

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ВИНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЕГО ТЯГОВО-МОЩНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК\*

Р. А. Нейдорф, Ю. Л. Сигида

*Кафедра «Программное обеспечение вычислительной техники  
и автоматизированных систем», ФГБОУ ВПО «Донской государственный  
технический университет», г. Ростов-на-Дону; yurius88@yandex.ru*

**Ключевые слова и фразы:** аэродинамические свойства; аэростат; воздушный винт; компьютерное моделирование; математическая модель; стратосфера.

**Аннотация:** Рассмотрены возможности имитационного моделирования воздушно-винтового движителя. Поставлена и решена задача исследования тяговых и мощностных возможностей воздушно-винтового движителя типичной для дирижаблей конфигурации. Исследование проведено путем построения математической модели, связывающей установившиеся значения мощности на валу и тягового усилия на оси винта со скоростью его вращения и фактической скоростью движения воздушного судна. Обоснован выбор ориентированной на решаемую задачу расчетной схемы компьютерного моделирования аэро- и термодинамических процессов, протекающих при вращении винта. Дано описание разработанного для задачи плана эксперимента, предусматривающего варьирование основных параметров работы винта, движения и среды полета. Приведены результаты проверки.

---

**Введение.** При математическом моделировании динамики движения летательных аппаратов возникает задача идентификации ряда констант и функций, которые не могут быть рассчитаны аналитически. К таким функциям относятся зависимости аэродинамических коэффициентов взаимодействия корпуса аппарата с воздушным потоком [1 – 3], а также тягово-мощностные рабочие характеристики активных движителей, используемых в полете воздушным судном. В настоящее время на дирижаблях и других воздушных кораблях с аэростатическим принципом удержания в воздухе применяются исключительно винтовые воздушные движители. Несмотря на внешнюю простоту конструкции винта, процессы, протекающие при его вращении и взаимодействии с частицами воздуха, чрезвычайно разнообразны и сложны [4]. Поэтому как в научной, так и в технической литературе практически отсутствуют приемлемые уравнения связи «форма лопасти – расход топлива – мощность на валу – обороты винта – тяговое усилие – скорость продольного движения винта с буксируемым корпусом относительно потока».

В связи с этим приходится решать задачи построения математической модели воздушно-винтового движителя и оптимизации его геометрических параметров с использованием натуральных экспериментов, либо компьютерного моделирования аэродинамических процессов. В связи с огромной сложностью аналитического решения нелинейных систем дифференциальных уравнений в частных производных в настоящее время все больше предпочтения отдается последнему подходу.

---

\* По материалам доклада на конференции ММТТ-2014.

Рассмотрим задачу, в которой ставились методологические цели: освоение и демонстрация технологии эксперимента по компьютерному моделированию воздушного винта и математической обработке его результатов с получением рабочих характеристик винта.

**Постановка задачи.** Для исследования выбран пятилопастной винт диаметром 2 м, предназначенный для установки на дирижаблях [5]. Необходимо с использованием методов и средств компьютерного моделирования получить данные по его мощностным, тяговым и скоростным свойствам. На основании этих данных требуется графически построить и исследовать рабочие характеристики воздушно-винтового движителя при движении воздушного судна вблизи земной поверхности. Исследованию подлежат наиболее информативные характеристики, связывающие момент и полную мощность на валу винта, тягу на его оси, полезную мощность, преобразованную в движение, и коэффициент полезного действия винта с частотой его вращения и фактической скоростью движения относительно воздушного потока. Максимальное значение данной скорости для дирижаблей составляет  $\sim 200$  км/ч, то есть около 60 м/с.

**Методы и инструменты решения задачи.** На рисунке 1, а изображена геометрическая модель выбранного для исследования воздушного винта. Для компьютерного моделирования применен метод SMM (Sliding Mesh Model) [6], основанный на вращении расчетной сетки, который является наиболее точным, однако требует больших вычислительных мощностей компьютера. Расчетная область для исследования винта изображена на рис. 1, б.

Параметры имитационного моделирования винта:

Предполагаемая скорость движения дирижабля, м/с ..	0...70 (шаг 10 м/с)
Давление, Па.....	101325
Скорость вращения пропеллера, об/мин.....	1000 – 3000 (шаг 500 об/мин)
Температура окружающей среды, °C .....	10
Временной шаг моделирования, с .....	$1,11 \cdot 10^{-3}$
Угол поворота за один шаг .....	$10^\circ$
Число шагов.....	360
Модель турбулентности .....	$k-\epsilon$ realizable

На поверхностях фронтального, бокового и заднего интерфейсов (см. рис. 1, б) измерялись при компьютерном моделировании давление  $P$ , скорость  $v$  и массовый расход  $G$ . Кроме того, измерялись механические и энергетические параметры взаимодействия винта с воздушным потоком: момент на валу  $M_x$  и осевая тяга  $F_x$ .

