

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут аерокосмічних технологій

Кафедра авіа- та ракетобудування

До захисту допущено

В. о. завідувача кафедри

_____ Олександр БОНДАРЕНКО

«__» _____ 2022 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

за освітньо-професійною програмою «Літаки і вертольоти»

спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»

на тему: «Системи запобігання обледенінню літака»

Виконав:

студент ІІ курсу, групи АЛ-11мп

Ахтямов Е.Х. _____

Керівник:

к.хім.н., старший науковий співробітник

Козакевич М.Л. _____

Рецензент:

Доц.

Черняк М.Г. _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут аерокосмічних технологій
Кафедра авіа- та ракетобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – **134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»**

Освітньо-професійна програма «Літаки і вертольоти»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

_____ Олександр БОНДАРЕНКО

«___» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Ахтямову Едварду Харисовичу

1. Тема дисертації «Системи запобігання обледенінню літака», науковий керівник дисертації Казакевич Михайло Леонідович, к.хім.н., старший науковий співробітник, затверджені наказом по університету від «11» листопада 2022 р. № 4174-с
2. Термін подання студентом дисертації 05 грудня 2022 р.
3. Об'єкт дослідження Системи запобігання обледенінню літака
4. Вихідні дані Матеріал - вуглецевий полімерний композит. Трьохфазний змінний струм, напруга –115 В, частота 340 -560 Гц, питома потужність НЕ циклічної дії становить від 1,7 до 2,5 Вт/см², тощо.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - 5.1. Аналітичний огляд по розробці нагрівальних елементів (НЕ ПОС) для літаків.
 - 5.2 Дослідження використання вуглецевих наноматеріалів в різних полімерних композитних матрицях в якості НЕ.
 - 5.3. Порівняння характеристик іноземних аналогів вуглецевих композитних матеріалів, оптимізація складу досліджуваного композиту та переваги їх впровадження.
 - 5.4. Розробка конструкції НЕ ПОС щодо заміни діючого нагрівального елемента на композит з вуглецевими наноматеріалами.
 - 5.5. Апробування на експериментальному стенді та визначення параметрів різних варіантів НЕ ПОС для впровадження у літаку.
 - 5.6 Доопрацювання конструкції та інструкції монтажу НЕ ПОС для літаків.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
- 6.1. Огляд літератури.
- 6.2. Фізико-хімічні характеристики досліджуваних композитних матеріалів.
- 6.3. Креслення конструкції експериментального стенду НЕ ПОС.
- 6.4. Результати апробування конструкцій НЕ ПОС.
- 6.5. Складальний кресленик монтажу НЕ ПОС для літаків.

7. Орієнтовний перелік публікацій

7.1. Стаття у фаховому виданні.

7.2. Доповідь на науково-технічній конференції з публікацією тез.

8. Дата видачі завдання 08.11.2021 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.		до 15.12.2021 р.	
2.	Дослідження використання вуглецевих наноматеріалів в різних полімерних композитних матрицях в якості НЕ.	до 31.03.2022 р.	
3.	Порівняння характеристик іноземних аналогів вуглецевих композитних матеріалів, оптимізація складу досліджуваного композиту та переваги їх впровадження.	до 21.04.2022 р.	
4.	Розробка конструкції НЕ ПОС щодо заміни діючого нагрівального елемента на композит з вуглецевими наноматеріалами.	до 03.06.2022 р.	
5.	Апробування на експериментальному стенді та визначення параметрів різних варіантів НЕ ПОС для впровадження у літаку.	до 20.09.2022 р.	
6.	Доопрацювання конструкції та інструкції монтажу НЕ ПОС для літаків.	до 25.11.2022 р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу. Попередній захист	до 05.12.2022 р.	
8.	Доопрацювання матеріалів дисертації. Перевірка на плагіат	до 10.12.2022 р.	

Студент
Науковий керівник

Едвард АХТЯМОВ
Михайло КАЗАКЕВИЧ

Анотація

Пояснювальна записка до магістерської дисертації «Системи запобігання обледенінню літака» містить 83 сторінки тексту, 15 ілюстрацій та 21 бібліографічне посилання.

Мета проекту – розробка композитного матеріалу на основі волокон на основі карбонових нанотрубок, який стане заміною нагрівального елемента літального апарату. Під впливом струму композит нагрівається, що дає можливість використовувати його, як протиоблідникову систему.

Нагрівальний елемент з використанням карбонових нанотрубок має перевагу перед аналогами у вигляді економічності, зменшення маси літального апарату, більш просте обслуговування.

Композитний матеріал разом із фарбою поміщується на поверхню літального апарату за допомогою фарборозпилювача. Це надає змогу більш легкої роботи системи запобігання обледенінню та зниження маси, так як фарба важить набагато менше ніж інші системи запобігання обледенінню, які зараз використовуються.

Ключові слова: Карбонові нанотрубки, карбонове колокно, нагрівальний елемент, система запобігання обліденінню.

Abstract

The explanatory note to the master's thesis "Aircraft anti-icing systems" contains 83 pages of text, 15 illustrations and 21 bibliographic references.

The goal of the project is to develop a composite material based on fibers based on carbon nanotubes, which will replace the heating element of the aircraft. Under the influence of current, the composite heats up, which makes it possible to use it as an anti-icing system.

The heating element using carbon nanotubes has an advantage over analogues in the form of economy, weight reduction of the aircraft, easier maintenance.

The composite material, together with the paint, is placed on the surface of the aircraft using a paint sprayer. This allows for easier operation of the anti-icing system and reduced weight, as the paint weighs much less than other anti-icing systems currently in use.

Key words: Carbon nanotubes, carbon column, heating element, anti-icing system.

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту

на тему: **«Системи запобігання обледенінню літака»**

Київ – 2022 рік

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 Аналітичний огляд по розробці нагрівальних елементів (НЕ ПОС) для літаків 10	
1.1 Постановка задачі.....	10
1.2 Огляд існуючих рішень	10
1.3 Механічні системи запобігання обледенінню	23
1.4 Рідинна система запобігання обледенінню	26
Висновки по розділу	30
2 Дослідження використання вуглецевих наноматеріалів в різних полімерних композитних матрицях в якості НЕ.....	31
2.1 Дослідження карбонових нанотрубок.....	31
2.2 КНТ як нагрівальний елемент ПОС ЛА.....	33
Висновки по розділу	38
3 Порівняння характеристик іноземних аналогів вуглецевих композитних матеріалів, оптимізація складу досліджуваного композиту та переваги їх впровадження	39
3.1 Порівняння характеристик іноземних аналогів	39
3.2 Оптимізація складу композитного матеріалу.....	48
Висновки по розділу	54

					АЛ-11мп-1.10.74.00.00ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Разраб.		Ахтямов Е.Х.			Системи запобігання обледенінню літака	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевіриє		Казакевич М.Л.					6	
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Н. контр.		Поворов С.А.				каф. АРБ АЛ-11мп		
Затверд		Бондаренко О.М.						

4 Розробка конструкції НЕ ПОС щодо заміни діючого нагрівального елемента на композит з вуглецевими наноматеріалами	55
4.1 Різновид конструкцій композиту з КНТ.....	55
4.2 Застосування композиту з вуглецевими наноматеріалами в авіації	64
Висновки по розділу	66
5 Апробування на експериментальному стенді та визначення параметрів різних варіантів НЕ ПОС для впровадження у літаку	67
5.1 Об'єкт випробувань.....	67
5.2 Мета випробувань	67
5.3 Результати тестування	67
Висновки по розділу.....	69
6 Доопрацювання конструкції та інструкції монтажу НЕ ПОС для літаків	70
6.1 Опис ідеї проєкту.....	70
6.2 Технологічний аудит ідеї проєкту	71
6.3 Аналіз ринкових можливостей по запуску проєкту.....	71
6.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту.....	77
6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	79
Висновки по розділу.....	81
ВИСНОВКИ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

- ЛА – літальний апарат
НЕ – нагрівальний елемент
ПОС – протиобліднювальна система
ТГД – турбо-гвинтовий двигун
ККД – коефіцієнт корисної дії
ЕІ – електроімпульсна
КНТ – карбонові нанотрубки
ОСНТ – одностійна вуглецева нанотрубка
ДСНТ – двостійна вуглецева нанотрубка
CFRP – армоване вуглецеве волокно
ЕСТ – electro-conductive carbon-based textile
РЧ – радіо частоти
GNR – graphene nanoribbons
HD-GNR – hexadecylated graphene nanoribbons
КНТ – відфільтровані нанотрубки
НЗСГ – нагрівач з силіконової гуми
КНП – карбонові нанопластики
ФСМ – функціонально сортовані матеріали
ДП – державне підприємство

ВСТУП

Освіта під час польоту на поверхні різних частин літака крижаних наростів становить велику небезпеку. Зледеніння зменшує підйомну силу літака та збільшує його лобовий опір, заважає роботі органів управління, погіршує пілотам видимість, збільшує вібрацію та навантаження окремих елементів планера. Викликаючи збільшення потрібної для польоту потужності, зледеніння призводить до зниження потужності внаслідок зменшення прохідного перерізу повітрозабірників двигунів і значних втрат швидкісного напору повітря, що надходить у двигун.

Обледеніння повітряного гвинта викликає різке зменшення його коефіцієнта корисної дії. Разом з тим порушується вагове та аеродинамічне балансування гвинта, що призводить до трясіння двигунів. Тряска викликає додаткові динамічні напруги в конструкції літака, а також неприємні фізіологічні впливи на екіпаж та пасажирів. Шматки льоду, що відриваються від лопатей, можуть пошкодити обшивку фюзеляжу і крила.

Тому ефективний захист літака від зледеніння є одним з найважливіших завдань і в даний час протиобмерзання на літаку є обов'язковими.

1 Аналітичний огляд по розробці нагрівальних елементів (НЕ ПОС) для літаків

1.1 Постановка задачі

Дослідити використання вуглецевих наноматеріалів в різних полімерних композитних матрицях в якості НЕ. Виявити переваги та недоліки впровадження вуглецевих наноматеріалів, як НЕ поверхні літака. Порівняти характеристики іноземних аналогів вуглецевих композитних матеріалів, оптимізація складу досліджуваного композиту та переваги їх впровадження. Оптимізувати склад та розробка конструкції НЕ ПОС щодо заміни діючого нагрівального елемента на композит з вуглецевими наноматеріалами.

1.2 Огляд існуючих рішень

Широке застосування авіації у діяльності людини викликає великі проблеми безпеки польотів і, зокрема, захисту літальних апаратів від зледеніння. Зледеніння літаків і гелікоптерів відбувається в атмосфері, що містить вологу при негативних температурах. Слід зазначити, що вода може бути в рідкій фазі до температури мінус 65°C.

Зледеніння є процесом крижаних утворень на деяких поверхнях літального апарату. Це може спричинити суттєві ускладнення польоту – аж до катастрофи.

Процес кристалізації води (перехід у лід) здійснюється з великою швидкістю та ініціюється утворенням центрів кристалізації. Як такі центри кристалізації можуть бути сторонні тіла (пилінки та ін.), зіткнення з поверхнею і т.д.

Найбільша ймовірність зледеніння виникає при польоті у хмарах із підвищеним вмістом вологи. Найбільш сприятлива температура для зледеніння

становить від 0°C до -20°C . Особливо слід відзначити можливість утворення криги на вхідних ділянках повітрозабірників двигунів при температурі від 0°C до $+10^{\circ}\text{C}$. Це пояснюється адіабатичним розширенням повітря, що викликає одночасне зниження його температури. При цьому одночасно відбувається конденсація пари, що знаходяться в повітрі. Це посилює можливість обмерзання обтічних ділянок повітрозабірників і навіть лопаток перших щаблів компресора.

Утворення льоду на поверхнях літального апарату є наслідком двох процесів - зіткненням переохолоджених крапель з поверхнею і подальшим розтіканням і замерзанням. Зони виникнення зледеніння дає картина обтікання вологим повітрям профілю крила.

У дозвуковому польоті атмосферне повітря розподіляється навколо лобової поверхні крила так, що лінії струму істотно викривляються біля передньої кромки і потім йдуть приблизно кривизні профілю. Водні краплі, в силу більшої інертності, рухаються траєкторією меншої кривизни, формуючи вздовж обтічної поверхні шар повітря з підвищеною концентрацією водних крапель. Значна частина крапель концентрується на лобовій поверхні профілю. Частина потоку, що залишилася, протікаючи по передній поверхні крила, замерзає на його поверхні.

Величина зони уловлювання залежить в основному від швидкості польоту і діаметра крапель - чим вище швидкість і більше діаметр крапель, тим більше зона уловлювання і тим більша частка води, що міститься в повітрі, осідає на передній кромці. Зменшення відносної товщини профілю та радіуса закруглення передньої кромки також призводить до збільшення розмірів зони уловлювання (розтікання). З цієї причини при гострих кромках, характерних для профілів надзвукових літаків, може бути захоплено до 90% водяних крапель, що містяться в повітряному потоці, в той час як відносно товстий профіль може захопити всього близько 15% крапель.

Зазвичай величина зони захоплення вбирається у 5...6% хорди профілю, а діаметр крапель, осідають на поверхні, лежить у діапазоні від 5 до 75 мкм.

Розміри зони розтікання води по поверхні залежать від температури, швидкості польоту, способу захисту від зледеніння та інших факторів.

У сукупності зона уловлювання та зона розтікання становлять зону захисту профілю, мінімальний розмір якої обмежений зоною уловлювання, а максимальний - зазвичай не перевищує 15% хорди профілю.

Крім зазначених вище температури навколишнього середовища та діаметра переохолоджених крапель істотно впливають на процес зледеніння надають водність навколишнього середовища і пов'язана з нею інтенсивність зледеніння. Під водністю навколишнього середовища розуміється маса води, що знаходиться в краплиннорідкому стані, в одному кубічному метрі об'єму.

Інтенсивність зледеніння - це швидкість утворення льоду, що характеризується зміною товщини крижаного шару в одиницю часу. Інтенсивність зледеніння залежить від водності навколишнього повітря, а також діаметра переохолоджених крапель.

Зледеніння ЛА найчастіше відбувається при проходженні хмарних атмосферних фронтів. З точки зору виникнення зледеніння з усього різноманіття хмарних утворень слід виділити два їх різновиди - шаруваті і купові хмари.

Шаруваті хмари можуть мати товщину від 200 до 2000 м-коду, по фронту досягати розміру до 1000 км., а їх довжина може знаходитися в межах від 200 до 900 км. За своєю структурою це переважно крапельні, іноді з домішкою кристалів льоду, хмари з діаметром крапель від 3 до 20 мкм. Середня водність шаруватих хмар становить близько 0,18 г/м³, інтенсивність зледеніння може досягати 2 мм/хв, а ймовірність його виникнення – до 85%.

Купові хмари можуть мати товщину до кількох кілометрів, фронтом мають розмір до 20...30 км і, як правило, йдуть грядами в зоні, що має довжину від 30 до 100 км від фронту. По структурі – це краплинні хмари з діаметром крапель

близько 12 мкм. Середня величина водності в купових хмарах становить близько 0,36 г/м³, інтенсивність зледеніння у верхній частині хмари досягає 5 мм/хв, а ймовірність зледеніння близько 70%.

Крижані нарости, що утворюються на частинах літальних апаратів, дуже різні і залежать від впливу комплексу багатьох факторів, таких як розмір переохолоджених крапель, температура середовища та швидкість польоту. Все різноманіття льодоутворень, що зустрічаються, можна класифікувати за формою і характером зовнішньої поверхні.

Жолобообразний крижаний нарост утворюється за відносно невеликих негативних температурах зовнішнього повітря від (0 до -7)°C. Його форма пояснюється тим, що в умовах краплі води замерзають не відразу, а розтікаються по поверхні. В результаті розтікання водяних крапель по поверхні ЛА утворюються два крижані бар'єри, що значною мірою спотворюють форму профілю. Якщо швидкість польоту ЛА досить велика, щоб температура гальмування потоку області передньої кромки профілю була позитивною, то утворюється різновид жолобообразної форми – рогоподібний нарост, викликаний кінетичним нагріванням.

Характерною рисою цього виду льодоутворення є його значне поширення по хорді, тобто велика зона захоплення. Лід, що утворюється в цьому випадку на поверхні ЛА, зазвичай прозорий, склоподібний і не має повітряних включень.

У діапазоні температур навколишнього повітря від -7°C до -10°C рівноймовірне утворення льоду будь-якої із зазначених, а також проміжних форм.

Клиноподібна форма наросту утворюється при температурі зовнішнього повітря (-10 ... -15) ° C і нижче. У цьому випадку краплі води, що потрапляють на поверхню ЛА, замерзають майже миттєво. Характерною властивістю такого льоду є практично повна відсутність зони розтікання крапель. Між замерзлими краплями залишаються повітряні порожнини, тому на вигляд такий лід зазвичай буває матовим, має шорстку поверхню і молочно-білий колір.

Крім розглянутих видів «краплинного» зледеніння, відомо зледеніння у вигляді інею, тобто легкого дрібнокристалічного нальоту на поверхні, що виникає в результаті, сублімації водяної пари. Цей вид зледеніння особливої небезпеки для аеродинаміки літальних апаратів не становить.

