NH @4 2003 @5 ,,1 <>@1 J. Young, J.C.S. Lai, M. Kaya, and I.H. Tuncer @2 Thrust and Efficiency of Propulsion by Oscillating Foils @3 in 3rd International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD3), Toronto @4 2004 @5 ,,313 <>@1 С.Г. Пушков, Е.В. Романенко, В.Н. Лопатин @2 Индуктивное сопротивление жесткого крыла @3 Успехи современной биологии @4 2009 @5 129,(1),105 <>@1 Романенко Е.В., Пушков С.Г. @2 Гидродинамика дельфинов, рыб и ластоногих @3 В сб. Фундаментальная и прикладная гидрофизика @4 2008 @5 ,(2),13 <>@1 Anderson J.M., K., Streitlien, D.S. Barret, M.S. Triantafyllou @2 Oscillating foils of high propulsive efficiency @3 J. Fluid Mech. @4 1998 @5 360,,41
- 9.15. *Общее число ссылок в списке использованной литературы* 22

Подпись руководителя проекта

Форма 511. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗАВЕРШЕННОГО ПРОЕКТА РФФИ В ПРИКЛАДНОЙ ОБЛАСТИ

- 11.1. *Номер проекта*08-04-00358
- 11.2.1. *Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, в котором, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты завершения проекта*транспортные, авиационные и космические системы
- 11.2.2. *Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, могут быть использованы результаты завершения проекта*технологии создания новых видов транспортных систем и управления ими
- 11.3. *Предлагаемое авторами название работы в прикладной области*Оперативная оценка гидродинамических сил и КПД, развиваемых жестким крылом в режиме движителя
- 11.4. *Ожидаемые результаты работы в прикладной области*Получение расчетных формул, позволяющих проводить оперативную оценку гидродинамических характеристик жесткого крыла в процессе создания плавникового движителя. Возможность использования формул для оценки характеристик бесконечных, прямоугольных и треугольных крыльев с учетом нелинейности вихревого следа, образующегося за крылом. В настоящее время для подобных целей используются весьма громоздкие численные методы.
- 11.5. *Планируемая продолжительность работы*свыше 3 лет
- 11.6. *Предполагаемые авторами пути дальнейшего продвижения проекта*подача заявки в другие фонды
- 11.7. *Информация, связанная с интеллектуальной собственностью*имеется ноу-хау
- 11.8. *Реквизиты охранных документов (номер патента, исходящий номер заявки на патент)*публикации
- Подпись руководителя проекта*

Форма 512. ДАННЫЕ О РУКОВОДИТЕЛЕ И ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЯХ, ФАКТИЧЕСКИ ПРИНИМАВШИХ УЧАСТИЕ В ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЕКТА В 2010 г.

- 12.1.1. *Фамилия, Имя, Отчество* Романенко Евгений Васильевич
 12.1.2. *Фамилия, Имя, Отчество на английском языке* Romanenko Evgeniy Vasilievitch
 12.2.1. *Дата рождения* 01.03.1933
 12.2.2. *Пол* мужской
 12.3.1. *Ученая степень* доктор биологических наук
 12.3.2. *Год присуждения ученой степени* 1986
 12.4.1. *Ученое звание* Профессор
 12.4.2. *Год присвоения ученого звания* 1998
 12.5.1. *Полное название организации - места работы* Учреждение Российской академии наук Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН
 12.5.2. *Сокращенное название организации - места работы* ИПЭЭ РАН
 12.6. *Должность* Главный научный сотрудник
 12.7.1. *Область научных интересов - ключевые слова* моделирование, крыло, дельфин, тяга, хвостовая лопасть, коэффициент сопротивления, коэффициент полезного действия
 12.7.2. *Область научных интересов - коды классификатора* 04-150
 12.8. *Общее число публикаций* 127
 12.9.1. *Почтовый индекс* 119526
 12.9.2. *Почтовый адрес* Москва, ул. 26 Бакинских комиссаров, д. 12, корп.4, кв. 86
 12.10. *Телефон рабочий* (499)1357149
 12.11. *Телефон домашний* (495)4341045
 12.12. *Факс* (499)1357149
 12.13. *Электронный адрес* evromanenko33@mail.ru
 12.14. *Участие в проекте* руководитель
 12.15. *Участие в других проектах, поддерживаемых РФФИ или другими организациями* Программа Президиума РАН № 20, И
 12.16. *Номер страхового свидетельства государственного пенсионного страхования* 004-680-067-22
 12.17. *Идентификационный номер налогоплательщика* 772910513259

Подпись участника проекта

Форма 512. ДАННЫЕ О РУКОВОДИТЕЛЕ И ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЯХ, ФАКТИЧЕСКИ ПРИНИМАВШИХ УЧАСТИЕ В ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЕКТА В 2010 г.

- 12.1.1. *Фамилия, Имя, Отчество* Лопатин Виктор Николаевич
 12.1.2. *Фамилия, Имя, Отчество на английском языке* Lopatin Viktor Nikolaevich
 12.2.1. *Дата рождения* 25.09.1937
 12.2.2. *Пол* мужской
 12.3.1. *Ученая степень* кандидат технических наук
 12.3.2. *Год присуждения ученой степени* 1972
 12.4.1. *Ученое звание* Доцент
 12.4.2. *Год присвоения ученого звания* 1974
 12.5.1. *Полное название организации - места работы* Учреждение Российской академии наук Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н.Северцова РАН
 12.5.2. *Сокращенное название организации - места работы* ИПЭЭ РАН
 12.6. *Должность* Старший научный сотрудник
 12.7.1. *Область научных интересов - ключевые слова* вычислительная математика, общая биология, математическое моделирование популяций животных, растений и экосистем, общая экология, регуляция численности животных, устойчивость экосистем
 12.7.2. *Область научных интересов - коды классификатора* 04-150 04-170 01-201
 12.8. *Общее число публикаций* 54
 12.9.1. *Почтовый индекс* 141400
 12.9.2. *Почтовый адрес* Химки, ул. Молодежная, д.32, кв. 65
 12.10. *Телефон рабочий* (495)1352164
 12.11. *Телефон домашний* (495)5707258
 12.12. *Факс* (495)9545534
 12.13. *Электронный адрес* lopatin@sevin.ru
 12.14. *Участие в проекте* исполнитель
 12.15. *Участие в других проектах, поддерживаемых РФФИ или другими организациями* РФФИ, 09-04-00125, И Программа Президиума РАН "Биоразнообразие: инвентаризация, функции, сохранение», И Программа ОБН РАН «Биологические ресурсы России: Оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга», И
 12.16. *Номер страхового свидетельства государственного пенсионного страхования* 022-799-441-73
 12.17. *Идентификационный номер налогоплательщика* 504707014930

Подпись участника проекта

Форма 512. ДАННЫЕ О РУКОВОДИТЕЛЕ И ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЯХ, ФАКТИЧЕСКИ ПРИНИМАВШИХ УЧАСТИЕ В ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЕКТА В 2010 г.

