



Получена на
02.08.2025г.

РЕЦЕНЗИЯ

**на дисертационния труд на
ас. маг. инж. Габриел Венелинов Георгиев**

на тема

**„Изследване характеристиките на въздушен винт при малки
числа на Рейнолдс в условия на екранен ефект“**

**Представен за придобиване на образователната
и научна степен ”доктор“**

Научна област: 5. Транспорт,

**Професионално направление: 5.5 Транспорт, корабоплаване и
авиация**

**по научна специалност: ”Навигация управление и експлоатация
на въздушния транспорт“**

**Рецензент: чл. кор. проф. д.т.н. Петър Стефанов Гецов,
Институт за космически изследвания и технологии,
Българска академия на науките**

1. Актуалност разработвания в дисертационния проблем

Все по - широкото използване на вертолети и безпилотни летателни апарати (БЛА) за граждански и военни цели пороци необходимостта от научно обоснована информация и допълнителни изследвания на аеродинамичните характеристики на прилаганите въздушни винтове в условия при излитане, кацане и полети от бордовете на самолетоносачи и ограничени площадки и в близост до препятствия, при които възниква екранен ефект.

При тези условия, при критично малки числа на Рейнолдс, провеждането на изчислителни операции е затруднено поради високата степен на неопределеност и поставят необходимостта от валидиране на числените резултати с експериментални. Успешното валидиране на изчислителен модел в такъв сложен комплекс от условия би позволило прякото му прилагане при създаването и анализа на системите за автоматично управление имащи основна цел осигуряване на управляващи команди с цел недопускане на нежелани разрушителни последствия.

Отчитайки казаното, изследваните проблеми и конкретните задачи разработени в дисертацията са изключително актуални и навременни.

2. Литературна осведоменост и компетентност на докторанта

Авторът е обработил значителна по обем литература, което е видно от представената библиографска справка. Цитирани са общо 112 литературни източници, като 110 са на латиница и 2 на кирилица.

На тази основа може да се каже, че това е достатъчна гаранция за осведомеността на докторанта и компетентността му по разглежданите в дисертационния труд въпроси. Докторантът притежава значителен информационен ресурс, което съдейства за творческата интерпретация на литературния материал и му е помогнало при провеждането на научните изследвания по дисертацията.

3. Съответствие на избраната методика на изследване с поставената цел и задачи на дисертационния труд

Избраната методика за комплексно изследване чрез експериментални и аналитични методи е изключително походяща за повишаване точността и истинността на изследваните процеси и явления и осъществяването на убедителна верификация на получаваните резултати и доказване на тяхната значимост и съответствие на поставените цели. Получени са три научно приложни и пет приложни приноси, което удовлетворява изискванията за дисертационен труд.

4. Кратка аналитична характеристика на естеството и оценка на достоверността на материала, върху който се градят приносите на дисертационния труд.

Дисертационният труд е в обем от 169 страници, като включва 5 раздела за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списъци на използваната литература и на публикациите по дисертацията както и приложения.

Дисертацията е структурирана много добре и е убедително обоснована целта на дисертационния труд и необходимите научно изследователски задачи.

Получените резултати чрез проведени експерименти на два стенда разработени в катедрата, където е реализирана експерименталната част на разработения от автора дисертационен труд, както и математическо моделиране на изследваните зависимости на аеродинамичните качества на винта са позволили да се осъществят достоверен и убедителен анализ и направят изводи, които обогатяват съществуващата теория в тази област с нови знания и нови факти.

Проведените експериментални изследвания включват две независещи една от друга методологии с цел определяне на аеродинамичните характеристики на двата изследвани винта в условия на екранен ефект.

При първата, основна методология е осъществен анализ на зависимостите на създаваната теглителна сила (T) и на съпротивителния

момент (Q) във функции от честотата на въртене (n), на ъгъла на поставяне на елементите на работните лопати (θ) и на относителното разстояние от равнината на въртене на винта до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$.

