

Дана заявка спирається на пріоритет попередньої заявки на [патент США №60/356476, поданої 11 лютого 2002р., на пріоритет попередньої заявки на патент США №60/398004, поданої 23 липня 2002р., і на пріоритет попередньої заявки на патент США №60/404872, поданої 21 серпня 2002р.].

Даний винахід відноситься до систем і способів зміни межі поділу між льодом і об'єктом.

Обмерзання створює багато проблем в різних галузях промисловості. Така проблема існує в авіаційній промисловості, коли лід утворюється на поверхні літака. Лід на поверхні літака, наприклад, крилі, може створювати небезпечні умови для літака в польоті. Інший приклад можна навести для наземного транспорту, коли лід утворюється на вітровому склі автомобіля і може створювати небезпечні умови для водія автомобіля. Видалення льоду з таких поверхонь дозволяє звести небезпеку до мінімуму.

Сучасні системи для видалення льоду включають в себе електричні нагрівники, які подають енергію на резистивні елементи для генерації тепла. Інші відомі системи включають в себе хімічні розчини для реалізації хімічних реакцій для термічного розчинення льоду. Електричні нагрівники подають певну енергію на резистивний елемент, щоб безпосередньо і пропорційно розтоплювати весь лід з поверхні, що контактує з електричними нагрівниками. Хімічні розчини можуть термічно розчиняти лід, але не діють протягом тривалого часу і створюють небажані умови для навколишнього середовища. Ці системи неефективні, оскільки намагаються розтопити весь лід.

Способи видалення льоду включають в себе використання механічної скребачки. Механічні скребачки часто використовуються для видалення прилипло до поверхні об'єкта льоду. Однак, механічні скребачки часто бувають ручними і незручні у використанні. Крім того, механічні скребачки не завжди ефективно видаляють лід і можуть пошкоджувати поверхню, до якої прилип лід.

Невчасне видалення льоду з поверхні об'єкта може, в принципі, мати катастрофічні наслідки. Наприклад, перевантаження за рахунок льоду на літаку в польоті може небезпечно знизити підймальну силу літака і порушити правильну роботу деяких вузлів літака. Інший приклад включає наростання льоду на вітровому склі автомобіля, якщо лід не видалити, видимість для водія може погіршитись настільки, що він не зможе вести машину.

Наступні патенти і патентні заявки забезпечують корисну інформацію і тому включені в описі за допомогою посилання: [патент США №6027075; патент США №6427946; заявка РСТ РСТ/US/25124, подана 26 жовтня 1999р.; заявка РСТ РСТ/US/28330, подана 30 листопада 1999р.; заявка РСТ РСТ/US/01858, подана 22 січня 2002р.; заявка РСТ РСТ/USOO/35529, подана 28 грудня 2000р.; заявка на патент США №09/971287, подана 4 жовтня 2001р.; і заявка на патент США №09/970555, подана 4 жовтня 2001р.].

Згідно з одним аспектом, імпульсна протильодова система нагріває межу поділу лід-поверхня об'єкта, порушуючи прилипання льоду і/або снігу (або просто лід) до поверхні. Для зниження енергоспоживання, в одному варіанті здійснення передбачено, що імпульсний протильодовий пристрій використовує дуже малу швидкість розповсюдження тепла в неметалічних твердих матеріалах, включаючи лід і сніг, і подає енергію нагрівання на поверхню протягом досить короткого часу, щоб тепло не йшло далеко від межі поділу. Відповідно, велика частина тепла використовується для нагрівання і розтоплення тільки дуже тонкого шару льоду (що далі іменується «граничний лід»). Система містить джерело живлення, здатне генерувати певну потужність. В одному випадку потужність обернено пропорційна величині енергії, що використовується для розтоплення льоду на межі поділу. Імпульсна протильодова система може також включати в себе контролер для обмеження часу, протягом якого джерело живлення генерує певну величину потужності. Тривалість, по суті, обернено пропорційна квадрату величини потужності. Джерело живлення може також включати в себе джерело живлення, що перемикається, здатне видавати імпульсну напругу. Імпульсна напруга може видаватись накопичувальним пристроєм, наприклад, батареєю або конденсатором. Таким чином, батарею або конденсатор можна використати для подання потужності на нагрівальний елемент, який термічно пов'язаний з межею поділу. У деяких випадках імпульсну напругу можна безпосередньо подавати на нагрівальний елемент, щоб порушувати прилипання льоду до поверхні. Згідно з іншим аспектом, нагрівальний елемент включає в себе тонку плівку з провідного матеріалу або тонку плівку, що містить напівпровідниковий матеріал. Напівпровідниковий матеріал не ускладнює огляд через тонку плівку, що дозволяє використати його з таким «об'єктом», як вітрове скло машини. Джерело живлення може модулювати потужність, що подається на напівпровідниковий матеріал, для перетворення потужності в теплову енергію. Модульована потужність переносить певну величину теплової енергії, яка може порушувати прилипання льоду до поверхні.

У деяких аспектах, конденсатор є або суперконденсатором, або ультраконденсатором. Джерелом живлення є маховик і/або високовольтне джерело живлення. Потужність від джерела живлення може перетворюватись в теплову енергію, щоб порушувати прилипання льоду до поверхні об'єкта. Наприклад, система може використати джерело живлення для видалення льоду і снігу з поверхні літака, шини, вітрового скла автомобіля, човна, дороги, моста, тротуару, морозильника, холодильника, будівлі, бігової доріжки або вікна. Фахівцям в даній галузі техніки ясно, що за допомогою імпульсної протильодової системи можна видаляти лід і з інших об'єктів.

Згідно з ще одним аспектом, система теплопередачі використовує підсистему акумуляції тепла, підключену до нагрівального елемента. Нагрівальний елемент може включати в себе теплопровідний матеріал, наприклад, метал. Нагрівальний елемент може включати в себе мембрану, приєднану до нагрівального елемента. Мембрана, наприклад, може бути надувною, що перешкоджає перенесенню тепла до поверхні об'єкта, з якого належить видаляти лід. Коли мембрана здувається, нагрівальний елемент переносить теплову енергію до поверхні, що порушує прилипання льоду до поверхні. Мембрану можна часто надувати і здувати, щоб модулювати перенесення теплової енергії до поверхні.

