



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ



**ФАКУЛТЕТ ПО ТРАНСПОРТА
КАТЕДРА "ВЪЗДУШЕН ТРАНСПОРТ"**

ас. маг. инж. Габриел Венелинов Георгиев

**ИЗСЛЕДВАНЕ ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ВЪЗДУШЕН
ВИНТ ПРИ МАЛКИ ЧИСЛА НА РЕЙНОЛДС В УСЛОВИЯ
НА ЕКРАНЕН ЕФЕКТ**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационния труд за придобиване на образователна научна степен
"ДОКТОР"

Научна област: 5. Транспорт

Професионално направление: 5.5 Транспорт, корабоплаване и авиация

Научна специалност: Навигация, управление и експлоатация на въздушния транспорт

София

2025

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Въздушен транспорт“ към Факултета по транспорт на ТУ-София на редовни заседания, проведени на 02.04.2025 г. и на 09.04.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 01.09.2025 г. от 13:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.5-13/02.05.2025 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р инж. Вълчо Николов Николов – председател
2. доц. д-р инж. Красин Красимиров Георгиев – научен секретар
3. чл. кор. проф. д-тн инж. Петър Стефанов Гецов
4. проф. д-р инж. Асен Ангелов Маринов
5. доц. д-р инж. Цветелина Владимирова Велкова

Рецензенти:

1. чл. кор. проф. д-тн инж. Петър Стефанов Гецов
2. проф. д-р инж. Асен Ангелов Маринов

Материалите по защитата са на разположение на интересующите се в канцеларията на Факултета по транспорта на ТУ-София, блок №9, кабинет № 9310.

Дисертантът е докторант на самостоятелна подготовка към катедра „Въздушен транспорт“ на Факултета по транспорт. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: ас. маг. инж. Габриел Венелинов Георгиев

Заглавие: Изследване характеристиките на въздушен винт при малки числа на Рейнолдс в условия на екранен ефект

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Настоящият дисертационен труд представя всеобхватно изследване на аеродинамичните характеристики на въздушни винтове при малки числа на Рейнолдс в условия на екранен ефект. Проведеното изследване включва следването на две независими една от друга методологии с основна цел осъществяване както на експериментално, така и на числено оценяване на характеристиките на въздушните винтове в условия на екранен ефект.

Актуалност на проблема

Нарастването на обема на техническата експлоатация на безпилотни летателни апарати (БЛА) породило необходимостта от научно обоснована информация относно аеродинамичните характеристики на прилаганите въздушни винтове в условия определящи етапите на излитане, кацане и при полети в близост до препятствия. Например, изпълнението на полети включващи излитане и кацане от бордовете на самолетоносачи изисква детайлен анализ основно поради малката разполагаема площ за излитане и кацане и поради сложните атмосферни условия.

От друга страна условията съответстващи на критично малки числа на Рейнолдс значително затрудняват провеждането на изчислителни операции 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 при анализа на системите за автоматично управление имащи основна цел осигуряване на управляващи команди.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

На базата на направения литературен обзор са дефинирани следните основни цели на дисертационния труд:

1. Експериментално определяне аеродинамичните характеристики на въздушен винт в условия на екранен ефект при вариация на комплекс от параметри като ъглите на поставяне на лопатите (θ) и разстоянието до екранната повърхност (H).
2. Избор на изчислителен модел и неговото доработване с цел определяне на аеродинамичните характеристики на въздушния винт в условия на екранен ефект.
3. Успешно валидиране на изчислителен модел на основание на изведените експериментални резултати относно характеристиките на въздушния винт в условия на екранен ефект.
4. Развитие на съществуващите изчислителни модели до ниво позволяващо достоверно определяне на характеристиките на въздушни винтове при различни оперативни параметри.

Основните задачи, които дисертационният труд поставя могат да бъдат обобщени в следната последователност:

1. Модифициране на стенд до ниво, което позволява определяне на аеродинамичните характеристики на въздушен винт в условия на екранен ефект.
2. Извършване на експериментално определяне на характеристиките на въздушен винт в условия на екранен ефект.

3. Прилагане на подходящ математичен модел с цел числено определяне характеристики на въздушен винт в условия на екранен ефект.
4. Доразвиване на изведените числени модели, които описват явлението екранен ефект и/или прилагането на вече изведените уравнения от изчислителната механика на флуидите с цел успешно валидиране на математичен модел, способен оптимално да определя характеристиките на въздушен винт в условия на екранен ефект при малки числа на Рейнолдс.

Научна новост

Научната новост в изготвения дисертационен труд включва внедряването на 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 ($\frac{C_T}{\sigma}$) и на съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$) при наличие на екранен ефект 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.

Практическа приложимост

Получените експериментални резултати, заедно с изведените числени, 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.

Апробация

Резултатите от изготвения дисертационен труд са обособени в рамките на статии и са представени по време на проведени открити лекции, научни конференции и в научни списания. Също така осъществена е апробация на резултатите и пред катедрения съвет на катедра "Въздушен транспорт" на различни етапи от провеждането на докторантурата.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 4 броя научни публикации, от които една самостоятелна, а останалите три в съавторство. Списъкът на реализираните научни публикации е представен в крайната част на автореферата.

Структура и обем 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. Цитирани са общо 112 литературни източници, като 110 са на латиница и 2 на кирилица. Работата включва общо 57 фигури и 17 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

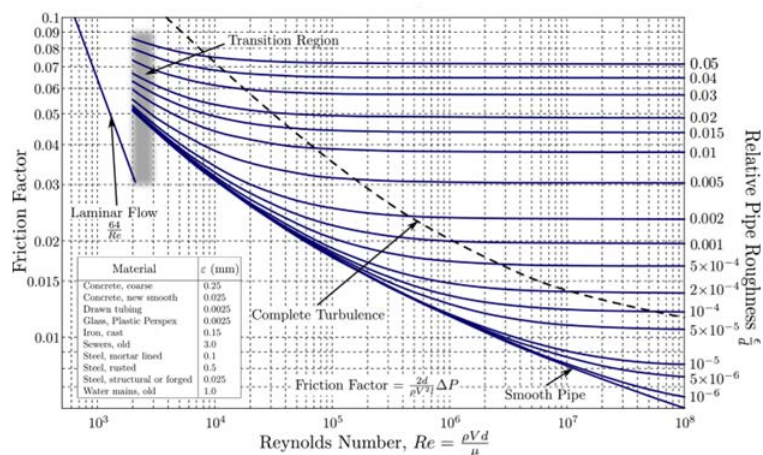
РАЗДЕЛ 1. НАСТОЯЩИ РАЗРАБОТКИ СВЪРЗАНИ С ЯВЛЕНИЕТО ЕКРАНЕН ЕФЕКТ НА ВЪЗДУШНИ ВИНТОВЕ

1.1 Въведение в проблема

Провеждането на научни изследвания относно явлението екранен ефект на въздушни винтове цели охарактеризиране влиянието на екранна повърхност върху работата им в близост до препятствия. Анализът на ефекта върху характеристиките на летателния апарат заема съществено значение, основно при определяне характеристиките на устойчивост и управляемост по време на етапа на кацане, както и към предявяване на основните изисквания към системата за автоматично управление в етапите на кацане и излитане с цел недопускане на нежелани разрушителни последствия. Изучаването на явлението екранен ефект на въздушни винтове датира от ускореното им приложение през първата половина на 20 – ти век.

В началото на 21 – ви век, с нарастване техническата експлоатация на безпилотни летателни апарати (БЛА), анализът на явлението отново породил интерес, особено при изучаването на поведението им при условия съществено различаващи се от условията в ниските слоеве на земната атмосфера. Особеност при работата на подобен тип въздушни винтове, прилагани при безпилотни летателни апарати, представляват работните условия при числа на Рейнолдс $Re < 10^6$, които се характеризират със значителен превес на вискозните сили над създаваните инерционни, в следствие на което степента на неопределеност остава значително голяма за да се потвърди достоверността на наличните изчислителни модели без да бъде приложено задълбочено експериментално изследване.

За онагледяване въздействието на нарастващото влияние на силите от триене за практически цели се използва експериментално изведена диаграма [6], която представя комплексна зависимост на коефициента на триене от числото на Рейнолдс при различна грапавост на повърхността на изследвания обект. От диаграмата на Фиг.1-1 се вижда явното нарастване в стойностите на коефициента на триене дори и при повърхности имащи малка стойност на коефициента на грапавост, каквито са полимерните. При полимерна повърхност, притежаваща малака грапавост, при вариация на числото на Рейнолдс с един порядък от 10^5 до 10^4 , коефициентът на триене нараства приблизително с 30 %.



Фиг.1-1: Зависимост на коефициента на триене от числото на Рейнолдс при различна относителна грапавост на повърхнината [6].

1.2 Проведени изследвания относно явлението екранен ефект на въздушни винтове

Проведените изследванията, свързани с явлението екранен ефект на въздушни винтове, включват комплекс от взаимосвързани задачи по експериментално и числено разглеждане на поведението им при вариация на комплекс от експлоатационни параметри. Влиянието на експлоатационните параметри върху изходните коефициенти на теглителна сила (C_T), съпротивителен въртящ момент (C_Q) и съпротивителна мощност (C_P) на изследваните въздушни винтове е отъждествено в множество научни трудове.

Гилад, Чопра и Ранд представят начин за числено валидиране на експериментални резултати относно характеристиките на въздушен винт в режим на висене, получени посредством моделиране на потока, прилагане на елементно-импулсен модел и модел на крайните елементи обединени заедно. Резултатите са онагледени във формата на зависимости на коефициентите на теглителна сила (C_T) и съпротивителна мощност (C_P) при различни честоти на въртене (n) [33]. Способ, основан на вихров модел на потока имащ за цел валидиране на експериментални резултати относно работата на въздушен винт в околни условия, съответстващи на условията на Марс, е представен от Конинг и Джонсън [56]. Условията на Марс водят до намаляване на производителността на въздушните винтове и витла, работещи при малки числа на Рейнолдс. Резултатите са представени в графичен вид под формата на зависимости между коефициентите на мощност (C_P) и теглителна сила (C_T) както и във формата на фигури на мерит (показател за ефективността). Бохоркес, Самуел и колектив предлагат анализиране аеродинамичните характеристики на микро безпилотни летателни апарати чрез прилагане на елементно – импулсен алгоритъм [11]. Сравнителен анализ с експериментални резултати е онагледен под формата на зависимости между коефициентите на съпротивителна мощност (C_P) и на теглителната сила (C_T). В допълнение, установено е нарастване от 15% на загубите поради профилно съпротивление [11]. Сдвоен модел с изследване аероеластичността на лопатите на въздушен винт в режим на висене е представен от Тодоров и колектив [103]. Определянето на аеродинамичните сили се осъществява посредством елементно –