- 12.1.1. *Фамилия, Имя, Отчество*Пушков Сергей Георгиевич
 12.1.2. *Фамилия, Имя, Отчество на английском языке*Pushkov Sergey Georgievitch
 12.2.1. *Дата рождения*31.01.1956
 12.2.2. *Пол*мужской
 12.3.1. *Ученая степень*кандидат технических наук
 12.3.2. *Год присуждения ученой степени*1990
 12.4.1. *Ученое звание*Без ученого звания
 12.4.2. *Год присвоения ученого звания*
 12.5.1. *Полное название организации - места работы*Федеральное государственное унитарное предприятие Летно-исследовательский институт имени М.М.Громова
 12.5.2. *Сокращенное название организации - места работы*ФГУП ЛИИ имени М.М.Громова
 12.6. *Должность*Ведущий научный сотрудник
 12.7.1. *Область научных интересов - ключевые слова*биогиродинамика, аэрогиродинамика, теория крыла, тяга, подсосывающая сила, КПД
 12.7.2. *Область научных интересов - коды классификатора*04-150
 12.8. *Общее число публикаций*27
 12.9.1. *Почтовый индекс*140180
 12.9.2. *Почтовый адрес*. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1, кв. 49
 12.10. *Телефон рабочий*(096)5567197
 12.11. *Телефон домашний*(096)4844320
 12.12. *Факс*(096)5565407
 12.13. *Электронный адрес*puschkoff.s@yandex.ru
 12.14. *Участие в проекте*исполнитель
 12.15. *Участие в других проектах, поддерживаемых РФФИ или другими организациями*
 12.16. *Номер страхового свидетельства государственного пенсионного страхования*004-034-838-97
 12.17. *Идентификационный номер налогоплательщика*501301620363
Подпись участника проекта

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ, РАЗВИВАЕМЫЕ КРЫЛОМ, ПРИ
 РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ ОСИ ЕГО ВРАЩЕНИЯ. ТЯГА,
 МОЩНОСТЬ И КПД ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ЗАКОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ
 УГЛОВ НАКЛОНА И АТАКИ**

С использованием приближенных выражений для составляющих гидродинамических сил через коэффициенты аэродинамических производных первого порядка и кинематических параметров движения построена математическая модель работы плоского жесткого крыла различного удлинения при больших амплитудах линейных и угловых колебаний и различных положениях оси вращения крыла. Получены расчетные формулы для вычисления тяги, мощности и КПД в случае гармонических изменений углов наклона и атаки крыла. Показано хорошее согласие результатов расчета по полученным формулам с известными экспериментальными данными.

В теории нестационарной аэро-гидродинамики крыла краевые задачи, как правило, сводят к решению интегральных уравнений, которые далее решаются либо численными методами [1,2,4,12-14,16,21,22] (чаще всего) либо аналитическими (в некоторых частных случаях) [1,2,3,15]. В книгах Белоцерковского С.М. [2] и Горелова Д.Н. [3] изложены некоторые численные методы решения сингулярных интегральных уравнений теории крыла.

Возможности аналитических методов весьма ограничены. Они разработаны достаточно подробно лишь для бесконечных крыльев (плоская задача) [15] в линейной постановке. Для крыльев конечного размаха есть решения только для весьма малых удлинений в случаях очень малых и очень больших значений числа Струхала [2].

Важно отметить, что все решения даже в нелинейной постановке задачи не в полной мере описывают особенности обтекания крыла, формирования вихревого следа при нестационарном движении. Таким образом, при достаточно большой сложности используемых методов расчета решения для аэро-гидродинамических характеристик крыла тем не менее в каждом конкретном случае являются лишь некоторым приближением. Одновременно имеющиеся частные решения задачи, порой проблематично применить для расчетов в конкретных случаях кинематики движения крыла определенной формы.

В большинстве работ рассматривается случай гармонических изменений линейных и угловых колебаний крыла [1,2,14-17,21,22], в трех работах [4,12,13] рассмотрен случай гармонических изменений линейных колебаний и угла атаки крыла и лишь в двух работах [18,19] экспериментально исследуется крыло, у которого по гармоническому закону изменяются угол наклона и атаки.

В последние годы ведутся работы по созданию метода решения краевой задачи в теории крыла на основе гидродинамических производных с получением относительно простых расчетных формул, которые позволяют проводить оперативную оценку гидродинамических сил, развиваемых жестким крылом, и его коэффициента полезного действия при больших амплитудах колебаний и произвольном положении оси вращения [4-

10,20]. При этом не требуется знания методов численного решения интегральных уравнений, достаточно умения пользоваться простым калькулятором. В работах [5-11] детально изложена постановка задачи, поэтому здесь мы не будем на этом останавливаться. В работе [9] получены выражения для тяги и мощности колеблющегося жесткого крыла. Здесь мы приведем их.

Тяга

$$\begin{aligned} \overline{F}_{xc} = \frac{\rho S}{2} \left(C_{yc}^{\alpha} \overline{v_{nc}} \overline{V}_{yc} + b \left\{ C_{yc}^{\dot{\alpha}} - \frac{2m^*}{\rho S b} \right\} \overline{\dot{v}_{nc}} \sin \theta_c - b C_{yc}^{\omega_z} \overline{\omega_z} \overline{V}_{yc} - b^2 C_{yc}^{\dot{\omega}_z} \overline{\dot{\omega}_z} \sin \theta_c \right) - \\ - \overline{X_{ic}} \cos \vartheta - \frac{\rho S}{2} \overline{U_c^2 C \cos \vartheta} \end{aligned} \quad (1)$$

Мощность

$$\overline{P}_c = -\overline{F_{yc} V_{yc}} - \overline{M_{zc} \omega_z} \quad (2)$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{\overline{A}_c}{\overline{P}_c}, \quad (3)$$

Выражения, входящие в правую часть формулы (2) имеют вид

$$\begin{aligned} -\overline{F_{yc} V_{yc}} - \overline{m^* V_{yc} \frac{d(v_{nc} \cos \vartheta)}{dt}} + \frac{\rho S}{2} \left[\overline{C_{yc}^{\alpha} v_{nc} V_{xc} V_{yc}} + \left(C_{yc}^{\dot{\alpha}} - \frac{2m^*}{\rho S b} \right) \overline{b \dot{v}_{nc} V_{yc} \cos \theta_c} - \right. \\ \left. - C_{yc}^{\omega_z} \overline{\omega_z b V_{xc} V_{yc}} - C_{yc}^{\dot{\omega}_z} \overline{\dot{\omega}_z b^2 V_{yc} \cos \theta_c} \right] + \\ + \overline{X_{ic} V_{yc} \sin \vartheta} + \frac{\rho S U_c^2 V_{yc}}{2} \overline{C \sin \vartheta} \end{aligned} \quad (4)$$

$$-\overline{M_{zc} \omega_z} - \frac{\rho S b}{2} \left[\overline{m_{zc}^{\alpha} \alpha_c \omega_z U_c^2} + \overline{m_{zc}^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha}_c b \omega_z U_c^2} - \overline{m_{zc}^{\omega_z} \omega_z^2 b U_c^2} - \overline{m_{zc}^{\dot{\omega}_z} \dot{\omega}_z \omega_z b^2 U_c^2} \right], \quad (5)$$

Черта сверху обозначает усреднение по времени.