Зазвичай зледеніння піддаються такі поверхні агрегатів ЛА:

- передні кромки крила та оперення;
- вхідні кромки повітрозабірників двигунів;
- лопасті та обтічники повітряних гвинтів турбогвинтових або гвинто-вентиляторних двигунів;
- лопасті несучих та рульових гвинтів вертольотів;
- обледеніння кабіни екіпажу;
- обтічники радіолокаційних та радіозв'язкових антен;
- датчики пілотажно-навігаційних приладів, що виходять у потік.

Зледеніння крила і оперення дуже впливає на льотні характеристики, стійкість і керованість літака. Спотворення форми і поява нерівностей і шорсткості на поверхні носової частини профілю суттєво впливають на підйомну силу та опір крила. У загальному прирості опору літака при зледеніння частка крила та оперення становить до 70...80%.

У разі зледеніння зростає не тільки опір ЛА та знижується його якість, а й суттєво зменшується величина максимального коефіцієнта підйомної сили $C_{y_{max}}$ (рисунок 1.1 та 1.2). Розмір критичного кута атаки зменшується на $(6...8)^\circ$. Це призводить до зриву потоку на поверхні, що несе, і зниження максимальне значення коефіцієнта підйомної сили в 1,5... 1,8 рази.

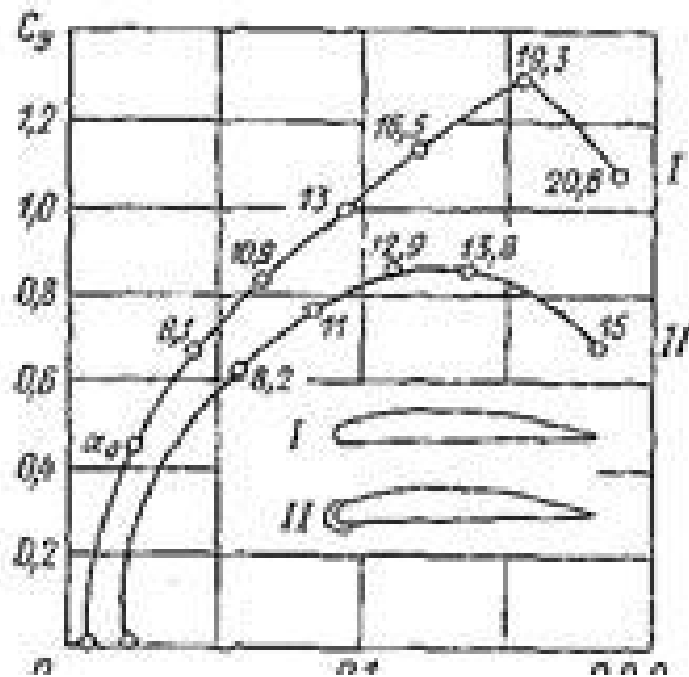


Рисунок 1.1 – Зміна полярів профілю під час обледеніння

Це означає, що посадка літака, щоб уникнути різкої втрати висоти, повинна проводитися на менших посадкових кутах, тобто при більшій швидкості.

Зменшення товщини профілю та загострення його передньої кромки збільшують чутливість профілю до зледеніння, тобто викликають зрив потоку на меншому куті атаки. Тому на малих швидкостях польоту реактивні надзвукові літаки під час зледеніння будуть у незрівнянно гірших умовах, ніж літаки з дозвуковими швидкостями польоту.

Горизонтальне оперення на злітно-посадкових швидкостях зазвичай обтікається під негативними кутами атаки. Зледеніння його, зменшуючи критичний кут атаки при відносно великій швидкості польоту та малому навантаженні, може вже при малих негативних кутах атаки призвести до зриву потоку.

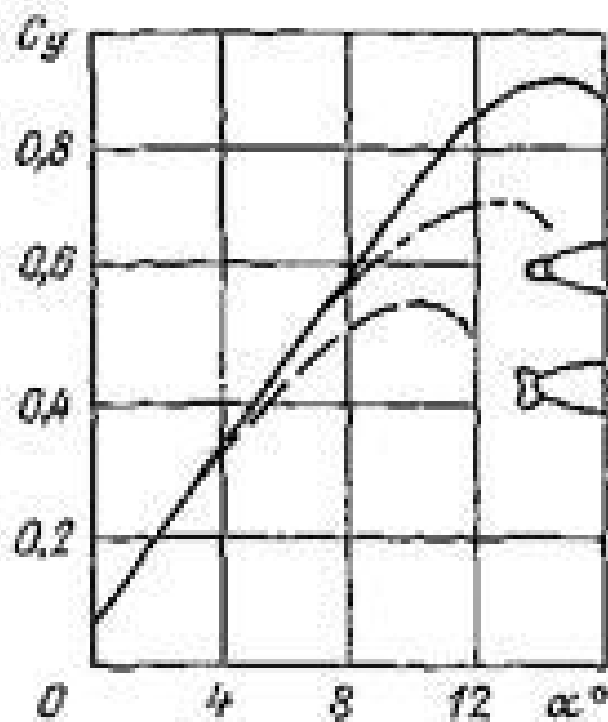


Рисунок 1.2 – Залежність критичного кута атаки від характеру обледеніння

Зменшити небезпеку зриву при зледенінні горизонтального оперення можна за допомогою низки конструктивних заходів: збільшенням площі та плеча підйомної сили стабілізатора, застосуванням більш несучих (несиметричних) профілів, профільуванням щілин на стабілізаторі перед кермом висоти, виносом стабілізатора із зони інтенсивного скосу потоку за крил подовження стабілізатора.

До втрати керованості літака може призвести зледеніння щілин органів управління, передніх кромek кермів, елеронів, закрилків, стиків секцій передкрилків, примерзання органів управління при польоті в умовах переохолодженого дощу або мокрого снігу.

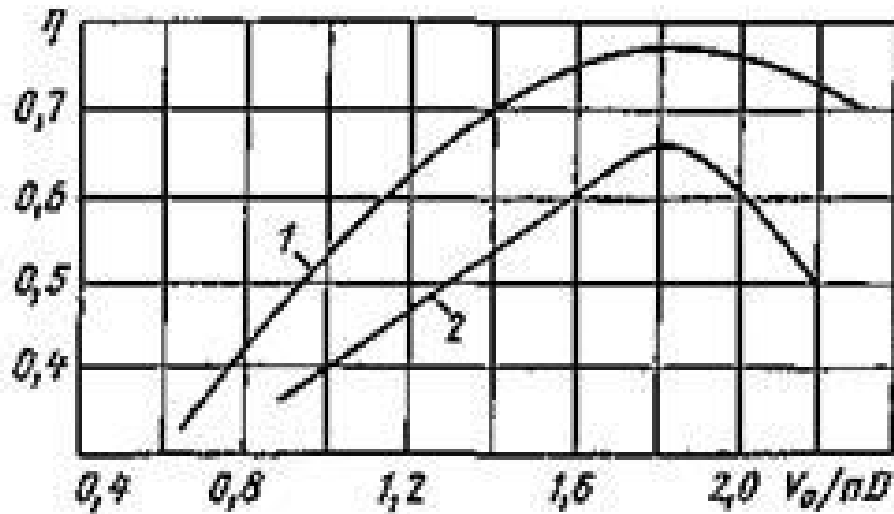


Рисунок 1.3 – Вплив зледеніння на ККД повітряного гвинта: 1 – без зледеніння; 2 – при зледеніння

Утворення льоду на входній кромці повітрозабірника створює істотну нерівномірність повітряного потоку на вході двигуна. Це може призвести до зниження тяги та запасу стійкості роботи компресора двигуна.

Зледеніння повітряних гвинтів за формами і видами льоду, що утворюється, мало відрізняється від зледеніння крила і оперення. Однак довжина зони зледеніння по хорді лопасті може досягати 25...21% її довжини. Протяжність зони зледеніння по радіусу гвинта становить 40...60%, рахуючи осі обертання. Кінцеві перерізи зледеніння не піддаються через аеродинамічний нагрів і підвищений рівень вібрацій. Зледеніння гвинта призводить до падіння його ККД на 12...16% (рис.1.3) та відповідного зменшення швидкості польоту на 20...30 км/год (тільки за рахунок зледеніння).

Вертолітні гвинти набагато більш чутливі до зледеніння, ніж літакові, а саме їх зледеніння відрізняється своєрідністю. Це з тим, що швидкості обтікання лопатей змінюються у дуже широких межах, до негативних у зоні зворотного обтікання.

У зоні зворотного обтікання інтенсивність зледеніння по передній кромці дуже невелика і лише злегка зростає вздовж лопаті. Далі вона починає досить швидко зростати і починаючи з деякого радіусу і до кінця лопаті зростає приблизно пропорційно відстані від осі обертання. Ближче до кінцевих зон зледеніння відсутнє, що викликається скиданням льоду при дії вібрації. Крім того, зледеніння піддаються втулка і всі деталі управління гвинтом. Зледеніння гвинта викликає динамічну незбалансованість. При цьому зазвичай погіршується керованість і може статися втрата стійкості вертольота.

Зледеніння скління кабіни екіпажу, обтічників антен та датчиків пілотажно-навігаційних приладів призводить до ускладнення умов польоту та створення несприятливої обстановки для роботи екіпажу.

З викладеного ясно, що для забезпечення безпеки польотів та підвищення їх регулярності ЛА повинні оснащуватися ПЮ, що захищає зазначені вище поверхні та агрегати літака або вертольота.

Існують два основні методи боротьби з зледенінням — пасивний та активний.

Пасивний метод передбачає виведення літака із зони зледеніння. Цілком очевидно, що пасивний метод не може задовольнити вимоги безпеки та регулярності польотів. Активні методи боротьби з зледенінням за характером впливу можна розділити на механічні, хімічні та термічні. Механічні методи захиті засновані головним чином на застосуванні гумових протекторів, що надуваються, які монтуються на передній кромці крила і хвостового оперення. У середині протектори мають поздовжні камери, куди поперемінно надходить стиснене повітря[1].

Протиобмерзальний пристрій включається в дію після утворення льоду на передній кромці. Спочатку надувається центральний протектор і ламає кригу, потім надуваються два інших протектори і надламаний крига відривається і зноситься повітряним потоком.

Хімічний метод заснований на застосуванні різних речовин у вигляді рідини або пасти, що мають температуру замерзання нижче 0°C і здатних у різних пропорціях з водою утворювати суміш, яка замерзає лише при температурі значно нижче 0°C .

Захищена частина літака покривається будь-яким пористим матеріалом, наприклад, спеціально обробленою шкірою, металокерамічним листом або прутком. Через пори цих елементів подається рідина, яка розчиняє кригу. У деяких випадках поверхня, що захищається, обливається антиобмерзаючою рідиною.

В результаті зчеплення між льодом і поверхнею профілю зменшується і лід, що відклався, здувається повітряним потоком. Цей метод застосовується як усунення, так попередження зледеніння. Рідина, що застосовується в таких пристроях запобігання обледеніння, може бути спирт, спирто-гліцеринові суміші та ін.

Механічні протизледенні системи. Принцип дії механічних ПОД полягає в механічному деформуванні шару льоду з подальшим його скиданням під дією аеродинамічних, відцентрових або інших зовнішніх силових факторів.

В основу принципу дії електроімпульсних ПОС покладено явище збудження в матеріалі обшивки агрегату пружних хвиль напруги з крутим переднім фронтом. Вони викликають у крижаному шарі напруги, що перевершують його динамічну міцність, але не викликають втомних явищ у матеріалі конструкції агрегату. Виникає стрибок напруги приводить до миттєвого руйнування льоду з подальшим його видаленням з поверхні потоком повітря, що набігає.

Перетворення електричних імпульсів та імпульсів пружних деформацій здійснюється в індукторах вихрових струмів, що є соленоїдами без сердечників. Що надходять з конденсаторних наповнювачів електроенергії імпульси електричної енергії проходять через обмотки соленоїдів і створюють змінне

магнітне поле високої частоти. Це поле, у свою чергу, наводить у металевій обшивці агрегат змінні вихрові струми та відповідні пружні деформації, достатні для руйнування льоду. Практика експлуатації електроімпульсних систем на літаку показала їх високу надійність при роботі в діапазоні температур до -40°C . У порівнянні з іншими типами ці системи характеризуються невеликою витратою енергії, малою масою та високою компактністю елементів [2].

Дуже перспективним у майбутньому передбачається застосування ультразвукових ПОС.

Фізико-хімічний спосіб заснований на використанні спеціальних рідин і паст, які або знижують температуру замерзання переохолоджених крапель води, або зменшують силу зчеплення льоду з поверхнею, що захищається для подальшого його видалення набігаючим потоком повітря.

Як робочі рідини застосовуються різні спирти, спирто-гліцеринові суміші або рідини на основі гліколів, наприклад етиленгліколь.

Застосовувані на деяких типах літаків рідинні ПОС працюють або в режимі попередження зледеніння, або в режимі періодичного видалення льоду з поверхні, що захищається. З огляду на пожежну небезпеку таких ПОС вони мають обмежене застосування.

Теплові протизледенні системи. Тепловий спосіб боротьби з зледенінням полягає в нагріванні захищається поверхні агрегату до температури танення льоду або випаровування вологи, що осаджується на неї. Як і раніше розглянуті, теплові ПОС працюють у режимах постійного чи циклічного действия.

Залежно від виду використовуваної енергії ці ПОС поділяються на повітряно-теплові та електротеплові.

Хімічні методи боротьби з зледенінням знайшли широке застосування в пристроях запобігання обледенінню скла ліхтаря кабіни пілотів та повітряних гвинтів.

Термічні системи можуть застосовуватися як для попередження, так і для усунення зледеніння. Робота термічних пристроїв запобігання обледенінню заснована на нагріванні поверхні літака, що захищається, до температури, що виключає можливість її зледеніння.

Залежно від способу захисту поверхонь літака розрізняють електротермічні та повітряно-теплові протизледенні системи. По-перше, як джерело тепла використовують електрику, по-друге — тепле повітря, повітря, змішане з газами, що відпрацювали, або одні відпрацьовані газы. Електротермічний спосіб захисту від зледеніння дозволяє подавати тепло в поверхні, що захищається з перервами. При цьому методі допускається утворення невеликої кількості льоду на поверхні, після чого до цієї поверхні подається тепло, крига підтає і здувається повітряним потоком. Після видалення льоду обігрів припиняється, температура знижується і крига утворюється знову; цей процес повторюється через певний проміжок часу.

У цьому випадку стікання води можна повністю виключити, що дозволяє обмежити площу обігріву зоною осідання води. При циклічному обігріві витрата енергії на обігрів у кілька разів менша, ніж при обігріві безперервної дії.

Захищаються від зледеніння поверхні зазвичай розбивають окремі секції. Секції мають симетричне розташування на лівій та правій частинах крила та оперення. Послідовне і симетричне підключення нагрівальних елементів секцій дає значну економію електричної енергії, що споживається пристроями запобігання обледенінню, так як замість одночасного обігріву всіх секцій обігрівається в кожен момент часу лише частина. На крилі і оперенні, крім секцій, що періодично включаються, можуть бути безперервно обігріваються в умовах зледеніння ділянки, такі, як місця стику секцій і передні кромки, з яких лід не може бути скинутий аеродинамічних сил.

Протиобмерзання передньої кромки крила і оперення являє собою багат шарову конструкцію, спресовану на синтетичному клеї, що складається з

зовнішньої і внутрішньої обшивки, між якими розміщені два склотканинні шари електроізоляції і нагрівальний елемент. Кожен нагрівальний елемент складається з двох латунних контактних шин (плюсової та мінусової), до яких підпаяна сітка з константанового дроту діаметром 0,12-0,15 мм. Конструкція нагрівальних елементів лопастей гвинтів та обтічників втулки гвинтів подібна до конструкції нагрівальних елементів крила. Обігріваний ділянку лопаті гвинта зазвичай становить 15-20% хорди і 50-75% довжини лопаті. Захист від зледеніння кінців лопатей не потрібна внаслідок нагрівання їх від тертя повітря і великих відцентрових сил, що зривають частинки льоду, що утворюються.

Надійний захист від зледеніння забезпечують системи, які використовують гарячий газ чи повітря.

З впровадженням на літаках газотурбінних двигунів отримано потужне джерело тепла, що використовується в системі протиобмерзання.

Джерелами тепла є повітря, що відводиться від компресорів двигуна, або газу, що відпрацювали, що відбираються з входу в турбіну або з реактивного сопла; крім того, можливе підігрів повітря в теплообміннику, встановленому навколо реактивного сопла. Кожен із вищерозглянутих способів забезпечення енергії може негативно вплинути на льотні характеристики літака внаслідок зменшення тяги, збільшення витрати палива або збільшення ваги. Аналіз погіршення льотних даних літака внаслідок застосування тієї чи іншої системи отримання теплової енергії показав, що система відведення повітря від компресора двигуна є більш прийнятною. До переваг такої системи відносяться також простота конструкції та використання чистого повітря без домішок продуктів згоряння. Чистота повітря має важливе значення з точки зору уникнення корозії трубопроводів та конструкції літака виключає, отруєння пасажирів та екіпажу.

