

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПІТЕРЦЕВ ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ

Прим. № _____

УДК 621.396.96:629.7.067

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗОН
ПОТЕНЦІЙНОГО ОБЛЕДЕНІННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН**

Спеціальність: 05.13.06 – Інформаційні технології
Галузь знань: 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Пітерцев О.А.

Науковий керівник: **Яновський Фелікс Йосипович**, доктор технічних наук,
професор, лауреат Державної премії України.

Київ-2017

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗОН ПОТЕНЦІЙНОГО ОБЛЕДЕНІННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

АНОТАЦІЯ

Пітерцев О.А. Інформаційна технологія виявлення зон потенційного обледеніння повітряних суден. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Національний авіаційний університет.

Зміст анотації

Безпека польотів повітряних суден (ПС) значною мірою пов'язана із функціонуванням інформаційних систем, що відповідають за попередження про небезпечні метеорологічні явища (НМЯ). Однією з найбільш складних але важливих задач є підвищення якості функціонування цих систем за рахунок розширення класу НМЯ, які система може розпізнати і про які пілоти можуть бути завчасно попереджені. Дисертація присвячена розробці інформаційної технології підвищення безпеки польотів ПС на базі методів визначення зон потенційного небезпечного обледеніння (ЗНО) повітряних суден.

Обледенінням називається небезпечне метеорологічне явище, суть якого складають процеси відкладення льоду в польоті на різних частинах літака. Воно має багато негативних чинників впливу на безпеку польоту повітряних суден. Так, обледеніння збільшує вагу літака, а осідаючи на різного роду приймачах, наприклад, на приймачах повітряного тиску, лід спотворює показання приладів, виводить з ладу системи і двигуни. Покриті льодом скла кабіни сильно ускладнюють посадку. Однак головна небезпека обледеніння полягає в порушенні обтікання крила літака, що призводить до передчасного зриву потоку і втрати крилом підйомної сили, тобто літак втрачає свої аеродинамічні якості. Вирішення задачі попередження обледеніння повітряних суден у польоті має важливе практичне значення для підвищення безпеки і регулярності пасажирських перевезень у цивільній авіації, а також зниження витрат.

Основою представлених в роботі результатів є вперше розроблений метод оцінки поляриметричних інформативних параметрів зон небезпечного обледеніння,

вдосконалений метод визначення та класифікації небезпечних метеорологічних явищ за допомогою бортової метеорологічної інформаційної системи шляхом додавання послідовності реалізацій для виявлення нового класу об'єктів – зон небезпечного обледеніння, і метод багатофакторної оцінки ступеня загрози обледеніння, який використовує поляризаційні характеристики електромагнітних хвиль, відбитих від метеорологічних об'єктів та також параметри повітряного судна і маршруту польоту.

Робота має важливе практичне значення для підвищення безпеки та регулярності пасажирських перевезень у цивільній авіації, а також зниження витрат. Значний прогрес в алгоритмах обробки сигналів, який спостерігається в останні роки, разом з швидким розвитком електронних обчислювальних засобів надають можливості для застосування більш складних та ресурсоемних методів аналізу радіолокаційних сигналів при скануванні метеорологічних об'єктів. А розвиток радіотехнічних засобів надає великі можливості у випромінюванні та прийманні складних радіолокаційних сигналів. Ці фактори збільшують кількість інформації, яку можна отримати від внутрішньої структури досліджуваних об'єктів. Визначення зон, що містять краплі переохолодженої рідини, які створюють небезпеку виникнення обледеніння в досліджуваному районі простору по курсу польоту повітряного судна, пропонується здійснювати за допомогою аналізу поляризаційних особливостей структури відбитих радіолокаційних сигналів.

Перший з представлених методів дозволяє провести оцінку основних параметрів сигналів бортової інформаційної метеорологічної системи, що були відбиті від метеорологічних об'єктів (досліджуваної області простору, заповненої гідрометеорами різних типів) на основі представлених в роботі математичної моделі відбиття електромагнітних хвиль від гідрометеорів несферичної форми. Модель дозволяє проводити розрахунки поліметричних параметрів відбитого сигналу за допомогою апроксимації несферичної форми розсіювачів (гідрометеорів) сфероїдами обертання та використання модифікованих формул Релея.