импулсен алгоритъм, докато анализирането на аероеластичността изисква прилагане на крайно-елементен модел [103]. Представеният модел онагледява разпределението на подемната сила (L) и силата на челно съпротивление (D) по дължината на лопатите (r). Тодоров и Ротару предполагат нарастване на ефективността на хеликоптерен въздушен винт, работещ в условия на екранен ефект, поради увеличение на аеродинамичното качество (L / D_d) [85]. Представено е изследване, проведено от Нйт и Хефнер, целящо да определи влиянието на екранната повърхност върху теглителната сила (T) и съпротивителната мощност (P) на въздушен винт работещ в условия на екранен ефект [55]. В предоставения анализ се наблюдава нарастване в стойностите на теглителната сила (T), когато винтът работи на разстояния до екрана по-малки от един диаметър (D) [55]. В допълнение, резултатите показват, че стойностите на съпротивителния въртящ момент (Q) се запазват относително постоянни с изключение при работа на винта на много малки разстояния до повърхността на екрана [55]. Изчисление на индуцираната съпротивителна мощност (P), когато хеликоптерен въздушен винт работи в близост до екранна повърхност е онагледено посредством математичен модел от Лайтхил [63]. В резултат на изследването се наблюдава намаление в стойностите на индуктивната мощност, когато винтът работи на близки разстояния до екранната повърхност [63]. Браун и Уайтхаус представят изчислителен модел с цел изследване на структурата на вихрите в струята на въздушен винт на хеликоптер [13]. Изчислителният модел показва, че потокът в струята на винта преминава през различни състояния при увеличаване на постъпателната скорост и потвърждава сходството с експериментални резултати [13]. Изследване на аеродинамичните характеристики на хеликоптерен винт е извършено посредством метода на крайните обеми [95]. Изследването е осъществено при две различни разстояния до екранната повърхност (H) и при вариация на колективната стъпка на въздушния винт, при число на Мах в крайните сечения на винта $M = 0.585$ [95]. Разглежданията са извършени при работа на въздушния винт в зоната на екранен ефект както и извън нея. Направено е сравнение с експериментални данни относно разпределението на налягането, на теглителната сила (T) както и на съпротивителния въртящ момент (Q) [95].

Струята на хеликоптерен въздушен винт е изследвана чрез вихров метод от Лейшман и колектив [61]. Представени са приложените уравнения, способите за решаването им като е разгледана и важността на сходимостта при намирането на решение [61]. Дискутирана е необходимостта от коригиране на граничните условия като са представени и алгоритми с използване на интерполации, целящи улесняване намирането на решения [61]. С цел изясняване влиянието на екранната повърхност върху аеродинамичните характеристики на въздушен винт в режим на висене чрез прилагане на комбинация от вихров и панелен метод Итога и колектив извършват изследване с отчитане на маховите движения на лопатите [47]. Екранната повърхност е представена като съставена от квадратни панели с неизвестни интензивности на вихровите шнулове. Лопатите на въздушния винт са моделирани като носещи линии. Получените числени резултати показват влиянието на наклонена и права екранна повърхност върху аеродинамичните характеристики на въздушния винт в режим на висене, влиянието на височината, на която работи въздушният винт от екранната повърхност върху геометрията на струята, а също така отчитат и въртящия момент [47]. В допълнение е разгледано и влиянието на екрана върху амплитудата и фазата на маховите движения на лопатите и са онагледени техните зависимости [47]. Влиянието на препятствие върху струята на въздушен винт в режим

на висене чрез панелен метод е представено от Шмид като е направено сравнение с експериментални резултати [90]. Постигнато е сходство с експерименталните резултати, като изключение прави случаят, при който има наличие на вятър, където се забелязва значителното влияние на вискозните сили. В резултат на което прогнозните стойности, получени чрез панелния метод, се различават от експерименталните значително [90]. Числено изследване посредством CFD метод относно характеристиките на хеликоптер при полет на малки височини и при малки коефициенти на скоростта е представено от Кавало и колектив [17]. Охарактеризирани са струите като вид и топология и е установено, че разпадът в структурата им е значителен при по-големи коефициенти на скоростта, в сравнение с предсказаното от теоретичния анализ [17]. Аеродинамичен модел за определяне характеристиките на въздушен винт в режим на висене е представен от Грабър и Росен [35]. Моделът е валидиран на основание на съществуващи експериментални резултати като показва сходство при резултатите за теглителна сила (T) и различия в получените резултати за съпротивителния въртящ момент (Q) [35]. Аеродинамичната интерференция между два винта, които работят в условия на екранен ефект, е изследвана от Декар и Рагни [22]. Винтовете изпълняват полет в режим на висене като двата се въртят в противоположни посоки и е използван метод за триизмерна широкомащабна скоростометрия. Онагледана е интерференцията между двата винта, работещи в условия на екранен ефект като са представени картините на разпределение на скоростите по дължините на работната лопата. Увеличаването на разстоянието между двата винта повече от един радиус довежда до поява на явлението фонтанен ефект, което предизвиква движение на въздушна струя между двата винта в посока нагоре [22]. Лаксминараян, Калра и Бийдър представят изчислителен модел за определяне характеристиките на въздушен винт в условия на екранен ефект. Моделът е валидиран посредством експериментални данни и показва сходство между стойностите на генерираните теглителна сила (T) и съпротивителната мощност (P) [59]. Използван е PIV метод и са онагледени нестабилности във вихрите в крайните сечения на работната лопата в зоната на екранния ефект. Анализът показва завихряния при работа на въздушния винт в близост до екранната повърхност [59].

РАЗДЕЛ 2. АНАЛИЗ НА ОСНОВНИТЕ ТЕОРЕТИЧНИ МОДЕЛИ ЗА ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ АЕРОДИНАМИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВЪЗДУШНИ ВИНТОВЕ В УСЛОВИЯ НА ЕКРАНЕН ЕФЕКТ

Численото определянето на аеродинамичните характеристики на въздушен винт в условия на екранен ефект предполага цялостно първоначално оценяване на натоварването на работните лопати и стойностите на създаваната от винта теглителната сила (T) и на съпротивителната механична мощност (P) в зоната извън действие на екранен ефект и последващото им оценяване в зоната на наличие на екранен ефект.

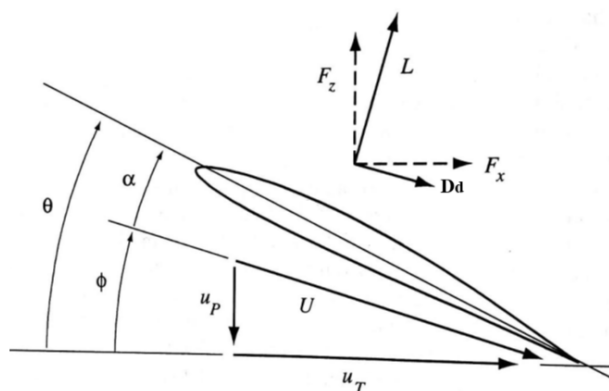
Изборът на изчислителен метод зависи от комплекс от обстоятелства. Основното обстоятелство е свързано с условията на изчислителната постановка и по-детайлно с оценката на физичните процеси при условията на провеждане на симулациите и тяхното влияние върху изходните резултати. Друго обстоятелство, което оказва влияние върху изходните резултати, е необходимият времеви диапазон за провеждане на изчисленията.

Балансът между времеви диапазон за провеждане на изчисленията и точност на резултатите е съществен за избора на един модел за конкретна изчислителна постановка. Последователно са изложени и анализирани основните аеродинамични модели за изследване характеристиките на въздушен винт работещ в условия на екранен ефект.

2.4 Теория на елементите на работната лопата

Начални сведения за изграждане на теорията на елементите на работната лопата се срещат в записките на Уилям Фруд от 1878 година като първоначалното дефиниране на теорията е направено от Стефан Дрзевиевски между 1892 г. – 1920 г. и от Глауерт през 1935 г [49].

Ботхезат реализира идеята на Стефан Дрзевиевски за използване на предварително експериментално определени аеродинамични характеристики на профилите. Колинс използва емпирични коефициенти както и експериментално определяне характеристиките на лопати с големи удължения [49].



Фиг.2-7: Аеродинамика на профила на работна лопата [49].

При известен ъгъл на поставяне на лопатите (θ) и входящ ъгъл на потока (ϕ), за аеродинамичния ъгъл на атака може да бъде записана следната зависимост (2.27):

$$\alpha = \theta - \phi = \theta - \frac{u_P}{u_T}, \quad (2.27)$$

Където u_T : тангенциална компонента на вектора на скоростта, u_P : нормална компонента на вектора на скоростта.

В следствие на което, могат да бъдат получени зависимостите за подемната сила (dL) (2.28) и за силата на челно съпротивление (dD_d) (2.29), създавани от всеки един от елементите на работната лопата:

$$dL = \frac{1}{2} \rho U^2 c C_L dy, \quad (2.28)$$

$$dD_d = \frac{1}{2} \rho U^2 c C_D dy, \quad (2.29)$$

Където ρ е означена плътността на въздуха, C_L и C_D са коефициентите на подемна сила и на челно съпротивление, c – хордата на съответния елемент от работната лопата, U – пълната скорост, dy – дължината на всеки елемент.

Като резултат могат да бъдат изведени следните уравнения за стойностите на теглителната сила (dT), съпротивителния момент (dQ) и на съпротивителната механична мощност (dP) от всеки един от работните елементи на лопатите (2.32), (2.33) и (2.34) [62]:

$$dT = N(dL \cos(\varphi) - dD_d \sin(\varphi)), \quad (2.32)$$

$$dQ = N(dL \sin(\varphi) + dD_d \cos(\varphi))y, \quad (2.33)$$

$$dP = N(dL \sin(\varphi) + dD_d \cos(\varphi))\Omega y, \quad (2.34)$$

Където N представлява броят работни лопати, y - координатата на всеки един от елементите, φ – индуцираният ъгъл на потока.

Съпротивителният въртящ момент (dQ) от всеки елемент от работната лопата може да бъде изведен посредством зависимост (2.42):

$$dQ \cong N(dL\phi + dD_d)y. \quad (2.42)$$

Създаваният коефициент на подемна сила (dC_T) при въртене на елементите на работната лопата е (2.43) [108]:

$$dC_T = \frac{\sigma a}{2}(\theta u_T^2 - u_T u_P)dr = \frac{\sigma a}{2}(\theta r^2 - \lambda r)dr, \quad (2.43)$$

Където,

$\sigma = (Nc)/(\pi R)$: коефициент на запълване на диска, a : аеродинамична производна на коефициента на подемна сила по ъгъла на атака, $\lambda = (V + u)/(\Omega R)$: коефициент на относителна скорост, r : радиус на всеки един от елементите.