Згідно з іншим аспектом нагрівальний елемент містить дві ділянки теплопровідного матеріалу, розділені теплоізолятором. Щонайменше одна з ділянок теплопровідного матеріалу приєднана до теплоізолятора з можливістю переміщення, так що коли ділянки розташовуються певним чином, дві ділянки фізично контактують одна з одною. Переміщення щонайменше однієї з ділянок можна модулювати з певною частотою, внаслідок чого одна ділянка теплопровідного матеріалу переносить на іншу ділянку належну величину теплової енергії. Перенесення теплової енергії порушує прилипання льоду до поверхні іншої ділянки.

Згідно з ще одним аспектом, передбачений спосіб термічної зміни граничного льоду на межі поділу між об'єктом і льодом. Спосіб включає в себе етап подання теплової енергії на межу поділу для розтоплення граничного шару льоду. Етап подання обмежений за часом, внаслідок чого відбувається розсіяння енергії нагрівання, що подається на межу поділу, причому відстань розсіяння тепла в льоді не перевищує товщину граничного шару льоду.

Етап подання теплової енергії містить етап подання на межу поділу потужності, величина якої щонайменше приблизно обернено пропорційна величині енергії, що використовується для розтоплення граничного шару льоду. Обмеження тривалості здійснюється шляхом обмеження тривалості етапу подання потужності на межу поділу так, що тривалість щонайменше приблизно обернено пропорційна квадрату величини потужності.

В іншому випадку етап подання енергії нагрівання включає в себе етап подання на межу поділу потужності, величина якої, по суті, обернено пропорційна величині енергії, що використовується для розтоплення граничного льоду. Обмеження тривалості здійснюється шляхом обмеження тривалості так, що тривалість, по суті, обернено пропорційна квадрату величини потужності.

Спосіб включає в себе додатковий етап полегшення повторного заморожування граничного шару льоду для впливу на коефіцієнт тертя між об'єктом і льодом. Наприклад, етап полегшення може включати в себе один або декілька з наступних етапів: (1) очікування повторного заморожування після етапу обмеження тривалості; (2) обдування межі поділу холодним повітрям; (3) розпилення води на межу поділу.

Згідно з певними аспектами, об'єктом є один з елементів: конструкція літака, вітрове скло, дзеркало, фара, лінія електропередачі, конструкція фунікулеру, поверхня ротора вітряної установки, поверхня ротора вертольота, дах, палуба, конструкція будівлі, дорога, конструкція моста, конструкція морозильника, антена, супутникова антена, залізнична конструкція, конструкція тунелю, кабель, дорожній знак, снігоступ, лижа, сноуборд, ковзан і черевик.

Згідно з іншим аспектом, етап подання енергії нагрівання на межу поділу включає в себе етап подання теплової енергії на межу поділу для розтоплення граничного шару льоду товщиною менше п'яти сантиметрів. У деяких випадках етап способу обмежує тривалість, внаслідок чого граничний шар льоду має товщину менше одного міліметра. Згідно з іншим варіантом, відстань розсіяння тепла додатково обмежують шляхом обмеження тривалості імпульсу, внаслідок чого товщина граничного шару складає від одного мікрона до одного міліметра.

На етапі обмеження тривалості теплової енергії на межу поділу подають протягом, максимум, 100сек. Згідно з іншим варіантом, на етапі обмеження тривалості тривалість теплової енергії, що подається, обмежують величиною від 1мсек. до 10сек.

Згідно з ще одним аспектом, етап подання теплової енергії на межу поділу включає в себе етап подання потужності на нагрівальний елемент, термічно пов'язаний з межею поділу, що знаходиться в об'єкті і/або що контактує з межею поділу. Етап подання теплової енергії може містити етап створення електричного опору для потужності за допомогою нагрівального елемента.

Етапи подання і обмеження періодично повторюють для створення потрібного коефіцієнта тертя між об'єктом і льодом.

Потужність повторно подається на межу поділу після повторного заморожування граничного шару для вибірного регулювання коефіцієнта тертя між льодом і об'єктом, коли об'єкт переміщається по льоду.

Фахівцям в даній галузі відомо, що в певних випадках лід може містити або бути замінений снігом без відхилення від об'єму винаходу.

Згідно з одним аспектом, об'єкт являє собою ковзане тіло, наприклад, черевик, сноуборд або лижу.

Згідно з винаходом запропонований спосіб управління коефіцієнтом тертя між об'єктом і льодом, що містить наступні етапи:

(1) подають імпульсну потужність на межу поділу між об'єктом і льодом, щоб розтопити граничний шар льоду на межі поділу і знизити коефіцієнт тертя,

(2) полегшують повторне заморожування граничного льоду на межі поділу, щоб збільшити коефіцієнт тертя,

(3) повторюють під контролем етапи (1) і (2), при цьому управляють середнім коефіцієнтом тертя між об'єктом і льодом.

Етап полегшення повторного заморожування включає в себе етап переміщення об'єкта по льоду для зниження температури об'єкта. Наприклад, автомобільна шина може бути нагріта, а потім обертатись (при русі машини) для приведення нагрітої шини в контакт з дорогою, що обмерзла, для полегшення повторного заморожування.

Етап подання імпульсної потужності включає в себе етапи обдування об'єкта (наприклад, автомобільної шини) першим повітрям, яке має температуру вище точки замерзання, і переміщення об'єкта в контакт з льодом. Етап полегшення повторного заморожування включає в себе етап обдування об'єкта (наприклад, шини) другим повітрям, температура якого нижче температури першого повітря.

Передбачено, що поверхня ковзного тіла повинна контактувати з льодом або снігом. Джерело живлення (наприклад, батарея) генерує потужність. Нагрівальний елемент здатний перетворювати потужність в тепло на поверхні, причому тепла досить для розтоплення граничного шару льоду на межі поділу. Контролер управляє поданням потужності на нагрівальний елемент, щоб регулювати коефіцієнт тертя між ковзним тілом і льодом або снігом.