Другий з представлених методів описує алгоритм виявлення зон потенційного обледеніння шляхом ідентифікації типів гідрометеорів на основі аналізу відмінності поляриметричних інформативних параметрів відбитого сигналу бортової

інформаційної метеорологічної системи, приймаючи до уваги результати математичного моделювання та оцінки цих параметрів в першому з представлених у роботі методів. Теоретичні дослідження, приведені в роботі, підтверджені експериментальними даними, зокрема результатами практичних вимірювань хмар та опадів існуючими метеорологічними радіолокаторами.

Третій з методів, що представлені в дисертації, використовує математичний апарат нечіткої логіки для оцінки ступеня небезпеки обледеніння повітряних суден. Також у цій роботі були проаналізовані існуючі методи визначення зон обледеніння, і запропоновані нові, більш досконалі методи, що дозволяють попереджувати про небезпеку обледеніння до його початку з урахуванням сукупності таких факторів, як поляриметричні параметри відбитого сигналу, температура, висота, швидкість польоту, тривалість перебування у небезпечній зоні та інші. Дана оцінка достовірності цих методів, і приведені рекомендації до їх реалізації в існуючих інформаційних системах забезпечення безпеки польотів.

Ключові слова

Інформаційні технології, безпека польотів, небезпечні метеорологічні явища, обледеніння, метеорологічна радіолокація, поляриметричний підхід.

Список публікацій здобувача

1. A. A. Pitertsev, The Analytical Method of Polarimetric Variables Prediction in The Case of Remote Sensing of Ice Crystals Clouds, Journal “Electronics and Control Systems”, Київ, НАУ, №51, 2017 р, стор. 24-29 (фахове видання);
2. A.A. Pitertsev, F.J. Yanovsky, Refined Models and Numerical Simulation of Polarimetric Radar Signals Scattered by Various Types of Hydrometeors, Proceedings of 2016 IEEE Radar Methods and Systems Workshop (RMSW-2016), Київ, 2016 р, стор. 48-49 (Scopus);
3. A.A. Pitertsev, R.B. Sinitsyn, F.J. Yanovsky, Copula Based Dependence Measure for Polarimetric Weather Radar, International Radar Symposium (IRS-2015), Дрезден, Німеччина, 2015 р, стор. 597-603 (Scopus);
4. A.A. Pitertsev, F.J. Yanovsky, Efficiency estimation for the parametric radar algorithm of detection of probable aircraft icing zones, ММЕТ-2014, Дніпропетровськ, 26-28 серпня 2014 р, стор. 243-246 (Scopus);

5. A. A. Pitertsev, F. J. Yanovsky, Polarimetric Radar as a Device for Detecting Potentially Dangerous Zones of Aircraft Icing, Proceeding IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2014), Київ, стор. 38-41 (Scopus);
6. A. A. Pitertsev, On the Problems of Radar Detection of Zones of Possible Aircraft Icing-In-Flight, Journal "Electronics and Control Systems", Київ, НАУ, №40, 2014 р, стор. 98-102 (фахове видання);
7. A. A. Pitertsev and F.J. Yanovsky, Polarimetric Method for Remote Predicting a Zone of Icing-in-Flight in Clouds and Precipitation, Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, Київ, 25 – 27 серпня 2011 р, стор. 220-223 (Scopus);
8. A. Pitertsev, F. Yanovsky. Radar Determination of Probable Icing-in-Flight // Proceedings Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2008), Київ, 2008 р, стор. 293-295 (Scopus);
9. A.A. Pitertsev, F.J. Yanovsky, Detection of Potential Aircraft Icing Zones by Remote Sensing of Meteorological Objects "Telecommunications and Radio Engineering", Volume 65, 2006, Issue 7, стор. 633-640 (журнал США, Scopus);
10. A.A. Pitertsev, F. J. Yanovsky. Advanced Algorithm for Radar Detection of Icing. Calculation of Polarimetric Observables, "Telecommunications and Radio Engineering", Volume 66, 2007, Issue 12, стор. 1465-1471 (журнал США, Scopus);
11. F. J. Yanovsky, V. V. Marchuk, Ya. P. Ostrovsky, A. A. Pitertsev, Ya. S. H. Khraisat, L.P. Ligthart. Microwave scattering from particles in turbulent atmosphere and its application for hydrometeor type recognition and turbulence detection // Вісник Інженерної академії України. – 2007. – № 3-4. – стор. 16-23 (фахове видання);
12. A.A. Pitertsev, F. J. Yanovsky. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms, Proceedings of the 37th European Microwave Conference, 978-2-87487-001-9 © 2007 EuMA, Мюнхен, Німеччина, 2007 р, стор. 1550-1553 (Scopus);
13. A.A. Pitertsev, F. J. Yanovsky. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms, Proceedings of the 4th European Radar Conference, 978-2-87487-004-0 © 2007 р. EuMA, Мюнхен, Німеччина, 2007 р, стор. 271-274 (Scopus);
14. F.J. Yanovsky, V.V. Marchuk, Y.P. Ostrovsky, A.A. Pitertsev, and L.P. Ligthart. Inverse Scattering and Radar Cross Section of Heterogeneous Hydrometeor Ensemble // Proceedings 2nd European Conference on Antennas and Propagation, Единбург, Великобританія, 2007 р, CD ROM: ISBN 9780863418426, стор. 1-5 (Scopus);