От друга страна в режим на висене съществува равенство между съпротивителната мощност и съпротивителният въртящ момент и техните коефициенти могат да се представят чрез (2.44) и (2.45):

$$\begin{aligned} dC_P = dC_Q &= \left[\frac{\sigma a}{2}(\theta u_T u_P - u_P^2) + \frac{\sigma C_d}{2} u_T^2 \right] r dr = \\ &= \left[\frac{\sigma a}{2}(\theta r \lambda - \lambda^2) + \frac{\sigma C_d}{2} r^2 \right] r dr, \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$dC_P = dC_Q = \left[\frac{\sigma a}{2}(\theta u_T^2 - u_T u_P) \right] r dr = \frac{\sigma a}{2}(\theta r^2 - \lambda r) r dr. \quad (2.45)$$

След изясняване на коефициентите на теглителна сила (dC_T) и на съпротивителна мощност (dC_P), създавани от всеки един от елементите, следва да бъдат определени коефициентите на теглителна сила (C_T) и на съпротивителна мощност (C_P), които създава цялата работна лопата (2.46), (2.53).

$$C_T = \int_0^1 \frac{\sigma a}{2}(\theta r^2 - \lambda r) dr \quad (2.46)$$

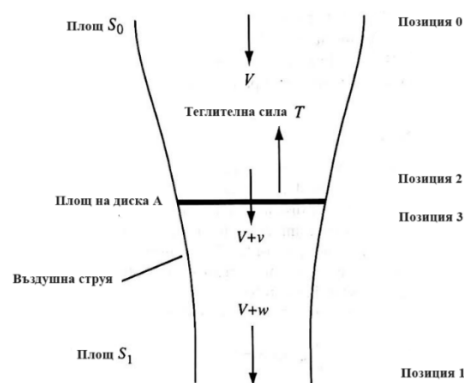
Коефициентът на мощността (C_P) се представя като двукомпонентна зависимост включващ профилна компонента (C_{P0}) и индуктивна компонента (C_{Pi}), респективно това са зависимости (2.52) и (2.53).

$$dC_P = \left[\lambda \frac{\sigma_a}{2} (\theta r^2 - \lambda r) + \frac{\sigma_{C_d}}{2} r^3 \right] dr = \lambda dC_T + \frac{\sigma_{C_d}}{2} r^3 dr \quad (2.52)$$

$$C_P = \int \lambda dC_T + \int_0^1 \frac{\sigma}{2} r^2 c_d dr \quad (2.53)$$

2.5 Импулсна теория

Импулсната теория е създадена от Уилиям Ранкин през 1865 г. с цел анализ на теглителната сила (T) и на съпротивителната мощност (P) от корабни витла. Развита е от Уилиям Фруд през 1885 г., от Глауерт през 1920 г. и от Бетс през 1935 г. Резултатите от импулсната теория осигуряват определяне на теглителната сила и на индуцираната мощност. Основата на импулсната теория представляват все още валидните според общите представи закони за запазване на масовия разход, на силата, на импулса и на силата на флуида преминаващ през въздушния винт [49].



Фиг.2-8: Основен модел на потока [49].

Генерираната теглителна сила (T) може да бъде представена като разликата в наляганията между двете равнини на диска посредством зависимост (2.65).

$$T/A = p_3 - p_2 = \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (2.65)$$

На следващо място е необходимо да бъде направен анализ за определяне на съпротивителната мощност за въртене на основание закона за запазване на енергията (2.66).

$$T v = \frac{1}{2} \dot{m} w, \quad (2.66)$$

Където,

$\dot{m}$: масов разход на въздух в равнината на диска;

w : индуцирана скорост.

С изясняване значението на индуцираната скорост (w) и теглителната сила (T) може да бъде определена и стойността на индуцираната мощност необходима за въртене на

въздушния винт (2.68) както и мощността необходима за създаване на единица теглителна сила (2.69).

$$v = \sqrt{T/(2\rho A)} \quad (2.67)$$

$$P = Tv = T\sqrt{T/(2\rho A)} \quad (2.68)$$

$$P/T = v = \sqrt{T/(2\rho A)} \quad (2.69)$$

2.6 Комбиниран елементно-импулсен модел

За определяне характеристиките на въздушния винт в настоящата тестова ситуация е необходимо комбиниране на изложената теория на елементите на работната лопата и импулсната теория в единна теория за да бъдат с цел оценка на характеристиките на въздушния винт в изложените условия.

Изясняването на разпределението на коефициента на относителна скорост по дължината на лопатата (λ) е от съществено значение при определянето на дискретните стойности на коефициента на теглителна сила по дължината на лопатата (dC_T), а оттам и при определянето на генерираната теглителна сила от въздушния винт (T) и съпротивителната мощност (P).

$$dC_T = \frac{\sigma a}{2} \left(\theta - \frac{\lambda}{r} \right) r^2 dr \quad (2.79)$$

$$dC_T = 4\lambda\lambda_i r dr \quad (2.80)$$

$$\lambda = \lambda_c + \lambda_i \quad (2.81)$$

$$\lambda_c = \frac{v}{\Omega R} \quad (2.82)$$

$$\lambda_i = \frac{v}{\Omega R}, \quad (2.83)$$

Където Ω : ъглова честота на въртене на винта, λ_c : коефициент на относителна скорост в режим на висене, λ_i : индуктивен коефициент на относителна скорост.

$$\lambda^2 + \left(\frac{\sigma a}{8} - \lambda_c \right) \lambda - \frac{\sigma a}{8} \theta r = 0 \quad (2.84)$$

$$\lambda_c = 0 \Rightarrow \lambda = \frac{\sigma a}{16} \left[\sqrt{1 + \frac{32}{\sigma a} \theta r} - 1 \right] [49] \quad (2.85)$$

Определянето на коефициента на относителна скорост в равнината на въртене на въздушния винт (λ) позволява да бъдат изчислени стойностите на коефициентите на теглителна сила (C_T) и на съпротивителна мощност (C_P), представени чрез зависимости (2.86) и (2.87).

$$C_T = \int_0^1 \frac{\sigma}{2} r^2 C_L dr \quad (2.86)$$

$$C_P = \int \lambda dC_T + \int_0^2 \frac{\sigma}{2} r^3 C_D dr \quad (2.87)$$

2.7 Емпирични модели отчитащи влиянието на екрана върху характеристиките на винта в условия на екранен ефект

Взимайки предвид анализа направен от множество изследователи могат да бъдат изложени серия от модели, които отчитат влиянието на екранната повърхност върху работата на въздушния винт. Тук от съществено значение е определяне връзката между коефициента на относителната скорост на въздушния винт в условия на екранен ефект и извън зоната на екранния ефект определена чрез зависимост (2.94) [48]. Разгледаните модели са онагледен чрез зависимости (2.95), (2.96), (2.97), (2.98), (2.99) и (2.100).

$$(\lambda_i)_{IGE} = f_g(\lambda_i)_{OGE} \quad (2.94)$$

- o Чесман и Бенет (основен)

$$f_{gCB} = \left[1 - \frac{1}{(4z_g/R)^2} \right]^{3/2} \quad (2.95)$$

- o Чесман и Бенет (теория на елементите на работната лопата)

$$f_{gCB BE} = \left[1 + 1.5 \frac{\sigma a \lambda_i}{4C_T} \frac{1}{\left(4 \frac{z_g}{R}\right)^2} \right]^{-3/2} \quad (2.96)$$

- o Лол $f_{gLow} = \left[\frac{1.0991 - 0.1042/(z_g/D)}{1 + (C_T/\sigma)(0.2894 - 0.3913/(z_g/D))} \right]^{-3/2} \quad (2.97)$

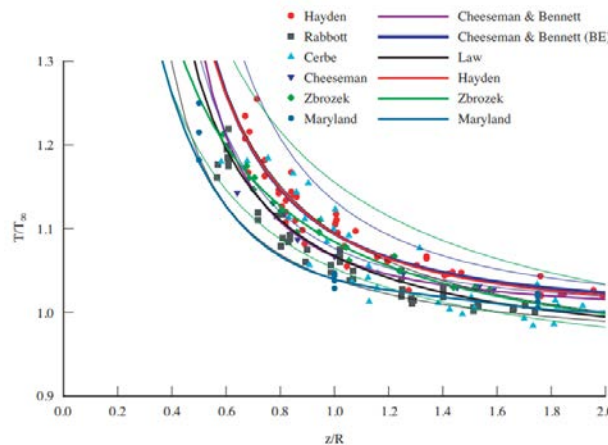
- o Хайден $f_{gHayden} = \left[0.9926 + \frac{0.03794}{(z_g/2R)^2} \right]^{-1} \quad (2.98)$

- o Зброзек $f_{gZbrozek} = \left[0.9122 + \frac{0.0544}{(z_g/R)\sqrt{C_T/\sigma}} \right]^{-3/2} \quad (2.99)$

- o Университета в Мериленд

$$f_{gUMD} = 0.146 + 2.090 \left(\frac{z_g}{R} \right) - 2.068 \left(\frac{z_g}{R} \right)^2 + 0.932 \left(\frac{z_g}{R} \right)^3 - 1.157 \left(\frac{z_g}{R} \right)^4 \quad (2.100)$$

Информация относно резултатите, получени при пряко прилагане на отделните модели по данни от НАСА, е показана на Фиг 2-9 [48].



Фиг 2-9: Зависимост на относителната теглителна сила на въздушния винт в условия на екранен ефект и извън зоната на действие на ефекта $\left(\frac{T}{T_\infty} \right)$ от относителното разстояние от равнината на въртене на винта до екранната повърхност $\left(\frac{z}{R} \right)$ [48].

РАЗДЕЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ЯВЛЕНИЕТО ЕКРАНЕН ЕФЕКТ НА ВЪЗДУШНИ ВИНТОВЕ

Експерименталните изследвания относно явлението екранен ефект целят определяне влиянието на екранната повърхност върху характеристиките на въздушен винт при вариация на комплекс от параметри, в това число честотата на въртене на вала (n), ъглите на поставяне на елементите на работните лопати (θ), ъглите на наклон на равнината на въртене (δ) и разстоянието от равнината на въртене на винта до екранната повърхност ($\frac{h}{R}$). Настоящите експерименталните изследвания са проведени при прилагане на две независими методологии изследващи два отделни въздушни винта.

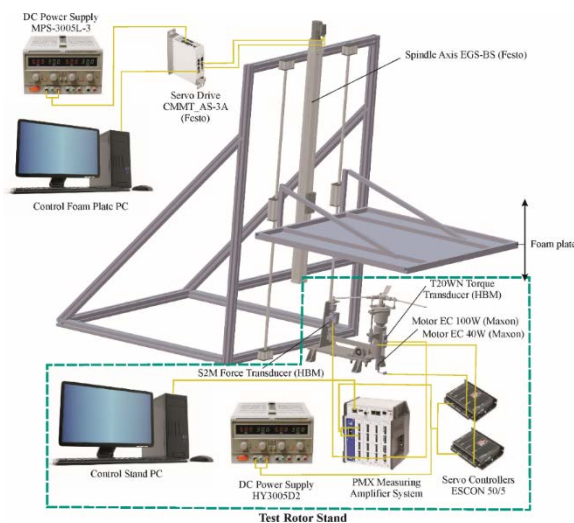
Първата, основна, методологическа постановка включва изследване характеристиките на въздушен винт в условия на екранен ефект в режим на висене. Главната задача е оценяване изменението на създаваната от винта теглителна сила (T), на съпротивителния въртящ момент (Q) и на съответстващите им коефициенти (C_T) и (C_Q) в зоната на наличие на екранен ефект. Осъществяването на втората експериментална постановка, включва изследване характеристиките на въздушен винт в условия на екранен ефект при вариация на честотата на въртене на въздушния винт (n), разстоянието от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{h}{R}$) и ъглите на наклона на равната на въртене (δ).