Расшифруем величины, входящие в приведенные формулы.

$$V_{xc} = U_0 - \omega_z x \sin \vartheta, \quad (6)$$

$$V_{yc} = V_{y1} + \omega_z x \cos \vartheta, \quad (7)$$

где U_0 – горизонтальная скорость крыла, $\vartheta(t)$ - угол наклона крыла, $V_{y1} = \dot{y}_1(t)$, $\omega_z = \dot{\vartheta}(t)$, $y_1(t)$ - вертикальные колебания крыла в точке x_1 (точка, через которую проходит ось вращения крыла), X_{ic} - индуктивное сопротивление, пересчитанное к центру крыла, x – расстояние от центра крыла до точки x_1 . $C_{yc}^\alpha, C_{yc}^{\dot{\alpha}}, C_{yc}^{\omega_z}, C_{yc}^{\dot{\omega}_z}, m_{zc}^\alpha, m_{zc}^{\dot{\alpha}}, m_{zc}^{\omega_z}, m_{zc}^{\dot{\omega}_z}$ - коэффициенты гидродинамических производных и коэффициенты вращательных производных момента [1], ρ - плотность жидкости, S – площадь одной стороны крыла, b – хорда, m^* - присоединенная масса крыла. Точка над буквой здесь и далее обозначает производную по времени.

В формулах (1-7) величины, которые пересчитаны к центру крыла имеют индекс “с”. Угол наклона крыла не имеет индекса, так как он одинаков во всех точках крыла, в том числе и в точке x_1 . Поэтому он определяется кинематическими параметрами именно этой точки (мгновенным углом набегающего потока θ и углом атаки α в точке x_1).

Аналогично соотношениям (6) и (7) выпишем выражения для других величин

$$v_{nc} = V_{y1} \cos \vartheta - U_0 \sin \vartheta + \omega_z x = U_c \sin \alpha_c, \quad (8)$$

$$\theta_c = \alpha_c + \vartheta = \arctg(V_{yc}/V_{xc}), \quad (9)$$

$$U_c^2 = V_{yc}^2 + V_{xc}^2, \quad (10)$$

где α_c — угол атаки, пересчитанный к центру крыла.

Формулы (1) – (10), имеют общий вид и справедливы при любых кинематических параметрах и формах крыла. Они могут быть использованы для оценки тяги и КПД крыла численными методами, что очень громоздко и требует определенной квалификации в области вычислительной математики.

Для каждого конкретного набора кинематических параметров формулы (1) и (2) могут быть упрощены путем процедуры усреднения в каждом члене. В результате без большого труда может быть получен набор расчетных формул, которые с достаточной точностью могут быть использованы для оперативной оценки гидродинамических сил и

коэффициента полезного действия, развиваемых крылом. Приведем эти формулы для случая, когда по гармоническому закону изменяются углы наклона и атаки крыла, тогда как линейные колебания совершаются по нелинейному закону:

$$\vartheta = \vartheta_0 \cos \omega t \quad (11)$$

$$\alpha_c = \alpha_0 \cos \omega t. \quad (12)$$

Линейные колебания крыла в этом случае отличаются от гармонических [18] и определяются из соотношения

$$\dot{y} = U_0 \operatorname{tg}(\vartheta + \alpha_c) \quad (13)$$

Формула (1) может быть представлена в форме коэффициентов тяги

$$C_T = \frac{2\overline{F_{xc}}}{\rho S U_0^2} \quad C_{T1} + C_{T2} + C_{T3} + C_{T4} + C_{T5} + C_{T6} \quad (14)$$

Входящие в формулу (14) коэффициенты тяги имеют вид:

Здесь

$$C_{T1} = C_{yc}^\alpha \left\{ \frac{\alpha_0}{2} \left(\theta_0 + 0.62\theta_0^3 + 0.32\theta_0^5 + 0.15\theta_0^7 + 0.07\theta_0^9 + 0.014\theta_0^{11} - 0.027\theta_0^{13} - 0.052\theta_0^{15} - 0.063\theta_0^{17} - 0.064\theta_0^{19} \right) + C_0 \right\}, \quad (15)$$

$$C_0 = \frac{\vartheta_0^2 (Sh_0)^2 X^2}{2} \left(\begin{array}{l} 1 + 0.25\alpha_0\theta_0 - 0.125\theta_0^2 - 0.021\alpha_0\theta_0^3 + 0.005\theta_0^4 - 0.001\alpha_0\theta_0^5 - \\ - 0.001\alpha_0\theta_0^7 + 0.01\theta_0^{10} + 0.008\alpha_0\theta_0^{11} + 0.019\theta_0^{12} + 0.018\alpha_0\theta_0^{13} + \\ + 0.023\theta_0^{14} + 0.025\alpha_0\theta_0^{15} + 0.02\theta_0^{16} + 0.025\alpha_0\theta_0^{17} + 0.017\theta_0^{18} \end{array} \right), \quad (16)$$

$$C_{T2} = -\frac{\vartheta_0^2 (Sh_0)^2 X}{2} \left(C_{yc}^{\dot{\alpha}} - \frac{2m^*}{\rho S b} \right) \left[\begin{array}{l} 1 - 0.125\vartheta_0^2 + 0.0052\vartheta_0^4 - \frac{\alpha_0\vartheta_0}{4} (1 - 0.0833\vartheta_0^2 + 0.0024\vartheta_0^4) - \\ - \frac{\alpha_0\theta_0^2}{4\vartheta_0} \left(\begin{array}{l} 1 + 0.1664\theta_0^2 + 0.0416\theta_0^4 + 0.012\theta_0^6 + 0.0036\theta_0^8 - \\ - 0.25\vartheta_0^2 - 0.052\vartheta_0^2\theta_0^2 - 0.0144\vartheta_0^2\theta_0^4 - 0.0044\vartheta_0^2\theta_0^6 + \\ + 0.0128\vartheta_0^4 + 0.003\vartheta_0^4\theta_0^2 + 0.009\vartheta_0^4\theta_0^4 \end{array} \right) \end{array} \right], \quad (17)$$

$$C_{T3} = -C_{yc}^{\omega_z} \frac{C_0}{X}. \quad (18)$$

$$C_{T4} = -C_{yc}^{\dot{\alpha}_z} \left\{ -(Sh_0)^2 g_0^2 \left[0.5 + 0.0625g_0^2 + 0.0026g_0^4 + \frac{\alpha_0}{g_0} (0.5 - 0.1875g_0^2 + 0.0586g_0^4) \right] \right\}, \quad (19)$$

$$C_{T5} = -\frac{\pi}{2} \left[\frac{\alpha_0^2}{2} \left(1 + 0.375\theta_0^2 + 0.13\theta_0^4 + 0.046\theta_0^6 + 0.017\theta_0^8 - 0.006\theta_0^{10} - \right. \right. \\ \left. \left. -0.031\theta_0^{12} - 0.043\theta_0^{14} - 0.046\theta_0^{16} - 0.043\theta_0^{18} \right) + C_0 \right], \quad (20)$$

$$C_{T6} = -C \left[(1 + 0.5\alpha_0\theta_0 + 0.25\theta_0^2 + 0.31\alpha_0\theta_0^3 + 0.078\theta_0^4 + 0.16\alpha_0\theta_0^5 + 0.026\theta_0^6) + C_0 \right]. \quad (21)$$

Получим формулы для чисто линейных и угловых колебаний.