15. A.A. Pitertsev, F. J. Yanovsky. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms, Book of Abstracts Proceedings of the 37th European Microwave Conference, EuMC-2007, Мюнхен, Німеччина, 2007, стор. 58;
16. A.A. Pitertsev, F. J. Yanovsky. Polarimetric Approach to Detecting Probable Aircraft Icing Zones. Icing Detection Algorithms, Book of Abstracts 4th European Radar Conference, EuRAD-2007, Мюнхен, Німеччина, Germany, 2007, стор. 12;
17. Питерцев А.А., Обнаружение зон потенциального обледенения самолетов при радиолокационном зондировании метеорологических объектов, журнал «Радиофизика и электроника», 2006, том 11, № 1, Харків, ІРЕ НАН, стор. 74-77 (фахове видання);
18. A. Pitertsev, F. Yanovsky. Simulation of Microwave Backscattering on Hydrometeors. Proc. Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Vol.2, Краків, Польща, 2006 р, стор. 499-502 (Scopus);
19. A.A. Pitertsev, V.V. Marchuk, F.J. Yanovsky. Identification of the Dangerous Meteorological Objects on Doppler-Polarimetric Radar Data Using the Neural Network Based Algorithm. Proc. IEEE Int. Radar Symposium, Краків, Польща, 2006 р, стор. 225-228 (Scopus);
20. F.J. Yanovsky, A.A. Pitertsev, Y.P. Ostrovsky, I.V. Mazura, V.V. Marchuk. Neural Network Identification Algorithm for Weather Radar. Extended Abstracts Int. Symposium on Tropospheric Profiling ISTR7, Боулдер, штат Колорадо, США, 11-17 червня 2006 р, стор 3. (paper 6.2);
21. F.J. Yanovsky, A.A. Pitertsev, Y.P. Ostrovsky, I.V. Mazura, V.V. Marchuk. Neural Network Identification Algorithm for Weather Radar. Proc. Int. Symposium on Tropospheric Profiling ISTR7, Боулдер, штат Колорадо, США, 11-17 червня 2006 р, CD ROM, стор. 9, <http://www.eol.ucar.edu/istp2006/istpprogram.html>;
22. Lawama, A. Pitertsev, F. Yanovsky. Microwave Propagation through the Mixed Ensemble of Hydrometeors: Effect of Back Scattering. Book of Abstracts European Microwave Week, EuMC 2005, 4-6 жовтня 2005 р, CNIT La Defence, Париж, Франція, стор. 155;
23. A. Pitertsev, F. Yanovsky. Advanced Algorithm for Radar Detection of Icing. Calculation of Polarimetric Observables. Proceedings International Workshop on Microwaves, Radar and Remote Sensing MRRS 2005, 19-21 вересня 2005 р., Київ, стор. 87-90 (Scopus);
24. A. Lawama, A. Pitertsev, F. Yanovsky. Microwave Propagation Trough Mixed Ensemble of Hydrometeors: Effect of Backscattering. 35th European Microwave

Conference – Париж, 2005 р. Proc. European Microwave Week 2005 Conference, EuMA, IEEE, стор. 1351-1354 (Scopus);

25. F. Yanovsky, A. Pitertsev, T. Sidorenko. Aircraft Icing Prevention Radar System: Models and Software for Calculation of Information Parameters. Proc. International Radar Symposium IRS-2005, Берлін, Німеччина, 2005 р, стор. 489-492 (Scopus);
26. A. Pitertsev, F. Yanovsky. Mathematical Modeling and Simulation of Backscattering from Hydrometeors of Different Types. Conference Proceedings. 10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Дніпропетровськ, 14-17 вересня 2004 р, стор. 292-294 (Scopus);
27. A. Pitertsev, F. Yanovsky. Identification of the meteorological objects on doppler-polarimetric radar data by using fuzzy logic based algorithm, ММЕТ-2006, Харків, 26-29 червня 2006, стор. 344-346.