Як ковзане тіло може виступати, наприклад, черевик, сноуборд, лижа або снігоступ.

Згідно з одним аспектом, ковзане тіло являє собою лижу, ковзан або сноуборд, а контролер реагує на команди користувача, модулюючи потужність, яка подається на поверхню, що дозволяє управляти швидкістю ковзного тіла. Таким чином, лижник може, за бажанням, регулювати свою швидкість при спуску на лижах.

Згідно з ще одним аспектом, передбачений протиліодовий пристрій вітрового скла. Протиліодовий пристрій вітрового скла містить вітрове скло і практично прозорий нагрівальний елемент, розміщений на вітровому склі, який генерує тепло при поданні потужності в кількості, достатній для розтоплення граничного шару льоду на вітровому склі.

Нагрівальний елемент вибирають з візуально прозорого напівпровідникового матеріалу, у якого ширина забороненої зони для електронів перевищує приблизно 3eВ. Як такий матеріал можна використати ZnO, ZnS або їх суміші.

Згідно з іншим варіантом виконання, нагрівальний елемент вибирають з прозорого провідного матеріалу. Наприклад, як провідний матеріал можна використати оксид індію-олова (ITO), оксид олова, тонкі металеві плівки або їх суміші.

Надалі винахід пояснюється описом переважних варіантів втілення з посиланнями на супроводжуючі креслення, на яких:

Фіг. 1 зображує схему імпульсної протиліодової системи для зміни межі поділу між об'єктом і льодом, згідно з винаходом;

Фіг. 2 - схему імпульсної протиліодової системи, згідно з винаходом;

Фіг. 3 - схему імпульсної протиліодової системи, згідно з винаходом;

Фіг. 4 - схему імпульсної протиліодової системи, згідно з винаходом;

Фіг. 5 - схему імпульсної протиліодової системи, згідно з винаходом;

Фіг. 6 - схему імпульсної протиліодової системи для крила літака, згідно з винаходом;

Фіг. 7 - схему багат шарового нагрівального елемента імпульсного протиліодового пристрою, згідно з винаходом;

Фіг. 8 - схему нагрівального елемента імпульсного протиліодового пристрою, згідно з винаходом;

Фіг. 9 і 10 - відстань розсіяння тепла за певний час для імпульсного протиліодового пристрою, згідно з винаходом;

Фіг. 11 - діаграму залежності часу розмороження від енергії видалення льоду для імпульсної протиліодової системи, згідно з винаходом;

Фіг. 12 - схему ВЧ протиліодової системи для зміни межі поділу льоду і об'єкта, згідно з винаходом;

Фіг. 13 - схему ВЧ протиліодової системи, згідно з винаходом;

Фіг. 14 - діаграму для аналізу ВЧ протиліодової системи, згідно з винаходом;

Фіг. 15 - множину видів однієї гребінчастої електронної схеми, що використовується у ВЧ протиліодовій системі, згідно з винаходом;

Фіг. 16 - загальний вигляд і вигляд зверху гребінчастої електронної схеми, що використовується у ВЧ протиліодовій системі, згідно з винаходом;

Фіг. 17 - діаграму частотної залежності електропровідності льоду і діелектричної проникності льоду, згідно з винаходом;

Фіг. 18 - електричну схему ВЧ протиліодового пристрою, згідно з винаходом;

Фіг. 19-29 - діаграми результатів певних випробувань схеми, показаної на Фіг. 18, згідно з винаходом;

Фіг. 30-35 - діаграми конвекційного механізму теплопередачі у ВЧ протиліодовій системі і перенесення тепла через підкладку ВЧ протиліодової системи, згідно з винаходом;

Фіг. 36 - схему протиліодової системи з теплопередачею для зміни межі поділу об'єкта і льоду, згідно з винаходом;

Фіг. 37 - схему протиліодової системи з теплопередачею, згідно з винаходом;

Фіг. 38 - схему протиліодової системи з теплопередачею, згідно з винаходом;

Фіг. 39 - схему імпульсної протиліодової системи, що дозволяє порівняти її з протиліодовою системою з теплопередачею, згідно з винаходом;

Фіг. 40 - схему протиліодової системи з теплопередачею, згідно з винаходом;

Фіг. 41 - схему протиліодової системи з теплопередачею, згідно з винаходом;

Фіг. 42-46 - діаграми для аналізу протиліодової системи з теплопередачею, згідно з винаходом;

Фіг. 47 і 48 - характеристики ковзного тіла, згідно з винаходом;

Фіг. 49 - схему ковзного пристрою, що ілюструє випробування на зміну тертя на межі поділу об'єкта і льоду, згідно з винаходом;

Фіг. 50 і 51 - ковзне тіло у вигляді лижі, згідно з винаходом;

Фіг. 52 - ковзне тіло у вигляді сноуборду, згідно з винаходом;

Фіг. 53 - ковзне тіло у вигляді черевики, згідно з винаходом;

Фіг. 54 - ковзне тіло у вигляді шини, згідно з винаходом;

Фіг. 55 - схему випробувальної конфігурації ковзного тіла, згідно з винаходом;

Фіг. 56 - ковзне тіло у вигляді гусениці, згідно з винаходом;

Фіг. 57 - ковзне тіло у вигляді лижі, згідно з винаходом;

Фіг. 58 - ковзне тіло у вигляді шини, згідно з винаходом;

Фіг. 59 - схему випробувальної конфігурації ковзного тіла, згідно з винаходом;

Фіг. 60 - діаграму залежності між коефіцієнтами тертя ковзних тіл і напругою, що подається на нагрівальні елементи, приєднані до ковзних тіл, згідно з винаходом;

Фіг. 61 - діаграму залежності між силою тертя спокою і нормальним тиском, що надається ковзними тілами на сніг, згідно з винаходом;

Фіг. 62 - діаграму залежності між коефіцієнтами тертя ковзних тіл і напругою, що подається на приєднаний нагрівальний елемент, згідно з винаходом;

Фіг. 63 - діаграму залежності між коефіцієнтами тертя одного ковзного тіла і часом, необхідним для зупинки ковзного тіла, згідно з винаходом;

Фіг. 64 - діаграму іншої залежності між коефіцієнтами тертя одного ковзного тіла і напругою, що подається на приєднаний нагрівальний елемент, згідно з винаходом;

Фіг. 65 і 66 - діаграми теплової енергії і часу охолодження ковзного тіла, згідно з винаходом;

Фіг. 67 - схему, що дозволяє проаналізувати збільшення тертя для ковзного тіла, згідно з варіантом здійснення, де як ковзне тіло виступає шина, згідно з винаходом;

Фіг. 68 і 69 - діаграми тертя між ковзним тілом і снігом, згідно з винаходом.