Для линейных колебаний ($\mathcal{G} = 0$).

$$C_{T1} = C_{yc}^{\alpha} \left\{ \frac{\alpha_0^2}{2} (1 + 0.62\alpha_0^2 + 0.32\alpha_0^4 + 0.15\alpha_0^6 + 0.07\alpha_0^8) \right\}, \quad (22)$$

$$C_0 = C_{T2} = C_{T3} = C_{T4} = 0, \quad (23)$$

$$C_{T5} = -\frac{\pi}{2} \left[\frac{\alpha_0^2}{2} (1 + 0.375\alpha_0^2 + 0.13\alpha_0^4 + 0.046\alpha_0^6 + 0.017\alpha_0^8) \right], \quad (24)$$

$$C_{T6} = -C (1 + 0.75\alpha_0^2 + 0.388\alpha_0^4 + 0.186\alpha_0^6 + 0.106\alpha_0^8) \quad (25)$$

Для угловых колебаний ($y = 0, \dot{y} = 0, \theta = 0, \mathcal{G} = -\alpha$)

$$C_{T1} = C_{yc}^{\alpha} \{ C_0 \}, \quad (26)$$

$$C_0 = \frac{g_0^2 (Sh_0)^2 X^2}{2}, \quad (27)$$

$$C_{T2} = -\frac{g_0^2 (Sh_0)^2 X}{2} \left(C_{yc}^{\dot{\alpha}} - \frac{2m^*}{\rho S b} \right) \left[\begin{array}{l} 1 - 0.125g_0^2 + 0.0052g_0^4 - \\ -\frac{\alpha_0 g_0}{4} (1 - 0.0833g_0^2 + 0.0024g_0^4) \end{array} \right], \quad (28)$$

$$C_{T3} = -C_{yc}^{\omega_z} \frac{C_0}{X}. \quad (29)$$

$$C_{T4} = -C_y^{\dot{\omega}_z} \left\{ -(Sh_0)^2 g_0^2 \left[0.5 + 0.0625g_0^2 + 0.0026g_0^4 + \frac{\alpha_0}{g_0} (0.5 - 0.1875g_0^2 + 0.0586g_0^4) \right] \right\}, \quad (30)$$

$$C_{T5} = -\frac{\pi}{2} \left[\frac{\alpha_0^2}{2} + C_0 \right], \quad (31)$$

$$C_{T6} = -C \left[1 + \frac{(Sh_0)^2 g_0^2 X^2}{2} \right]. \quad (32)$$

Здесь и далее введены обозначения $Sh_0 = \frac{\omega b}{U_0}$ - число Струхала, $\lambda_p = \frac{U_0}{\omega y_0}$, $C = 2(C_f + C_p)$, C_f ,

C_p - коэффициенты трения и формы крыла соответственно, $X = \frac{x}{b}$.

Получим расчетные формулы для коэффициентов мощности. Выражение (2) с учетом (4) и (5) может быть представлено в форме коэффициентов мощности

$$C_P = \frac{2\bar{P}}{\rho S_2 U_0^3} C_{P1} + C_{P2} + C_{P3} + C_{P4} + C_{P5} + C_{P6} + C_{P7} + C_{P8} + C_{P9} + C_{P10} + C_{P11}, \quad (33)$$

Входящие в формулу (13) коэффициенты мощности имеют вид:

$$C_{P1} = m^* \frac{2(Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X}{\rho S b} \left[\begin{array}{l} -0.5 + 0.3125\mathcal{G}_0^2 - 0.19\mathcal{G}_0^4 + 0.0125\mathcal{G}_0^6 - \\ -\frac{1}{\mathcal{G}_0} \left(0.5\theta_0 + 0.125\theta_0^3 + 0.0417\theta_0^5 - 0.1875\mathcal{G}_0^2\theta_0 - \right) - \\ -0.375\mathcal{G}_0\theta_0 - 0.0624\mathcal{G}_0\theta_0^3 - 0.0156\mathcal{G}_0\theta_0^5 + 0.1562\mathcal{G}_0^3\theta_0 + \\ + 0.0326\mathcal{G}_0^3\theta_0^3 + 0.019\mathcal{G}_0^3\theta_0^5 - 0.0326\mathcal{G}_0^5\theta_0 - 0.0076\mathcal{G}_0^5\theta_0^3 + \\ + \frac{\theta_0}{\mathcal{G}_0} \left(0.5 - 0.1875\mathcal{G}_0^2 + 0.0469\mathcal{G}_0^4 + 0.125\theta_0^2 - 0.0938\mathcal{G}_0^2\theta_0^2 + \right) \\ + \frac{\theta_0}{\mathcal{G}_0} \left(+ 0.0293\mathcal{G}_0^4\theta_0^2 - 0.0156\theta_0^4 + 0.0146\mathcal{G}_0^2\theta_0^4 - 0.0051\mathcal{G}_0^4\theta_0^4 \right) \end{array} \right] \quad (34)$$

$$C_{P2} = C_{yc}^\alpha \theta_0 \left\{ \begin{array}{l} 0.5\theta_0 + 0.25\theta_0^3 + 0.118\theta_0^5 + 0.0364\theta_0^7 - 0.1875\mathcal{G}_0^2\theta_0 - \\ -0.1042\mathcal{G}_0^2\theta_0^3 - 0.0516\mathcal{G}_0^2\theta_0^5 - 0.5\mathcal{G}_0 - 0.125\mathcal{G}_0\theta_0^2 - 0.0417\mathcal{G}_0\theta_0^4 - \\ -0.0061\mathcal{G}_0\theta_0^6 + 0.0625\mathcal{G}_0^3 + 0.0174\mathcal{G}_0^3\theta_0^2 - \\ -\frac{(Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X^2}{\theta_0} \left[\begin{array}{l} -0.5 + 0.0625\mathcal{G}_0^2 + 0.25\mathcal{G}_0\theta_0 + 0.0417\mathcal{G}_0\theta_0^3 + 0.0104\mathcal{G}_0\theta_0^5 - \\ -0.0833\mathcal{G}_0^3\theta_0 - 0.0174\mathcal{G}_0^3\theta_0^3 - 0.0049\mathcal{G}_0^3\theta_0^5 + 0.0163\mathcal{G}_0^5\theta_0 + \\ + 0.0038\mathcal{G}_0^5\theta_0^3 - 0.125\mathcal{G}_0^2 + 0.0521\mathcal{G}_0^4 - 0.0076\mathcal{G}_0^6 \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (35)$$

$$C_{P3} = \left(C_{yc}^\alpha - \frac{2m^*}{\rho S b} \right) (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X \left(\begin{array}{l} -0.5 + 0.1875\mathcal{G}_0^2 - 0.0521\mathcal{G}_0^4 + 0.0076\mathcal{G}_0^6 - \\ -0.125\mathcal{G}_0\theta_0 - 0.0104\mathcal{G}_0^3\theta_0 + 0.0625\mathcal{G}_0^3\theta_0 - \\ -0.0195\mathcal{G}_0^5\theta_0 + 0.013\mathcal{G}_0^3\theta_0^3 - 0.0046\mathcal{G}_0^5\theta_0^3 + 0.0091\mathcal{G}_0^3\theta_0^5 \end{array} \right) \quad (36)$$