Разгледани са и безразмерните значения на съответстващите им коефициенти (C_T) и (C_Q) при определен комплекс от условия. В следствие от предоставения анализ на резултатите се наблюдава нарастване на създаваната от въздушния винт теглителна сила (T) с увеличаване на честотата на въртене (n) при всяко едно фиксирано относително разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ и при постоянен ъгъл на поставяне на елементите на работните лопати (θ). Намаляването на работното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ довежда до последващо нарастване в значенията на създаваната теглителна сила (T), при условие че честотата на въртене (n) и ъглите на поставяне на работните лопати (θ) се запазват постоянни. От предоставените зависимости относно значенията на съпротивителния въртящ момент (Q) на изследвания въздушен винт в условия на екранен ефект във функция на честотата на въртене (n) при вариация на ъглите на поставяне на елементите на работните лопати (θ) и на относителните разстояния от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ е отчетено нарастване на значенията на съпротивителния въртящ момент (Q) при нарастване на честотата на въртене (n) и при запазване постоянни останалите параметри. При всяка зададена постоянна честота на въртене на въздушния винт (n) намаляването на относително разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ довежда до намаление в значенията на съпротивителния момент (Q) при запазване постоянни останалите параметри, противоположно на резултатите за теглителната сила (T). В следствие от осъществения безразмерен анализ е направено заключението, че зоната в която екранът оказва влияние върху аеродинамичните характеристики на изследвания въздушен винт се намира на относително разстояние от равнината на въртене $\frac{H}{R} \approx 2$.

Втората (спомогателна) методология включва допълнителен анализ на аеродинамичните характеристики на въздушен винт в зоната на действие на явлението екранен ефект. Изследваните параметри са създаваната от въздушния винт теглителна сила (T), съпротивителната мощност (P) както и съответстващите им коефициенти (C_T) и (C_P) при комплекс от относителни разстояния от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{h}{R}\right)$ и при вариация на ъглите на наклон на равнината на въртене (δ). Зоната, в която се проявява явлението екранен ефект при

изследвания въздушен винт, покрива относително разстояние от равнината на въртене на винта и екранната повърхност $\frac{h}{R} \approx 1$. Увеличаването на честотата на въртене на въздушния винт (n) довежда до нарастване на значенията на създаваната теглителна сила (T) и на съпротивителната мощност (P) при всички относителни разстояния от равнината на въртене на винта до екранната повърхност $\left(\frac{h}{R}\right)$. При всяка постоянна честота на въртене (n) намаляване на разстоянието от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{h}{R}\right)$ предизвиква увеличение в значенията на теглителната сила (T) и довежда до редуциране на съпротивителната мощност (P). Установено е също така, че влиянието на екрана върху изходните характеристики на въздушния винт намалява при увеличаване на ъглите на наклон на равнината на въртене (δ).

Осъщественият математичен анализ цели числено доказателство на извършените преди това експериментални резултати относно характеристиките на изпитвания въздушен винт в условия на екранен ефект при прилагането на основната методология.

Приложението на хибридният елементно – импулсен модел с емпирични корекции относно коефициента на скоростта в равнината на въртене на винта (λ) предполага определяне значенията на относителните коефициенти на теглителна сила и мощност $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ и $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$, съответно. Изчислителната методологията включва оценяване на значенията на коефициентите при вариация на комплекс от параметри като ъгъла на поставяне на елементите на работните лопати (θ) и относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$. Намирането на сходимост относно стойностите на относителните коефициенти извън зоната на наличие на екранен ефект позволява емпирично коригиране на значенията на коефициента на относителна скорост в равнината на въртене (λ) и последващо оценяване стойностите на относителните коефициенти $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ и $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ в зоната на проявление на явлението екранен ефект. В резултат от осъществените изчисления са построени зависимостите на относителните коефициенти на теглителна сила $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ и съпротивителна мощност $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ във функция на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) при вариация на относително разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$. Изчислителните значения на изследваните относителни коефициенти на теглителна сила $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ при ъгли на поставяне на работните лопати $\theta > 9^\circ$ и при относителни разстояния от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\frac{H}{R} > 0.25$ попадат в

рамките на толеранс от 5% в сравнение с експериментално изведените значения. Различията в прогнозните стойности на относителните коефициенти на теглителна сила $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ в зоната на наличие на екранен ефект се проявяват поради неспособността на емпиричните модели да отчетат достатъчно достоверно влиянието на екранната повърхност върху относителния коефициент на скоростта в равнината на въртене на винта (λ). В допълнение, анализът включва и построяване на зависимостите на относителните коефициенти на теглителна сила $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ и съпротивителна мощност $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ от относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) както и на съотношението между относителните коефициенти на съпротивителна мощност $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ и теглителна сила $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ във функция на относителното разстояние от равнината на въртене на винта $\left(\frac{H}{R}\right)$ и на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ).

Признавам получените в работата приноси. Цялостната работа показва, че кандидатът притежава задълбочени теоретични знания по специалността и способност за самостоятелни научни изследвания.