Описані нижче конкретні варіанти здійснення винаходу відносяться до систем і способів зміни межі поділу між об'єктом і льодом. Згідно з одним варіантом здійснення, система подає енергію на межу поділу між льодом (або снігом) і поверхнею об'єкта для видалення льоду з поверхні з метою «антиобмерзання»

об'єкта. Згідно з іншим варіантом здійснення, система модулює розтоплення в граничному шарі льоду на межі поділу лід-об'єкт, внаслідок чого розтоплений граничний шар швидко повторно заморожується, що дозволяє змінювати коефіцієнт тертя між поверхнею об'єкта і льодом.

Певні варіанти здійснення протиліодових пристроїв або ковзних тіл передбачають використання високочастотних (ВЧ) джерел живлення змінного струму (АС), інші варіанти здійснення протиліодових пристроїв або ковзних тіл передбачають використання джерел живлення постійного струму (DC) і/або системи перенесення теплової енергії (наприклад, системи акумуляції тепла).

Нижченаведені поділи озаглавлені так: «Імпульсні протиліодові системи», «Нагрівальні елементи, що використовуються в імпульсних протиліодових системах», «Аналіз імпульсних протиліодових систем», «ВЧ протиліодові системи», «Гребінчаста електронна схема для використання в імпульсній протиліодовій системі», «Аналіз ВЧ протиліодових систем», «Протиліодові системи з теплопередачею», «Аналіз протиліодових систем з теплопередачею», «Способи регулювання коефіцієнта тертя» і «Аналіз регулювання коефіцієнта тертя».

У деяких поділах, що описують імпульсні протиліодові системи, описані операції видалення льоду шляхом розтоплення граничного шару льоду, що налипнув на поверхню об'єкта. Нагрівальні елементи деяких імпульсних протиліодових систем також можуть використовуватися для розтоплення граничного шару, наприклад, шляхом електричного підключення до джерела живлення постійного або змінного струму. Інші варіанти здійснення імпульсних протиліодових систем передбачають модуляцію нагрівання на межі поділу льоду і об'єкта, через що об'єкт повторно заморожується (протягом періоду відсутності нагрівання), і коефіцієнт тертя між об'єктом і льодом змінюється. Деякі імпульсні протиліодові пристрої діють як ковзне тіло або разом з ним, що описано нижче.

У деяких розділах описуються операції із видалення льоду шляхом розтоплення граничного шару льоду, що налипнув на поверхню об'єкта. Гребінчасті електроди деяких ВЧ протиліодових систем можуть використовуватись для розтоплення граничного шару і можуть житись, наприклад, від джерела живлення змінного струму.

Інші варіанти здійснення ВЧ протиліодових систем можна використати для зміни коефіцієнта тертя між льодом і ковзним тілом. Під ковзним тілом мається на увазі об'єкт, який може контактувати з льодом і/або снігом. Він може ковзати внаслідок взаємодії з льодом і/або снігом і коефіцієнта тертя між ковзним тілом і льодом і/або снігом. Приклади ковзних тіл включають в себе шини, лижі, сноуборди, черевики, гусениці снігоходів, полози саней, шасі літаків і т.д.

У деяких розділах описані протиліодові системи з теплоперенесенням для видалення льоду шляхом розтоплення граничного шару льоду, що налипнув на поверхню об'єкта. Протиліодові системи з теплоперенесенням можуть містити підсистеми акумуляції тепла, в яких нагромаджується тепла енергія. Теплова енергія, накопичена в підсистемах акумуляції тепла, може переноситись на нагрівальний елемент, термічно пов'язаний з межею поділу об'єкта і льоду. Деякі варіанти здійснення протиліодових систем з теплоперенесенням передбачають акумуляцію теплової енергії і вибіркоче або кероване перенесення цієї енергії на межу поділу об'єкта з льодом.

В інших наведених нижче варіантах здійснення винаходу описані системи, що змінюють коефіцієнт тертя між льодом і ковзним тілом шляхом розтоплення граничного шару льоду, що примикає до ковзного тіла. Після розтоплення, граничний шар повторно заморожують для створення зв'язку між ковзним тілом і льодом. Цей зв'язок діє як «гальмо», яке збільшує коефіцієнт тертя між ковзним тілом і льодом. Потім повторно розтоплюють граничний шар для руйнування зв'язку, знову змінюючи коефіцієнт тертя. Ця модульована взаємодія заморожування і повторного заморожування на межі поділу об'єкта і льоду дозволяє регулювати коефіцієнт тертя до потрібної величини. Регульований коефіцієнт тертя корисний в таких пристроях, як лижі для гонок, снігоступи, черевики, сноуборди, ковзани та інші пристрої, які взаємодіють з льодом і снігом.

Імпульсні протиліодові системи

Імпульсні протиліодові системи можна використати для видалення льоду з поверхні об'єкта. Системи можна також використати для розплавлення граничного шару льоду і/або зміни коефіцієнта тертя на межі поділу об'єкта і льоду, що більш детально описано нижче.