$$C_{P4} = -C_{yc}^{\omega_z} \left[-(Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X \left(\begin{array}{l} -0.5 + 0.0625\mathcal{G}_0^2 + 0.125\mathcal{G}_0\theta_0 + 0.0208\mathcal{G}_0\theta_0^3 + 0.0052\mathcal{G}_0\theta_0^5 - \\ -0.0104\mathcal{G}_0^3\theta_0 - 0.0022\mathcal{G}_0^3\theta_0^3 \end{array} \right) \right] \quad (37)$$

$$C_{P5} = -C_{yc}^{\omega_z} \left\{ (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0 \left[\begin{array}{l} \mathcal{G}_0 (-0.5 + 0.0625\mathcal{G}_0^2) + \alpha_0 (-0.5 + 0.1875\mathcal{G}_0^2) + \\ + (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^3 X^2 (0.125 - 0.0287\mathcal{G}_0^2 + 0.0033\mathcal{G}_0^4) \end{array} \right] \right\} \quad (38)$$

$$C_{P6} = \frac{\pi}{2} \left\{ \begin{array}{l} 0.375g_0\theta_0^3 + 0.313g_0\theta_0^5 + 0.2005g_0\theta_0^7 + 0.0911g_0\theta_0^9 + \\ 0.375g_0^3\theta_0 - 0.2604g_0^3\theta_0^3 - 0.2826g_0^3\theta_0^5 - 0.205g_0^3\theta_0^7 - \\ - 0.1563g_0^5\theta_0 + 0.0683g_0^5\theta_0^3 + 0.0861g_0^5\theta_0^5 + 0.0664g_0^5\theta_0^7 - \\ - 0.75g_0^2\theta_0^2 - 0.4166g_0^2\theta_0^4 - 0.0296g_0^2\theta_0^6 - 0.0656g_0^2\theta_0^8 + \\ + 0.5208g_0^4\theta_0^2 + 0.3038g_0^4\theta_0^4 + 0.1548g_0^4\theta_0^6 + 0.0502g_0^4\theta_0^8 - \\ - 0.1064g_0^6\theta_0^2 - 0.0638g_0^6\theta_0^4 - 0.0332g_0^6\theta_0^6 - 0.0104g_0^6\theta_0^8 + \\ + (Sh_0)^2 g_0^2 X^2 \left(\begin{array}{l} 0.375g_0\theta_0 + 0.0625g_0\theta_0^3 + 0.0156g_0\theta_0^5 - \\ - 0.1562g_0^3\theta_0 - 0.0326g_0^3\theta_0^3 - 0.0086g_0^3\theta_0^5 + \\ + 0.0326g_0^5\theta_0 + 0.0076g_0^5\theta_0^3 + 0.0022g_0^5\theta_0^5 - \\ - 0.25g_0^2 + 0.1042g_0^4 - 0.0152g_0^6 \end{array} \right) \end{array} \right\} \quad (39)$$

$$C_{P7} = C \left(\begin{array}{l} 0.5g_0\theta_0 + 0.5g_0\theta_0^3 + 0.3542g_0\theta_0^5 + 0.2066g_0\theta_0^7 - \\ - 0.0625g_0^3\theta_0 - 0.0695g_0^3\theta_0^3 - 0.0517g_0^3\theta_0^5 - 0.0319g_0^3\theta_0^7 \end{array} \right) \quad (40)$$

$$C_{P8} = m_{zc}^\alpha (Sh_0)^2 g_0^2 X (0.5 + 0.0625\theta_0^2 + 0.013\theta_0^4 - 0.0016\theta_0^6) \quad (41)$$

$$C_{P9} = m_{zc}^\alpha (Sh_0)^2 \alpha_0 g_0 (0.5 + 0.125\theta_0^2 + 0.0417\theta_0^4 + 0.0148\theta_0^6 + 0.0036\theta_0^8) \quad (42)$$

$$C_{P10} = -m_{zc}^{\omega_z} (Sh_0)^2 g_0^2 (0.5 + 0.125\theta_0^2 + 0.0417\theta_0^4 + 0.0148\theta_0^6 + 0.0036\theta_0^8) \quad (43)$$

$$C_{P11} = -m_{zc}^{\dot{\omega}_z} \frac{(Sh_0)^4 g_0^4 X}{4} \left(\begin{array}{l} 1 - 0.0833g_0^2 - \frac{\theta_0}{g_0} - 0.1668 \frac{\theta_0^3}{g_0} - \\ - 0.0417 \frac{\theta_0^5}{g_0} + 0.25g_0\theta_0 + 0.052g_0\theta_0^3 \end{array} \right) \quad (44)$$

Получим формулы для линейных и угловых колебаний.

Для линейных колебаний

$$C_{P1} = C_{P3} = C_{P4} = C_{P5} = C_{P6} = C_{P7} = C_{P8} = C_{P9} = C_{P10} = C_{P11} = 0 \quad (45)$$

$$C_{P2} = C_{yc}^\alpha \alpha_0^2 \{0.5 + 0.25\alpha_0^2\} \quad (46)$$

Для угловых колебаний ($y = 0, \dot{y} = 0, \theta = 0, g = -\alpha$)

$$C_{P1} = m^* \frac{2(Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X}{\rho S b} [-0.5 + 0.3125 \mathcal{G}_0^2 - 0.1 \mathcal{G}_0^4 + 0.0125 \mathcal{G}_0^6] \quad (47)$$

$$C_{P2} = C_{yc}^\alpha \left\{ -(Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X^2 [-0.5 + 0.0625 \mathcal{G}_0^2] \right\} \quad (48)$$

$$C_{P3} = \left(C_{yc}^\alpha - \frac{2m^*}{\rho S b} \right) (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X (-0.5 + 0.1875 \mathcal{G}_0^2 - 0.0521 \mathcal{G}_0^4 + 0.0076 \mathcal{G}_0^6) \quad (49)$$

$$C_{P4} = C_{yc}^{\omega_z} \left[(Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X (-0.5 + 0.0625 \mathcal{G}_0^2) \right] \quad (50)$$

$$C_{P5} = -C_{yc}^{\dot{\omega}_z} \left\{ (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0 \left[-0.125 \mathcal{G}_0 + (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^3 X^2 (0.125 - 0.0287 \mathcal{G}_0^2 + 0.0033 \mathcal{G}_0^4) \right] \right\} \quad (51)$$

$$C_{P6} = \frac{\pi}{2} \left\{ (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X^2 (-0.25 \mathcal{G}_0^2 + 0.1042 \mathcal{G}_0^4 - 0.0152 \mathcal{G}_0^6) \right\} \quad (52)$$

$$C_{P7} = 0 \quad (53)$$

$$C_{P8} = \frac{m_{zc}^\alpha (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2 X}{2} \quad (54)$$

$$C_{P9} = \frac{m_{zc}^\alpha (Sh_0)^2 \alpha_0 \mathcal{G}_0}{2} \quad (55)$$

$$C_{P10} = -\frac{m_{zc}^{\omega_z} (Sh_0)^2 \mathcal{G}_0^2}{2} \quad (56)$$

$$C_{P11} = -m_{zc}^{\dot{\omega}_z} \frac{(Sh_0)^4 \mathcal{G}_0^4 X}{4} (1 - 0.0833 \mathcal{G}_0^2) \quad (57)$$