5. Научни и научноприложни приноси

В дисертационния труд е внедрен метод за коригиране на коефициента на относителната скорост (λ) в равнината на въртене на въздушния винт за зоната на наличие на екранен ефект с основна задача изчисляване значенията на относителните коефициенти на теглителна сила и на съпротивителна мощност посредством прилагането на иновативен емпирично коригиран елементно-импулсен алгоритъм. Осъщественото охарактеризиране позволява цялостно определяне на аеродинамичните характеристики при отчитане на комплекс от параметри при екранен ефект.

6. Оценка на степента на личното участие на дисертанта в приносите

Отчитайки начина на излагане на материала в дисертационния труд и подхода при формулиране на проблемите свързани с темата и получените резултати, считам че проведените изследвания, написването на дисертационния труд и получените приноси в него са лично дело на докторанта.

Нямам сведения за използване или цитиране на данни от изследванията в дисертационния труд от други автори.

7. Преценка на публикациите по дисертацията и авторството

Основните резултати от дисертацията са отразени в 3 колективни и една самостоятелна публикации, които отразяват същността на направените изследвания и получените резултати описани в дисертационния труд.

8. Използване на резултатите от дисертационния труд в научната и социалната практика.

Получените експериментални и изведените числени резултати позволяват да бъде реализирана практическа оценка относно ефекта върху аеродинамичните характеристики на въздушен винт при режими на работа в зоната на наличие на екранен ефект. Оценката може да бъде пряко прилагана в анализа при подготовката за осъществяване на излитане и кацане, особено от площадки с ограничени размери като палуби на кораби и покриви на сгради, както и при осъществяване на маневри в близост до препятствия. От проектантска гледна точка получените резултати намират приложимост при създаването на алгоритмите за автоматично управление на етапите на излитане и кацане с оглед осигуряването на необходимата мощност с насока реализиране на устойчиви режими.

9. Оценка за автореферата

Авторефератът на дисертационния труд в обем на 32 страници, съдържащ 23 фигури и 5 таблици, е оформен съгласно изискванията и отразява поставената цел, решените задачи, постигнатите резултати и научно-приложни и приложни приноси. В него коректно и достоверно е отразено съдържанието на дисертационния труд, основните проблеми и начините за тяхното решаване.

10. Мнение, препоръки и бележки

Качеството на дисертационния труд отговаря на изискванията на ЗРАСРБ и Правилника за неговото прилагане. Дисертационният труд показва, че докторантът притежава задълбочени теоретични знания, качества и умения, както и професионални умения за провеждане на изследвания и преподаване по специалността „Навигация управление и експлоатация на въздушния транспорт“.

Препоръчвам на докторанта да продължи работата в това направление с цел комплексно решаване на въпросите по приложение и преподаване на изследваните проблеми.

11. Заключение

Имайки предвид обема и качеството на дисертационния труд, научно-приложните и приложни резултати и възможности на кандидата, давам своята положителна оценка и препоръчвам на научното жури да удостои ас. маг. инж. **Габриел Венелинов Георгиев** с образователната и научна степен

”доктор“ за разработения от него дисертационен труд на тема „Изследване характеристиките на въздушен винт при малки числа на Рейнолдс в условия на екранен ефект в Научна област: 5. Транспорт, Професионално направление: 5.5 Транспорт, корабоплаване и авиация по научна специалност: Навигация управление и експлоатация, на въздушния транспорт.

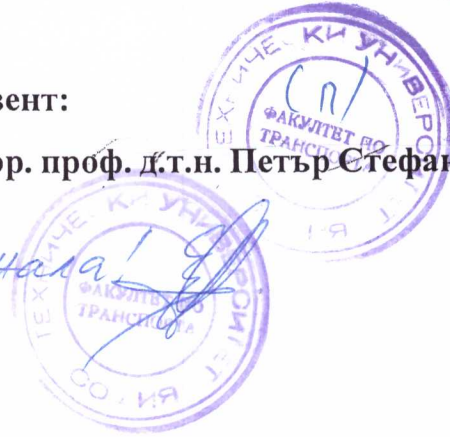
София

25.06.2025 г.

Рецензент:

(чл. кор. проф. д.т.н. Петър Стефанов Гецов)

Варто с оригинала!