На Фіг.1 показана імпульсна протиліодова система 10 для зміни межі 15 поділу між об'єктом 16 і льодом 11. Система 10 містить джерело 12 живлення, контролер 14 і нагрівальний елемент 13. Джерело 12 живлення здатне генерувати потужність, величина якої обернено пропорційна величині енергії, що використовується для розтоплення граничного льоду (що нижче іменується «граничний лід») на межі 15 поділу. Нагрівальний елемент 13 підключений до джерела 12 живлення для перетворення потужності в тепло на межі 15 поділу. Контролер 14 підключений до джерела 12 живлення для обмеження часу, протягом якого нагрівальний елемент 13 перетворює потужність в тепло. Час, протягом якого нагрівальний елемент 13 перетворює потужність в тепло на межі 15 поділу, по суті, обернено пропорційний квадрату величини потужності.

Зокрема, коли щільність потужності нагрівання W (Вт/м²) надходить протягом часу t на межу поділу між льодом і підкладкою, тепло розповсюджується на відстань $l_{вл}$ в льоді і на відстань $l_{вп}$ в підкладці. Товщину цих нагрітих шарів і їх відповідну теплоємність визначають, наскільки поглинається тепло. Якщо визначити коефіцієнти теплопровідності льоду і підкладки $\lambda_{л}$ і $\lambda_{п}$ відповідно, $\rho_{л}$ і $\rho_{п}$ - відповідна щільність і $C_{л}$ і $C_{п}$ - відповідна питома теплоємність, то, як відомо фахівцям в цій галузі техніки, тепловий потік $Q_{п}$ в льоді і тепловий потік $Q_{л}$ в підкладці можна виразити таким чином:

$$Q_{п} \approx C_{п} l_{вл} \rho_{п} (T_{г} - T) \quad (0-1)$$

де $T_{г} - T$ - різниця температур на межі поділу,

$$Q_{л} \approx C_{л} l_{вп} \rho_{л} (T_{г} - T) \quad (0-2)$$

$$I_{pn} = \sqrt{\frac{\lambda_n t}{\rho_n C_n}} \quad (0-3)$$

$$I_{pn} = \sqrt{\frac{\lambda_n t}{\rho_n C_n}} \quad (0-4)$$

Вирішуючи Рівн. (0-1) - Рівн. (0-4) відносно сумарної кількості теплоти, що відводиться з межі поділу, можна знайти:

$$Q = Q_n + Q_p \approx W \cdot t = \frac{(T_T - T)^2}{W} \left[\sqrt{\rho_n C_n \lambda_n} + \sqrt{\rho_p C_p \lambda_p} \right] \quad (0-5)$$

де: W - щільність потужності нагрівання на межі поділу.

Вищенаведений алгебраїчний аналіз дає наближений результат енергоспоживання, передбаченого імпульсною протилідовою системою. Точний математичний розрахунок шляхом розв'язання рівнянь в частинних похідних дозволяє прогнозувати, для часу t видалення льоду і енергії Q видалення льоду, наступний ілюстративний варіант здійснення:

наприклад, контролер 14 може регулювати час подання потужності на нагрівальний елемент 13 згідно з наступним співвідношенням:

$$t = \frac{\pi(T_T - T)^2}{4W^2} \left[\sqrt{\rho_n C_n \lambda_n} + \sqrt{\rho_p C_p \lambda_p} \right]^2 \quad (1-1)$$

де: T_T - температура танення льоду; T - температура навколишнього середовища; λ - коефіцієнт теплопровідності; ρ - щільність матеріалу; C - питома теплоємність матеріалу (нижній індекс «л» означає лід і/або сніг, і нижній індекс «п» означає матеріал підкладки); W - потужність на квадратний метр.

У цьому прикладі контролер 14 також регулює величину потужності, що подається на нагрівальний елемент 13, щоб енергія Q на межі 15 поділу була, по суті, обернено пропорційна величині потужності. У цьому прикладі, контролер 14 регулює величину потужності згідно з наступним співвідношенням:

$$Q = W \cdot t = \frac{\pi(T_T - T)^2}{4W^2} \left[\sqrt{\rho_n C_n \lambda_n} + \sqrt{\rho_p C_p \lambda_p} \right]^2 \quad (1-2)$$

Відповідно, щоб досягнути потрібної температури (наприклад, для розтоплення льоду на межі 15 поділу), затративши менше енергії, треба підвищити потужність нагрівання W , подаючи потужність нагрівання протягом більш короткого проміжку часу. Для порівняння, результат спрощеного аналізу рівн. 0-5 відрізняється від більш точного розв'язання рівн. 1-2 коефіцієнтом $\pi/4 \approx 0,785$. Ці рівняння, зокрема, корисні для опису коротких імпульсів потужності, коли довжина розсіювання тепла менше товщини цільового об'єкта (наприклад, товщина граничного льоду на межі 15 поділу).

Більш точне наближення можна отримати, склавши енергію, що використовується для розтоплення дуже тонкого шару граничного льоду, і для нагрівання тонкого нагрівника товщиною $d_{нар}$, Q_{min} :

$$Q_{min} = I_l \cdot q_l \cdot \rho_l + d_{нар} \cdot C_{нар} \cdot \rho_{нар} \cdot (T_T - T) \quad (1-3)$$

де: I_l - товщина розтопленого шару; ρ_l - щільність льоду; q_l - прихована теплота плавлення льоду; $C_{нар}$ і $\rho_{нар}$ - питома теплоємність і щільність нагрівника. В даному прикладі контролер 14 може регулювати величину потужності згідно з наступним співвідношенням:

$$Q = \frac{\pi(T_T - T)^2}{4W^2} \left[\sqrt{\rho_n C_n \lambda_n} + \sqrt{\rho_p C_p \lambda_p} \right]^2 + d_l \cdot q_l \cdot \rho_l + d_{нар} \cdot C_{нар} \cdot \rho_{нар} \cdot (T_T - T) \quad (1-4)$$

Енергія, отримана за Рівн. 1-4, наведена з розрахунку на квадратний метр (Дж/м²). У рівн. 1-4 можна також додати член, пов'язаний з конвективним механізмом теплопровідності, але цим членом звичайно нехтують через дуже малу тривалість імпульсу нагрівання. Коли товщина підкладки і/або шару льоду менше довжин розсіювання тепла (рівн. 0-3, рівн. 0-4, відповідно), енергія виявляється навіть менше отриманої з Рівн. 1-4.