Применим полученные формулы к оценке коэффициентов тяги и полезного действия, развиваемых жестким прямоугольным крылом с удлинением, равном 5, экспериментально исследованном в работе [18]. Кинематические параметры крыла следующие: ось вращения проходит на расстоянии 1/3 от передней кромки (в этом случае безразмерная координата $X=-1/6$), диапазон максимальных значений угла атаки от 10^0 до 30^0 , диапазон чисел Струхала от 0.15 до 0.45, отношение амплитуды линейных колебаний

к хорде крыла $\frac{h_0}{b} = 0.75$, $U_0 = 0.4$ м/с. $C = 0.028$ [16]. Выражение для присоединенной

массы крыла принято в форме $m^* = \frac{0.9\rho l\pi b^2}{2}$, где l – полуразмах крыла.

Для числа Струхалия в упомянутой работе принято выражение

$$St = \frac{2h_0 f}{U_0} \quad (38)$$

Это выражение отличается от принятого в нашей работе и находится с ним в соотношении

$$St = \frac{h_0(Sh_0)}{b\pi} \quad (39)$$

В расчетные формулы (21) – (27) входят углы α_0, ϑ_0 , а также их сумма θ_0 . В эксперименте известны только значения углов атаки, при которых проводились измерения. Остальные два угла могут быть найдены из соотношения (13). Разложим правую часть этого соотношения в ряд Маклорена и ограничимся первыми четырьмя членами. После почленного интегрирования полученного ряда в пределах от 0 до $\pi/2$ получим следующее соотношение, связывающее число St и суммарный угол θ_0 :

$$\pi(St) = \theta_0 \left(1 + 0.222\theta_0^2 + 0.071\theta_0^4 + 0.0247\theta_0^6 \right) \quad (40)$$

В таблице 1 приведены вычисленные величины угла θ_0 для значений числа St , использованных в эксперименте.

Таблица 1. Рассчитанные значения суммарного угла.

St	θ_0 , рад
0.15	0.45
0.25	0.7
0.35	0.891
0.45	1.043

Из последней строки таблицы видно, что при $St = 0.45$ $\theta_0 > 1$ и расчетные формулы могут приводить к значительной погрешности.

На рис. 1 показаны результаты измерения коэффициентов тяги, на рис. 2 – коэффициентов полезного действия в зависимости от угла атаки [18]. На тех же рисунках представлены результаты вычислений по приведенным выше формулам.

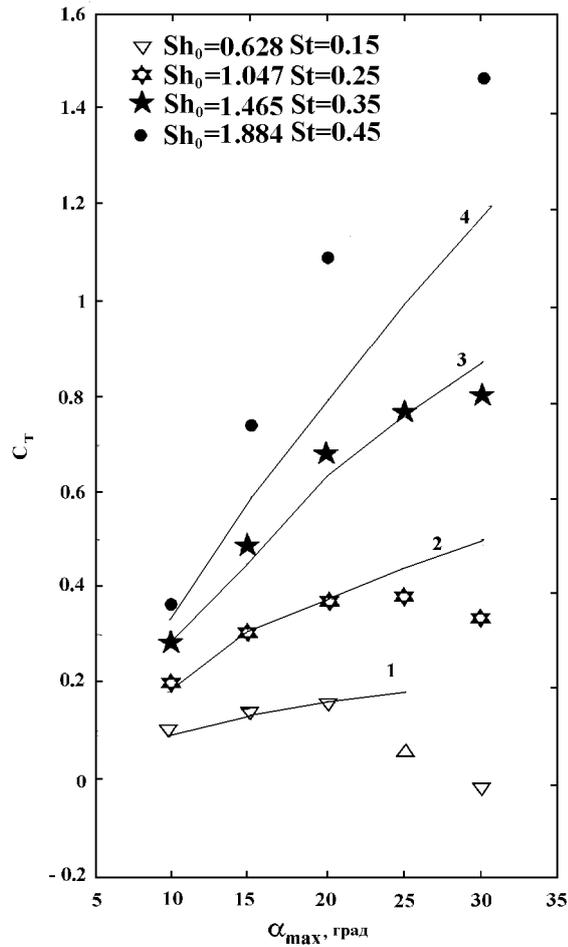


Рис. 1. Сравнение измеренных значений коэффициента тяги (значки разной формы) и значений, вычисленных по формулам (линии 1-4).