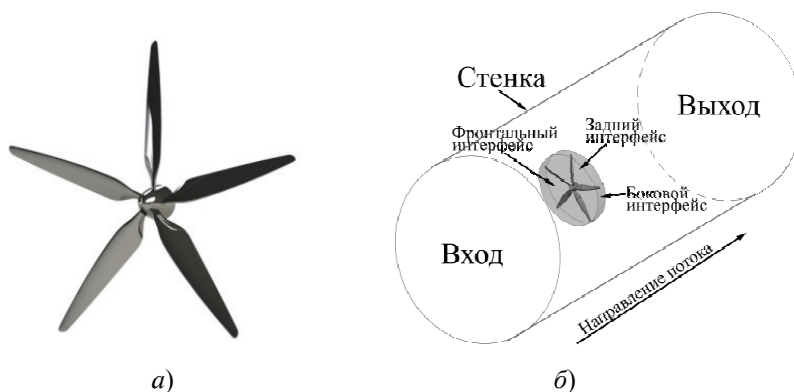


Рис. 1. Геометрическая модель винта (а) и расчетная область (б)

Кроме данных эксперимента вычислены параметры, не поддающиеся прямо-  
му измерению или моделированию, к которым относятся следующие величины:

$$N_{\text{shaft}} = M_x \omega_x; \quad (1)$$

$$N_{\text{drag}} = F_x v; \quad (2)$$

$$K_{\text{use}} = \frac{N_{\text{drag}}}{N_{\text{shaft}}}; \quad (3)$$

$$K_{\text{loss}} = -\frac{N_{\text{shaft}}}{N_{\text{drag}}}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{shaft}}$  – мощность, развиваемая двигателем на валу винта;  $N_{\text{drag}}$  – мощность, затрачиваемая на движение воздушного судна с преодолением сопротивления воздуха;  $K_{\text{use}}$ ,  $K_{\text{loss}}$  – коэффициенты полезного действия и потери мощности соответственно. Коэффициент  $K_{\text{loss}}$  введен как виртуальная характеристика свойств винта и соответствует случаю, когда скорость потока превышает максимальную скорость потока, которую может создать винт при заданной скорости вращения. В этом случае поток создает на валу винта противомомент и противосилу, так что эти переменные меняют знак. Знак минус в уравнении (4) отражает потерю мощности.

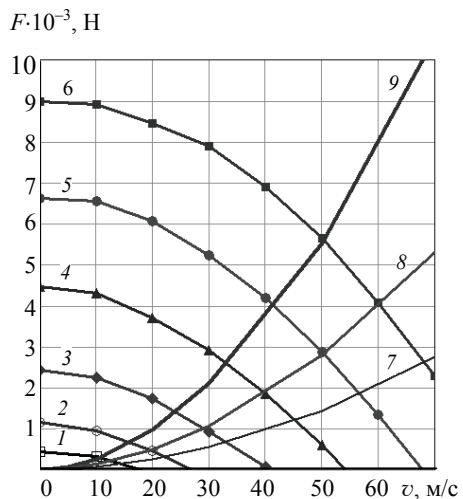
**Анализ полученных данных.** На рисунке 2 показано семейство зависимостей тяги  $F_x$ , развиваемой винтом, от скорости движения винта в воздушной среде при различных скоростях вращения винта.

С увеличением скорости движения тяга уменьшается. При увеличении числа оборотов винта в единицу времени тяга увеличивается. Уменьшение тяги с ростом скорости движения при постоянной скорости вращения винта приводит к тому, что при некоторой скорости  $v_{\text{cr}}$  она становится нулевой. При дальнейшем росте скорости начинается торможение винта, и сила становится отрицательной.

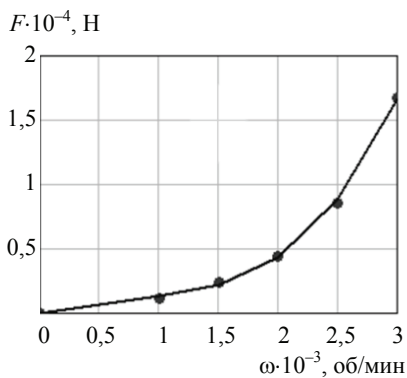
Величина  $v_{\text{cr}}$  является пределом скоростных возможностей винта для создания тяги и показателем его скоростной эффективности. Результаты эксперимента позволяют построить и использовать при выборе типа винта графики зависимости скоростной эффективности различных конструкций от скорости вращения. Для исследуемого винта данная зависимость оказалась практически линейной.