Систему 10 можна, наприклад, використати в автомобілі для видалення льоду 11 з вітрового скла (як об'єкта 16). У цьому прикладі нагрівальний елемент 13 прозорий і вбудований у вітрове скло 16, а джерело 12 живлення і контролер 14 діють спільно, подаючи потужність, достатню для розтоплення граничного льоду на межі 15 поділу згідно з рівн. 1-1 і 1-2.

Щоб далі проілюструвати роботу системи 10, розглянемо властивості льоду:

$$\lambda_l = 2,2 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}, \quad \rho_l = 920 \text{ кг/м}^3, \quad c_l = 2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}, \quad q_l = 333,5 \text{ кДж/кг} \quad (1-5)$$

Властивості звичайного вітрового скла (наприклад, як підкладка) такі:

$$\lambda_n \approx 1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}, \rho_n \approx 3000 \text{ кг/м}^3, c_n \approx 1,54 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К} \quad (1-6)$$

Згідно з рівн. 1-1 час, необхідний для досягнення температури танення льоду (0°C) при початковій температурі -10°C і при щільності потоку енергії 100 кВт/м^2 , складає $t_{0,142}$ секунд для підкладки 16 зі скла або склоподібного матеріалу. Корекція на основі рівн. 1-3 може додати до тривалості близько $0,016$ секунд, тобто близько 10% . При зниженні пікової потужності нагрівання в десять разів (наприклад, з 100 кВт/м^2 до 10 кВт/м^2) цей час зростає приблизно на два порядки. Для порівняння, при -30°C повний час видалення льоду при $W=100 \text{ кВт/м}^2$ може становити $1,42$ секунд. Відповідну повну енергію Q видалення льоду при $W=100 \text{ кВт/м}^2$ і -10°C можна виразити як

$$Q = 100 \text{ кВт/м}^2 \cdot 0,158 \text{ сек.} = 15,8 \text{ кДж/м}^2 \quad (\text{Рівн. 1-7})$$

При тій же температурі і більш низькій потужності $W=10 \text{ кВт/м}^2$ енергія Q , що виражається за допомогою Рівн. 1-4, буде

$$Q = 144 \text{ кДж/м}^2 \quad (\text{Рівн. 1-8})$$

Цей результат майже на порядок величини більше, ніж при $W=100 \text{ кВт/м}^2$. Перевага вищеведеного прикладу полягає у використанні зниженої енергії видалення льоду у порівнянні з відомими системами, приблизно на один порядок величини за рахунок збільшення щільності потоку енергії приблизно на порядок при скороченні часу подання потужності приблизно на два порядки. Завдяки обмеженню часу подання потужності на межу 15 поділу обмежується стік теплової енергії в навколишнє середовище і в масу льоду 11 . Навпаки, завдяки більш коротким імпульсам потужності більше енергії залишається в межах межі 15 поділу для розтоплення граничного льоду.

На Фіг.2 показана імпульсна протилідова система 20 , згідно з іншим варіантом здійснення винаходу. Протилідова система 20 містить джерело 22 живлення постійного струму, конденсатор 26 , резистивний нагрівальний елемент 28 і перемикач 24 . Джерело 22 живлення постійного струму здатне подавати потужність для зарядки конденсатора, коли перемикач 24 замкнутий на контакт 23 . Конденсатор 26 , будучи підключеним до резистивного нагрівального елемента 28 через контакт 25 , здатний видавати певну потужність відповідно до рівнянь Фіг.1. Перемикач 24 знаходиться, наприклад, під оперативним управлінням контролера або мікропроцесора для видачі імпульсу струму з конденсатора 26 на резистивний нагрівальний елемент 28 , коли перемикач 24 замкнутий на контакт 25 (Рівн. 1-1 Фіг.1). Джерело живлення 22 постійного струму заряджає конденсатор 26 , коли перемикач 24 замкнутий на контакт 23 . Після зарядки конденсатора 26 , перемикач 24 розмикається, а потім замикається на контакт 25 для розряду струму в резистивний нагрівальний елемент 28 . Резистивний нагрівальний елемент 28 генерує достатню потужність нагрівання для розтоплення граничного шару льоду на межі об'єкта, наприклад, на межі 15 (Фіг.1). В залежності від застосування імпульсної протилідової системи 20 , розтоплення граничного шару корисне для видалення льоду з поверхні об'єкта, запобігання його утворенню на поверхні і/або зміни міцності його прилипання і/або зміни коефіцієнта тертя між льодом або снігом і об'єктом.

На Фіг.3 показана імпульсна протилідова система 30 , згідно з ще одним варіантом здійснення. Імпульсна протилідова система 30 містить пару силових шин 32 , нагрівальний елемент 34 , конденсатор 38 , перемикач 36 і джерело 37 живлення. Імпульсна протилідова система 30 здатна видаляти лід, що примикає до елемента 34 (наприклад, елемент 34 розташований з, в і/або на об'єкті, з якого треба видалити лід). У показаному на Фіг.3 варіанті здійснення конденсатор 38 є суперконденсатором, що має ємність близько 1000 Ф і потенціал близько $2,5 \text{ В}$, наприклад, суперконденсатор PC2500 виробництва Maxwell Technology. Крім того, нагрівальний елемент 34 містить лист фольги з нержавіючої сталі товщиною 50 мкм , приєднаний до пластини з плексигласу товщиною 1 см , і джерело 37 живлення являє собою джерело живлення постійного струму з ЕДС $2,5 \text{ В}$. Перемикач 36 може діяти як сильноточовий механічний перемикач для обмеження часу, протягом якого джерело 37 живлення подає потужність на нагрівальний елемент 34 . У деяких випадках перемикач 36 діє як електричний перемикач, що одержує керуючий сигнал від контролера, наприклад, контролера 14 (Фіг.1). Опір нагрівального елемента 34 складає близько 6 мОм . При початковій щільності потужності близько 40 кВт/м^2 , повній накопиченій енергії близько $3,125 \text{ кДж}$ і повній щільності енергії близько $83,33 \text{ кДж/м}^2$ імпульсна протилідова система 30 ефективно видаляє близько 2 см льоду на площі поверхні близько 375 см^2 приблизно за одну секунду при температурі навколишнього середовища близько -10°C , з використанням щільності енергії близько 40 кДж/м^2 .