1.3 Механічні системи запобігання обледенінню

Механічні ПОС належать до систем циклічної дії. Для їх ефективної роботи необхідне утворення певної товщини льоду. Видалення льоду під час роботи механічних систем запобігання обледенінню умовно можна поділити на два етапи: руйнування льоду чи зменшення зчеплення його з обшивкою та видалення його дією аеродинамічного напору. Остання, очевидно, накладає умову при проектуванні системи запобігання обледенінню – забезпечення максимально допустимої за безпеки польоту товщини льоду. Для кожного типу літального апарату допустима товщина льоду, як правило, визначається при експериментальних продувках моделі. Зазвичай на практиці на несучих поверхнях більшості сучасних літаків допускається товщина льоду $\delta_{\text{л}} = 4 \dots 5$ мм. Сила зчеплення льоду з обшивкою залежить від структури льоду, чистоти обробки поверхні, покриттів, а також від температури навколишнього повітря і може досягати за нормаллю $85 \dots 160$ Н/см².

Пневматичні протизледенні системи є різновидом механічних - це одні з перших систем, які були встановлені на літаках для боротьби з зледенінням.

Пристрій та принцип дії. На поверхні, що захищається, закріплюють тонкий протектор з еластичного матеріалу (різних еластомерів) з вбудованими в нього камерами. Ширина протектора вибирається з умови довжини хорди, що дорівнює або трохи перевищує область уловлювання крапель (для дозвукових літаків, як відомо, вона становить $5 \dots 6\%$ хорди). Залежно від типу літака, розмірів поверхні, що захищається, розрахункової швидкості польоту і допустимої товщини льоду протектор протиобледенителя розбивається на ряд секцій. Вони включаються до роботи відповідно до прийнятої програми (почергова або одночасна робота камер). Кількість камер залежить переважно від ширини протектора і може бути до 10 [3].

До переваг пневматичних ПОС відноситься мала енергоємність системи - невеликий відбір повітря від двигуна, а також мала питома маса всієї системи - близько 30 кг/м^2 .

Недоліками системи є збільшення опору крила приблизно на 5...6% у неробочому стані протектора та на 100...110% у робочому стані. Для зменшення впливу протектора на аеродинамічний опір ЛА бажано його камери розташовувати вздовж хорди профілю. Крім того, до недоліків пневматичних ПОС відноситься досить швидке старіння еластомерів під впливом змінних температур і сонячної радіації, що призводить до розтріскування та руйнування протектора.

Слід зазначити, що поява нових досконаліших еластомерів і малий відбір повітря може вивести такі системи в перспективні.

Електроімпульсна ПОС, розроблена радянським інженером І.А. Левіним, вперше з'явилася як штатна система на літаку Іл-86.

Дія електроімпульсної ПОС (ЕІ ПОС) полягає у створенні в обшивці, що захищається, і шарі льоду, що знаходиться на ній, повторюваних імпульсних силових деформацій, розділених певними часовими інтервалами.

Перетворення електричних імпульсів на імпульси пружних деформацій здійснюється в індукторах вихрових струмів, що є соленоїдами (див. рис.1.4). Надходять з конденсаторних накопичувачів імпульси електроенергії проходять через обмотки соленоїдів і створюють змінне магнітне поле.

Це поле наводить в металевій обшивці агрегату, що захищається, вихрові струми зворотної спрямованості, що викликають пружні деформації в обшивці. Ці деформації викликають у крижаному полі напруги, що перевершують його динамічну міцність. Це призводить до миттєвого руйнування льоду з подальшим його видаленням з поверхні потоком повітря, що набігає. Тривалість імпульсів становить близько 10^{-4} секунд із періодом прямування сигналів – 1...2 с.

Індуктори встановлюються у безпосередній близькості від внутрішньої поверхні обшивки (з мінімальним зазором) у зоні можливого зледеніння.

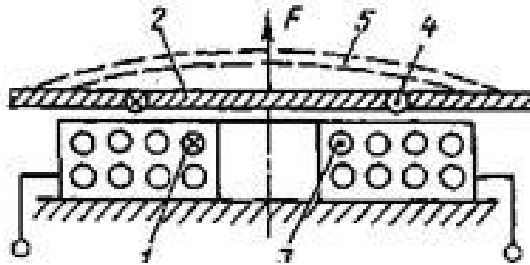


Рисунок 1.4 – Схема робочої частини пневматичного протиобледенителя несучих поверхонь: а) з поздовжніми камерами, що по чергово-наповнюються 3, 4; б) з поздовжніми робочими камерами, що одночасно наповнюються; 1 – працююча секція, 2 – непрацююча секція

ЕІ ПОС перед тепловими системами мають такі переваги:

- потрібна для роботи потужність, що відбирається від двигунів, набагато менше, ніж при тепловій системі;
- суттєво розширюється діапазон температур навколишнього повітря, при якому забезпечується захист від обледеніння;
- ефективність роботи електроімпульсної системи підвищується зі збільшенням товщини шару льоду та інтенсивності зледеніння;
- робота електроімпульсної системи не впливає на характеристики двигунів;
- не потрібно збільшувати потужність електричних генераторів, що встановлюються на двигунах;
- менша пожежна небезпека системи; менше зниження міцності обшивки агрегатів, що захищаються від зледеніння;
- незалежність ефективності роботи системи від режиму роботи двигунів;

- виключається можливість появи "бар'єрного льоду" позаду зони, що захищається, так як при роботі системи лід скидається, а не розплавляється; простота наземної перевірки тощо.

До недоліків цих систем належать:

- велика кількість індукторів, оскільки область їхньої дії обмежена як розмірами індукторів, так і стиками обшивки та елементами силового набору агрегату;

- наявність залишкових льодоутворень у разі, якщо зона уловлювання становить понад 2% хорди по верхній або нижній поверхні профілю;

- необхідність підвищення потужності імпульсу в міру зростання жорсткості конструкції (цим, зокрема, пояснюється той факт, що системи, що розглядаються, не знаходять застосування на легких і середніх літаках).

1.4 Рідинна система запобігання обледенінню

На деяких літаках застосовуються рідинні ПОС для захисту обледеніння лобових частин ліхтаря, блістера штурмана і т.д. У цій системі на поверхню, що захищається, подається рідина, яка або знижує температуру замерзання води, або зменшує силу зчеплення льоду з поверхнею, що захищається для подальшого його видалення зустрічним потоком повітря.

Як робочі рідини застосовуються різні спирти, спиртогліцерінова суміш або рідини на основі гліколей, як правило, мають температуру замерзання близько -60°C . Якість роботи системи багато в чому залежить від способу подачі рідини і рівномірності її розтікання на поверхні, що захищається.

Найбільш широке поширення рідинна ПОС набула захисту обледеніння кабін. Її робота полягає в тому, що робоча рідина подається через колектор на обледеніння та зустрічним потоком забортного повітря розбризкується по склу.

До переваг систем такого типу належать: відсутність залишкових льодоутворень, хороші масові характеристики (багато компонентів системи

виготовляються з полімерних матеріалів), малі споживані потужності, економічне витрачання рідини, великий ресурс, який можна порівняти з ресурсом планера.

Однак рідинні ПОС мають суттєві недоліки:

- час роботи системи залежить від запасу рідини на борту;
- ефективність у разі важкого зледеніння недостатня;
- системи пожежонебезпечні.

Теплові ПОС

В даний час для захисту ЛА від зледеніння найчастіше застосовуються теплові ПОС, які можна підрозділити на дві групи - повітряно-теплові та електротеплові. В основу такого поділу покладено джерело енергії, від якого живиться ПОС. Крім того, в окремих випадках, головним чином для захисту силової установки, застосовуються системи протиобмерзання, що використовують гаряче масло від двигуна.

Незалежно від джерела енергії всі теплові ПОС поділяються на системи постійної та циклічної дії.

При постійному обігріві краплі води, потрапляючи на підігріту поверхню, не замерзаючи, розтікаються по ній, поступово випаровуючись і частково здуваючись потоком, що набігає. Якщо протяжність зони обігріву виявиться недостатньою для повного видалення води, то остання замерзає на межі зони, що обігривається, у вигляді не віддаленого бар'єрного льоду.

Застосування протиобледенювачів постійного обігріву, що повністю випаровують воду, потребує підвищених витрат енергії та пов'язано з необхідністю захисту великих поверхонь. Тому такі системи запобігання обледенінню використовують для захисту тільки тих частин, на яких неприпустиме утворення льоду.

Суттєву економію енергії дає застосування протиобледенювачів циклічного обігріву. У цьому випадку вся поверхня, що захищається,

розбивається на окремі секції, що обігриваються по черзі. На поверхні утворюється крига допустимої товщини, яка при черговому нагріванні секції повинна скидатися. Для того щоб після вимкнення обігріву лід знову не примерзав до поверхні, на передній кромці є вузька смуга, що постійно обігривається. Це так званий "тепловий ніж", який розділяє лід на дві частини, що легко видаляються потоком, що набігає після того, як в результаті нагрівання і підтоплення льоду зсередини різко зменшуються сили його зчеплення з обшивкою. ПОС циклічної дії застосовують для захисту тільки тих поверхонь, скидання льоду з яких не може призвести до небезпечних наслідків. Наприклад, їх не можна застосовувати для захисту вхідних кромок повітрязбірників силових установок.

Відбір повітря від компресора двигуна має свої негативні сторони: збільшуються довжина розбігу і злітна дистанція, знижується скоропідйомність і скорочується дальність польоту ЛА.

Сучасні літаки (особливо пасажирські лайнери), що мають суттєві розміри несучих поверхонь і, відповідно, зони захисту, ПОС безперервної дії вимагають для своєї роботи значних потужностей (сотні кіловат). Це викликає необхідність застосування систем циклічної дії, що дозволяють суттєво скоротити енерговитрати на роботу ПОС. Питома потужність таких систем становить 12...35 кВт/м².

Особливість роботи таких систем полягає в певній періодичності подачі гарячого повітря в окремі секції поверхні, що обігривається. Управління, зазвичай, автоматичне.

Повітряно-теплова ПОС циклічної дії, встановлена на крилі Іл-62, складається з трьох секцій, що працюють по черзі протягом 50 секунд кожна. Коренева частина крила обігривається постійно і утворення льоду не допускається. У конструкції робочої частини підвищення коефіцієнта теплового використання застосовано ежектирование відпрацьованого повітря.

Тепловий спосіб боротьби з зледенінням полягає в нагріванні захищається поверхні агрегату до температури танення льоду або випаровування вологи, що осаджується на неї. Теплові ПОС працюють у режимах постійної чи циклічної дії [4].

Залежно від виду використовуваної енергії ці ПОС поділяються на повітряно-теплові та електротеплові.

У повітряно-теплових системах гаряче повітря для обігріву поверхонь відбирається від компресора двигуна. Температура повітря, що надходить на вхід у робочі частини ПОС не повинна перевищувати 200°C ... 230°C.

В електротеплових ПОС нагрівальними елементами служать паралельно приєднуються до шин металеві дроти з високим електричним опором, металева фольга, а також струмопровідні плівки або тканини.

У системах захисту крила і оперення циклічної дії поряд з секційними нагрівальними елементами в районі передніх кромek цих агрегатів встановлюються металеві смуги, що постійно обігріваються, що отримали найменування «теплових ножів».

Як нагрівальні елементи оглядового скла ліхтарів кабін екіпажу використовуються металеві молекулярні плівки із золота або сплаву золота з вісмутом.

Найбільш широке застосування для захисту крила, оперення та повітрязбірників отримали повітряно-теплові та електротеплові ПОС. Почалося використання електроімпульсних систем. Разом з тим слід зазначити, що застосування повітряно-теплових систем доцільно в тих випадках, коли агрегати, що обігріваються, розташовані недалеко від джерела тепла, так як в іншому випадку створюються труднощі в компонуванні трас і систем регулювання, збільшуються втрати тепла, а також збільшується маса системи.

Захист гвинтів ТГД здійснюється за допомогою електротеплових ПОС.

Для запобігання зледеніння оглядового скла ліхтаря екіпажу знайшли застосування електротеплові ПОС при одночасному обдуві внутрішньої поверхні гарячим повітрям, що запобігає запотіванню. Спільно з тепловим захистом під час посадки літака в умовах дощу або снігопаду може використовуватися рідинна ПОС. При цьому одночасно з подачею рідини здійснюється механічне видалення вологи та снігу за допомогою спеціальних механічних скребків-двірників.

Висновки по розділу

В першому розділі були розглянуті види систем для запобігання обледеніння літака, розглянуто, чим небезпечне обледеніння, та надані аеродинамічні характеристики профілю при зледенінні. Зледеніння крила і оперення дуже впливає на льотні характеристики, стійкість і керованість літака. Спотворення форми і поява нерівностей і шорсткості на поверхні носової частини профілю суттєво впливають на підйомну силу та опір крила.

2 Дослідження використання вуглецевих наноматеріалів в різних полімерних композитних матрицях в якості НЕ

2.1 Дослідження карбонових нанотрубок

Нанотрубка - топологічна форма наночастинок у вигляді порожнистого стрижня нанорозміру.

Вуглецеві нанотрубки - це великий клас різноманітних циліндричних наночастинок, які утворені впорядковано розташованими атомами вуглецю і вздовж осі мають внутрішню порожнину. Атоми вуглецю утворюють у стінках нанотрубок сітки із шестикутників. У вуглецевих нанотрубках, на відміну іншої форми вуглецю — графіту, ці сітки згорнуті в циліндри, рулони чи конуси. Така геометрія і зумовлює характерні властивості вуглецевих нанотрубок.

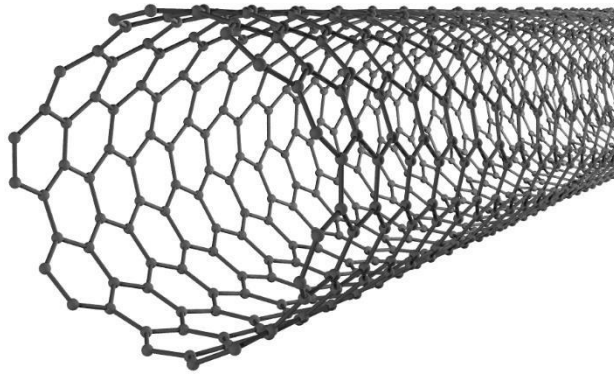


Рисунок 2.1 – Структура карбонових нанотрубок

Застосування нанотрубок дуже широке: електроніка, космічна промисловість, медицина, будівництво. Їх використовують для створення біосенсорів, електронних нанокомпонентів та провідних композиційних матеріалів. У медицині вуглецеві нанотрубки планують застосовувати як переносники лікарських речовин.

Вперше про нанотрубки заявив японський фізик Суміо Ізіма. 1991 року він повідомив про те, що у вуглеці існують дуже тонкі циліндричні утворення. Вчений з'ясував це за допомогою електронного мікроскопа, що просвічує, і описав геометрію і кристалічну структуру нанотрубок вуглецю. Через кілька років після відкриття вуглецевих нанотрубок, були виявлені нанотрубки і в інших сполуках, таких як, наприклад, вольфраму сульфід і нітриду бору [5].

Карбонові нанотрубки (КНТ) вважаються одним із найперспективніших матеріалів у нанотехнології. КНТ — це штучно отримана атомарна структура, що є сукупністю атомів у вигляді трубок з порожниною всередині довжиною до 100 нм і діаметром 1–2 нм. Трубчаста форма має три контактні поверхні: кінці трубок, внутрішня та зовнішня поверхні. У природі вуглець перебуває у двох формах — алмазу та графіту, що відрізняються між собою будовою кристалічної решітки [6].

Особливо актуальним питанням є методи синтезу КНТ. До таких нанотрубок виникає ряд вимог: достатня кількість наноматеріалу для всебічного його вивчення, процес синтезу не повинен займати багато часу та має бути економічно вигідним.



Рисунок 2.2 – зовнішній вигляд КНТ

За останні кілька років вуглецеві нанотрубки перетворилися на значний об'єкт досліджень у галузі нанотехнологій, матеріалознавства та електроніки. Завдяки своїм видатним механічним та електротранспортним властивостям вони стали одним із найпопулярніших вуглецевих матеріалів.

Вуглецеві нанотрубки є циліндричні трубки з атомів вуглецю з внутрішнім діаметром $> 0,9$ нм. Вони використовуються, наприклад, для виробництва польових емітерів з високою емісією кутового струму, наповнювачів при виготовленні композитів або нанорозмірних пристроїв.

Для термообробки вуглецевих нанотрубок потрібні високі температури понад 2000°C для видалення структурних дефектів, таких як металеві домішки та вакансії. Високі температури також необхідні зміни структури самих трубок від одностінної вуглецевої нанотрубки (ОСНТ) до двостінної вуглецевої нанотрубки (ДСНТ) або навіть до багатостінної вуглецевої нанотрубки (МСНТ).