Патенти

28. Пітерцев О.А., Яновський Ф. Й. Патент України на корисну модель № 98228 «Спосіб визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» від 27.04.2015;
29. Пітерцев О.А., Яновський Ф. Й. Патент України на корисну модель № 100763 «Пристрій для визначення зон можливого обледеніння літаків і гелікоптерів» від 10.08.2015.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ЗМІСТ	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	12
ВСТУП	14
1. ОБЛЕДЕНІННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ЯК НЕБЕЗПЕЧНЕ	
МЕТЕОРОЛОГІЧНЕ ЯВИЩЕ	25
1.1 Загальні відомості	25
1.2 Умови виникнення зон небезпечного обледеніння (ЗНО).....	26
1.3 Актуальність проблеми раннього виявлення ЗНО	28
1.4 Постановка задачі ранньої діагностики ЗНО з борта літального апарату (ПС)	31
1.5 Висновки	38
2. МЕТОД ОЦІНКИ ІНФОРМАТИВНИХ ПОЛЯРИМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗОН НЕБЕЗПЕЧНОГО ОБЛЕДЕНІННЯ	41
2.1 Математичні моделі зв'язку поляризаційних параметрів з характеристиками гідрометеорів.....	41
2.1.1 Початкові дані.....	41
2.1.2 Радіолокаційна відбиваність.....	42
2.1.3 Матриця зворотного розсіювання	43
2.1.4 Поляриметричні вимірювані параметри	46
2.2 Поляриметричний підхід до питання розрахунку параметрів радіолокаційного сигналу, відбитого від еліпсоїдних частинок	48
2.2.1 Основні параметри і визначення	48
2.2.2 Варіант з вертикальною орієнтацією головної осі еліпсоїда (без нахилу)	52

2.2.3	<i>Похила орієнтація головної осі еліпсоїда (загальний випадок)</i>	57
2.3	Поляриметричний підхід до питання розрахунку параметрів радіолокаційного сигналу, відбитого від хмари еліпсоїдів	61
2.3.1	<i>Статистичні параметри розподілу гідрометеорів в хмарі.....</i>	61
2.3.2	<i>Рівноймовірна орієнтація кристалів в об'ємі хмари.....</i>	63
2.3.3	<i>Переважно впорядкована орієнтація кристалів в хмарі.....</i>	68
2.4	Поляризаційні характеристики рідких крапель (хмарних і дощових)	72
2.5	Поляризаційні характеристики кристалів льоду	80
2.6	Поляризаційні характеристики шару танення	88
2.7	Структурно-аналітична схема методу оцінки інформативних поляриметричних параметрів зон небезпечного обледеніння	89
2.8	Висновки	90
3.	МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ ЗА ДОПОМОГОЮ БОРТОВОЇ МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	94
3.1	Характеристика умов отримання експериментальних даних	94
3.1.1	<i>Загальні відомості про джерела експериментальних даних.....</i>	94
3.1.2	<i>Коротка характеристика апаратури</i>	95
3.2	Методика експериментів і задача обробки даних	101
3.3	Експериментальна перевірка адекватності моделей	102
3.4	Аналіз результатів вимірювання РВ, ДВ і ЛДВ одноканальним радіолокаційним поляриметром	104
3.5	Аналіз результатів вимірювання ДВ і ЛДВ двоканальним поляриметричним радіолокатором TARA.....	107
3.6	Аналіз результатів вимірювання РВ, ДВ, ЛДВ і КК системою PARSAX	111
3.7	Аналіз існуючих алгоритмів виявлення ЗНО.....	113