Згідно з ще одним варіантом здійснення імпульсної протилідової системи 30 , конденсатор 38 є автомобільним акумулятором, наприклад, EverStart®; автомобільним акумулятором з піковим струмом близько 1000 А і потенціалом близько 12 В . Крім того, згідно з цим варіантом здійснення, нагрівальний елемент 34 містить лист фольги з нержавіючої сталі товщиною 100 мкм , приєднаний до пластини з плексигласу товщиною 1 см . Перемикач 36 може являти собою, наприклад, реле. При початковій щільності потужності близько 25 кВт/м^2 , імпульсна протилідова система 30 ефективно видаляє близько 2 см льоду на площі поверхні близько 375 см^2 приблизно за дві секунди при температурі навколишнього середовища близько -10°C , з використанням щільності енергії близько 50 кДж/м^2 . Згідно з ще одним варіантом здійснення, джерело живлення 37 являє собою джерело живлення постійного струму $2,5 \text{ В}$, який заряджає конденсатор 38 .

На Фіг.4 показана одна імпульсна протилідова система 40 , що відповідає ще одному варіанту здійснення винаходу. Протилідова система 40 містить джерело 42 живлення постійного струму, конденсатор 45 , резистивний нагрівальний елемент 46 , перетворювач 44 постійного струму і перемикач 48 . Джерело 42 живлення постійного струму здатне подавати потужність через перетворювач 44 постійного струму, щоб заряджати конденсатор 45 , коли перемикач 48 замкнутий на контакт 41 . Перетворювач 44

постійного струму здатний підвищувати напругу, що видається джерелом 42 живлення постійного струму. Конденсатор 45 підключений до резистивного нагрівального елемента 46 через контакт 43 і здатний видавати деяку потужність відповідно до рівнянь Фіг.1. Перемикач 48 знаходиться, наприклад, під оперативним управлінням контролера або мікропроцесора для видачі імпульсу струму з конденсатора 45 на резистивний нагрівальний елемент 46, коли перемикач 48 замкнутий на контакт 43 (Рівн. 1-1 Фіг.1). Джерело 42 живлення постійного струму заряджає конденсатор 45, коли перемикач 48 замкнутий на контакт 43. Після зарядки конденсатора 45, перемикач 48 розмикається, а потім замикається на контакт 43 для розряду струму в резистивний нагрівальний елемент 46. Резистивний нагрівальний елемент 46 генерує достатню потужність нагрівання для розтоплення граничного шару льоду. В залежності від застосування імпульсної протилідової системи 40 розтоплення граничного шару корисне для видалення льоду з поверхні об'єкта, запобігання його утворенню на поверхні і/або зміни міцності його прилипання і/або зміни коефіцієнта тертя між льодом і об'єктом. Імпульсна протилідова система 40 також корисна, коли недоступні великі подання потужності, або коли об'єкти мають малу площу поверхні контакту зі снігом, наприклад, для черевика (наприклад, черевик 684, Фіг.61). Згідно з одним варіантом здійснення, імпульсна протилідова система 40 використовується як «імпульсне гальмо», детально описане нижче.

На Фіг.5 показана імпульсна протилідова система 50, згідно з ще одним варіантом здійснення винаходу. Імпульсна протилідова система 50 здатна видаляти лід з об'єкта і містить протилідовий пристрій 62, пару силових шин 64, термopару 63, блок 52 термopар, підсилювач 54, батарею 58, реле 59, конденсатор 61, напівпровідникове реле (НПР) 60 і комп'ютерну систему 57. Протилідовий пристрій 62 підключений до силових шин 64 для прийому потужності від батареї 58. Комп'ютерна система 57 підключена до протилідового пристрою 62 через блок 52 термopар і підсилювач 54 для прийому температурної інформації про протилідовий пристрій 62 через термopару 63. Комп'ютерна система 57 може включати в себе плату 55 аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), здатну приймати температурну інформацію в аналоговому вигляді і перетворювати аналогову температурну інформацію в цифровий формат для використання комп'ютерною системою 57, яка підключена до протилідового пристрою 62 через НПР 60 для управління тривалістю і величиною потужності, що "подається на протилідовий пристрій 62, наприклад, відповідно до рівнянь Фіг.1. Комп'ютерна система 57 оперативно управляє НПР 60 і реле 59 для подання потужності від батареї 58 на протилідовий пристрій 62.

НПР 60 можна замінити електромагнітом 67 і перемикачем 66. Комп'ютерна система 57 може додатково включати в себе блок 56 транзисторно-транзисторної логіки (ТТЛ) для подання керуючої інформації на НПР 60, так що, коли електромагніт 68 отримує кроковий вхідний сигнал від модуля 56 ТТЛ, електромагніт 68 замикає перемикач 65. Коли перемикач 65 замкнутий, конденсатор 61 розряджається в електромагніт 67 для замикання перемикача 66. Коли перемикач 66 замкнутий, батарея 58 подає потужність на протилідовий пристрій 62. Комп'ютерна система 57 відключає потужність від протилідового пристрою 62, коли температура зростає до певного рівня, що визначається термopарою 63. Комп'ютерна система 57 приймає температурну інформацію від термopар 63 через блок 52 термopар і підсилювач 54. Блок 52 термopар передає температурну інформацію на комп'ютерну систему 57. Підсилювач 54 посилює температурну інформацію, після чого плата 55 А/Ц перетворює відцифровану температурну інформацію для комп'ютерної системи 57. Коли температура протилідового пристрою 62 досягає певного рівня, достатнього для розтоплення граничного шару льоду, комп'ютерна система 57 наказує блоку 56 ТТЛ розімкнути перемикач 65 за допомогою електромагніту 68. Оскільки перемикач 65 відкривається, коли комп'ютерна система визначає, що потрібно відключити подання потужності від протилідового пристрою 62, конденсатор 61 розряджається, і перемикач 66 розмикається, оскільки на електромагніт 67 вже не надходить напруга. При цьому, електромагніт 67 починає заряджати конденсатор 61.