І ДСНТ, і МСНТ набагато стабільніші порівняно зі своїми одностінними аналогами. Структурні зміни для створення багатостінних нанотрубок відбуваються за температури від 2000°C до 2800°C в атмосфері аргону.

Лабораторна вакуумна піч LHTG з нагрівачами та ізоляцією з графіту дозволяє досягти температури до 3000°C і ідеально підходить для цього завдання, якщо в атмосфері допустима наявність вуглецю.

2.2 КНТ як нагрівальний елемент ПОС ЛА

Інженери компанії Battelle розробили на основі вуглецевих нанотрубок унікальну протизледенню систему для літальних апаратів.

Технологія Battelle є спеціальною фарбою, яка нагріває поверхню літака і при цьому споживає зовсім мало енергії, не кажучи вже про економію місця і зручність нанесення на вигнуті поверхні крил і фюзеляжу. Протиобмерзання містить вуглецеві нанотрубки і являє собою суміш зі звичайною фарбою, якою фарбують літаки. Але на відміну від звичайної фарби, покриття від Battelle може

нагріватися, живлячись від бортового генератора літака і таким чином запобігати небезпечному зледенінню [8].

Традиційні протизледенні системи використовують відведення гарячого повітря від двигунів, механічні пристрої (наприклад вібрацією, що збивають крижану кірку), розбризкування токсичних рідин на зразок антифрізу та інші методи, зазвичай дуже складні, дорогі і небезпечні. Крім того, старі протиобледенителі занадто важкі для встановлення на безпілотні літальні апарати, у яких кожен кілограм корисного навантаження цінується на вагу золота.

Нова технологія пропонує простий та ефективний спосіб запобігання утворенню крижаної кірки на літаках. Її застосування дозволить знизити небезпеку попадання льоду в двигун, руйнування обшивки літака, а також підвищить економічність польоту завдяки тому, що не потрібно буде витратити паливо на перевезення намерзлої води.

В даний час фахівці Battelle готують нове покриття до масштабного тестування в аеродинамічній трубі з мінусовою температурою, що імітує політ на висотах. Випробування пройдуть найближчими місяцями, після чого розробники планують отримати додаткове фінансування та вивести готовий продукт на ринок протягом найближчих двох-трьох років.

Підготовка тонкої плівки на глибину до шкіри, товщина якої дуже мала відносно глибини РЧ шкіри (або проникнення), є ключем до мінімізації поглинання РЧ. Глибина шкіри типових металів становить близько мікрометра в частотному діапазоні гігагерц. Як наслідок, звичайним провідним матеріалам (наприклад, металам) дуже важко утворювати плівки великої площі під шкіру.

Плівка графенових нанострічок досить тонка, щоб дозволити передачу радіочастот. Це безметалева, надлегка, міцна та масштабована РЧ-прозора провідна покриття на основі графену може значно зменшити розмір і вартість покриттів проти обмерзання для кришок радіочастотного обладнання. Це важливо для багатьох авіаційних застосувань.

Системи, які подають гаряче повітря для розтоплення льоду з уразливих місць, використовуються десятиліттями, але вони важкі, неефективні та вимагають постійного обслуговування. Вони також потребують більшої потужності при використанні з полімерними композитами, армованими вуглецевим волокном (CFRP), які все частіше зустрічаються для пасажирських літаків (наприклад, Boeing 787 містить >50% вуглецевих волокон).

Дослідники з Університету Королеви в Белфасті починають з малювання «павутини CNT» – безперервної плівки з горизонтально орієнтованих CNT (вуглецевих нано-трубок). Хоча електричний опір полотна має високу провідність уздовж напрямку витяжки, його можна контролювати шляхом накладання окремих шарів. Були виготовлені пакети вуглецевих нано-трубок із 10-40 шарів і затвердили смолою зі скловолокна для забезпечення структурної підтримки, а мідна фольга під'єднала зразки до джерела живлення. Команда також виготовила серію вуглецевого волокна з еквівалентними опорами для порівняння. Було виявлено, що зразки з 10, 20, 30 і 40 шарами полотна вуглецевих трубок мають дуже подібну стійкість до зразків вуглецевого волокна з 4, 8, 12 і 16 шарами відповідно [9].

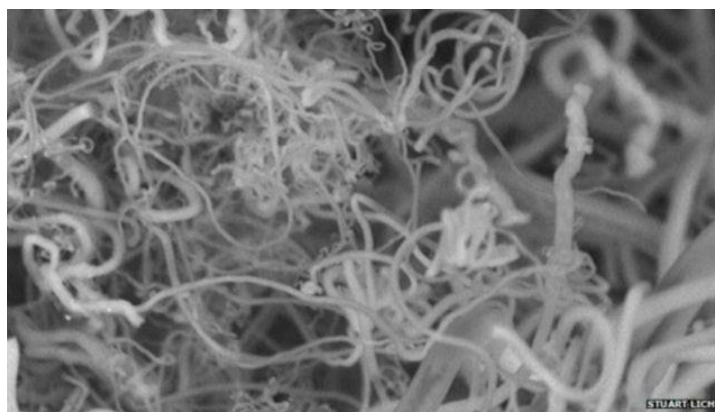


Рисунок 2.3 – карбонове нановолокно

Нагрівачі з вуглецевих трубок досягли вищої швидкості нагрівання та охолодження, ніж еквівалентні обігрівачі вуглецевого волокна – напр. через 30

секунд зразок CNT-40 досяг 95°C , тоді як CFRP-12 досяг 39°C . Це вказує на те, що обігрівачі з вуглецевими трубками можуть позбавлятися від льоду з меншим часом і енергією, ніж нагрівачі вуглецевого волокна. Паки CNT також були значно більш термічно однорідними, ніж CFRP – автори пояснювали це наявністю великого температурного градієнта всередині CFRP через його товщину (CFRP-16 був у десять разів товщі, ніж CNT-40).

Випробування характеристик вуглецевих нагрівачів показали, що половина штабелів CFRP була ефективною, тоді як лише CNT-10 не зміг досягти результатів. Протиобledenіння вимагає додаткової енергії для подолання прихованої теплоти плавлення, і зразки були встановлені вертикально, щоб представляти передні кромки. У змодельованих умовах польоту обігрівач CNT-40 позбавив від льоду випробувану поверхню за 15 секунд, у порівнянні з 25 секундами для найкращого обігрівача з вуглецевого волокна.

В порівнянні з нинішніми найсучаснішими системами, їх CNT-нагрівач володіє незначною вагою, швидким і рівномірним нагріванням, ефективним споживанням енергії.

Вчені з Китаю, Японії та Австралії розробили спосіб зміни хіральності вуглецевих нанотрубок, що дозволяє змінити їх властивості з металевих на напівпровідникові.

Поруч із кількістю шарів одне із основних структурних властивостей вуглецевих нанотрубок — їх хіральність. Вона залежить від того, під якими кутами графенова площина згорнута в трубку, і сильно впливає на властивості трубки. Наприклад, індекси хіральності визначають, якими провідними властивостями має нанотрубка, - металевими або напівпровідниковими. Незважаючи на розвиток способів отримання нанотрубок з певними структурою та властивостями, поки вони залишаються не надто надійними і досить складно отримати велику кількість нанотрубок із певними параметрами.

Група дослідників під керівництвом Йосіо Бандо (Yoshio Bando) з Національного інституту матеріалознавства в Токіо та Дмитра Гольберга (Dmitri Golberg) з Національного дослідного технологічного університету «MICS» розробила метод, що дозволяє змінювати структуру та властивості багатостінних вуглецевих нанотрубок. Вчені вирішили викликати структурні зміни в нанотрубках за допомогою одночасно двох стимулів - нагрівання та механічного навантаження.

Дослідники поміщали в електронний мікроскоп, що просвічує, зразки багатостінних вуглецевих нанотрубок. Нанотрубка приєднувалася до електродів усередині камери мікроскопа, через які на неї подавали мілісекундні електричні імпульси, що викликають її нагрівання, а зонд скануючого тунельного мікроскопа допомагав розтягувати нанотрубку з певною напругою. Оскільки завданням вчених було з'ясування впливу нагрівання та механічного навантаження на хіральність, вони визначали її за допомогою вимірювання діаметра трубки та визначення дифракційних ліній певних шарів перпендикулярних до осі трубки.

Під час експериментів вчені прикладали електричні імпульси до нанотрубки, під час яких верхні шари послідовно сублімувалися, завдяки чому вдалося отримати з багатошарової одношарової нанотрубки. Крім того, їм вдалося досягти зміни хіральності двошарових нанотрубок та зміни властивостей зовнішнього шару з металевих на напівпровідникові.

Щоб зрозуміти, як саме відбувається зміна структури, дослідники провели симуляцію цього процесу. При розтягуванні на 8,5 відсотка та температурі близько двох тисяч кельвінів (1727 градусів Цельсія) у нанотрубці утворюється дефект Стоуна — Уейлса, який є розташованими поруч п'яти- і семичлені кільця з вуглецевих атомів. Оскільки при цьому орієнтація вуглець-вуглецевих зв'язків порушується, початковий дефект при подальшому збільшенні навантаження на трубку виступає як центр утворення нових дефектів Стоуна — Уейлса і

складніших, у тому числі з восьмичленних вуглецевих кілець. Згодом ці дефекти починають ковзати по трубці та змінювати її діаметр хіральності, що й спостерігалось під час експериментів [10].

Нещодавно група вчених із США та Ірану за допомогою комп'ютерного моделювання передбачила можливість формування всередині вуглецевих та борнітридних нанотрубок діаметром близько одного нанометра впорядкованої водної структури з циліндричною геометрією.

Вчені розпочали розробку супергідрофобного покриття для захисту літака від зледеніння. Покриття відштовхуватиме вологу і захищатиме поверхню техніки від льоду завдяки унікальній структурі «стовпчиками». Матеріалом послужить, швидше за все, кераміка через високу твердість та інертність (ні з чим не вступає в реакцію і зберігає температуру).

Таке покриття для літаків сприяє поліпшенню системи протиобмерзання, і про зледеніння можна буде забути.

Висновки по розділу

Було розглянуто карбонові нанотрубки як нагрівальний елемент і можливість застосувати технологію для впровадження у авіацію. В порівнянні з нинішніми найсучаснішими системами, КНТ-нагрівач володіє незначною вагою, швидким і рівномірним нагріванням, ефективним споживанням енергії.

3 Порівняння характеристик іноземних аналогів вуглецевих композитних матеріалів, оптимізація складу досліджуваного композиту та переваги їх впровадження

3.1 Порівняння характеристик іноземних аналогів

Співставлено характеристики різних матеріалів для нагрівальних елементів, включаючи КНТ, графен, вуглецеве волокно, шар рідкого металу, електро-провідний текстиль та константановий провід. Деякі з цих матеріалів: металеві шари та проволоки - занадто важкі та навіть несумісні із композитними матеріалами самих ЛА та БПЛ. Електро-термічні нагрівні елементи з вуглецевими наноматеріалами для протиобліднювальних систем – це дуже приваблива альтернатива металу, так як вони сумісні із карбоновою матрицею ЛА та виступають потенційними «претендентами» зробити свій внесок в покращення структурних властивостей матеріалу.

Тепло- і електропровідні властивості НЕ з вуглецевими наноматеріалами залежать від типу застосованих наноматеріалів, їх концентрації в основному полімерному матеріалі та технології виготовлення НЕ.

Металевий шар (Boeing 787)

Електричне розморожування споживає більше електроенергії, ніж зазвичай отримується від генераторів. Тому електричне видалення льоду стає можливим, лише якщо електроенергія використовується протягом обмежених інтервалів часу для розплавлення льоду і відокремте його від крила. Потім повітряний потік просто відносить лід, що уникає необхідності додаткова потужність для розтаплення або навіть повного випаровування льоду. Крижані плити, що утворюються на крилі, можна переносити повітряним потоком, якщо плити відокремлені одна від одної.

На прикладі Boeing 787 виведено агреговані загальні технологічні параметри (k-фактори).

Застосування цих оцінок k-факторів потужності Boeing 787 для інших подібних літаків значно спрощено.

Без власних експериментальних результатів для перевірки метод зрештою калібрується на основі висновків опубліковані в літературі.

Виходячи з розрахунків, наведених у цьому документі, Boeing 787 потребує 3,61 кВт/м² для захисту від льоду. Загальна необхідна встановлена потужність для Boeing 787 з електричною системою антиобледеніння (і технології як описано) становитиме 75,8 кВт, що добре узгоджується з опублікованим діапазоном потужності від 45 до 75 кВт [11].

Constantan wires

Зразки електротермічної протижеледної системи з композиту CFRP і SMF були виготовлені з мідним екраном, шарами скловолокна, SMF і вуглецевого волокна шарів, як показано на рис 3.1.

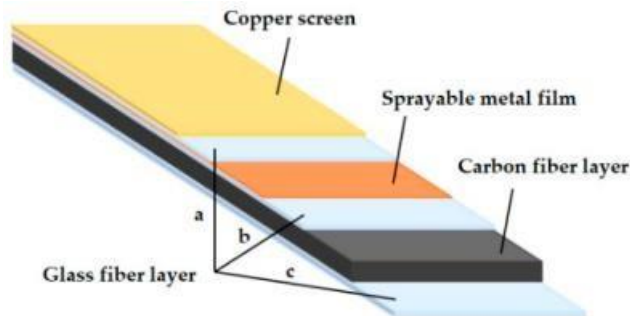


Рисунок 3.1 – Схематичне розміщення зразка: (a) для ізоляції між мідним екраном і розпилюваним металевим плівкою; (b) для ізоляції між металевим плівкою, що напилюється, та шаром вуглецевого волокна; (c) для ізоляції між шаром вуглецевого волокна та зовнішньою стороною

Розроблено мідний екран із кількістю сіток 10 для захисту від ударів блискавки та паразитних електричних струмів. SMF, з якого було зроблено Сплав Cu-Mn був нанесений всередину зразка як нагрівальний елемент через метал технологія термічного напилення від United Coatings Technologies (Пекін,

Китай) Co., Ltd виявлено, що плівка, яка утворювала покриття зі сплаву, що містить 79,10% Cu та 20,90% Mn, має товщину 100 мкм (± 5 мкм) після осадження. Як видно з рисунка 3.1.2, SMF був близький до верхньої поверхні замість середини в напрямку товщини, що може зменшити термічний опір і підвищити ефективність теплопередачі в процесі захисту від зледеніння.

Шари вуглецевого волокна з послідовністю укладання (45/-45/0/90/45/0/90/-45/0) були відформовані автоклавною обробкою (максимальна температура затвердіння: 200 °C) для покращення міцності конструкції зразка. Для покращення електричної ізоляції між SMF та інші шари, шари скловолокна були розміщені з послідовністю укладання (0/90) між SMF і шарами вуглецевого волокна [12].

Композиційні матеріали та обробка технології були надані Aerospace Haiying (Zhenjiang, Китай) Special Materials Co., Ltd. Технічні характеристики матеріалів наведені в табл 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики матеріалів для дослідження

Матеріал		Товщина, мм	Позначення
Мідний екран		0,3	CMS-AD-107-II-2-B-022
Середній екран	a	0,2	CMS-CP-313-I-4-120
	b	0,2	
	c	0,4	
SMF		0,1	Cu-Mn alloy
Шари вуглецевого волокна		2,34	CMS-CP-306-35-1-130

На рисунку 3.2 показано розміри зразків, які були визначені стандарти. Зона затиску знаходиться на кінці зразка та навантаженні область знаходиться в

середині зразка. Зразок на малюнку 3.2а використовувався при температурі і статичні випробування на розтяг, тоді як зразок на малюнку 3.2б з отвором $\Phi 6$ мм у центрі використовувався в термічних і механічних циклічних випробуваннях. Схема SMF відображається в

Рисунок 3.2с, який трохи подовжений у вигляді електродів на краю зразка.

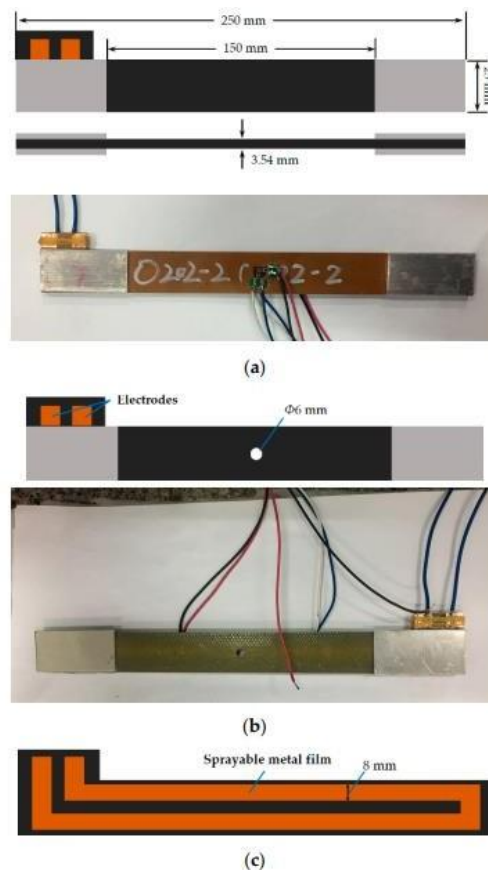


Рисунок 3.2 – Розміри зразків: (а) зразок, що використовується для температурних і статичних випробувань на розтяг; (б) зразок, що використовується в термічних і механічних циклічних випробуваннях; (с) контур металевої плівки, що розпилюється

Результуючий час на термічний цикл становив приблизно 2 хв. Температура зразка зросла від -55 до 80 °C, а потім впала до -55 °C. Хоча напружуватися не стало сильно змінюється в теплових циклах, він все ще мало

велике значення, коли температура досягала 80 °С, це означає, що зразок мав незначну деформацію під час циклічного випробування.