3.1 Експериментална установка за прилагане на основната методология

Приложената експерименталната установка, която се използва при провеждане на изследванията, може да бъде подразделена на две подгрупи:

- Измервателна установка за определяне силите и моментите на изследвания въздушен винт;
- Експериментална установка за пресъздаване ефекта от близостта на изследвания въздушен винт с екранната повърхност;

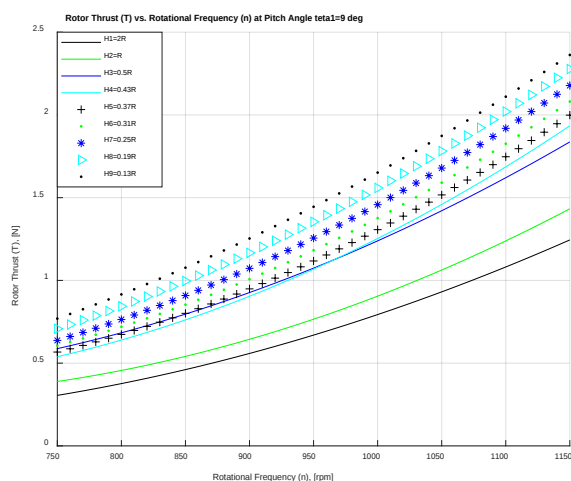
Общият вид на приложената основна експериментална установка е онагледен на Фиг.3-1.



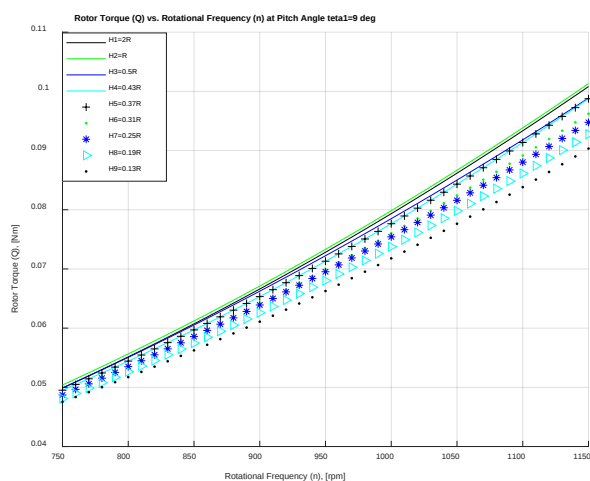
Фиг.3-1: Основна експериментална установка.

3.3 Получени експериментални резултати при прилагане на основната методология

На базата на проведените експериментални измервания са онагледени зависимостите относно генерираните теглителни сили (T_i) от честотата на въртене (n) при различни ъгли на поставяне на работните лопати (θ_i), варирайки разстоянието от равнината на въртене на винта до равнината на плоскостта (H_i), от една страна, както и зависимостите относно съпротивителните моменти (Q_i) спрямо разстоянието от равнината на въртене на винта до равнината на плоскостта (H_i). На първо място са представени гореспоменатите зависимости при най-малкия ъгъл на поставяне на лопатите $\theta_1 = 9^\circ$. На Фиг.3-4 са показани зависимостите на създаваните от въздушния винт теглителни сили (T), варирайки честотата на въртене (n) от $750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ до $1150 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. Изобразените зависимости ясно онагледяват наличието на явлениято екранен ефект като резултатът от него се проявява като увеличение в стойностите на измерените теглителни сили (T) при приближаване на екранната плоскост към равнината на въртене на въздушния винт.



Фиг.3-4: Зависимости на създаваната теглителна сила (T) при вариация на честотата на въртене (n) от $750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ до $1150 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ и на разстоянието от препятствието до равнината на въртене (H) на трилопатен въздушен винт Goe417 при ъгъл на поставяне на лопатите $\theta_1 = 9^\circ$.

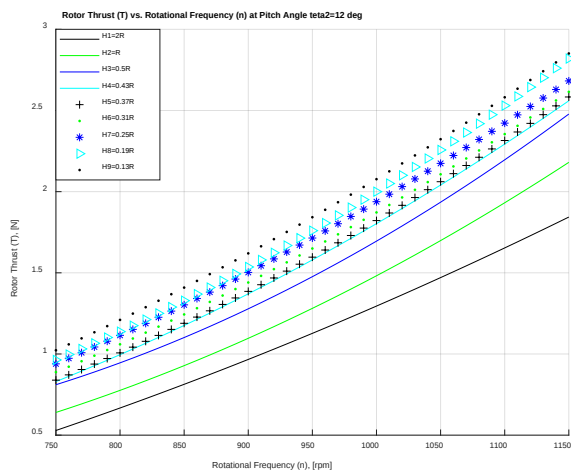


Фиг.3-5: Зависимости на съпротивителния момент (Q) при вариация на честотата на въртене (n) от $750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ до $1150 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ и на разстоянието от екранната повърхност до равнината на въртене (H) на трилопатен въздушен винт Goe417 при ъгъл на поставяне на лопатите $\theta_1 = 9^\circ$.

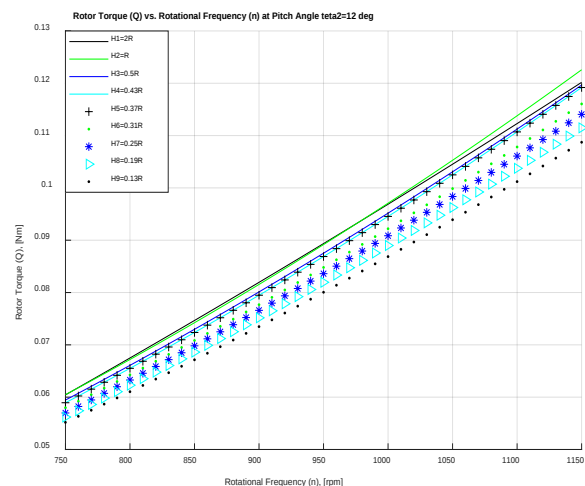
На второ място, на Фиг. 3-5, е представена зависимостта на съпротивителния момент (Q) от въздушния винт при вариация на честотата на въртене от $750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ до $1150 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ и при ъгъл на поставяне на лопатите θ съответстващ на 9° . Противоположно на значенията на теглителната сила (T), при работа на въздушния винт на близки разстояния до екрана съпротивителният въртящ момент намалява в сравнение със стойностите му, когато винтът оперира на по-големи разстояния до екранната повърхност. Тенденцията в

нарастването на значенията на въртящия момент (Q) с нарастването на честотата на въртене (n) запазва вида си - крива от втора степен. С нарастване ъглите на поставяне на елементите на работните лопати (θ) на въздушния винт от $\theta_1 = 9^\circ$ до $\theta_2 = 12^\circ$ се наблюдава и увеличение в значението на създаваната теглителна сила (T) в сравнение с резултатите, получени при ъгли на поставяне на работните лопати $\theta_1 = 9^\circ$.

Графичният вид на резултатите, получени чрез полиномна интерполация с криви от втора степен относно теглителната сила (T) и съпротивителният въртящ момент (Q) като функция на честотата на въртене (n) при ъгли на поставяне на елементите на работните лопати $\theta = 12^\circ$, са представени на Фиг. 3-6 и на Фиг. 3-7, съответно.



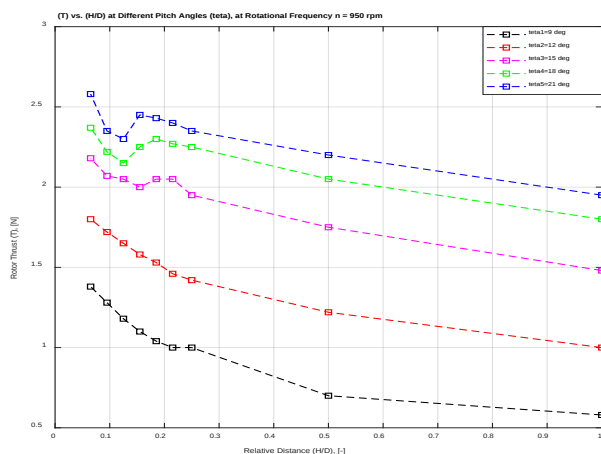
Фиг.3-6: Зависимости на създаваната теглителна сила (T) при вариация на честотата на въртене (n) от $750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ до $1150 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ и на разстоянието от екранната повърхност до равнината на въртене (H) на трилопатен въздушен винт Goe417 при ъгъл на поставяне на елементите на лопатите $\theta_2 = 12^\circ$.



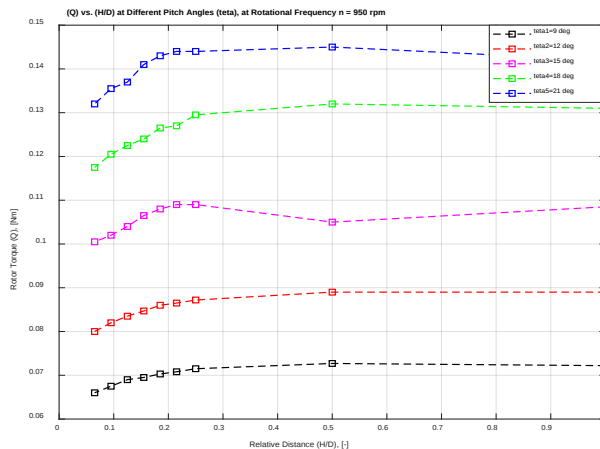
Фиг.3-7: Зависимости на съпротивителния момент (Q) при вариация на честотата на въртене (n) от $750 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ до $1150 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ и на разстоянието от екранната повърхност до равнината на въртене (H) на трилопатен въздушен винт Goe417 при ъгъл на поставяне на елементите на лопатите $\theta_2 = 12^\circ$.

На следващо място, съществена част от анализа представлява онагледяване влиянието на ъгъла на поставяне на лопатите (θ) върху величината на създаваната теглителна сила (T), съпротивителният въртящ момент (Q) както и на съответстващите им коефициенти, (C_T) и (C_Q) при вариация на честотата на въртене (n). Фиг.3-12 онагледява зависимостта на създаваната от въздушния винт теглителна сила (T) от относителното разстояние до екранната повърхност ($\frac{H}{D}$) при вариация на ъглите на поставяне на работните лопати (θ), при честота на въртене $n=950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. На базата на получените резултати може да бъде направено заключението, че нарастването на ъгъла на поставяне на лопатите (θ) довежда до увеличение във величината на генерираната теглителната сила (T), като при работа на въздушния винт на разстояния по-малки от един радиус (R) нарастването в стойностите на теглителната сила (T) е значително. Останалите зависимости относно значенията на теглителната сила (T) във функция на относителното разстояние ($\frac{H}{D}$) при ъгли на

поставяне на работните лопати $\theta_2 = 12^\circ$, $\theta_3 = 15^\circ$ и $\theta_4 = 18^\circ$ следват същите тенденции, клонейки към установена стойност при относително разстояние от 1.