3.8	Логічні процедури виявлення ЗНО	115
3.9	Вимоги до порогових рівнів основних параметрів.....	120
3.10	Висновки	122
4.	МЕТОД БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОЇ ОЦІНКИ СТУПЕНЯ ЗАГРОЗИ	
	ОБЛЕДЕНІННЯ ПС	124
4.1	Оцінка достовірності виявлення ЗНО.....	124
4.2	Оцінка температури досліджуваного метеорологічного об'єкта	127
4.3	Алгоритм виявлення ЗНО та класифікатор рівня загрози з використанням математичного апарату нечіткої логіки.....	129
4.4	Структурно-логічна схема інформаційної технології підвищення ефективності функціонування інформаційних систем безпеки польотів літальних апаратів.....	140
4.5	Висновки	141
	ВИСНОВКИ.....	144
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	146
	ДОДАТКИ.....	155
1.	Додаток 1. Додаткові теоретичні відомості про обледеніння як небезпечне метеорологічне явище	155
1.1	<i>Вплив обледеніння на аеродинамічні якості літака і безпеку польотів</i>	155
1.2	<i>Типи льоду і форма відкладень.</i>	156
1.3	<i>Вплив параметрів ПС та навколишнього середовища на можливість обледеніння.....</i>	160
1.4	<i>Боротьба з обледенінням. Протиобліднювальні системи</i>	169
1.5	<i>Приклади авіаційних подій, пов'язаних з обледенінням</i>	167

2.	Додаток 2. Аналіз комбінацій гідрометеорів, що становлять підвищену небезпеку обледеніння ПС.....	174
2.1	<i>Класифікація.....</i>	174
2.2	<i>Сценарій переохолодженого дощу.....</i>	174
2.3	<i>Сценарій шаруватого обледеніння.....</i>	177
2.4	<i>Сценарій конвективного обледеніння</i>	179
2.5	<i>Сценарій загального обледеніння</i>	180
3.	Додаток 3. Оцінка температури метеорологічного об'єкту за допомогою температурного градієнту повітря.....	184
4.	Додаток 4. Копія актів впровадження результатів дисертаційної роботи в НДЧ ХНУРЕ і НАУ.....	185
5.	Додаток 5. Тексти програм в середовищі розрахунків MATLAB	188
5.1	<i>Розрахунок значень поляриметричних змінних в MATLAB: кристали льоду стовпчастого типу, розподілені в просторі хаотично</i>	188
5.2	<i>Розрахунок значень поляриметричних змінних в MATLAB: рідкі краплі води, розподілені в просторі переважно горизонтально</i>	197

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АС** – Антиобліднювальна Система
- БПЛА** – Безпілотний Літальний Апарат
- БАОС** – Блок Аналогової Обробки Сигналів
- ДС** – Діаграма Спрямованості
- ДВ** – Диференціальна Відбиваність
- ЕМВ** – Електромагнітне Випромінювання
- ЕПР** – Ефективна Площа Розсіювання
- ЗНО** – Зона Небезпечного Обледеніння
- ІКО** – Індикатор Кругового Огляду
- ІП** – Інформативні Параметри
- КК** – Коефіцієнт Кореляції
- ЛДВ** – Лінійне Деполяризаційне Відношення
- ЛА** – Літальний Апарат
- МК** – Модуль Керування
- МРЛ** – Метеорологічний Радіолокатор
- МНРЛС** – Метеорологічна Навігаційна Радіолокаційна Станція
- НМЯ** – Небезпечне Метеорологічне Явище
- ПР** – Поляриметричний Радіолокатор
- ПрС** – Пристрій Сполучення
- ПС** – Повітряне Судно
- ПЧ** – Проміжна Частота
- РВ** – Радіолокаційна Відбиваність
- ЦАО** – Центральна Аерологічна Обсерваторія
- ШПП** – Швидкодіючий Перемикач Поляризацій
- ЩРЙ** – Щільність Розподілу Ймовірності

ADWICE – German Advanced Diagnosis and Warning system for aircraft ICing Environments

ASRS – Aviation Safety Reporting System

CNS/ATM – Communications, Navigation, Surveillance/ Air Traffic Management

DARR – Delft Atmospheric Research Radar

IRCTR – International Research Centre for Telecommunications and Radar

FAA – Federal Aviation Administration

FPGA – Field-Programmable Gate Array

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NTSB – National Transportation Safety Board

PARSAX – Polarimetric Agile Radar in S– And X–band

PCM – Pulse Code Modulation

SFDR – Spurious–Free Dynamic Range

SLWD – Supercooled Liquid Water Drops

TARA – Transportable Atmospheric Radar

UAV – Unmanned Aerial Vehicle

WUT – Warsaw University of Technology