Початкові опори становили 8,29, 8,36 і 8,23 Ом відповідно. Як число циклів збільшився, електричний опір мав тенденцію до підвищення. Після 1000 термічних циклів, опори стали 9,58, 9,73 і 9,94 Ом. Максимальний приріст склав близько 20%.

Оскільки опір збільшується на 20%, потужність нагріву знижується на 16,67%, що погіршує продуктивність електротеплова антиожеледна система. Жодних візуально виявлених дефектів після термічної обробки не виявлено циклів у зразках. Крім того, результати ультразвукового С-сканування показали, що там не було ні розшарування, ні пор до і після термічних циклів. У ньому зазначено, що погіршення теплових характеристик передувало руйнуванню конструкції.

Electroconductive textile

Описано попередню оцінку нового електротермічного пристрою проти зледеніння/розморожування для композитних аероструктур з вуглецевого волокна. Нагрівальним елементом є електропровідний текстиль на основі вуглецю (ЕСТ) від Gorix. Електричне замикання між конструкційними вуглецевими волокнами та ЕСТ було пом'якшено шляхом включення ізоляційного шару, утвореного зі скловолоконних шарів або полімерної плівки. Лабораторна програма випробувань на захист від зледеніння та зледеніння продемонструвала, що пристрої з плівковою ізоляцією мають кращу продуктивність, ніж пристрої з ізоляцією зі скловолокна. Здатність до нагрівання після пошкодження від удару зберігалася до тих пір, поки тканина ЕСТ не була порушена настільки, щоб викликати електричне замикання. Показано, що модифікований структурний ремонт шарфа відновлює нагрівальну здатність пошкодженого зразка.

У підході, дослідженому в цьому дослідженні, використовується карбонізований електропровідний текстиль (ЕСТ), виготовлений компанією Gogix, який легко драпірується та легко відповідає складній геометрії. Він вбудований у зовнішню поверхню ламінату з вуглецевого волокна, що забезпечує дві основні переваги. Перший полягає в тому, що потреба в електроенергії для досягнення бажаної температури поверхні менша, ніж у випадку, якщо електропровідний нагрівальний елемент вбудовано глибше в композитний ламінат з вуглецевого волокна.

Графен Spray-покриття

Нагрівальні шари проти зледеніння часто використовуються в кришках великого радіочастотного (РЧ) обладнання, такого як радар, для видалення льоду, який може пошкодити конструкції або зробити їх нестабільними. Як правило, протиобледні засоби виготовляються з використанням металевого каркаса та неорганічного ізолятора; комерційні резистивні нагрівальні матеріали часто непрозорі для радіочастотних хвиль. Підготовка тонкої плівки на глибину під шкіру, товщина якої є дуже малою відносно глибини шкіри РЧ (або проникнення), є ключем до мінімізації поглинання РЧ. Глибина скін-сфери типових металів становить близько мікрометра в діапазоні частот гігагерц. Як наслідок, звичайним провідним матеріалам (таким як метали) дуже важко утворювати плівки великої площі під поверхнею. Ми розкриваємо новий композит протиожеледного нагрівального шару, виготовлений з використанням графенових нанострічок (GNR). Ми демонструємо, що плівка GNR досить тонка, щоб забезпечити радіочастотну передачу. Це безметалеве, надлегке, міцне та масштабоване радіочастотне прозоре провідне покриття на основі графену може значно зменшити розмір і вартість антикризових покриттів для кришок радіочастотного обладнання. Це важливо в багатьох авіаційних і морських програмах. Це демонстрація ефективності та застосовності GNR для забезпечення продуктивності, недосяжної звичайними матеріалами.

Повідомляється, що провідні плівки, виготовлені з гексадецильованих графенових нанострічок (HD-GNR), можуть мати високу прозорість для радіочастотних хвиль навіть за дуже високої щільності падаючої потужності. Було виявлено, що плівки HD-GNR нанорозмірної товщини з площею в кілька квадратних сантиметрів передають до 390 Вт ($2 \times 10(5) \text{ Вт/м}^2$) потужності РЧ з незначними втратами, при коефіцієнті радіочастотного пропускання $\sim 99\%$. Плівки HD-GNR відповідали теорії електромагнітної глибини, яка фактично враховує передачу радіочастот. Плівки HD-GNR також продемонстрували достатню оптичну прозорість для застосувань із затемненим склом із ефективним видаленням поверхонь під дією напруги. Дисперсія HD-GNR, що забезпечується їх краєвою функціональністю, дає змогу наносити покриття за допомогою розпилення, обертання або леза майже на будь-яку підкладку, таким чином полегшуючи гнучке, конформне та великомасштабне виробництво плівок. На додаток до використання в антенах і обтічниках, де РЧ-прозорість має вирішальне значення, ці можливості сприяють використанню плівок HD-GNR в автомобільному та загальному застосуванні скла, де потрібні як оптичні, так і РЧ-прозорі [13].

Дисперговані КНТ

Були виготовлені мезо/макропористий папір з вуглецевих нанотрубок і самонагрівуючий армований волокном полімерний композит КНТ/скловолокно/епоксид на основі мезо/макропористого КНТ [14]. Діаметр пор в основному розподіляється від 30 до 90 нм, що характеризується за допомогою ізотерм адсорбції азоту при 77 К. Електропровідність композиту КНТ і епоксиду становить 77,8 і 64,9 См^{-1} . Ефективність електричного нагріву епоксиду досліджували при різних густинах теплового потоку, швидкості вітру та температурі навколишнього середовища. Рівномірний розподіл температури спостерігався на поверхні епоксиду, виявлений інфрачервоною температурною камерою. Ефективність електричного нагріву була перевірена шляхом видалення

певної кількості льоду з різною щільністю теплового потоку за двох видів навколишнього середовища: -22°C без вітру та -22°C зі швидкістю вітру 14 м/с. Час розморожування за двох умов становив менше 220 і 450 с відповідно. Техніко-економічна ефективність протиожеледної роботи була продемонстрована серією експериментів, і результати вказують на те, що цей матеріал є перспективним кандидатом як електричний нагрівальний матеріал для розморожування.

Вирівняні КНТ

Високо вирівняні полотна КНТ з площинною щільністю $0,019 \text{ г/м}^2$, вироблялися прям креслення «лісів» КНТ, вирощених шляхом хімічного осадження з парової фази, для формування провідного нагріву елемент. Згодом вони були вставлені між попередньо затверділими шарами односпрямованого вуглецю волоконно-армований полімер і електро- і теплопровідність комбінованої системи були оцінені за різних умов затвердіння [15]. Контрольні композитні зразки, затверділі під високим тиском продемонстрували вищу об'ємну частку волокна, а також вищу електричну і теплопровідність. З додаванням одного 20-шарового полотна КНТ, електричної провідності зросла на 25%, коли вирівнювання полотна КНТ було перпендикулярним до вирівнювання волокон і на 15%, коли вирівнювання полотна КНТ було паралельним волокнам. Крім того, три досліджено типи розподілу міжшарових КНТ. Через пошиття тиск, вуглець укладання волокна та прошарку з КНТ, була отримана ефективна електротеплова система, яка могла бути розгорнутим як частина системи захисту від льоду на літаках.

Таблиця 3.2 – Порівняння іноземних аналогів композиту з КНТ

Матеріал	Коментар	НЕ	Товщина (μm)	Sheet resistance (Ω sq-1)	Power density (kW/m ²)	Швидкість нагріву (°C /s)	Інтервал нагріву (°C)
Metal layer (Boeing787)	Hand spray	GF fabric + CF/epoxy prepreg	-	-	3.6-11.8	-	24
Constantan wires	From Omega	GF/epoxy prepreg	250	-	5.0-8.3	-	27-82
Electroconductive textile	From Gorix	Resin film + insulating polymer	-	70-92.5	0.3-1.2	~0.1	10-37
CF (Карбонове волокно)	Шар в одному напрямі	GF/epoxy prepreg	283-4620	15.8-264.5	0.4-6.5	0.2-0.7	15-132
Графен	Spray-покриття	Поліуретан, покритий поліімідом	0.1-0.2	1020-4970	3.9	-	-
Дисперговані КНТ	відфільтрована суспензія	Ероху + GF(стекловолокно)	70	4	0.4-3.7	0.8	10-100
Вирівняні КНТ	Паралельно поверхні	Ероху film	80	5.9-12.8	0.3-1.3	-	4-14
Вирівняні КНТ	намальовані (Directly drawn)	GF/epoxy prepreg	6-24	20.9-76.0	1.3-4.9	0.9-2.6	54-140

3.2 Оптимізація складу композитного матеріалу

Епоксидні смоли як органічні мають високу міцність, хорошу жорсткість, хорошу термічну стабільність, відмінну термо-, вологостійкість і хімічну стійкість; отже, вони застосовуються у сфері покриттів, адгезивів, лиття, заливки, композитів, ламінатів та інкапсуляції напівпровідникових пристроїв. Крім того, використання графену як провідного нанонаповнювача при виготовленні графену/епоксидні нанокompозити привернули інтерес в аерокосмічній сфері. Графен/епоксидні композити з покращеною електропровідністю використовуються в системах захисту від обмерзання в літаках.

Графен виявився дуже успішним у перетворенні електричної енергії в теплову енергію в так званому електротепловому ефекті (джоулеве нагрівання), що дозволяє вченим створювати новий композитний шар нагрівача проти обледеніння, виготовлений із плівок графенових нанострічок, які використовуватимуться в системах захисту від льоду. Протягом двох десятиліть проводилися значні дослідження щодо додавання матеріалів на основі вуглецю, таких як вуглецеві нанотрубки (КНТ), в епоксидні матриці з метою покращення електричних, механічних і термічних властивостей композитів. Незважаючи на досягнутий успіх цих вуглецевих матеріалів у покращенні електричних властивостей епоксидної смоли, вони мають багато недоліків, які ускладнюють їх використання в багатьох сферах застосування.

Графенові листи можна отримати недорого шляхом масового виробництва порівняно з КНТ, і вони також можуть надати досить високу електропровідність полімерним композитам при низькій концентрації порівняно з технічним вуглецем. Таким чином, графенові нанопластинки (КНП) стали цікавим кандидатом як нанонаповнювач для цих полімерних матриць.

Графен/епоксидні композити вже показали багатообіцяючі результати для створення електропровідних композитів. Електричний струм викликає джоулевий ефект нагріву, або самонагрівання, у наноармованих полімерах; це

нагрівання можна використовувати для різних застосувань, таких як антиожеледні покриття. Вчені розробили нові низьковольтні нагрівачі для захисту від обледеніння на основі плівки з ультратонких провідних графенових нанострічок, що забезпечує низький опір листів, вищу теплопровідність і чудове поширення тепла з рівномірним розподілом температури. Композитна плівка з графену/епоксидної смоли, отримала чудові характеристики електричного нагріву, такі як швидка реакція на температуру, висока ефективність використання електроенергії та стабільність роботи за прикладених напруг.

Монетта та ін. (2015) підготували систему покриття графен/епоксид, додавши нанопластівці графену в епоксидну смолу на водній основі. Результат показує покращення електричних властивостей композиту та покращену стійкість до корозії. Раджі та ін. (2016) виготовили провідний композит із пакетів графенових нанострічок (GNR) та епоксидної смоли.

Крім того, вчені використовували графен або вуглецеві нанотрубки для модифікації епоксидного композиту, посиленого вуглецевим волокном, щоб покращити та підвищити електро- та теплопровідність, щоб відкрити можливості для використання в якості нагрівача для очищення поверхонь літаків. Електропровідність покращується та збільшується на 145%, коли до CFRP додають графенові нанопластилини або вуглецеві нанотрубки. Але електропровідність CFRP збільшується на 257%, коли наночастинки срібла додаються до CFRP; однак використання срібла додасть більшої ваги композиту, а це не є кращим в авіації.

Дослідники також повідомили про ефективні синергічні ефекти графенових нанопластин і КНТ на підвищену електропровідність епоксидних композитів, що пояснюється утворенням більш ефективної перколюючої мережі наночастинок. На додаток до цього, вбудовування гібридів КНТ і графенових нанопластин у первинні епоксидні смоли продемонструвало відмінну продуктивність електричного нагріву в температурному відгуку, електричну

енергоефективність і циклічну роботу нагрівання-охолодження при заданих прикладених напругах, а також краще міжфазне зчеплення між вуглецевих наповнювачів і матриці, що призводить до значного підвищення ефективності передачі навантаження. Провідні графенові композитні плівки повинні бути надзвичайно міцними з хорошою адгезією до нагрітої поверхні, така плівка має бути легкою та дешевою, з фізичними характеристиками, які дозволяють їй покривати великі вигнуті поверхні.

Є багато патентів на використання електропровідних графенових композитів як нагрівача елемента проти обледеніння в літаках, вчені винайшли графенову/епоксидну електротермічну плівку, яка вирішила б проблему обледеніння без загальних недоліків; це безпечна робоча напруга, висока ефективність термічного перетворення, висока теплопровідність, швидка реакція та висока міцність.

Наприклад, Li et al. (2014) і Бертон та ін. (2016) описали конфігурації для забезпечення рівномірного розподілу тепла резистивних нагрівачів. Ця конфігурація дозволяє успішно захищати від зледеніння та зледеніння з відносно низькою прикладеною потужністю. Також Karim et al. (2018) і Lui і Hui (2016) змішали графенові нанопластинки з полімерною смолою. Потім смола наноситься на поверхні літака, забезпечуючи щільну оболонку навколо всіх компонентів літака. Коли лід захоплюється частиною літака, ця частина (або весь зовнішній вигляд літака) може нагріватися, пропускаючи електричний струм через провідну оболонку. Запропонована концепція поєднання супервідштовхування з електротермічним нагріванням може забезпечити нову стратегію для вирішення проблем, пов'язаних з утворенням льоду. Тур та ін. (2016) і Matsubayashi et al. (2016) винайшли електропровідні супергідрофобні покриття для запобігання або зменшення утворення льоду на поверхні літака шляхом відштовхування води від поверхні. Було продемонстровано чудові

водовідштовхувальні властивості та ефективну здатність до нагрівання, створювану шляхом подачі напруги через поверхню провідної плівки [19].

Нова розумна система складається з бістабільних композитних структур, перевагами яких є легкість і багатофункціональність. Приведення в дію бістабільної оболонки може бути для системи видалення льоду, де зміна форми може відокремити шар льоду на поверхні літака. Бістабільні композитні структури мають два різні типи стабільних конфігурацій («Стан-I» і «Стан-II»), як показано на рис. 3.3.

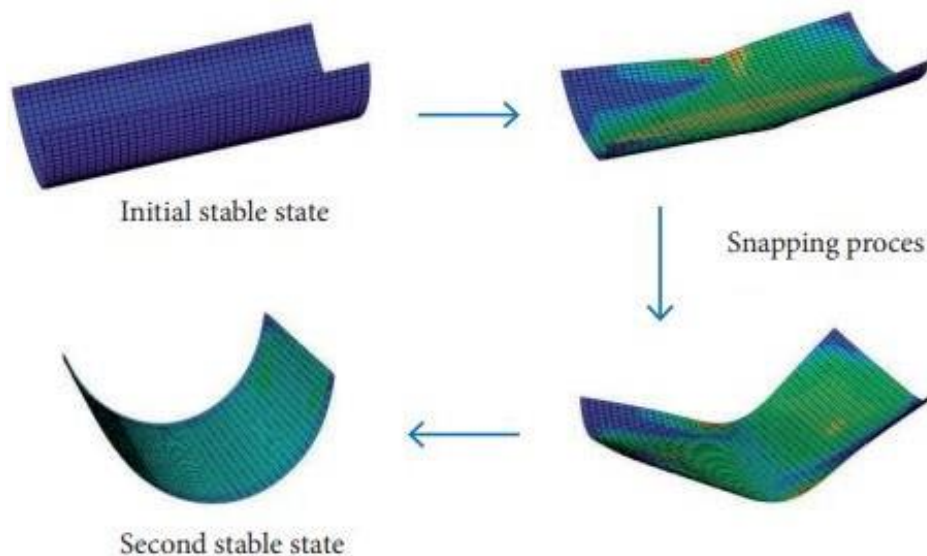


Рисунок 3.3 – Два різних типи стабільних конфігурацій

Ці структури можна змінювати з однієї стабільної форми на іншу за допомогою зовнішньої активації, щоб викликати перехід між станами або зміна форми в одному стані, як-от температурні поля, механічні сили, п'єзоелектричні матеріали та електромагнетизм.