Фиг.3-12: Зависимости на създаваната теглителна сила (Т) при вариация на относителното разстояние от екранната повърхност до равнината на въртене на въздушния винт ($\frac{H}{D}$) и на ъгъла на поставяне на лопатите (θ) на трилопатен въздушен винт Goe417 при честота на въртене $n=950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.



Фиг.3-14: Зависимости на съпротивителния момент (Q) при вариация на относителното разстояние от екранната повърхност до равнината на въртене на въздушния винт ($\frac{H}{D}$) и на ъгъла на поставяне на лопатите (θ) на трилопатен въздушен винт Goe417 при честота на въртене $n=950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

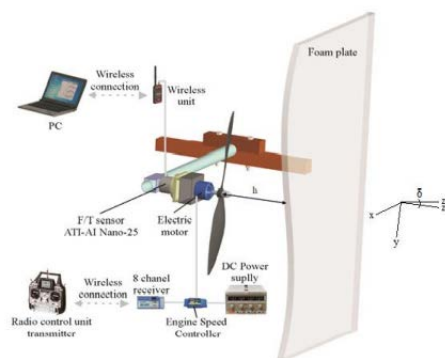
На следващо място, на Фиг.3-14, са изобразени зависимостите на съпротивителния въртящ момент (Q) при фиксирана честота на въртене $n=950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, при вариация на ъгъла на поставяне на лопатите (θ) и при вариация на относителното разстояние до екранната повърхност ($\frac{H}{D}$). При въртене на въздушния винт с ъглова честота $n=950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, при всеки един постоянен ъгъл на поставяне на лопатите (θ) се наблюдава намаляване в значенията на съпротивителния момент за въртене, когато винтът работи в зоната на екранен ефект.

3.4 Експериментална установка за изследване явлението екранен ефект на въздушен винт при прилагане на спомагателната методология

Основната задача на спомагателното експериментално изследване е да бъдат изведени зависимостите между създаваната теглителна сила (Т) и съпротивителната мощност (Р) от развиваната честота на въртене (n) от една страна, и зависимостите между относителните теглителна сила ($\frac{T_{IGE}}{T_{OGE}}$) и мощност ($\frac{P_{IGE}}{P_{OGE}}$), и относителното разстояние от равнината на винта до екранната повърхност ($\frac{h}{D}$) при различни ъгли на наклона на равнината на въртене (δ). За целите на настоящото изследване е използван тестови стенд, модифициран за целите на анализа, представен на Фиг.3-19.

Получените резултати, в следствие от осъщественото спомагателно експериментално изследване, са представени под формата на графични зависимости на основните

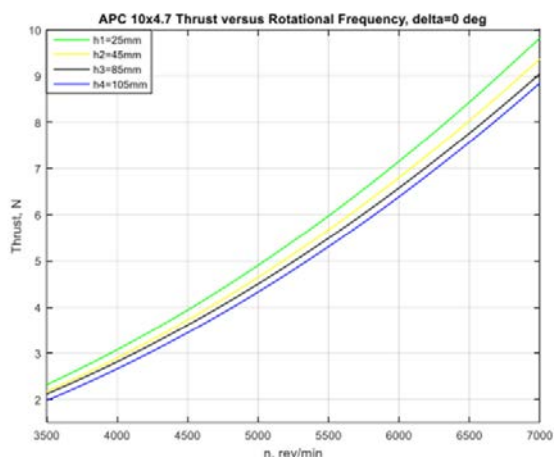
параметри, които характеризират работата на въздушния винт в режим на висене на разстояние (h) от екранната повърхност при различни ъгли на наклона на равнината на въртене (δ).



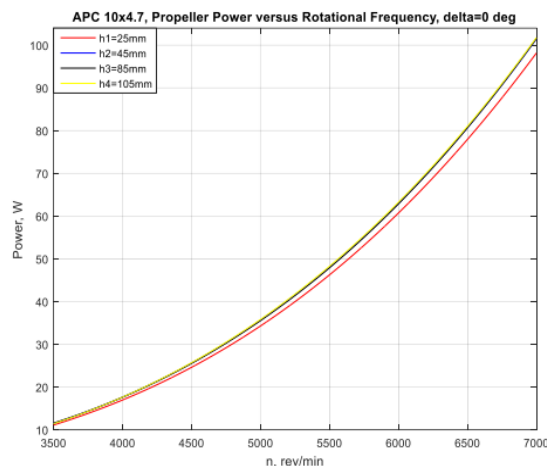
Фиг.3-19: Тестови стенд в конфигурация за изследване на екранен ефект на въздушен винт – спомагателна методология.

3.5 Получени експериментални резултати при прилагане на спомагателната методология

На Фиг.3-21 е представена зависимостта на създаваната от винта теглителна сила T [N] от развиваната честота на въртене (n) $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}}\right]$ в случай на работа на въздушния винт на различни разстояния до екранната повърхност и при ъгъл на наклона на равнината на въртене спрямо равнината на плоскостта $\delta=0^\circ$. Получените резултати показват постепенно нарастваща тенденция на зависимостта на създаваната теглителната сила (T) от развиваната честота на въртене (n), варирайки при промяна на разстоянието до екранната повърхност (h).



Фиг.3-21: Зависимост на създаваната от изпитвания въздушен винт теглителна сила (T) [N] при вариация на честота на въртене (n) $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}}\right]$, при работата му на различни разстояния до плоскостта (h), [mm] и при ъгъл на наклона на равнината на въртене $\delta=0$.

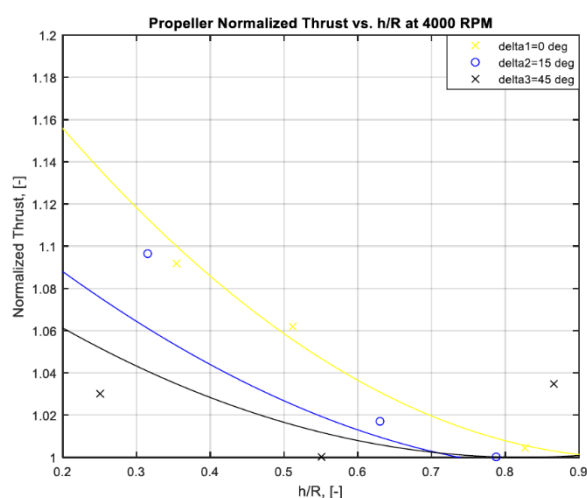


Фиг.3-22: Зависимост на съпротивителната мощност (P) [W] на изпитвания въздушен винт при вариация на честотата на въртене (n) $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}}\right]$, при работата му на различни разстояния до плоскостта (h), [mm] и при ъгъл на наклона на равнината на въртене $\delta=0$.

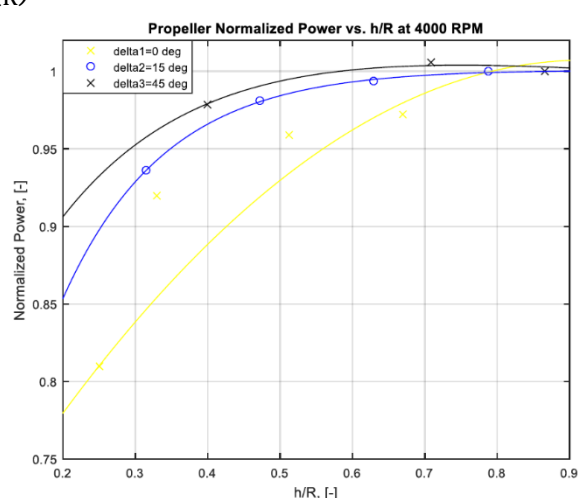
Аналогично, на Фиг.3-22, са представени зависимостите на съпротивителните механични мощности (P) [W] във функция на развиваната честота на въртене (n) $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}}\right]$ при вариация на разстоянието от равнината на въртене на винта до екранната плоскост (h), при ъгъл на наклона на равнината на въртене $\delta=0^\circ$.

В съответствие с представените резултати на Фиг.3-22 може да бъде направено заключението, че при работа въздушният винт при ниски честоти на въртене – до $4000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ влиянието на екранната повърхност върху съпротивителната механична мощност (P) е незначително. От друга страна, влиянието на екранния ефект върху съпротивителната механична мощност (P) става по-ясно разграничимо при по-високи честоти на въртене (n).

В допълнение, с цел оценяване въздействието на екранната повърхност върху характеристиките на винта, е осъществен бездименсионен анализ. Основната му цел е да предостави в графичен вид зависимостите на относителната теглителна сила на винта, когато той работи в зоната на наличие на екранен ефект и извън нея $\left(\frac{T_{IGE}}{T_{OGE}}\right)$ и на относителната съпротивителна мощност $\left(\frac{P_{IGE}}{P_{OGE}}\right)$ от относителното разстояние до екранната повърхност $\left(\frac{h}{R}\right)$. В следствие от осъществяването на анализа, на Фиг.3-23, са представени зависимостите на относителната теглителна сила $\left(\frac{T_{IGE}}{T_{OGE}}\right)$ при различни ъгли на наклона на равнината на въртене на винта (δ) и при вариация на разстоянието от равнината на въртене до екранната плоскост $\left(\frac{h}{R}\right)$.



Фиг.3-23: Зависимост на относителната теглителна сила $\left(\frac{T_{IGE}}{T_{OGE}}\right)$ на въздушния винт при работата му на различни относителни разстояния до плоскостта $\left(\frac{h}{R}\right)$, при вариация на ъгъла на наклона на равнината на въртене (δ) и при честота на въртене $n = 4000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.



Фиг.3-24: Зависимост на относителната мощност $\left(\frac{P_{IGE}}{P_{OGE}}\right)$ на въздушния винт при работата му на различни относителни разстояния до плоскостта $\left(\frac{h}{R}\right)$, при вариация на ъгъла на наклона на равнината на въртене (δ) и при честота на въртене $n = 4000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

На основание на получените резултати може да бъде направено заключението, че при постоянен ъгъл на наклона на равнината на въртене на винта (δ) и при намаляване на относителното разстояние до екранната повърхност $\left(\frac{h}{R}\right)$ създаваната теглителна сила (T) нараства.

В допълнение, на Фиг.3-24, са представени зависимостите на относителната мощност $\left(\frac{P_{IGE}}{P_{OGE}}\right)$ от относителното разстояние до екранната повърхност $\left(\frac{h}{R}\right)$ за въздушен винт APC 10x4.7. Противоположно на представените резултати относно зависимостта на относителната теглителна сила $\left(\frac{T_{IGE}}{T_{OGE}}\right)$ в зоната на наличие на екранен ефект и извън нея представена на Фиг.3-23, резултатите относно зависимостта на относителната мощност $\left(\frac{P_{IGE}}{P_{OGE}}\right)$, която е показана на Фиг.3-24, показват увеличение при нарастване на ъгъла на наклона на равнината на въртене (δ), при постоянна честота на въртене (n).