Важной эксплуатационной характеристикой воздушного винта является зависимость развиваемой им при неподвижном положении тяги от скорости вращения (рис. 3). Она показывает стартовые характеристики двигателя и хорошо описывается близкой к параболической зависимостью вида

$$F_{\text{drag}}(\omega) = -31,39\omega - 0,003014\omega^2 + 0,000001272\omega^3. \quad (5)$$



**Рис. 2. Зависимость тяги от скорости движения воздушного судна при различных скоростях вращения винта, об/мин:**  
1 – 500; 2 – 1000; 3 – 1500;  
4 – 2000; 5 – 2500; 6 – 3000;  
7–9 – сила лобового сопротивления при фронтальной площади 6; 11,6 и 23 м<sup>2</sup>



**Рис. 3. Тяга, развиваемая в неподвижном положении:**

••• – экспериментальные данные;  
 — — компьютерное моделирование

максимального фронтального сечения. Абсциссы точек пересечения характеристик являются значениями равновесной скорости воздушного судна моделируемой формы с маршевым двигателем, оснащенный исследуемым винтом.

Таким образом, возникает возможность оценивать и корректировать свойства системы «дирижабль – винт» (Д-В система) [7] в следующих аспектах.

Во-первых, можно с высокой точностью оценивать и моделировать свойства построенной Д-В системы. Во-вторых – корректировать геометрические параметры винта, добиваясь требуемых тактико-технических данных проектируемой Д-В системы. В-третьих, появляется возможность уточнять геометрические и аэродинамические характеристики аппарата, для которых выбран конкретный маршевый движитель, изменять конструкцию нельзя или нецелесообразно.

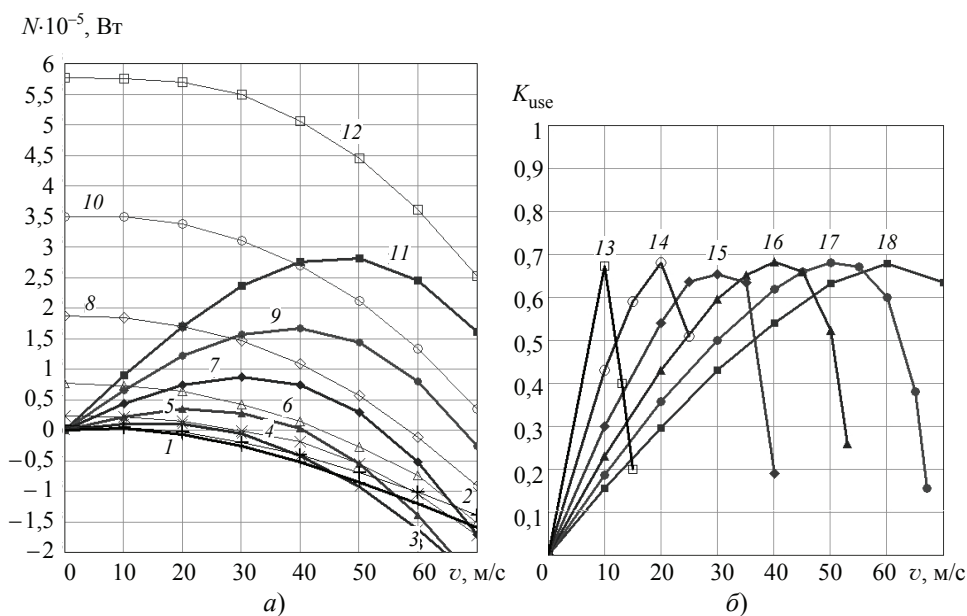
Наиболее эффективным способом решения задачи построения Д-В системы является ее оптимизация. При этом наиболее эффективным критерием оптимизации эксплуатационных характеристик дирижабля является максимизация  $K_{use}$ . В связи с этим представляет интерес исследование полученных в эксперименте данных в целях определения оптимального скоростного режима работы рассматриваемого в качестве примера винта.

На рисунке 4, а построены зависимости полученных из эксперимента значений  $N_{shaft}$  и  $N_{drag}$ . Кривые зависимости мощности, отдаваемой двигателем на валу  $N_{shaft}$  (жирные линии со сплошными маркерами) от скорости движения воздушного судна расположены выше кривых зависимости мощности, затрачиваемой на движение этого судна  $N_{drag}$  (тонкие линии с контурными маркерами). Превышение мощности на валу винта над отдаваемой им полезной мощностью увеличивается с уменьшением скорости. При  $v = 0$  мощность движения тоже равна 0.