Такі ламінатні конструкції знаходять цікаві застосування, такі як зміна форми, збір енергії та видалення льоду. Бістабільні композитні структури зазвичай виготовляються з композитів з вуглецевого волокна або матриці скловолокно/смола; отже, механічні властивості бістабільних композитних

структур чутливі до коливань температури навколишнього середовища, вологи та часу навантаження. Коли бістабільні структури піддаються дії поля температурного градієнта, тоді можна перейти до іншої стабільної конфігурації.

Системи захисту від зледеніння та зледеніння, які включають бістабільні композитні структури з супергідрофобною поверхнею та електротермічним пластиром показано на рис. 3.4. Супергідрофобна поверхня зменшує адгезію льоду до обшивки літака. Електротермічний патч забезпечує привідну силу для бістабільного композиту, щоб змінити його форму та передати теплову енергію. Результати показують, що продуктивність системи є ефективною в системах проти зледеніння та зледеніння при роботі за дуже низьких температур. Лід на поверхні конструкцій повністю розтоплюється шляхом нагрівання бістабільних конструкцій. Було виявлено, що після процесу промивання бістабільної структури на поверхні літака не залишається води.

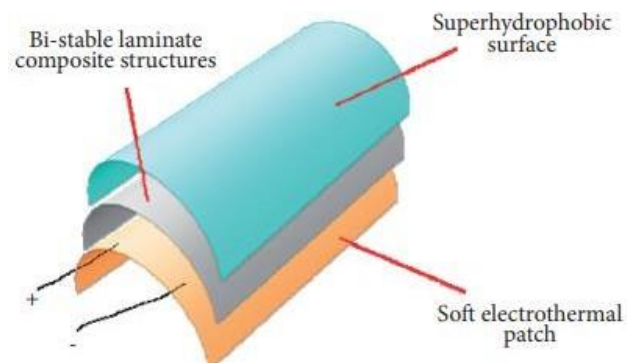


Рисунок 3.4 – Принципова схема системи проти обледеніння

З іншого боку, вчені підготували функціонально сортовані матеріали (ФСМ), які мають чудові механічні властивості та стійкість до навколишнього середовища. ФСМ розроблені зі зміною властивостей залежно від об'єму сипучого матеріалу. ФСМ виготовляються з різними властивостями, які включають зміну хімічних властивостей, механічних, магнітних, термічних та електричних властивостей.

Варіація властивостей ФСМ може зменшити термічні напруги, залишкові напруги та концентрації напруг, виявлені в композитах. Градація ФСМ у властивостях матеріалу спонукає дизайнерів адаптувати реакцію матеріалу для задоволення потреб дизайну.

Змінюючи об'ємну частку вуглецевого волокна в епоксидному композиті з вуглецевого волокна, отримують ламіновану оболонку з функціонально сортованого матеріалу, яку можна використовувати в літаках, таких як процес видалення зледеніння, де можна отримати необхідні електро- та теплопровідність, необхідні для ефективного видалення зледеніння.

Властивості матеріалу цього типу оболонки ФСМ постійно змінюються разом із компонентами матеріалу вздовж напрямку товщини. Нещодавно дослідники використовували вирівняну мережу вуглецевих нанотрубок для створення системи захисту від обледеніння поверхонь літаків. Полотно з вуглецевих нанотрубок (КНТ) — це горизонтально орієнтована безперервна плівка, отримана шляхом малювання лісів КНТ з контрольованим діаметром і довжиною, отриманих методом хімічного осадження з парової фази.

Полотна КНТ мають високу електропровідність у напрямку малювання, отже, електричний опір КНТ ламінату можна легко змінити, змінюючи кількість шарів. Тому полотно КНТ було використано як електротермічний нагрівальний елемент для захисту від зледеніння та зледеніння композитних конструкцій.

Вирівняний нагрівач CNT-web-web-heater має незначну вагу, швидкий і рівномірний нагрів, економічне споживання енергії, сумісний з CFR і може бути налаштований як з точки зору форми, так і продуктивності відповідно до будь-якої поверхні та вимог до потужності для досягнення швидкого видалення зледеніння. Яо та ін. (2018) досліджували вдосконалені системи захисту від зледеніння та зледеніння, виготовлені з добре вирівняних полотен вуглецевих нанотрубок. Результати показують, що ламінат з вуглецевого волокна з шарами полотна КНТ успішно захищав від зледеніння та зледеніння. Кожна ефективність

захисту від зледеніння/зледеніння перевіряється. Для боротьби з льодом, при постійному електроживленні, ламінат, який має 40 шарів полотна КНТ, може видалити накопичений лід протягом 15 секунд.

Висновки по розділу

Було розглянуто іноземні композити з карбонових нанотрубок, такі як Карбоновое волокно, графен, Дисперговані КНТ, Вирівняні КНТ. Були наведені порівняльні характеристики.

4 Розробка конструкції НЕ ПОС щодо заміни діючого нагрівального елемента на композит з вуглецевими наноматеріалами

4.1 Різновид конструкції композиту з КНТ

Було проаналізовано дослідження іноземного аналога та його оптимізацію. У цьому дослідженні була розроблена система термічного розморожування/попередження зледеніння поверхонь літаків з використанням гнучкої графенової плівки/паперу. Він був розміщений між двома шарами пластику, армованого вуглецевим волокном (CFRP). Гнучкий нагрівальний папір має високі механічні та термічні властивості та потребує до дев'яти разів менше електроенергії, ніж поточні відомі термічні системи нагрівальних колодок для досягнення розморожування. Температуру поверхні контролювали, змінюючи споживану потужність. Це дозволяє контролювати час розморожування, який можна налаштувати менш ніж за 10 хвилин. Техніко-технічне виконання ефективності розморожування було продемонстровано за допомогою серії експериментів, і результати показують, що розроблений метод може бути дуже багатообіцяючою стратегією електричного опалення, здатною підтримувати легкість, ефективність у розморозці та зменшити вплив на навколишнє середовище видалення льоду, що здійснюється через забруднюючі рідини.

Результати, пов'язані з характеристикою електричного нагріву графенової плівки/паперу, представлені на рис. 4.1. Зв'язок між часом і температурою для різних густин теплового потоку при 22°C і -32°C показаний на рис. 4.1 і 4.2 відповідно. Збільшення першої зони на рис. 4.2, що відповідає прямокутній області, виділеній чорним периметром, висвітлюючи лише температури, що дорівнюють або менше 5°C.

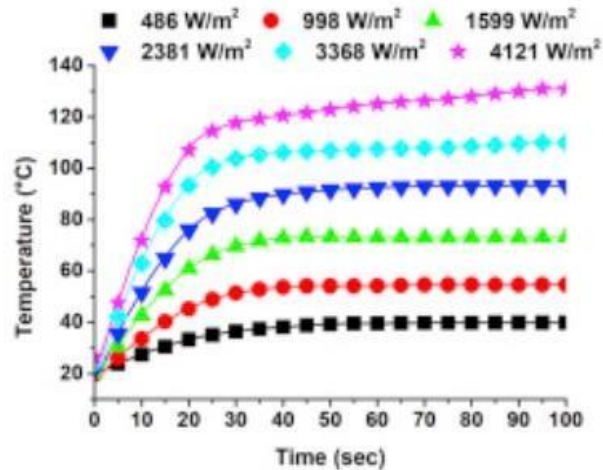


Рисунок 4.1 – Зв'язок між часом і температурою при різних густинах теплового потоку для плівки/паперу при температурі навколишнього середовища 22°C

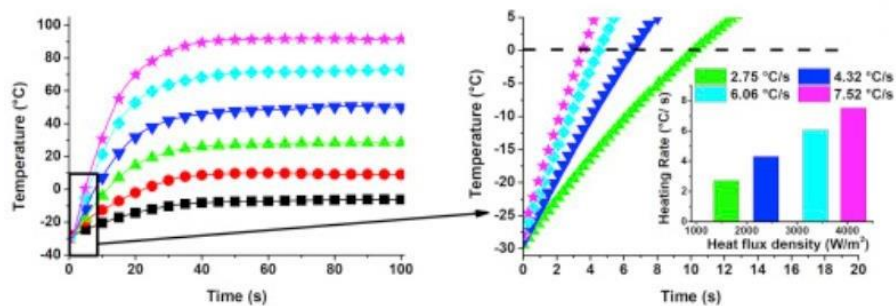


Рисунок 4.2 – Зв'язок між часом і температурою при різних густинах теплового потоку для плівки/паперу при температурі навколишнього середовища -32°C

Зокрема, дані, показані на рис. 3.2.1 і 3.2.2, були зібрані, починаючи з двох різних температур -30°C і 22°C , під різним струмом від 0,4 А до 1,4 А (інтервал 0,2 А), що відповідає густині теплового потоку 486 , 998, 1599, 2381, 3368 і 4121 Вт/м² відповідно. З графіків видно, що температура поверхні спочатку швидко зростає, а потім досягає плато, що відповідає рівноважним температурам на поверхні зразка. Рівноважна температура зразка поступово зростає зі

збільшенням щільності теплового потоку, і час, необхідний для досягнення рівноважної температури, поступово збільшується.

На початку температура різко швидко зростає через високі властивості провідності графенової плівки. Згідно з рис. 4.1 і 4.2, очевидно, що рівноважна температура поступово зростає при різних густинах теплового потоку, а швидкість нагрівання прискорюється зі збільшенням густин теплового потоку від 456 до 4121 Вт/м².

Висока швидкість нагрівання означає, що графенова плівка/папір підходить для видалення льоду, оскільки, як правило, електричні нагрівальні матеріали для видалення льоду повинні досягти високої температури за короткий період часу. Для всіх кривих рис. 4.1 і 4.2 на початковій частині спостерігається лінійний тренд. Діапазон лінійності залежить від щільності теплового потоку. Наприклад, враховуючи температуру навколишнього середовища -32°C для густини теплового потоку вище 1599 Вт/м², температурний тренд від часу є лінійним принаймні до температури поверхні 5°C (рис. 4.2). У цих умовах можна визначити реальну швидкість нагріву за нахилом відповідних кривих.

Як описано раніше, на рис. 4.2, швидкість нагрівання показана для різних густин теплового потоку та може бути оцінена до діапазону температур на 5°C вище, ніж температура замерзання 0°C (це коливається від 0°C до 5°C), умова, за якої виникає явище розморожування. Швидкість виявилася дуже високою: від мінімуму $2,75^{\circ}\text{C}/\text{с}$ для щільності теплового потоку 1599 Вт/м² до максимуму $7,52^{\circ}\text{C}/\text{с}$ для щільності теплового потоку 4121 Вт/м². У будь-якому випадку температура 0°C була досягнута за 10 с.

Рис. 4.2 показує, що температура навколишнього середовища впливає на температуру рівноваги. Для кожної даної щільності теплового потоку рівноважна температура приблизно збільшується приблизно на 40–45 $^{\circ}\text{C}$. Цей останній температурний розрив майже еквівалентний різниці між двома температурами навколишнього середовища -32°C і 22°C . Для перевірки та

підтвердження того, що отримана графенова плівка/папір може бути альтернативою відомим тепловим системам із нагрівальними подушками опору, нижче наведено порівняння між нагрівачем із силіконової гуми та графеновою плівкою/папером (див. таблицю 4.1).

Таблиця 4.1 Залежність досягнутої температури від щільності поданого струму

Зразок	Температура навколишнього середовища (°C)	Щільність теплового потоку (Вт/м²)	Потужність (Вт)	Досягнута температура (°C)	Час досягнення температури (34°C) (с)	Температура, досягнута за 90 с (°C)
Плівка/папір	-32	2548	132	34	38	54
Плівка/папір	-32	3689	190	34	12	76
Плівка/папір	-32	4542	234	34	10	91
НЗСГ	-0,5	23250	1233	34,4	90	34,4

Порівняння проводилося на поверхні площею 0,052 м², на якій нагрівач із силіконової гуми потребує 1233 Вт або 23250 Вт/м² [16], щоб підняти температуру поверхні від -0,5°C до 34,4°C за 90 с. Як показано в таблиці 4.1, враховуючи щільність теплового потоку від 2548 Вт/м² до 4542 Вт/м², потужність, вироблена графеновою плівкою/папером, коливається від 132 Вт до 234 Вт. Це в 5–9 разів менше, ніж вироблена потужність сучасними системами дровових нагрівачів, запропонованими для літаків. Важливо зазначити, що ця оцінка була зроблена з урахуванням початкових умов навколишнього

середовища. Зокрема, оцінка для графенової плівки/паперу проводилася при більш суттєвій температурі -32°C , а не $-0,5^{\circ}\text{C}$, яка є температурою навколишнього середовища під час випробувань нагрівача з силіконової гуми.

Незважаючи на ці різкі умови порівняно з тими, що розглядаються для стандартної поточної системи дротяної грілки ($-0,5^{\circ}\text{C}$), з потужністю 234 Вт, температура 34°C досягається протягом 10 секунд, тоді як для НЗСГ, з потужністю 1233 Вт, температура $34,4^{\circ}\text{C}$ досягається в 90 с. Була зроблена оцінка ваги плівки за співвідношенням вага/площа; якщо розглядається плівка товщиною 50 мкм, співвідношення вага/площа становить приблизно 35 г/м^2 , що є одним із нижчих значень, про які в літературі повідомляють для інших систем опалення.

Що стосується останнього пункту, результати дуже повного та точного дослідження були повідомлені Йо та ін. [17]. Ці автори розробили високо вирівняний КНТ-полотно-нагрівач, який має незначну вагу; вони порівнювали отримані результати з уже існуючими системами або іншими системами, описаними в літературі. Навіть якщо система, описана в цьому документі, відрізняється від усіх описаних систем, порівняння підкреслює великий прикладний потенціал описаної тут стратегії. Інфрачервоні зображення плівки/паперу були зібрані під час процесу джоулевого нагрівання, щоб оцінити рівномірність нагріву електротермічної плівки.

Зокрема, на рис. 4.3 температурний профіль плівки/паперу (розміри $8\text{ см} \times 4\text{ см}$) від часу під час нагрівання відстежувався за допомогою струму 1 А. Результати показують, що розподіл температури плівки/паперу стає все більш рівномірним, коли температура наближається до значення плато. Однак для всіх температур виявляється майже однорідний розподіл температури. Насправді площа, що характеризується рівномірним кольором, ніколи не становить менше 70/80% усієї поверхні. Виявлена однорідність температури, швидше за все,

пов'язана з однаковою товщиною зразка та задовільною однорідністю розподілу нанонаповнювача.

Дуже цікаво дослідити джоулеву температуру плівки/паперу, щоб оцінити її реальний потенціал як ефективної стратегії розморожування. Для проведення цих випробувань використовувалася зібрана композитна система. Результати процедури нагрівання та видалення льоду показані на рис. 4.4. Контрольна температура становила -32°C . На рис. 4.4 показаний профіль температури як функція часу. У морозильну камеру вставили ендоскопічну камеру, щоб візуально контролювати процес розморожування.