РАЗДЕЛ 4. АНАЛИЗ НА АЕРОДИНАМИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВЪЗДУШЕН ВИНТ В УСЛОВИЯ НА ЕКРАНЕН ЕФЕКТ ПОСРЕДСТВОМ ЧИСЛЕНИ МЕТОДИ

Основната задача, която настоящият раздел поставя, е числено моделиране на определената от основната методология постановка и валидиране на получените числени резултати с експерименталните.

4.1 Приложени числени методи

Приложените изчислителни модели за определяне характеристиките на въздушен винт в условия на екранен ефект при малки числа на Рейнолдс имат основна цел цялостно числено определяне на стойностите на съответстващите коефициенти, които характеризират значенията на теглителната сила (T), съпротивителният момент (Q), или съпротивителната мощност (P) при комплекс от изчислителни условия.

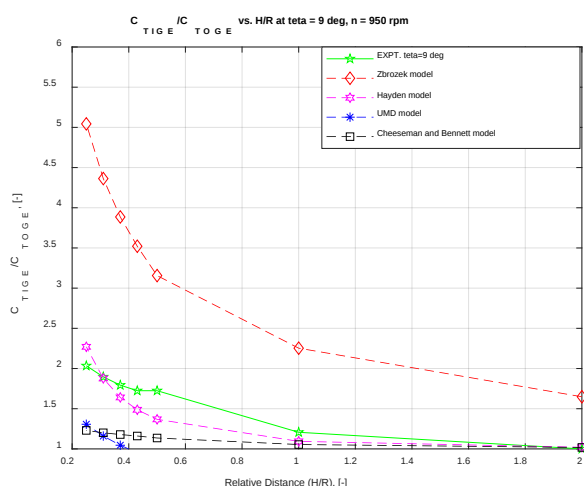
Водещите изчислителни центрове, като центърът на Локхийд Мартин в Университета в Мериленд в Съединените Американски Щати препоръчват при наличие на изчислителни случаи, при които има налице множество неопределености да бъдат използвани комбинирани модели, които са основани на няколко основни изводни постановки. Затова и тук е използвана подходяща комбинация от модели. Определянето на аеродинамичните коефициенти е базирано на няколко основни теории:

- Теория на елементите на работната лопата;
- Импулсна теория;
- Емпирични модели;
- Корекционни модели, относно неопределеността на коефициентите при малки числа на Рейнолдс.

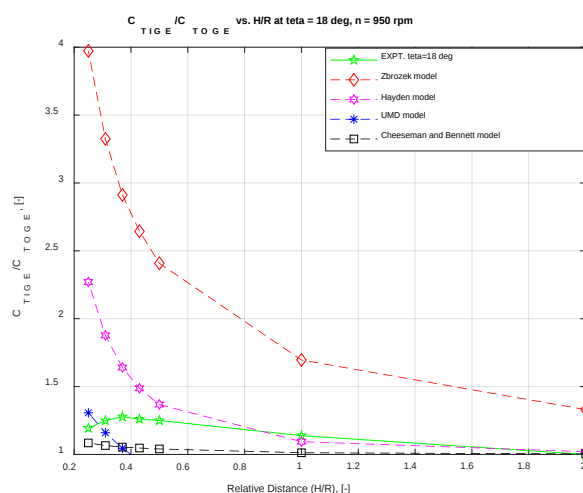
На следващо място е осъществен анализ на резултатите от емпиричните модели на основание на налични експериментални данни за избор на подходящ емпиричен модел с цел отчитане изменението на коефициента на относителна скорост в равнината на въртене в условия на екранен ефект. Представени са числените стойности на относителните коефициенти на теглителна сила в зоната на наличие на екранен ефект и

извън нея $\left(\frac{C_{TIGE}}{C_{TOGE}}\right)$ при прилагане на емпиричните модели на Зброкек, Хайден, Университета в Мериленд и Чесман и Бене, респективно. От изложените стойности се вижда, че при ъгли на поставяне на работните лопати $\theta < 18^\circ$ моделът на Хайден осигурява по-добро припокриване с експерименталните данни, докато при ъгли на поставяне $\theta > 18^\circ$ разминаването между емпиричните и експерименталните данни е значително. От друга страна приложимостта на модела на Чесман и Бене при ъгли на поставяне на работните лопати $\theta > 18^\circ$ осигурява задоволително добро припокриване с изложените експериментални значения за стойностите на относителния коефициент на теглителна сила $\left(\frac{C_{TIGE}}{C_{TOGE}}\right)$.

Затова при прилаганата методология двата модела са избрани и приложени за целите на коригиране значенията на коефициента на относителна скорост в равнината на въртене на въздушния винт в условия на екранен ефект. Представените резултати на Фиг.4-1 и на Фиг.4-3 показват отношенията на относителните коефициенти на теглителна сила $\left(\frac{C_{TIGE}}{C_{TOGE}}\right)$ и относителното разстояние до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ при ъгли на поставяне на работните лопати $\theta_1 = 9^\circ$ и $\theta_4 = 18^\circ$, респективно.



Фиг.4-1: Зависимост на относителния коефициент на теглителна сила $\left(\frac{C_{TIGE}}{C_{TOGE}}\right)$ от относителното разстояние до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ при експериментални резултати и при прилагане на всеки един от емпиричните модели, при ъгъл на поставяне на работните лопати $\theta_1 = 9^\circ$ за честота на въртене $n=950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.



Фиг.4-3: Зависимост на относителния коефициент на теглителна сила $\left(\frac{C_{TIGE}}{C_{TOGE}}\right)$ от относителното разстояние до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ при експериментални резултати и при прилагане на всеки един от емпиричните модели, при ъгъл на поставяне на работните лопати $\theta_4 = 18^\circ$ за честота на въртене $n=950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

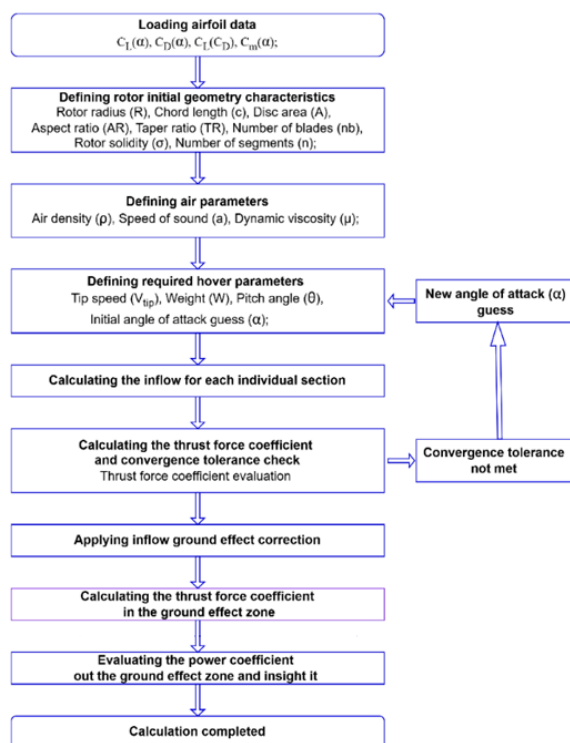
4.2 Изчислителна методология (въвеждане на моделите в MATLAB)

Използваната изчислителна методология предполага интегриране на изложените дотук модели в MATLAB и прилагането им при определяне аеродинамичните характеристики на изследвания въздушен винт. За тази цел е обособена самостоятелна изчислителна директория, която следва последователност от стъпки. Във всяка от стъпките се определят някои от параметрите към всяка определена изчислителна процедура. Те са изложени в следната последователност:

- 4.2.1 Зареждане характеристиките на използваните аеродинамични профили
- 4.2.2 Дефиниране геометричните характеристики на изследвания въздушен винт и параметрите на въздуха
- 4.2.3 Задаване на параметрите определящи ротацията
- 4.2.4 Проверка за достигане толеранса на сходимост

Представената и приложената методология е обобщена чрез блоковата диаграма, онагледена в Табл.4.7, описваща изчислителния алгоритъм.

Табл.4.7: Емпиричен – Импулсно – Елементен Алгоритъм.



4.3 Получени числени резултати

Резултатите от осъществените числени изследвания са представени като последователност от междинни и обобщаващи зависимости относно основните определящи параметри в прилагания модел. Един от важните междинни параметри в комплекса от методи представлява коефициента на относителната скорост (λ) при редица условия. Охарактеризирането на коефициента на относителната скорост (λ) предполага последващо определяне на теглителната сила (T) и на принадлежащия и коефициент (C_T)

в сложения комплекс от условия, а също така и съпротивителната мощност за въртене (P) и съответстващия и коефициент (C_p). Първоначално е необходимо определянето на теглителната сила (T), на съпротивителната мощност (P), както и на принадлежащите им коефициенти (C_T) и (C_p), в условия съответстващи на работа на въздушния винт извън зоната на екранен ефект, а след това и последващото им определяне при условия на работа на въздушния винт в условия на екранен ефект.

В Табл.4.8 е онагледено разпределението на коефициента на относителната скорост (λ) по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$) при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ), при честота на въртене на винта $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ в условия на екранен ефект на разстояние $\frac{H}{R} = 1$. Представените в Табл.4.8 резултати ясно онагледяват основния закон на разпределение на коефициента на скоростта (λ) по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$): крива от втора степен, достигаща своя максимум при относително разстояние $\frac{r}{R} = 0.65$. В допълнение, при увеличаване на ъглите на поставяне на работните лопати (θ) за всяка една относителна радиална координата ($\frac{r}{R}$) се наблюдава увеличение в значенията на коефициента на относителна скорост (λ).

Представените в Табл.4.8 числени резултати могат да бъдат онагледени в графичен вид.

Табл.4.8: Коефициент на относителна скорост (λ) по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$) при вариация на ъгъла на поставяне на лопатите (θ), при въртене на въздушния винт с честота $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ в условия на екранен ефект, при $\frac{H}{R} = 1$.