На рисунке 4, б построены кривые зависимости  $K_{use}$ , переходящие при пересечении нуля в  $K_{loss}$ , для обособленно работающего в движущемся потоке винта. Следует отметить особенность, что максимум  $K_{use}$  оказывается практически независимым (с учетом погрешности компьютерного эксперимента) от скорости вращения винта. Их значения для исследуемой конструкции находятся в пределах 0,655...0,682, а максимумы соответствуют скоростям движения, которые при заданных оборотах винта минимизируют энергозатраты на полет дирижабля. Это открывает перспективы эффективной оптимизации двигательных систем воздушных судов с винтовыми приводами.

Семейство графиков тяговых зависимостей винта от скорости его вращения удобно использовать в сочетании с аэродинамическими характеристиками лобового сопротивления воздушного судна. Совместно они позволяют построить более информативную рабочую характеристику системы «аппарат – движитель», которая определяет маршевые возможности воздушного судна.

На рисунке 2 вместе с тяговыми характеристиками винта построены зависимости лобового сопротивления  $F_s(S, v)$  макета классического дирижабля типа «парсеваль» с масштабируемой характеристической площадью  $S$  макси-



**Рис. 4. Графики зависимостей мощностей движения (1, 3, 5, 7, 9, 11) и на валу (2, 4, 6, 8, 10, 12) (а) и КПД (б) от скорости движения воздушного судна при различных скоростях вращения винта, об/мин:**  
 1, 2, 13 – 500; 3, 4, 14 – 1000; 5, 6, 15 – 1500;  
 7, 8, 16 – 2000; 9, 10, 17 – 2500; 11, 12, 18 – 3000

Анализ построенных характеристик (см. рис. 2) показывает, что при  $\omega_x \in (1000, \dots, 3000)$  оптимальные по  $K_{use}$  скорости дирижабля приблизительно отвечают ряду  $v \in (20, \dots, 60)$ , следовательно можно вывод о том, какие обороты винта необходимо устанавливать при различных заданиях на скорость полета. Так, при установленном техническими требованиями значении крейсерской скорости дирижабля  $v = 50$  м/с, что соответствует 180 км/ч, оптимальные обороты винта составляют 2500 об/мин. В этой точке тяговую характеристику винта пересекает характеристика дирижабля с профилем «парсеваль» и площадью сечения  $11,6 \text{ м}^2$ , которая представляет график зависимости лобового сопротивления аппарата от скорости полета. Следовательно, Д-В система дирижабля исследованного винта образует оптимальную пару. Примечательно, что такая Д-В система близка к оптимуму и на других оборотах с соответствующими скоростями.

**Выводы.** Для задачи исследования воздушно-винтового движителя компьютерное моделирование позволило оценить тяговые и мощностные характеристики выбранного винта, найти оптимальные режимы его работы и показать практическую независимость оптимального значения КПД от скорости движения.

#### Список литературы

1. Impact of the Feeder Aerodynamics Characteristics on the Power of Control Actions in Steady and Transient Regimes : SAE Technical Paper : 2012-01-2112 / Pshikhopov V. [et al.]. – 2012.
2. Stability Analysis of the MAAT Feeder Airship During Ascent and Descent with Wind Disturbances : SAE Technical Paper : 2013-01-2111 / Neydorf R. [et al.]. – 2013.

3. Aerodynamic Characteristics Study and Possible Improvements of MAAT Feeder Airships : SAE Technical Paper : 2013-01-2112 / Voloshin V. [et al.]. – 2013.

4. Нейдорф, Р. А. Специфика построения расчетной области при компьютерном моделировании взаимодействия вращающихся тел и воздушного потока / Р. А. Нейдорф, Ю. Л. Сигида // Сборник материалов Девятой Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и Четвертой молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах» / Координац. науч.-техн. центр систем упр. Южного Федер. округа при Южном федер. университете. – Таганрог, 2014. – С. 23 – 30.

5. GrabCAD [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://grabcad.com/home> (дата обращения: 10.09.2013).

6. Modeling Flows Using Sliding and Deforming Meshes [Электронный ресурс] / Fluent Inc. – Режим доступа : <http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug/node436.htm> (дата обращения: 11.08.2013).

7. Propeller for Airships [Электронный ресурс] // MT-Propeller. – Режим доступа : [http://www.mt-propeller.com/en/entw/pro\\_air.htm](http://www.mt-propeller.com/en/entw/pro_air.htm) (дата обращения: 8.08.2013).