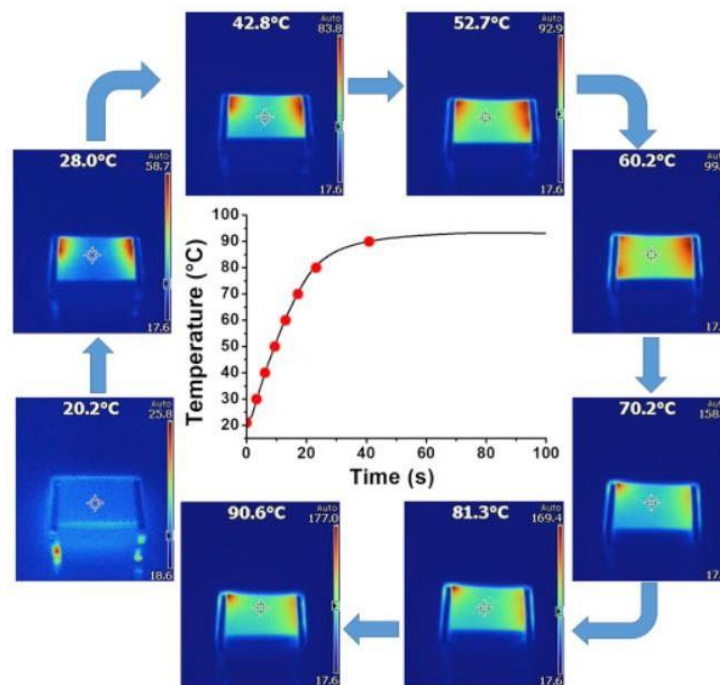


Рисунок 4.3 – Інфрачервоні зображення плівки/паперу під час процесу джоулевого нагрівання

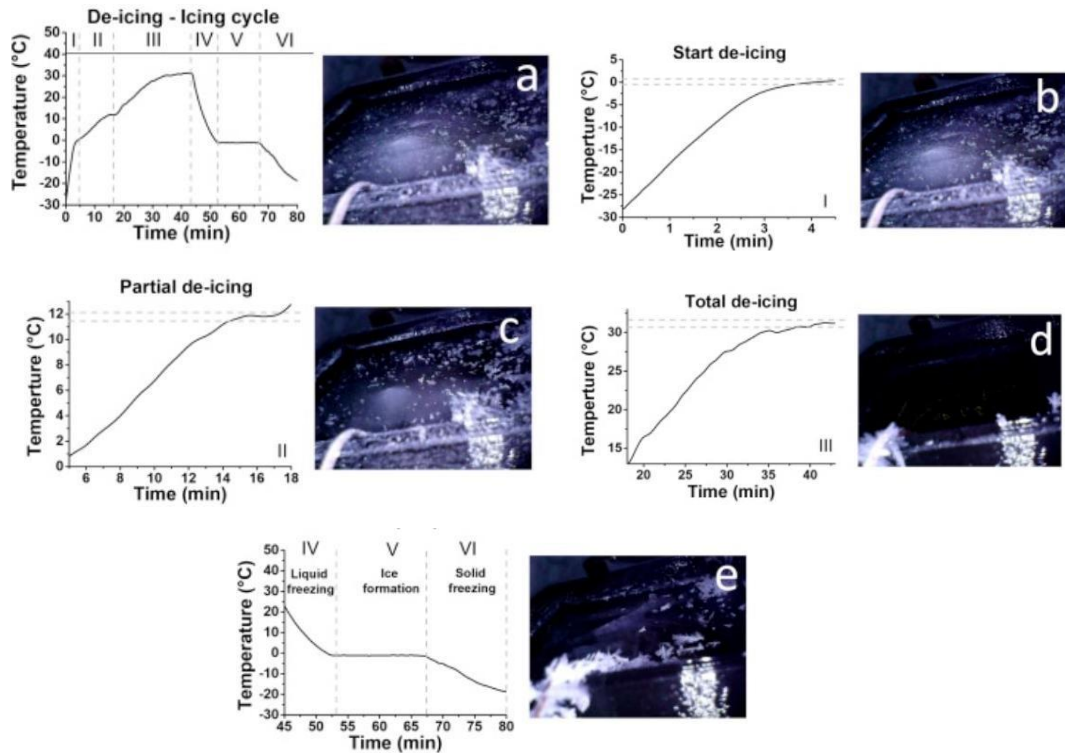


Рисунок 4.4 – Залежність температури від часу під час увімкнення-вимкнення живлення зібраного композиту при температурі навколишнього середовища -32°C з оцінкою процесу розморожування (щільність теплового потоку 3706 Вт/м^2) ендоскопічною камерою.

Як тільки було подано електроенергію, температура швидко підвищилася на першому етапі (зона I) з лінійною тенденцією до досягнення температури плато 0°C , при якій починається розморожування. Збільшення першого етапу (зона I) показано на рис. 4.4 b. Температура залишалася постійною на рівні 0°C протягом 1 хв, а потім знову підвищувалася (рис. 4.4 c). У цей момент перший шар льоду, який контактував з композитом, розтанув, а решта льоду залишилася твердою, як показано на рис. 4.4 c. У II і III зоні температура зростала меншою швидкістю. Мікрофотографія зроблена в кінці зони II, на якій видно, що кількість льоду зменшилася. У кінці III зони весь лід розтанув. Зони IV, V, VI відносяться до замерзання рідини, утворення льоду (рис. 4.4 d) і замерзання твердого тіла відповідно.

Ці результати демонструють, що в діапазоні використовуваної електроенергії внутрішня частина зібраної системи не піддавалася надмірному нагріванню, яке може порушити цілісність графенової плівки/паперу ($T < 180^{\circ}\text{C}$). Вплив збільшення щільності теплового потоку (1741, 3706, 2634, 5831 Вт/м²) на розморожування зібраного композиту показано на рис. 4.5.

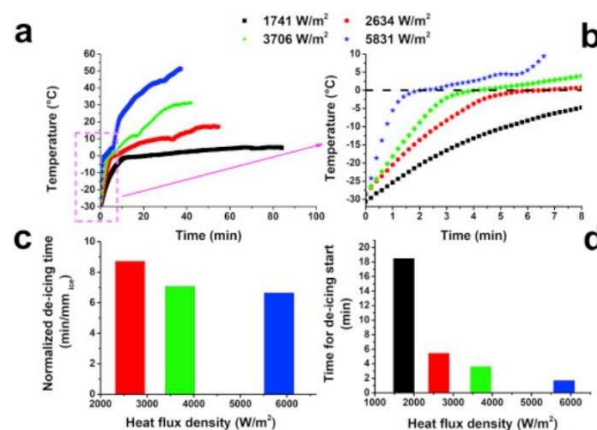


Рисунок 4.5 – а) Співвідношення між часом і температурою при різних густинах теплового потоку для зібраного композиту під час процесу видалення зледеніння; б) підвищення діапазону температур від -32°C до 10°C ; порівняння нормованого часу розморожування при різних густинах теплового потоку; д) порівняння часів відгуку зібраного композиту при різних густинах теплового потоку.

Щоб досягти ефективного розморожування, для розглянутої геометрії потрібно щонайменше 1741 Вт/м^2 . Фактично, при цьому значенні густини теплового потоку (див. чорну криву на рис. 4.5 а) система досягає температури 0°C лише через 18 хв, а потім температура досягає значення плато близько 7°C , що не є достатньо, щоб повністю розтопити лід за короткий проміжок часу. Більш високі значення щільності теплового потоку призводять до повного танення льоду, що дозволяє скоротити як час розморожування (рис. 4.5 с), так і час досягнення температури розморожування 0°C (див. рис. 4.5b, 4.5d).

Враховуючи значення найвищої щільності теплового потоку, яке використовується в цій роботі, починаючи з температури навколишнього середовища -32°C , можна розтопити шар льоду товщиною 1 мм менш ніж за 9 хвилин. У майбутній роботі, щоб збільшити швидкість відгуку композиту, зібраного проти обмерзання, буде розглянуто можливість розміщення графенової плівки/паперу безпосередньо на поверхні композиту. Загалом, час відгуку системи дуже малий навіть у найгірших умовах, які відповідають температурі навколишнього середовища -32°C ; тоді як зазвичай системи розморожування, які зараз використовуються, активуються, коли температура навколишнього середовища падає трохи нижче 0°C .

Результати випробувань показують, що цей вуглецевий нагрівач дуже ефективний і дуже конкурентоспроможний порівняно з поточним резистивним нагрівачем. Температуру поверхні графенової плівки можна легко контролювати, змінюючи споживану потужність. Запропонована стратегія може стати значним прогресом у впровадженні енергозберігаючих структур у сфері авіаційного транспорту.

Розроблена система також може працювати з меншим енергоспоживанням. Враховуючи значення найвищої щільності теплового потоку та температуру навколишнього середовища -32°C , можна розтопити шар льоду товщиною 1 мм менш ніж за 7 хвилин. Техніко-технічне виконання ефективності розморожування було продемонстровано за допомогою серії експериментів, і результати показують, що розроблений метод може бути дуже багатообіцяючою стратегією електричного опалення, здатною підтримувати легкість і ефективність у розморозці та зменшити вплив на навколишнє середовище розморожування, яке в даний час здійснюється за допомогою забруднюючих рідин [18].

4.2 Застосування композиту з вуглецевими наноматеріалами в авіації

Вуглецеві нанотрубки використовувалися для простого та недорогого з'єднання аерокосмічних композитів, які використовуються для виробництва літаків. Технологія, розроблена дослідниками з Массачусетського технологічного інституту (MIT), дозволяє уникнути потреби у дорогих і енергоємних посудинах під тиском і може прискорити виробництво літаків і високоефективних композитних конструкцій, таких як лопаті вітрових турбін.

Сучасні літаки побудовані з листових композитів, які сплавляються разом при високих температурах у гігантських резервуарах під тиском, які називаються автоклавами. Вони потрібні для витіснення крихітних кишень повітря, які утворюються між листами завдяки їхній мікроскопічній шорсткості поверхні – подібно до видавлювання бульбашок повітря, які утворюються під пластиковою плівкою.

Нанопористі мережі – ультратонкі плівки, виготовлені із внутрішньовирівняних матеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки – для з'єднання композитів. Проміжки між кожною нанотрубною в таких щільних плівках можуть діяти як капіляри – і створювати тиск на основі їх геометрії та поверхневої енергії. Команда передбачила, що, помістивши таку плівку між двома листами інших матеріалів і нагрівши її, можна застосувати на 50% більший капілярний тиск до навколишніх матеріалів, ніж це можливо в автоклаві, при цьому аналогічно усуваючи будь-які захоплені порожнечі [20].

Щоб уможливити визначення ключових параметрів, якими повинен володіти КНТ, щоб працювати з заданим джерелом живлення для конкретної області та положення на профілі. Це призвело до створення діапазону та схеми питомого електричного опору, який розсіював би електричну потужність у вигляді тепла, необхідного для ефективного захисту від зледеніння або зледеніння. ПОС використовує джоулеве нагрівання, а необхідний електричний опір можна виразити в Омх на квадрат, і розраховується за допомогою

сполучених терморідинних моделей, щоб отримати нагрів, необхідний як для розморожування, так і для запобігання зледененню. Було виміряно значення опору листів наностічків, а опір листа було адаптовано шляхом контролю морфології вирівняних КНТ у полімері, що дозволило створити необхідні опори, які просторово змінюються по поверхні повітря.

Цей підхід дозволяє використовувати кілька ступенів свободи для того, щоб отримати один конкретний опір електричного листа (точніше: тензор електричного опору). Ці властивості походять від складної структури-властивості-відношень у різних масштабах. Можливо, найбільш фундаментальний параметр пов'язаний з індивідуальною морфологією КНТ, яка є певною кристалографічною структурою (відома аспіральність), що призводить до трьох різних профілів електричних властивостей.

Наступний аспект морфології визначається довжиною окремих КНТ. У процесі, який використовується в цьому дослідженні, існує досить простий зв'язок між тривалістю синтезу (часом росту) і висотою лісу. Цією характеристикою матеріалу можна легко і надійно керувати, тому її було обрано як основний фактор для регулювання опору нагрівального шару. Матеріал брали лише з тих місць у печі, які створювали б ліси приблизно однакової висоти, щоб уникнути великих відхилень опору листа [21].

На мікроскопічному рівні опір і нагрівання в масиві КНТ залишаються нерівномірно розподіленими і сильно залежать від напрямку потоку струму. Для вирощеного масиву або лісу опір значно нижчий вздовж головної осі КНТ, ніж перпендикулярно до неї. Очевидно, що провідність, паралельна первинній осі КНТ, відносно тісно корелює з опором шару в цьому напрямку. Крім того, на опір листа сильно впливають електричні контакти між сусідніми КНТ.

Кількість і характер цих контактів залежить від довжини, відстані, хвилястості та діаметра КНТ і не обов'язково відповідає строгій лінійній залежності, яка передбачається значенням провідності. Слід лише зазначити, що

ці аспекти представляють додаткові ступені свободи, які можна використовувати для керування потоком струму та розсіюванням тепла в матеріалі ПОС.

Для виготовлення резистивного нагрівального шару було вирішено змінити морфологію КНТ, натиснувши їх і одночасно стиснувши. Це іноді називають «нокдауном» або «вертикальним ущільненням», і його можна виконувати різними способами. Збитий і ущільнений шар КНТ стає більш механічно надійним, ніж вирощені масиви КНТ (використовуються як нанострічки).

Завдяки збільшеній об'ємній частці КНТ існує набагато більше паралельних електричних контактів, що призводить до більш стабільного та нижчого загального опору листа. Перед початком виробництва пристрою для нагрівання аеродинамічного профілю було виготовлено ряд менших зразків для визначення довжини КНТ, якості та перевірки життєздатності різних мікроструктурних модифікацій і методів контактування.

Спрямований характер електричного опору можна вплинути шляхом адаптації масиву КНТ під час і після росту, що дозволяє модифікувати розподіл електричного струму для ПОС. Однак при виготовленні прототипу нагрівального пристрою не було необхідності використовувати цю опцію.

Висновки по розділу

Було проаналізовано залежність нагріву композитів з карбонових нанотрубок в залежності від густини теплового потоку та потужності струму. Виявлені оптимальні показники. Температуру поверхні графенової плівки можна легко контролювати, змінюючи споживану потужність. Запропонована стратегія може стати значним прогресом у впровадженні енергозберігаючих структур у сфері авіаційного транспорту.

5 Апробування на експериментальному стенді та визначення параметрів різних варіантів НЕ ПОС для впровадження у літаку

5.1 Об'єкт випробувань

Зразок електропровідного теплогенеруючого матеріалу «ЕМКАН» («ЕТМ ЕМКАН») у вигляді плівки, отриманої за допомогою нанесення «ЕМКАН-АЕРОЗОЛЬ» на дослідний зразок.

5.2 Мета випробувань

Тестування зразку «ЕТМ ЕМКАН» на базі науково-дослідної лабораторії ДП «КОЛОРАН» для визначення основних показників

5.3 Результати тестування

П.1. Візуальний контроль проводився згідно ДСТУ ISO 4628-4:2015; ДСТУ ISO 28199-3:2015 та ДСТУ ISO 4628-1:2015. Після висихання поверхня матеріалу рівна, однорідна, без сторонніх включень.

П.2. Усадка полімеризації вимірювалася згідно ДСТУ ISO 28199-1:2015. На зразок легкого тканого матеріалу (бязь) розміром 140x30 мм було нанесено «ЕМКАН-АЕРОЗОЛЬ». Зразок висушено в ексікаторі на антиадгезивній поверхні (тефлон) в ексікаторі. Геометричні розміри до нанесення «ЕМКАН-АЕРОЗОЛЬ» та після висихання до ступеня 3 замірялися штангенциркулем з абсолютною похибкою 0,05 мм. Відносне скорочення зразку після висихання склало 2%.

П.3. Адгезія матеріалу «ЕТМ ЕМКАН») до металевих пластин з нанесеним ґрунтом ЕП-0215 визначалася методом ґратчастих надрізів згідно ДСТУ ISO 4624:2019. На металевий зразок 100x100 мм з нанесеним ґрунтом ЕП-0215 було

розпилено «ЕМКАН-АЕРОЗОЛЬ» та після висихання до ступеня 3 за допомогою скальпеля в трьох місцях було зроблено ґратчасті надрізи з утворенням ґрат з коміркою 1x1 мм. Було виявлено що краї надрізів повністю гладкі, немає ознак відшарування в жодному квадраті решітки. Адгезію оцінено в 1 бал.

П.4. Клас нагрівостійкості (250°C) визначався згідно ДСТУ ISO 4624:2019. На металеву пластину розміром 100x100 мм було нанесено «ЕМКАН-АЕРОЗОЛЬ». Після висихання до ступеня 3 було визначено електричну потужність що споживав зразок при напрузі 115В за допомогою мультиметра та температуру на поверхні за допомогою тепловізора. Після відключення зразок помістили в термальну камеру, нагріли до 250°C та витримали 15 хвилин. При повторному підключенні до 115В знов було визначено електричну потужність що споживав зразок при напрузі 115В за допомогою мультиметра та температуру на поверхні за допомогою тепловізора. Значення потужності та температури співпали в межах похибки. Малюнок зони нагріву на тепловізорі також не змінився.

П.5. Для визначення величини питомого теплового потоку на контакти зразка подали електричну напругу 115В. При цьому нижню частину зразка теплоізолювали листами АТМ-3. За допомогою тепловізора Flir TG267 контролювати температуру на поверхні зразка. Після досягнення температурою поверхні сталих значень (дивись Рис.5.2) визначити величину електричної потужності, що споживається, мультиметром Keweisi KWS-AC300 (дивись Рис.5.1). Значення питомого теплового потоку розраховано діленням значення електричної потужності (90,6 Вт) на площу поверхні зразка, яка покрита «ЕМКАН» та дорівнює $74 \text{ мм} * 12 \text{ мм} * 6 = 5,31 * 10^{-3} \text{ м}^2$. Значення питомого теплового для цього зразка становить $1,7 \text{ Вт/см}^2$.



Рисунок 5.1 – Показники мультиметра.

П.6. Електричний опір дослідного зразка визначався омметром Pro'sKit MT-2018. Опір зразка який проходив теплові випробування складає 145 Ом.

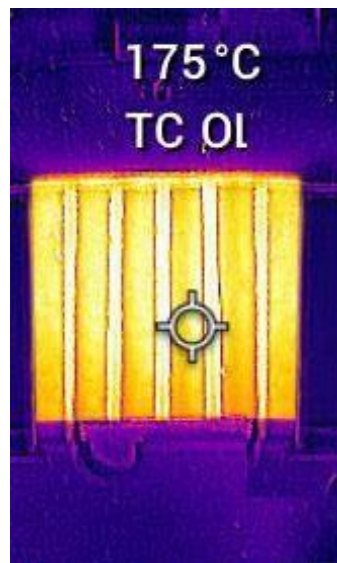


Рисунок 5.2 – Показники тепловізора

Викновки по розділу

Отримані результати тестування дослідного зразка відповідають вимогам поставленої задачі, були виміряні показники мультиметра, показники тепловізора, електричний опір дослідного зразка.