Rotational Frequency $n = 950 \text{ rpm}$, $H/R = 1$					
Relative Radial Distance	Inflow Ratio (λ)				
(r/R)	$\theta_1 = 9^\circ$	$\theta_2 = 12^\circ$	$\theta_3 = 15^\circ$	$\theta_4 = 18^\circ$	$\theta_5 = 21^\circ$
0.1	0.013	0.018	0.022	0.025	0.029
0.2	0.025	0.030	0.037	0.041	0.045
0.3	0.032	0.039	0.046	0.052	0.056
0.4	0.039	0.044	0.054	0.060	0.064
0.5	0.041	0.049	0.059	0.066	0.070
0.6	0.042	0.050	0.062	0.069	0.072
0.7	0.040	0.050	0.062	0.070	0.073
0.8	0.036	0.046	0.061	0.069	0.072
0.9	0.031	0.038	0.054	0.065	0.068

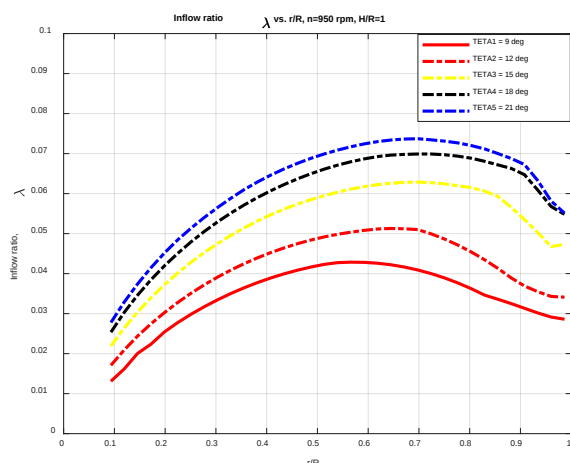
На следващо място, в Табл.4.9, са представени значенията на коефициента на относителна скорост (λ) от относителната радиална координата ($\frac{r}{R}$) при вариация на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$), в случай че винтът се върти с честота $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, а работните лопати са поставени на ъгъл $\theta_4 = 18^\circ$.

В съответствие с представените в Табл.4.9 данни, намаление в значенията на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$) довежда до съответно понижение в стойностите на коефициента на скоростта (λ) при всяка една радиална координата ($\frac{r}{R}$).

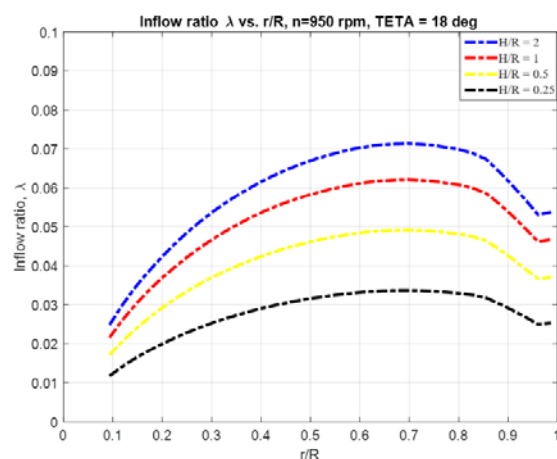
Табл.4.9: Коефициент на относителна скорост (λ) по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$) при вариация на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$), при ъгъл на поставяне на лопатите $\theta_4 = 18^\circ$ и при въртене на въздушния винт с честота $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Rotational Frequency $n = 950 \text{ rpm}$, $\theta_4 = 18^\circ$				
Relative Radial Distance (r/R)	Inflow Ratio (λ)			
	$H/R = 2$	$H/R = 1$	$H/R = 0.5$	$H/R = 0.25$
0.1	0.025	0.021	0.018	0.011
0.2	0.042	0.036	0.029	0.020
0.3	0.053	0.047	0.037	0.025
0.4	0.061	0.053	0.042	0.029
0.5	0.068	0.059	0.046	0.031
0.6	0.070	0.061	0.048	0.033
0.7	0.071	0.062	0.049	0.033
0.8	0.070	0.060	0.048	0.033
0.9	0.062	0.053	0.043	0.029

На Фиг.4-9 е представена зависимостта на коефициента на относителната скорост (λ) по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$) при постоянна честота на въртене $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, при запазване на постоянно разстоянието от равнината на въртене на винта до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$), съответстващо на един радиус и при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ).



Фиг.4-9: Разпределение на коефициента на относителна скорост (λ) по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$) при постоянна честота на въртене на винта $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, при работа на винта на относително разстояние $\frac{H}{R} = 1$ и при вариация ъгъла на поставяне на работните лопати (θ).



Фиг.4-10: Разпределение на коефициента на относителна скорост (λ) по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$) при постоянна честота на въртене на винта $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, при ъгъл на поставяне на работните лопати $\theta_4 = 18^\circ$ в зоната на наличие на екранен ефект и при вариация на относителното разстояние до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$).

Зависимостта на коефициента на относителна скорост в равнината на въртене на въздушния винт (λ) от относителното разстояние до екранна повърхност ($\frac{H}{R}$) е параболична. Всички представени криви следват гладка тенденция без високочестотни колебания по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$). При всеки един от елементите на работната лопата нарастването на ъгъла на поставяне (θ) довежда до съответстващо нарастване на коефициента на относителна скорост (λ) в равнината на въртене. В допълнение, изложените в Табл.4.9 данни относно разпределението на коефициента на скоростта (λ) по дължината на работната лопата ($\frac{r}{R}$), са онагледени в графичен вид като резултатите са представени на Фиг.4-10. Стойностите на коефициента на относителна скорост (λ) следват намаляваща тенденция при всяка една постоянна относителна радиална координата ($\frac{r}{R}$) при намаление на относителното разстояние от равнината на въртене на винта до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$). Изчислените значения на коефициента на скоростта в равнината на въртене на винта (λ) при постоянна честота на въртене $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) и на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$) позволяват определянето на стойностите на коефициента на теглителна сила (C_T) чрез прилагането на останалата част от емпиричния - импулсно - елементен алгоритъм.

Табл.4.10 представя експерименталните и изчислителните стойности на относителния коефициент на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати и на относителното разстояние от равнината на въртене на винта до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$), при въртене на въздушния винт с честота $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

От предоставените в таблицата стойности може да бъде направено заключението, че всички изчислителни стойности на относителния коефициент на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$), получени за ъгли на поставяне на работните лопати $\theta > 9^\circ$ и за относителни разстояния $\frac{H}{R} > 0.25$ попадат в рамките на толеранс от 5% от съответните им експериментални значения. При работа на въздушния винт в условия на екстремен екранен ефект ($\frac{H}{R} \leq 0.25$) изчислителната грешка е по-голяма поради неспособността на емпиричните модели да опишат процесите при тези условия. Представените в Табл.4.10 резултати относно значението на относителния коефициент на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) и на относителното разстояние от равнината на въртене на винта до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$), при въртене на въздушния винт с честота $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ могат да бъдат представени в графичен вид.

Табл.4.10: Относителен коефициент на теглителна сила $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$ при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) и на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$, при въртене на винта с честота $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Weighted Thrust Force Coefficient (C_T/σ)										
	EXP	BEM	EXP	BEM	EXP	BEM	EXP	BEM	EXP	BEM
	$\theta_1 = 9^\circ$		$\theta_2 = 12^\circ$		$\theta_3 = 15^\circ$		$\theta_4 = 18^\circ$		$\theta_5 = 21^\circ$	
H/R=2	0.032	0.045	0.059	0.060	0.083	0.084	0.102	0.103	0.109	0.110
H/R=1	0.041	0.051	0.072	0.069	0.101	0.097	0.120	0.115	0.125	0.122
H/R=0.5	0.059	0.065	0.083	0.080	0.115	0.113	0.132	0.131	0.138	0.141
H/R=0.25	0.070	0.083	0.097	0.105	0.120	0.142	0.125	0.164	0.134	0.178

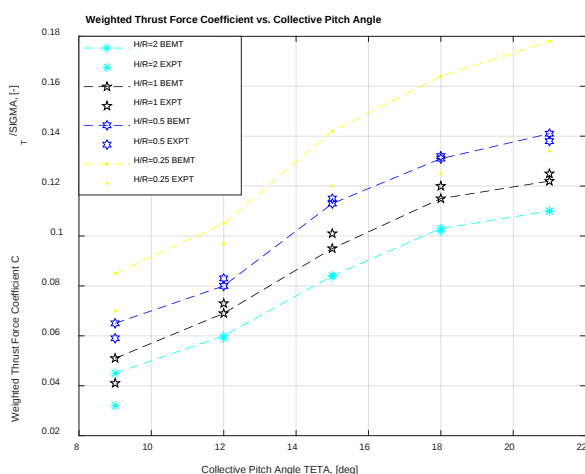
Фиг.4-11 представя тази зависимост. При работа на въздушния винт на всяко едно фиксирано относително разстояние от равнината на въртене до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$ увеличаването на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) довежда до съответно нарастване в значенията на изчислителния и на експерименталния относителен коефициент на теглителна сила $\left(\frac{C_T}{\sigma}\right)$.

В Табл.4.11 са представени стойностите на експериментално получения и на изчислителния относителен коефициент на съпротивителна мощност $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ при вариация на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$, и на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ).

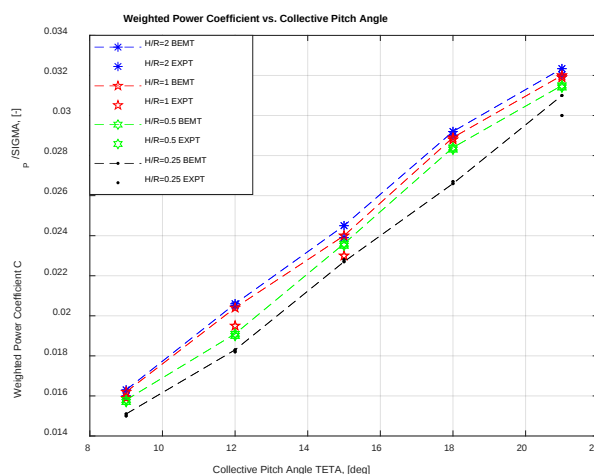
Табл.4.11: Относителен коефициент на съпротивителна мощност $\left(\frac{C_P}{\sigma}\right)$ при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) и на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност $\left(\frac{H}{R}\right)$, при въртене на винта с честота $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$.

Weighted Power Coefficient (C_P/σ)										
	EXP	BEM	EXP	BEM	EXP	BEM	EXP	BEM	EXP	BEM
	$\theta_1 = 9^\circ$		$\theta_2 = 12^\circ$		$\theta_3 = 15^\circ$		$\theta_4 = 18^\circ$		$\theta_5 = 21^\circ$	
H/R=2	0.0160	0.0163	0.0205	0.0206	0.0239	0.0245	0.0290	0.0292	0.0320 3	0.03204
H/R=1	0.0159	0.0162	0.0195	0.0204	0.0230	0.0240	0.0288	0.0289	0.0319	0.0320
H/R=0.5	0.0157	0.0158	0.0190	0.0191	0.0240	0.0241	0.0283	0.0284	0.0314	0.0315
H/R=0.25	0.0150	0.0151	0.0182	0.0183	0.0228	0.0227	0.0267	0.0266	0.0300	0.0310

От представените значения за относителния коефициент на съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$) може да бъде направено заключението, че при всеки един постоянен ъгъл на поставяне на работните лопати (θ) намаляването на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екрана ($\frac{H}{R}$) предизвиква съответно намаление на значенията на относителния коефициент на съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$). Предоставените в Табл.4.11 и онагледените посредством Фиг.4-13 изчислителни значения на относителния коефициент на мощността ($\frac{C_P}{\sigma}$) попадат в рамките на толеранс от 5% от изведените експериментални.