REVIEW

of the dissertation

of Assistant M.Sc. Eng. Gabriel Venelinov Georgiev

on the topic:

**"Helicopter Rotor Aerodynamic Characteristics Estimation
in Ground Effect"**

**Submitted in fulfilment of the requirements for the
award of the educational and scientific degree "Doctor"**

Scientific Field: 5. Transport,

Professional Field: 5.5 Transport, Shipping and Aviation

**Professional Speciality: "Navigation, Management and Operation of
Air Transport"**

Reviewer:

**Corresponding Member Prof. D.Sc. Eng. Petar Stefanov Getsov,
Space Research and Technology Institute,
Bulgarian Academy of Sciences**

1. Relevance of the Dissertation Research Problem

The growing use of helicopters and unmanned aerial vehicles (UAVs) for both civilian and military applications has led to a demand for scientifically grounded information and further research into the aerodynamic characteristics of airscrews used during take-off, landing, and flight operations - particularly from aircraft carriers, confined platforms, and in proximity to obstacles, where ground effect occurs.

Under these conditions, at critically low Reynolds numbers, performing computational operations is challenging due to a high degree of uncertainty, which necessitates the validation of numerical results with experimental data. This highlights the necessity of validating numerical results through experimental data. Successfully validating a computational model under such a complex set of

conditions would enable its direct application in the design and analysis of automatic control systems, whose primary objective is to generate control commands that prevent undesirable and potentially destructive outcomes.

Taking into account what has been mentioned, the researched problems and the specific tasks developed in the dissertation are extremely actual.

2. Literature Awareness and Competence of the Doctoral Student

The author has reviewed a substantial amount of literature, as evidenced by the presented bibliography. A total of 112 sources have been cited, of which 110 are in Latin script and 2 in Cyrillic. Based on this, it can be concluded that the doctoral student demonstrates sufficient awareness and competence regarding the issues addressed in the dissertation. The candidate possesses a significant information base, which has contributed to the creative interpretation of the literature and has supported the conduct of the scientific research presented in the dissertation.

3. Appropriateness of the Chosen Research Methodology to the Aim and Objectives of the Dissertation

The chosen methodology, based on a comprehensive approach, combining experimental and analytical methods, is highly appropriate for increasing the accuracy and reliability of the studied processes and phenomena. It also enables a convincing verification of the obtained results and demonstrates their relevance and alignment with the stated research objectives. The dissertation presents three scientifically applicable and five practical contributions, which meet the formal requirements for a doctoral dissertation.

4. Brief Analytical Characterization of the Nature and Evaluation of the Reliability of the Material on Which the Dissertation's Contributions Are Based

The dissertation comprises 169 pages and includes five sections dedicated to solving the main research tasks, a list of the key contributions, references, a list of the candidate's publications related to the dissertation, and appendices.

The dissertation is very well structured, and the objective of the dissertation work as well as the necessary research tasks are convincingly justified.

The results obtained through experiments conducted on two test rigs developed within the department, where the experimental part of the author's dissertation work was carried out, as well as the mathematical modeling of the investigated dependencies of the aerodynamic characteristics of the rotor, have enabled a reliable and convincing analysis to be performed and conclusions to be drawn. These conclusions enrich the existing theory in this field with new knowledge and new facts.

The experimental research employed two independent methodologies to determine the aerodynamic characteristics of two tested airscrews under ground effect conditions.

The first (primary) methodology involved analysing the dependencies of thrust force (T) and torque (Q) as functions of rotational frequency (n), blade pitch angle (θ), and the relative distance from the rotor's rotational plane to the ground surface ($\frac{H}{R}$). Dimensionless coefficients (C_T) and (C_Q) corresponding to these parameters were also examined under a defined set of conditions.

The analysis revealed an increase in thrust (T), when increasing rotational frequency (n) at every fixed value of ($\frac{H}{R}$) and constant pitch angle (θ). A decrease in the operational distance ($\frac{H}{R}$) (with constant (n) and (θ)) led to further increases in thrust. In contrast, the torque (Q) values increased, when increasing (n), but

decreased when $\left(\frac{H}{R}\right)$ was reduced, with all other parameters constant - opposite to the trend observed in thrust.

From the dimensionless analysis, it was concluded that the ground effect significantly influences the aerodynamic characteristics of the rotor up to a relative distance of approximately $\frac{H}{R} \approx 2$.

The second (auxiliary) methodology provided a supplementary analysis of the airscrew's aerodynamic characteristics in the ground effect zone. Investigated parameters included thrust (T), power required (P), and their corresponding dimensionless coefficients (C_T) and (C_P), analyzed across different relative distances $\left(\frac{h}{R}\right)$ and angles of inclination of the rotational plane (δ).

It was determined that the ground effect becomes prominent at $\frac{h}{R} \approx 1$. An increase in rotational frequency (n) resulted in higher thrust and power values at all $\left(\frac{h}{R}\right)$ values. At a fixed rotational frequency, reducing $\left(\frac{h}{R}\right)$ led to increased thrust and reduced power. It was also observed that the influence of the ground effect diminished as the plane inclination angle (δ) increased.