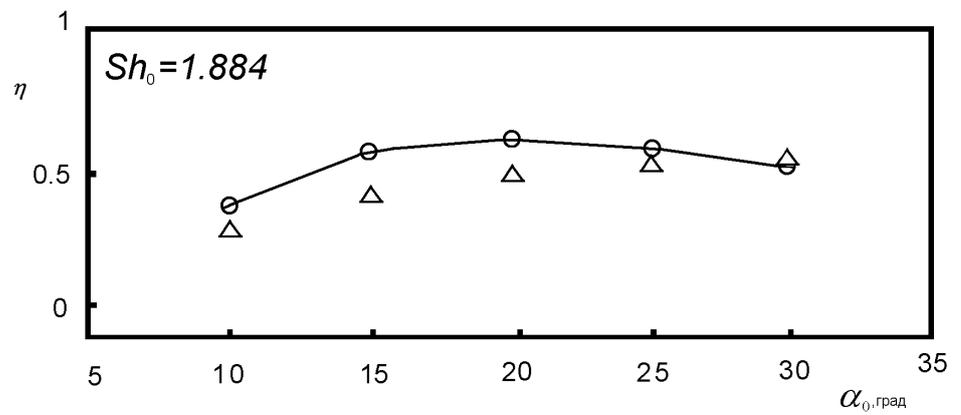
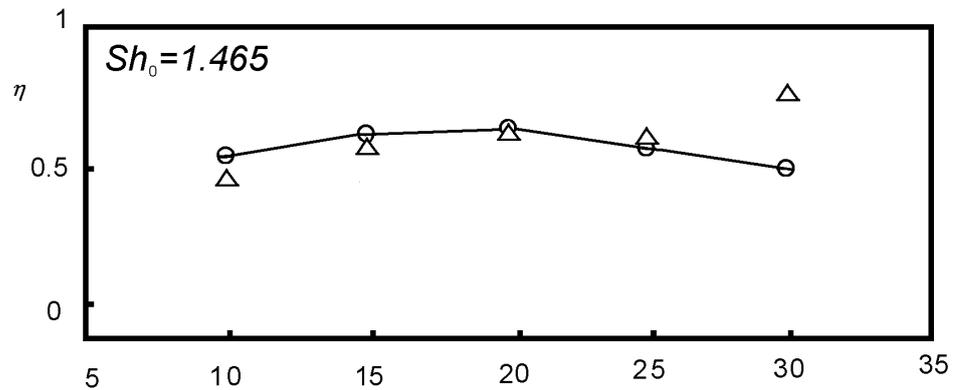
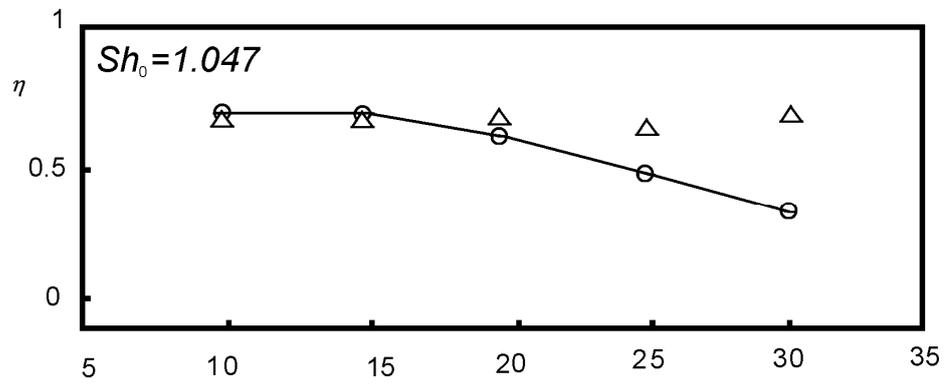
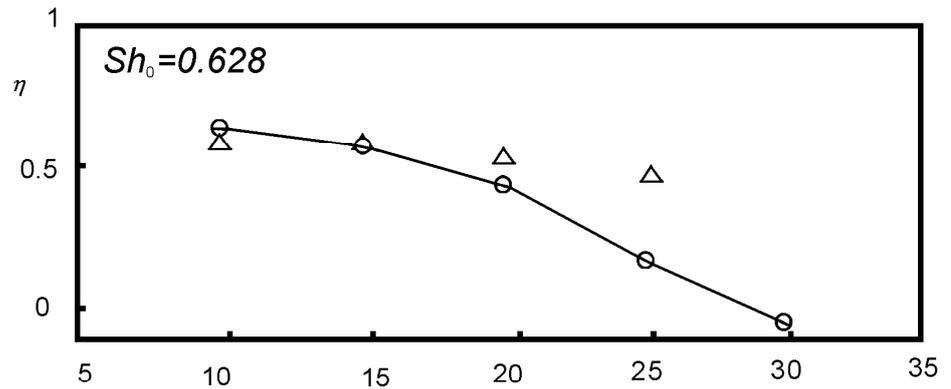


Рис. 2. Сравнение измеренных значений коэффициентов полезного действия (круглые значки) и значений, вычисленных по формулам (треугольники).

Анализируя результаты, представленные на рисунках, можно сделать следующий вывод: рассчитанные по формулам значения хорошо согласуются с измеренными при значениях угла атаки до 20-25 градусов. Объясняется это тем, что формулы получены в предположении малости угла атаки. Заметнее всего отличия при наибольшем значении числа Струхалия. Причина этого объяснена выше ($\theta_0 > 1$).

В зарубежной научной литературе совершенно не рассматривается вопрос о влиянии положения оси вращения крыла на его гидродинамические характеристики. В теоретических и экспериментальных работах рассматривается единственный случай положения оси вращения на расстоянии $1/3$ хорды от передней кромки без объяснения причин такого выбора. Однако это положение оси вращения не является оптимальным. Лишь в работах отечественных авторов [4,12,13] рассмотрена зависимость гидродинамических характеристик крыла от положения оси вращения для случая гармонических линейных колебаний крыла и угла атаки. Показано, что оптимальным является положение оси вращения вблизи задней кромки крыла. Для крыла, исследованного в работе [18], по полученным формулам рассчитана зависимость КПД от положения оси вращения крыла. Проведенная оценка показала, что оптимальное положение оси вращения крыла действительно находится между центром крыла и его задней кромкой.

На рис. 3 показана зависимость КПД жесткого прямоугольного крыла с удлинением 5, совершающего колебания при гармонических изменениях угла наклона и атаки, от положения оси вращения. Зависимость рассчитана по приведенным выше формулам при следующих кинематических параметрах: число Струхалия равно 0.628, угол атаки равен 10 градусов, угол наклона крыла 15.8 градуса, отношение амплитуды колебаний к хорде 0.75. Видно, что оптимальные положения оси вращения расположены между центром крыла и задней кромкой.

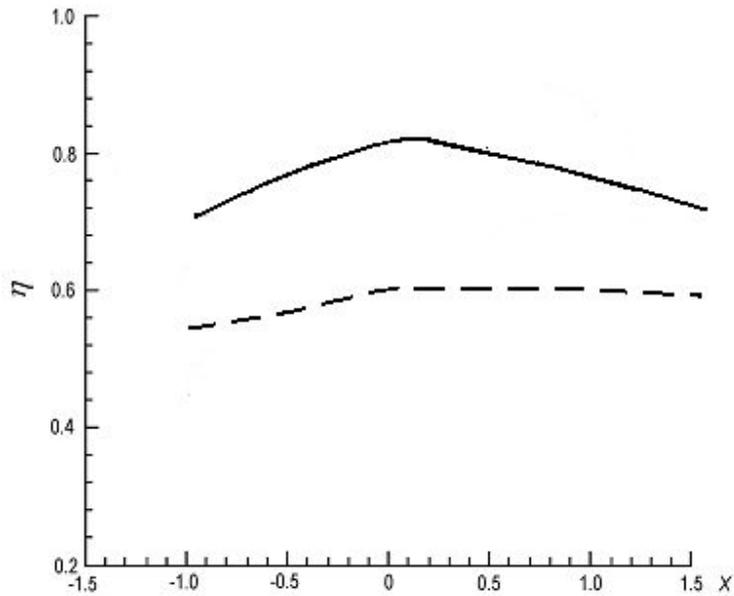


Рис. 3. Зависимость КПД жесткого прямоугольного крыла [18], совершающего колебания при гармонических изменениях угла наклона и атаки, от положения оси вращения. В точке 0 на горизонтальной оси – центр крыла. Обозначения: пунктир – КПД с учетом сопротивления трения и формы крыла, сплошная линия – КПД без учета сопротивления.