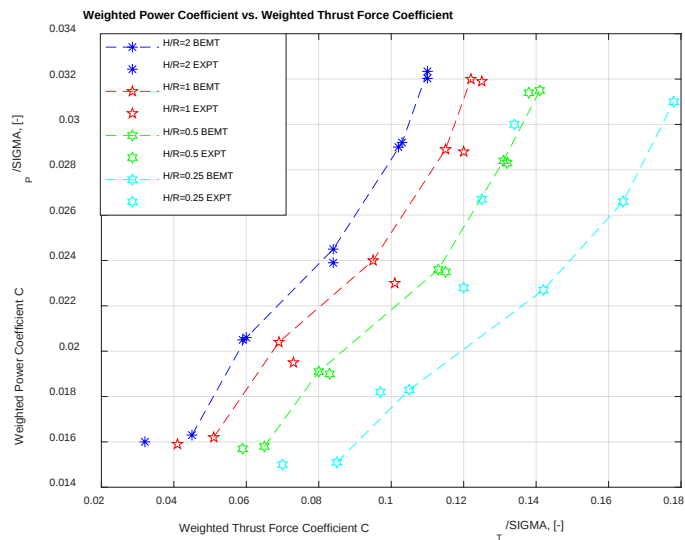
Фиг.4-11: Зависимост на относителния коефициент на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) от ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) при вариация на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$) и при честота на въртене $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. Експериментални и числени резултати.



Фиг.4-13: Зависимост на относителния коефициент на мощността ($\frac{C_P}{\sigma}$) от ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) при вариация на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$) и при честота на въртене $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. Експериментални и числени резултати.

Представените в Табл.4.10 и в Табл.4.11 значения на относителния коефициент на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) и на относителния коефициент на съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$) при вариация на комплекс от определящи параметри могат да бъдат представени в обща зависимост.

На Фиг.4-15 е показана зависимостта между относителния коефициент на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) и относителния коефициент на съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$) при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ), и на относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$).



Фиг.4-15: Зависимост на относителния коефициент на съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$) от относителния коефициент на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ), при работа на въздушния винт на различни разстояния от равнината на въртене до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$) и при честота на въртене $n = 950 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$. Експериментални и числени резултати.

При всяка една от получените криви, при работа на въздушния винт в режим на висене на постоянно относително разстояние от равнината на въртене до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$) се вижда, че при увеличаване на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) зависимостта следва квадратичен закон.

РАЗДЕЛ 5. ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Представеният дисертационен труд разглежда изследването на аеродинамичните характеристики на въздушни винтове работещи в условия на екранен ефект. В следствие на проведения детайлен литературен обзор беше дефинирана необходимостта от осъществяване на изследване на аеродинамичните характеристики на два въздушни винта работещи в режим на висене в зоната на наличие на екранен ефект посредством прилагане на експериментална и/или на числена постановка.

Методологичната същност на проведените експериментални изследвания включва следването на две независещи една от друга методологии с цел определяне на аеродинамичните характеристики на двата изследвани винта в условия на екранен ефект. При прилагането на първата, основна методология се осъществи анализ на зависимостите на създаваната теглителна сила (T) и на съпротивителния момент (Q) във функции на 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 ($\frac{H}{R}$). В допълнение са разгледани и безразмерните значения на съответстващите им коефициенти (C_T) и (C_Q) при изложения 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 ($\frac{H}{R}$) и при постоянен ъгъл на поставяне на елементите на работните лопати (θ). Намалването 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 (Т), 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 съпротивителния момент (Q) при запазване постоянни останалите параметри, противоположно на резултатите за теглителната сила (Т). В следствие от осъществения безразмерен анализ може да бъде 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 на екранен ефект. Изследваните параметри са създаваната от въздушния винт теглителна сила (Т), съпротивителната мощност (Р) 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 (Т) и на съпротивителната мощност (Р) 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 (Т) и довежда до редуциране на съпротивителната мощност (Р). 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 ($\frac{H}{R}$). Намирането на сходимост относно стойностите 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 ($\frac{C_T}{\sigma}$) и ($\frac{C_P}{\sigma}$) в зоната на проявление на явлението екранен ефект. В резултат от осъществените изчисления са построени зависимостите на относителните коефициенти на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) и съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$) 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 ($\frac{H}{R}$). Изчислителните значения на изследваните относителни коефициенти на теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) 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 ($\frac{C_T}{\sigma}$) в зоната на наличие на екстремен 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 ($\frac{C_T}{\sigma}$) и съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$) от относителното разстояние от равнината на въртене на въздушния винт до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$) при вариация на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ) както и на съотношението между относителните коефициенти на съпротивителна мощност ($\frac{C_P}{\sigma}$) и теглителна сила ($\frac{C_T}{\sigma}$) във функция на относителното разстояние от равнината на въртене на винта ($\frac{H}{R}$) и на ъгъла на поставяне на работните лопати (θ).

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

1. Създадена е методология за експериментално определяне на аеродинамичните характеристики на два въздушни винта при работа в условия на екранен ефект.
2. Предложен е иновативен хибриден алгоритъм за изследване характеристиките на въздушни винтове работещи в условия на екранен ефект.
3. Осъществено е числено моделиране на аеродинамичните характеристики на въздушен винт при работа в условия на екранен ефект чрез интегриране в модела на емпирични поправки отнасящи се за коефициента на относителна скорост в равнината на въртене на винта (λ).

Приложни приноси

1. Извършено е експериментално определяне на аеродинамичните характеристики на въздушен винт в условия на екранен ефект при вариация на комплекс от параметри: ъгълът на поставяне на елементите на работните лопати (θ), относителното разстояние от равнината на въртене на винта до екранната повърхност ($\frac{H}{R}$) и на честотата на въртене (n). Изследваните изходни параметри са: създаваната от въздушния винт теглителна сила (T), съпротивителният момент (Q), както и техните коефициенти (C_T) и (C_Q).
2. Пресъздадена е в MATLAB среда методологическата последователност на предложения хибриден модел с основна задача провеждане на изчисленията.
3. Приложен е хибриден елементно-импулсен модел с емпирични корекции с основна задача числено определяне на аеродинамичните характеристики на въздушен винт в условия на екранен ефект. Изчислени са стойностите на теглителната сила (T), на съпротивителната мощност (P) и на съответстващите им относителни коефициенти ($\frac{C_T}{\sigma}$) и ($\frac{C_P}{\sigma}$) при вариация на комплекс от параметри: ъгълът на поставяне на елементите на лопатите (θ) и относителното разстояние от равнината на въртене на винта до екрана ($\frac{H}{R}$).
4. Осъществено е експериментално определяне на аеродинамичните характеристики на мултикоптерен въздушен винт при работа в условия на екранен ефект. Оценени са значенията на създаваната теглителна сила (T), съпротивителната мощност (P) при вариация на честотата на въртене (n), относителното разстояние до екранната повърхност ($\frac{h}{R}$) и на ъгъла на наклона на равнината на въртене (δ).
5. Представена е оценка на зоната на наличие на екранен ефект на двата изследвани въздушни винта и за влиянието на екранната повърхност върху основните експлоатационни параметри на винтовете при работата им в зоната на наличие на екранен ефект.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Georgiev G., Serbezov V. and Todorov M., Data Acquisition System for Small Propeller Test Rig, AIP Conf. Proc. 2449, 050006, 2022, <https://doi.org/10.1063/5.0092112>.
2. Georgiev G., Serbezov V. and Todorov M., Experimental Study of Multicopter Propeller Performance Near Ground at Different Inclination Angles, AIP Conf. Proc. 2557, 020002, 2022, <https://doi.org/10.1063/5.0106920>.
3. Georgiev G., Panayotov F., Serbezov V. and Todorov M., Experimental Study of Static Characteristics of a Helicopter Rotor in Ground Effect, AIP Conf. Proc. 2980, 050002, 2024, <https://doi.org/10.1063/5.0186410>.
4. Georgiev G., Blade element – momentum aerodynamic model of a helicopter rotor operating at low-Reynolds numbers in ground effect, Aviation Journal, Vilnius, Lithuania, 2025, DOI: <https://doi.org/10.3846/aviation.2025.23587>.

HELICOPTER ROTOR AERODYNAMIC CHARACTERISTICS ESTIMATION IN GROUND EFFECT

Author: M.Sc. Eng. Gabriel Venelinov Georgiev

Abstract

The general objective of this Ph.D. thesis is the evaluation of helicopter rotor aerodynamic characteristics in ground effect conditions both experimentally and numerically. Motivated by the intensive technical application of helicopter and multicopter unmanned aerial vehicles, the study aims to quantify the major dependencies which fully describe their performance in conditions corresponding to taking off, landing regimes, and flights in the vicinity of obstacles. As a result, the ground effect zone is quantified for delivering essential scientifically approved information regarding the rotor performance varying several parameters, and a proper mathematical model is recommended. The aerodynamic forces and moments quantification in ground effect conditions could be directly applied in the analysis and design of automatic taking-off and landing systems.

For the purpose of completion of this study, two independent experimental methodologies have been followed. The first methodology evaluates the dependencies between the generated thrust (T) and required torque (Q) as a function of the rotational frequency (n), the blade collective pitch angle (θ), and the relative distance from the rotational plane to the ground surface ($\frac{H}{R}$). As a result, a rise in thrust (T) and a decline in the torque (Q) magnitudes are observed, when decreasing the relative distance to the ground surface for every given constant collective pitch angle (θ). The dimensionless analysis quantified the ground effect zone, which lies between the rotational plane and the ground surface at a length equal to $2R$. Moreover, a mathematical modeling is performed for the sake of providing numerical validity of the experimental results. Given the complicated testing conditions, including extremely low Reynolds numbers conditions, a hybrid empirical-blade element-momentum model is proposed and applied for finding the aerodynamic characteristics of the examined rotor in the main testing methodology. Dependencies between the weighted thrust force coefficients ($\frac{C_T}{\sigma}$), the weighted power coefficients ($\frac{C_P}{\sigma}$), and the collective pitch angle (θ), varying the relative distance to the ground surface ($\frac{H}{R}$) are derived. For every constant relative distance to the ground surface at which the helicopter rotor operates, an increase in the collective pitch angle (θ) produces a corresponding increase in the examined coefficients' values. A decline in the operational distance to the ground surface ($\frac{H}{R}$) for every given constant collective pitch angle (θ) leads to an increase in the weighted thrust force coefficients' values ($\frac{C_T}{\sigma}$) and a corresponding decrease in the weighted power coefficients' values ($\frac{C_P}{\sigma}$). The calculated numerical results for the weighted thrust force coefficients ($\frac{C_T}{\sigma}$) fall within a range of 5% from the experimentally obtained, except for the values for the relative distances $\frac{H}{R} \leq 0.25$ due to the inability of the applied empirical model to predict the rotor characteristics in such conditions.

The auxiliary methodology provides the estimation of multicopter rotor characteristics in the ground effect zone considering the relative distance to the ground plate ($\frac{h}{R}$) and the rotational plane inclination angle (δ). An increase in the rotational plane inclination angle (δ) leads to a decrease in the ground effect intensity.