The mathematical modelling aimed to numerically verify the experimental findings from the primary methodology. A hybrid blade element-momentum model with empirical corrections for the velocity coefficient in the rotor's rotational plane (λ) was applied. This allowed the determination of relative thrust and power coefficients $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ and $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$, based on variations in blade pitch angle (θ) and the relative distance $\left(\frac{H}{R}\right)$.

Outside the influence zone of ground effect, a convergence of calculated and experimental coefficient values was observed, allowing empirical correction of (λ). This facilitated accurate evaluation of $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ and $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ within the ground effect zone. For blade pitch angles $\theta > 9^\circ$ and $\frac{H}{R} > 0.25$, the predicted values of $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$

remained within a 5% tolerance when compared to experimental results. Discrepancies in $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ within extreme ground effect conditions were attributed to the empirical model's limitations in capturing the influence of the ground surface on the relative velocity coefficient (λ).

The analysis also included dependencies of $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ and $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ on $\left(\frac{H}{R}\right)$ under varying blade pitch angles (θ), as well as the ratio $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ to $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ as a function of both $\left(\frac{H}{R}\right)$ and (θ).

The contributions presented in the dissertation are recognized. The overall work demonstrates that the candidate possesses deep theoretical knowledge in the field and the ability to conduct independent scientific research.

5. Scientific and Applied Contributions

The dissertation introduces a method for correcting the relative velocity coefficient (λ) in the plane of rotation of a helicopter rotor within the ground effect zone. The primary objective is to calculate the relative coefficients of thrust and power required through the application of an innovative empirically corrected blade element - momentum algorithm. This characterization allows for a comprehensive determination of aerodynamic characteristics, while accounting for a complex set of parameters under ground effect conditions.

6. Assessment of the Degree of Personal Contribution by the Doctoral Student

Based on the presentation of the material, the approach to problem formulation, and the results obtained, I am convinced that the research conducted, the writing of the dissertation, and the contributions achieved are entirely the result of the doctoral candidate's individual effort.

I have no knowledge of any data from the dissertation research being used or cited by other authors.

7. Evaluation of Publications Related to the Dissertation and Authorship

The main results of the dissertation are included in three co-authored publications and one individual publication, which accurately represent the essence of the conducted research and the results described in the dissertation.

8. Application of the Dissertation Results in Scientific and Social Practice

The experimental and numerically derived results allow for a practical assessment of the influence of ground effect on the aerodynamic characteristics of an airscrew under relevant operating conditions. This assessment can be directly applied in pre-flight analysis and decision-making for take-off and landing operations particularly from restricted surfaces such as ship decks and building rooftops, as well as during manoeuvres near obstacles. From a design perspective, the findings are applicable to the development of control algorithms for the take-off and landing phases, aimed at ensuring the required power and achieving stable operating modes.

9. Evaluation of the Dissertation Abstract

The dissertation abstract, comprising 32 pages, 23 figures, and 5 tables, is formatted in accordance with the applicable requirements. It accurately represents the stated objective, the tasks addressed, the achieved results, and the scientific and practical contributions. The abstract faithfully and reliably represents the content of the dissertation, the main issues explored, and the approaches taken to resolve them.

10. Opinions, Recommendations, and Remarks

The quality of the dissertation meets the requirements of the Law on the Development of Academic Staff in the Republic of Bulgaria (LDASRB) and the associated regulations. The dissertation demonstrates that the doctoral student possesses in-depth theoretical knowledge, relevant qualities and skills, as well as professional competence for conducting research and teaching in the field of "Navigation, Management, and Operation of Air Transport".

I encourage the doctoral student to continue the research in this field with the aim of comprehensively addressing the practical application and academic dissemination of the studied problems.

11. Conclusion

Considering the length and quality of the dissertation, the scientific-applied and practical results achieved, as well as the capabilities of the candidate, I give my positive mark and recommend that the academic jury award Assistant M.Sc. Eng. **Gabriel Venelinov Georgiev** the educational and scientific degree "Doctor" for his dissertation entitled "Helicopter Rotor Aerodynamic Characteristics Estimation in Ground Effect" in the Scientific Field: 5. Transport, Professional Field: 5.5 Transport, Shipping and Aviation, Scientific Specialty: Navigation, Management and Operation of Air Transport.

Sofia

25.06.2025

Reviewer:

(Corresponding Member

Prof. D.Sc. Eng. Petar Stefanov Getsov)

Възро с опустошаване!