В линейном приближении значения коэффициентов аэродинамических производных и присоединенная масса определяются формой крыла и числом Струхала. При расчетах составляющих гидродинамических сил использованы известные решения для коэффициентов аэродинамических производных первого порядка, которые табулированы в широком интервале чисел Струхала для четырех типов крыльев: бесконечного, прямоугольного, треугольного и кольцевого [1,2]. Однако они представлены для удлинений крыла, не превышающих 4. А в эксперименте, описанном в работе [18], удлинение крыла близко к 5. Значения производных для удлинения 5 было получено путем экстраполяции. Кроме того в работе [1] коэффициенты аэродинамических производных рассчитаны для точки крыла, отстоящей от передней кромки на четверть хорды, а в расчетные формулы (21) – (27) входят величины, пересчитанные к центру крыла. Поэтому целесообразно и коэффициенты

аэродинамических производных пересчитать к центру. В работе [1] подробно описана методика такого пересчета. Формулы пересчета выглядят следующим образом: $C_{yc}^\alpha = C_y^\alpha$, $C_{yc}^{\dot{\alpha}} = C_y^{\dot{\alpha}}$, $C_{yc}^{\omega_z} = C_y^{\omega_z} + C_y^\alpha \xi_0$, $C_{yc}^{\dot{\omega}_z} = C_y^{\dot{\omega}_z} + C_y^{\dot{\alpha}} \xi_0$, $m_{zc}^\alpha = m_z^\alpha - C_y^\alpha \xi_0$, $m_{zc}^{\dot{\alpha}} = m_z^{\dot{\alpha}} - C_y^{\dot{\alpha}} \xi_0$, $m_{zc}^{\omega_z} = m_z^{\omega_z} - (C_y^{\omega_z} - m_z^\alpha) \xi_0 - C_y^\alpha \xi_0^2$, $m_{zc}^{\dot{\omega}_z} = m_z^{\dot{\omega}_z} - (C_y^{\dot{\omega}_z} - m_z^{\dot{\alpha}}) \xi_0 - C_y^{\dot{\alpha}} \xi_0^2$. Здесь $\xi_0 = -0.25$.

При этом необходимо учитывать следующие обстоятельства. Если определять по таблицам коэффициенты аэродинамических производных по числу Струхала $Sh_0 = \frac{\omega b}{U_0}$, то гидродинамические силы, вычисленные по расчетным формулам, будут соответствовать линейному варианту теории. В этом случае при больших амплитудах линейных и угловых колебаний крыла может иметь место увеличение ошибок результатов расчета с увеличением чисел Струхала. Оценить эти ошибки можно путем сравнения расчетов по приведенным формулам с результатами нелинейных теоретических моделей и экспериментальными исследованиями реальных крыльев.

Для того, чтобы учесть нелинейность вихревого следа за крылом, коэффициенты аэродинамических производных следует определять по числу Струхала, имеющему вид

$$Sh = \frac{(Sh_0)\lambda_p}{\sqrt{\lambda_p^2 + 1}}$$

В таблице 2 представлены уже пересчитанные значения коэффициентов для значений числа Струхала, использованных в эксперименте.

Таблица 2. Коэффициенты аэродинамических производных для крыла с удлинением 5, пересчитанные к центру крыла.

St	Sh_0	Sh	C_{yc}^α	$C_{yc}^{\dot{\alpha}}$	$C_{yc}^{\omega_z}$	$C_{yc}^{\dot{\omega}_z}$	m_{zc}^α	$m_{zc}^{\dot{\alpha}}$	$m_{zc}^{\omega_z}$	$m_{zc}^{\dot{\omega}_z}$
0.15	0.628	0.568	3.348	0.45	0.873	-0.259	0.901	-0.239	-0.128	-0.112
0.25	1.047	0.8	3.202	0.665	0.843	-0.202	0.863	-0.184	-0.136	-0.1
0.35	1.465	0.921	3.082	0.777	0.828	-0.173	0.844	-0.153	-0.139	-0.095
0.45	1.884	0.949	2.985	0.803	0.824	-0.166	0.837	-0.149	-0.143	-0.093

Авторы выражают искреннюю благодарность Р.И. Герасимовой за помощь в подготовке рисунков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-04-00358 а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоцерковский С.М. Тр. ЦАГИ. 1958. Вып.725. С. 5.
2. Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К., Табачников В.Г. Крыло в нестационарном потоке газа. М. Наука. 1971. 768 с.
3. Д.Н. Горелов. Методы решения плоских краевых задач теории крыла. Новосибирск. Изд. СО РАН. 2000. 215 с.
4. Зайцев А.А., Федотов А.А. // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1986. № 5. С. 75 – 82.
5. Пушков С.Г., Романенко Е.В. // Успехи соврем. Биологии. 2000. Т. 120. № 2. С. 207.
6. Пушков С.Г., Романенко Е.В. Лопатин В.Н. // Успехи соврем. Биологии. 2006. Т. 126. № 3. С. 318.
7. С.Г. Пушков, Е.В. Романенко, В.Н. Лопатин. // Успехи современной биологии. 2009. том 129. №1. С. 104.
8. Романенко Е.В. Гидродинамика рыб и дельфинов. М.: КМК. 2001. 412 с.
9. Романенко Е.В., Пушков С.Г. // ж. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. (в печати)
10. Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. // Успехи соврем. Биологии. 2005. Т. 125. № 5. С. 478.
11. Романенко Е.В., Пушков С.Г., Лопатин В.Н. // Успехи соврем. Биологии. 2007. Т. 127. № 3. С. 299.
12. Федотов А.А. Исследование обтекания идеальной жидкостью тонкого крыла конечного размаха, колеблющегося с большой амплитудой. 1987. Канд. дисс. Москва.
13. Шеховцов А.В. // Прикладна гідромеханіка. 1999. Том 1(73). № 2. С. 71 – 88.
14. Anderson J.M., K. Streitlien, D.S. Barret, M.S. Triantofillou // J. Fluid Mech. 1998. V. 360. P. 41.
15. Garrick I.E. Propulsion of a flapping and oscillating airfoil. NACA Report 567 1936. P. 419-427.
16. Heathcote S. and I. Gursul // AIAA Journal V. 45, № 5, May 2007. P. 1066-1079.

17. *Pedro G., A. Suleman, N. Djilali.* // Int. J. Numer. Meth. Fluids. 2003, V. 42. pp. 493-526.
18. *Prempraneerach P., F.S. Hover and M.S. Triantafyllou* // Pros. 13th Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Techn.. Durham, NH, Aug. 24-27, 2003.
19. *Hover F.S., O. Haugsdal, M.S. Triantafyllou* // J. of Fluids and Structures. 2004, №19, P. 37-47.
20. *Romanenko E.V.* Fish and Dolphin Swimming. Sofia-Moscow. Pensoft. 2002. 430 p.
21. *Yang Shuchi, Shijun Luo, Feng Liu, Her-Mann Tsai.* // The AIAA 43rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, Jan. 10-13, 2005.
22. *Young J., J.C.S. Lai, M. Kaya, and I.H. Tuncer* // in 3rd International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD3), Toronto, July 2004.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Код проекта №08-04-00358 а.

Авторы выражают искреннюю благодарность Р.И. Герасимовой за помощь в подготовке рисунков.

HYDRODYNAMIC FORCES EXERTED BY THE WING AS A
FUNCTION OF THE PITCH-AXES LOCATION. THRUST, POWER AND
EFFICIENCY EXERTES ON CONDITION THAT PITCH AND ATTACK
OSCILLATIONS OF THE WING VARIES HARMONICALLY.

The approximate expressions of hydrodynamic forces were used for to construct the mathematical model of the flat and rigid wing with different form and aspect ratio when pitch-axes location varies and heaving and pitching amplitudes are sufficiently large. A peculiarity of this model is usage of the first order aerodynamic derivatives coefficients and kinematic parameters. To calculate the thrust and efficiency when the pitch angle and angle of attack

varies harmonically the formulas were derived. The results of calculations agree well with numerical solutions.