---

## Computer Simulation of Airscrew in the Study of its Traction Power Capacity

R. A. Neudorf, Yu. L. Sigida

*Department “Software Computer Technology and Automated Systems”,  
Don State Technical University, Rostov-on-Don; yurius88@yandex.ru*

**Key words and phrases:** aerodynamic properties; airscrew; airship; computer simulation; mathematical model; stratosphere.

**Abstract:** The possibilities of simulation of airscrew propeller have been studied. The authors stated and solved the problem of studying traction and power capabilities of airscrew propeller of a typical airship configuration. The authors constructed a mathematical model relating the steady-state values of the shaft power and traction effort on the screw axis with a speed of rotation and the actual speed of the aircraft. The choice of the design scheme for computer simulation of aerodynamic and thermodynamic processes occurring during the rotation of the screw was justified. The authors described the experiment plan, permitting the variation of the basic parameters of the screw, movement and flight environment. The test results were reported.

### References

1. Pshikhopov V., Medvedev M., Neydorf R., Krukhmalev V. et al. *Impact of the Feeder Aerodynamics Characteristics on the Power of Control Actions in Steady and Transient Regimes*, SAE Technical Paper 2012-01-2112, 2012, doi: 10.4271/2012-01-2112.

2. Neydorf R., Sigida Y., Voloshin V., Chen Y. *Stability Analysis of the MAAT Feeder Airship During Ascent and Descent with Wind Disturbances*, SAE Technical Paper 2013-01-2111, 2013, doi:10.4271/2013-01-2111.

3. Voloshin V., Chen Y., Neydorf R., Boldyreva A. *Aerodynamic Characteristics Study and Possible Improvements of MAAT Feeder Airships*, SAE Technical Paper 2013-01-2112, 2013, doi:10.4271/2013-01-2112.

4. Neidorf R.A., Sigida Yu.L. *Sbornik materialov Devyatoi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya" i Chetvertoi molodezhnoi shkoly-seminara "Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh"* (Proceedings of the Ninth All-Russian scientific-practical conference "Advanced Systems and Control Problems" and the Fourth Youth School-Seminar "Management and information processing in technical systems"), Taganrog, 2014, pp. 23-30.

5. <https://grabcad.com/home> (дата обращения: 10.09.2013).

6. <http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug/node436.htm> (accessed 11.08.2013).

7. [http://www.mt-propeller.com/en/entw/pro\\_air.htm](http://www.mt-propeller.com/en/entw/pro_air.htm) (accessed 8.08.2013).

---

### **Computermodellierung der Luftschraube bei der Forschung ihrer Zugleistungscharakteristiken**

**Zusammenfassung:** Es werden die Möglichkeiten der Imitationmodellierung des Luftschraubefahrwerks betrachtet. Es ist die Aufgabe der Forschung der Zug- und Leistungsmöglichkeiten des Luftschraubefahrwerks der für die Luftschiffe typischen Konfiguration gestellt und entschieden. Die Forschung wird durch die Konstruktion des mathematischen Modells, das die bestimmten Bedeutungen der Macht auf der Welle und der Zugbemühungen auf der Achse der Schraube mit der Geschwindigkeit ihres Drehens und mit der tatsächlichen Geschwindigkeit der Bewegung des Luftfahrzeugs verbindet, durchgeführt. Es wird die Auswahl des auf die gelöste Aufgabe ausgerichteten Rechenschemas der Computermodellierung der luft- und thermodynamischen Prozesse rechtfertigt, die beim Drehen der Schraube verlaufen. Es wird der für die Aufgabe entwickelte Plan des Experimentes, der das Variieren der Hauptparameter der Arbeit der Schraube, der Bewegung und der Umgebung des Flugsvorsieht, beschrieben. Es werden die Ergebnisse der Prüfung gebracht.

---

### **Modélage informatique d'hélice d'avion lors de l'étude de ses caractéristiques de traction et de puissance**

**Résumé:** Sont examinées les possibilités du modélage d'imitation du propulseur d'hélice d'avion. Est mis et résolu le problème de l'étude des possibilités de traction et de puissance du propulseur d'hélice d'avion typique pour la configuration des dirigeables. L'étude est accompagnée de la construction du modèle mathématique. Est argumenté le choix du schéma du modélage informatique des processus aéro- et thermodynamiques. Est décrit le plan de l'expérience. Sont cités les résultats du contrôle.

---

**Авторы:** *Нейдорф Рудольф Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»; *Сигида Юрий Леонидович* – аспирант кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем», ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону.

**Рецензент:** *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».