6 Доопрацювання конструкції та інструкції монтажу НЕ ПОС для літаків

6.1 Опис ідеї проєкту

Таблиця 6.1 — Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розроблен композитний матеріал на основі карбонових нанотрубок, який у вигляді фарби наноситься на поверхню літака за допомогою фарборозпилювача	1. Нанесення фарби з КНТ на поверхню літака	Зниження маси літака за рахунок заміни НЕ, облегшення обслуговування та зниження затрат на виготовлення системи запобігання обледенінню
	2. Заміна існуючого НЕ літака на НЕ з використанням КНТ	

Таблиця 6.2 — Опис ідеї стартап-проєкту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Продукція конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Теплові ПОС	Пневматичні ПОС	Хімічні ПОС			
1	Зручність користування	Висока	Середня	Середня	Середня			+
2	Зрічність обслуговування	Висока	Середня	Середня	Середня			+
3	Документація	Ні	Так	Так	Так	+		
4	Невелика маса	Так	Ні	Так	Ні			+
5	Ціна виготовлення	Середня	Висока	Середня	Середня		+	
6	Сучасність	Так	Так	Ні	Так		+	

6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Щоб визначити основні потреби перед початком ідеї, технологічний аудит є обов'язковим. Він включає аналіз стану доступності технологій, які будуть використовуватися в процесі надання послуг, та рівня їх доступності для компанії на цьому етапі. Результати цього аналізу представлені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 — Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	НЕ з композитного матеріалу з використанням КНТ	Нагрівання матеріалу за допомогою подачі струму на поверхню	Наявна	Необхідна закупка матеріалів для виготовлення композиту
2	Нанесення композиту на поверхню літака у вигляді фарби	Фарборозпилювач	Наявна	Необхідна закупка фарборозпилювачів для нанесення фарби

Висновок: технологічна реалізація продукту – можлива, потрібна оптова закупка матеріалів для виготовлення композиту, та фарборозпилювачі.

6.3 Аналіз ринкових можливостей по запуску проекту

Цей етап аналізу ідеї необхідний, бо він всебічно аналізує можливість виходу на ринок та можливості зайняти на ньому певного місця. У таблиці 4.4 наведено інформацію про аналіз потенційного ринку. Оскільки ринок літаків є

дуже перспективним і постійно розширюється, вибір цього ринку є перспективним. Звичайно, це супроводжується великою кількістю необхідних сертифікацій та ліцензій для таких розрахунків, але потенційна рентабельність інвестицій у цей проект компенсує ці недоліки.

Таблиця 6.4 — Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн./ум.од	322,000\$
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі або по ринку, %	20,07%

Таблиця 6.5 — Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Вимоги споживачів до товару
1	Оптимізація системи запобігання обледенінню	Конструкторські бюро малої та середньої авіації	Очікують продукт, який надає можливості облегчити обслуговування ПОС, зменшення маси ПОС

Для визначення загроз та можливостей проєкту на ринку проводиться додатковий аналіз із прогнозом цих подій та можливими реакціями компанії на цю подію. Цей аналіз сформовано у наступних двох таблицях 4.6 та 4.7, де впливають негативні та позитивні фактори. Основними загрозами були відсутність клієнтської бази та потенційних споживачів та складність встановлення оптимальних робочих процесів на ранніх стадіях впровадження.

Таблиця 6.6 — Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Небезання підприємств застосовувати нову та невідому для них технологію	Підприємства не хочуть витратити час та ресурси на впровадження нової технології	Доступна для застосування документація
2	Кошти на розробку та підтримку продукту	Закінчення грошей та недостатнє фінансування	Залучення додаткових інвесторів, мотивація роботи на перспективу; Ітеративна розробка продукту задля покрокового виведення продукту на ринок та отримання відповіді користувачів
3	Вихід аналогу	Вихід аналогу даного товару може призвести до знецінення та безідейності даного товару	Вихід товару на ринок в коротші строки з не повною, але достатньою, функціональністю для зацікавлення усіх цільових аудиторій; Проведення рекламної компанії

Таблиця 6.7 — Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Новий продукт	Вихід на ринок, Надання нових рішень у сфері	Більш сучасне та оптимізоване рішення проблеми зледеніння
2	Вихід аналогу	Надати продукт з певними характеристиками та можливостями що відсутні у компаній конкурентів	Аналіз ринку та користувачів задля вирішення проблем устарівшої системи
3	Грошова винагорода	При достатньому попиту на розподілену систему товарообігу можлива комерціалізація продукту	Точкова комерціалізація продукту; Ведення додаткових коштів у проєкт задля його подальшого розвитку.

Таблиця 6.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Тип конкуренції: монополістична	Товар від кожної компанії на ринку, являється недосконалим замінником товару, реалізованого іншими фірмами; На ринку є умови для входу та виходу;	Розробка продукту з характеристиками, які покривають сфери вживання що не покривають інші товари-замінники; Кореляція цін у відповідності до товарів замінників; Різні типи ліцензій.
Рівень конкурентної боротьби: локальний	Всі продукти замінники розроблялись командою розробників	Вихід на ринок збуту продукту з клієнто-необхідною функціональністю.
Галузева ознака: внутрішньогалузева	Даний тип продукту може використовуватися тільки у сфері авіації	Надання оптимізованої ПОС
Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Дана конкуренція – конкуренція між товарами одного виду.	Впровадження функціональності яка відсутня у товарів-замінників;
Характер конкурентних переваг: цінова та не цінова	Цінові переваги – точкова комерціалізація; Не цінова – надання функціональності, що відсутня у товарах-замінниках.	Впровадження унікальної функціональності.
За інтенсивністю: марочна	Наявність унікального знаку що відрізняє даний продукт від продуктів-замінників	Впровадження власної назви та власного знаку.

Таблиця 6.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари - замітники
	Великі конструкторські бюро та інститути	Профільні інститути та нові компанії.	Компанії з виготовлення фарборозпилювачів	ДП «Антонов»	-
Висновки:	Рішення проблеми зледеніння інших компаній занадто устарілі	На даний момент продукт є новим рішенням на ринку	Постачальники не диктують умови	Формують ціни та функціонал	-

Для виходу на ринок продукт повинен мати функціонал що відсутній у продуктів-аналогів, повинен задовольняти потреби користувачів, мати необхідний та достатній функціонал з конфігурування, підтримку зі сторони розробників та можливість розробки спеціального функціоналу за відповідною ліцензією.

Таблиця 6.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Актуальність товару	Більш нова та функціональна система ПОС
2	Висока готовність до кооперації	Відкритість до діалогу
3	Простота використання	Нанесення композита за допомогою фарборозпилювача

Передостаннім етапом аналізу ринкових можливостей стартап-проекту є аналіз стосовно кожного з прямих конкурентів. Цей аналіз представлений у

формі таблиці, що показує порівняння факторів конкурентоспроможності. У таблиці 6.10 представлений аналіз за факторами конкурентоспроможності у порівнянні з компанією по виготовленню ПОС.

Таблиця 6.11 — Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін розподіленої системи товарообігу

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з запропонованим						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Актуальність товару	18					+		
2	Простота використання	18					+		
3	Можливість використання будь-якою компанією	17		+					
4	Новизна	20						+	
5	Зменшення маси ЛА	18					+		
6	Обслуговування	17					+		

Таблиця 6.12 — SWOT аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони (S): Зменшення маси літака Не потрібне постійне обслуговування Більш дешева за аналоги Знижує витрати на паливо</p>	<p>Слабкі сторони (W): Необхідність інвестицій, сильного позиціонування компанії та підвищення зацікавленості</p>
<p>Можливості (O): Вихід на міжнародний ринок; Співпраця із великими компаніями.</p>	<p>Загрози (T): Відсутність замовлень; Великі затрати.</p>

Таблиця 6.13 — Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Виготовлення композиту з КНТ	Головний ресурс – люди, даний ресурс - наявний	3-4 місяці
2	Реклама	Залучення власних коштів для реклами товару	2-3 місяці
3	Написання статей та опис товару на відомих ресурсах	Головний ресурс – час, даний ресурс - наявний	3-4 тижні

6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 6.14 — Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Державні підприємці	Висока, тому що ПОС, які використовуються ДП на даний момент застарілі	80% - високий попит	Низька	Треба докласти зусиль через недовіру споживачів
2	Компанії	Середня, тому що компанії використовують ПОС, які виготовляють самі	50% - середній попит	Середня	Важко, закрити політику компаній

Які цільові групи обрано: державні підприємці, компанії

Відповідно до проведеного аналізу можна зробити висновок, що підходящою цільовою групою для розповсюдження даної системи проти зледеніння є державні підприємці, компанії. Відповідно до стратегії охоплення ринку збуту товару обрано стратегію масового маркетингу.

Таблиця 6.15 — Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Постійна співпраця з замовниками, надання послуг і обслуговування	Проведення реклами, контакт на пряму з споживачами; формування лояльності і прихильності споживачів	Зниження ступеню заміненості товару; Прихильність клієнтів; Відмітні властивості товару; Відмітні характеристики товару;	Стратегія диференціації

Таблиця 6.16 — Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, які?	Стратегія конкурентної поведінки
Частково, так як дана технологія не використовується в нашій країні, але є за кордоном	Забирати існуючих у конкурентів	Не буде	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 6.17 — Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту
1	Обслуговування та оновлення ПОС	Стратегії диверсифікованого зростання	Постійний контакт з клієнтами та надання послуг	модульність відкритість до змін гнучкість

Можна зробити висновок, що стартап-компанія вибирає базову стратегію розвитку – стратегію диференціації, як базову стратегію конкурентної поведінки – стратегію заняття конкурентної ніші.

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для визначення маркетингової програми стартап-проекту ми визначимо основні ключові переваги, які клієнт отримає від послуг компанії (табл. 6.18). Наступним кроком є визначення трирівневої моделі збуту товару. Проводиться додаткове уточнення ідеї послуг та особливостей їх надання замовнику. Цей аналіз представлений у таблиці 6.19.

Таблиця 6.18 — Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Заміна устарілих ПОС літальних апаратів на наш продукт	Більш простий, ефективний спосіб боротьби з обледенінням	У конкурентів немає такого функціоналу

Кінець таблиці 6.18

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
2	Консультація клієнтів	Постійний контакт з клієнтами та надання послуг	Довгострокове обслуговування клієнтів, надання послуг, оновлення товару

Таблиця 6.19 — Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
1. Товар за задумом	Розподілена система товарообігу		
2. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	1. Легкість за обслуговуванням	М	Тх
	2. Зменшення маси ЛА	М	Тх
	3. Зниження витрат на пальне	М	Вр/Тх/Е
4. Більш нова технологія	Нм	Тл	
	3. Товар із підкріпленням	Технічне обслуговування, увага до клієнта	
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: унікальність продукту, патентування			

Таблиця 4.20 — Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
220-430\$	370-950\$	Середній для державних підприємств і високий для компаній	200-700\$ в залежності від рівня підписки

Таблиця 4.21 — Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Підприємства можуть заключити угоду на довстрокову поставку товару	Аналіз ринку, дослідження ринків для розширення	Багатоканальний розподіл	Розповсюдження через мережу Інтернет

Таблиця 4.22 — Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Клієнти зацікавлені в оптимізації ПОС	Інтернет	Легкість за обслуговуванням Зменшення маси ЛА Зниження витрат на пальне Більш нова технологія	Залучити зацікавлених осіб	Більш вигідне рішення проблеми з обледенінням

Висновки по розділу

В розділі описано стратегії з розроблення стартап-проекту, визначено динаміку та рентабельність роботи ринку. Розглянувши потенційні групи

клієнтів, стан конкуренції та конкурентоспроможність проекту було встановлено що проект є дуже перспективним у реалізації.

ВИСНОВКИ

Обледеніння повітряного гвинта викликає різке зменшення його коефіцієнта корисної дії. Разом з тим порушується вагове та аеродинамічне балансування гвинта, що призводить до трясіння двигунів. Тряска викликає додаткові динамічні напруги в конструкції літака, а також неприємні фізіологічні впливи на екіпаж та пасажирів. Шматки льоду, що відриваються від лопатей, можуть пошкодити обшивку фюзеляжу і крила.

Тому ефективний захист літака від зледеніння є одним з найважливіших завдань і в даний час протиобмерзання на літаку є обов'язковими.

В першому розділі були розглянуті види систем для запобігання обледеніння літака, розглянуто, чим небезпечне обледеніння, та надані аеродинамічні характеристики профілю при зледенінні.

В другому розділі було розглянуто карбонові нанотрубки як нагрівальний елемент і можливість застосувати технологію для впровадження у авіацію. В порівнянні з нинішніми найсучаснішими системами, КНТ-нагрівач володіє незначною вагою, швидким і рівномірним нагріванням, ефективним споживанням енергії.

В третьому розділі було розглянуто іноземні композити з карбонових нанотрубок, такі як Карбоновое волокно, графен, Дисперговані КНТ, Вирівняні КНТ. Були наведені порівняльні характеристики.

В четвертому розділі було проаналізовано залежність нагріву композитів з карбонових нанотрубок в залежності від густини теплового потоку та потужності струму. Виявлені оптимальні показники.

В п'ятому розділі отримані результати тестування дослідного зразка відповідають вимогам поставленої задачі, були виміряні показники мультиметра, показники тепловізора, електричний опір дослідного зразка.

Даний композит з карбонових нанотрубок є сучасним і вигідним заміненням відомих нам ПОС: зменшує масу ЛА, більш економічній, простий у використанні та обслуговуванні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Системи запобігання обледенінню літака . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://privetstudent.com/referaty/aviatsiya/564-protivoobledenitelnye-sistemy-samoleta.html>
- 2) Методические указания по проведению практических занятий на тему «Противообледенительная система самолета» . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pandia.ru/text/78/314/23473.php>
- 3) Вплив зледеніння на льотні характеристики та безпеку польотів ЛА . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://poznayka.org/s78809t1.html>
- 4) Студопедія . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studopedia.info/1-31523.html>
- 5) Indicator . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://indicator.ru/label/nanotrubka>
- 6) Карбонові нанотрубки: методи отримання та перспективи застосування в медицині . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.umj.com.ua/article/1275/karbonovi-nanotrubki-metodi-otrimannya-ta-perspektivi-zastosuvannya-v-medicini>
- 7) Вуглецеві нанотруби . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.carbolite-gero.ru/ru/applications/heating-applications/carbon-nanotubes/>
- 8) Нанотрубки захистять літаки від льоду . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/nanotrubki_zashhityat_samolety_oto_lda
- 9) De-icing aircraft with a carbon nanotube web. . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.materialstoday.com/carbon-fiber/news/deicing-aircraft-with-a-carbon-nanotube-web/>
- 10) Розтягування та нагрівання перетворили вуглецеві нанотрубки на напівпровідник . – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.google.com/amp/s/nplus1.ru/news/2018/10/17/nanotubes/amp>

11) Meier O, Scholz D. A Handbook Method for the Estimation of Power Requirements for Electrical De-Icing Systems. DLRK, Hamburg, 31 Aug-02 Sep, 2010.

12) Mohseni M, Amirfazli a. A novel electro-thermal anti-icing system for fiber-reinforced polymer composite airfoils. *Cold Reg Sci Technol* 2013; 87:47–58.

13) Volman V, Zhu Y, Raji ARO, Genorio B, Lu W, Xiang C, et al. Radio-frequency-transparent, electrically conductive graphene nanoribbon thin films as deicing heating layers. *ACS Appl Mater Interfaces* 2014; 6:298–304.

14) Chu H, Zhang Z, Liu Y, Leng J. Self-heating fiber reinforced polymer composite using meso/macropore carbon nanotube paper and its application in deicing. *Carbon* 2014; 66:154–63

15) Brampton CJ, Pickering SG, Bowen CR, Kim AH, Buschhorn ST, Lee J, et al. Actuation of Bistable Laminates by Conductive Polymer nanocomposites for use in Thermal-Mechanical Aerosurface. 55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, National Harbor, MD, USA., January 13-17, 2014.

16) A. Heinrich, R. Ross, G. Zumwalt, J. Provorse, V. Padmanabhan Aircraft icing Handbook, vol. 2, GATES LEARJET CORP WICHITA KS (1991)

17) X. Yao, S.C. Hawkins, B.G. Falzon An advanced anti-icing/de-icing system utilizing highly aligned carbon nanotube webs *Carbon*, 136 (2018), pp. 130-138

18) L.Vertuccio, F.De Santis, R.Pantani, K.Lafdi, L.Guadagno. Effective de-icing skin using graphene-based flexible heater. *Composites Part B* 162 (2019) 600–610

19) Carbon nanotube anti-icing and de-icing means for aircraft / J. P. Rivera, W. T. Chee. // Patent US2018215476A1. – 2018.

20) Aircraft wings could be assembled cheaply and easily using nanotubes. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.chemistryworld.com/news/aircraft-wings-could-be-assembled-cheaply-and-easily-using-nanotubes/4011096.article>

21) Buschhorn ST, Lachman N, Gavin J, Wardle BL. Electrothermal Icing protection of Aerosurfaces Using Conductive Polymer Nanocomposites. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Boston, MA, USA., April 8-11, 2013