Протилідовий пристрій 62 виконаний з нержавіючої сталі товщиною 50мкм і приєднаний до переднього краю малої аеродинамічної поверхні (наприклад, передній відкритий ділянки крила літака). Згідно з цим варіантом здійснення аеродинамічна поверхня має розмах близько 20см і товщину близько 5см, і протилідовий пристрій 62 має розміри близько 20см×10см.

Система 50 була випробувана таким чином. Протилідовий пристрій 62 сформували на аеродинамічній поверхні і вмістили в обморожувальну аеродинамічну трубу, його випробовували при швидкості повітря близько 142км/год, при -10°C з краплями води розміром близько 20мкм. На аеродинамічній поверхні утворювався атмосферний лід. Після наростання льоду товщиною від 5мм до 10мм, комп'ютерна система 57 наказувала батареї 58 подати потужність на протилідовий пристрій 62 у вигляді імпульсів, як показано на Фіг.5. При щільності потужності W близько 100Вт/м^2 і тривалість t імпульсу потужності близько 0,3 секунд, протилідовий пристрій 62 розтоплює граничний шар льоду на аеродинамічній поверхні, внаслідок чого прилипання льоду до аеродинамічної поверхні істотно змінюється і/або зникає. Після цього лід видалається з аеродинамічної поверхні силою лобового опору повітря. Тривалість імпульсу в цьому прикладі більше, ніж у прикладі вітрового скла, внаслідок більшої теплоємності нагрівника з металевої фольги.

На Фіг.6 показана імпульсна протилідова система 70 для крила 80 літака, згідно з одним варіантом здійснення. Імпульсна протилідова система 70 містить джерело 74 живлення і контролер 78. Джерело 74 живлення здатне генерувати потужність, величина якої, по суті, обернено пропорційна величині енергії, що використовується для розтоплення граничного шару льоду на межі 73 поділу. Показано, що межа 73 поділу - це поверхня крила 80 літака, що контактує з льодом і/або снігом. Імпульсна протилідова система 70 також містить нагрівальний елемент 75, підключений до джерела 74 живлення для перетворення потужності в тепло на межі 73 поділу. Система 70 містить контролер 78, підключений до джерела 74 живлення, для обмеження часу, протягом якого нагрівальний елемент 75 перетворює потужність в тепло. Тривалість подання потужності, наприклад, обернено пропорційна квадрату величини потужності.

Система 70 також містить детектор 72 льоду і датчик 76 температури. Датчик 76 температури приєднаний до межі 73 поділу, щоб реєструвати температуру на межі 73 поділу. Датчик 76 температури видає температурну інформацію про межу 73 поділу у вигляді сигналу зворотного зв'язку на контролер 78. Контролер 78 обробляє температурну інформацію для управління режимом подання потужності на нагрівальний елемент 75 і/або межу 73 поділу.

Детектор 72 льоду здатний реєструвати товщину льоду на межі 73 поділу. Детектор 72 льоду може, наприклад, включати в себе сітку з електродів, яка полегшує вимірювання товщини льоду. Оскільки лід має унікальну діелектричну постійну, відмінну від діелектричних постійних води і повітря, наявність і товщину льоду можна визначити, вимірявши міжелектродну ємність детектора 72 льоду. Детектор 72 льоду передає інформацію про лід (наприклад, наявність і товщину льоду) на контролер 78. Контролер 78 обробляє інформацію, щоб визначити, коли треба подавати потужність на нагрівальний елемент 75. Згідно з одним варіантом здійснення, коли лід на крилі 80 літака досягає певної товщини, контролер 78 автоматично визначає необхідність видалення льоду і оперативно наказує джерелу 74 живлення подати потужність на нагрівальний елемент 75.

Нижче описаний приклад експлуатаційних характеристик системи 70. Розглянемо навколишнє середовище протилідового пристрою, в якому зовнішня температура T складає близько -10°C , швидкість повітря - близько 320км/год , і товщина крила 80 літака - близько 10см , при коефіцієнті конвективного теплообміну h_k близько $1200\text{Вт/К}\cdot\text{м}^2$ (на основі експериментальних даних).

Для порівняння, відома протилідова система подає потужність W на поверхню крила 80 літака, щоб підтримувати температуру T_T на поверхні крила 80 літака вище точки замерзання води (наприклад, 0°C), згідно з наступним рівнянням:

$$W = h_k (T_T - T) = 12\text{кВт/м}^2 \quad (\text{Рівн. 6-1})$$

Підтримка цієї потужності протягом трьох хвилин дає велику кількість енергії Q , що виражається наступним рівнянням:

$$W = 12 \cdot 10^3\text{Вт/м}^2 \cdot 180\text{сек.} = 432\text{кДж/м}^2 \quad (\text{Рівн. 6-2})$$

Імпульсна протилідова система 70 відрізняється від відомої протилідової системи тим, що розтоплює граничний шар льоду на межі поділу, а не весь лід. Імпульсна протилідова система 70 очищає аеродинамічну поверхню від льоду, використовуючи тільки 30кДж/м^2 . При трихвилинному інтервалі між імпульсами імпульсна протилідова система 70 споживає дуже низьку «середню» потужність:

$$W_{\text{серед}} = 30\text{кДж/180сек.} \cdot \text{м}^2 = 0,167\text{кВт/м}^2 \quad (\text{Рівн. 6-3})$$

Зокрема, результат Рівн. 6-3 становить тільки $1,4\%$ від того, що використовує електротепловий протилідовий пристрій, згідно з Рівн. 6-2.

Згідно з цим варіантом здійснення, імпульсна протилідова система 70 видає імпульси енергії на нагрівальний елемент 75 згідно з рівняннями Фіг.1. Нагрівальний елемент 75 може містити сітку з електродів для розтоплення граничного шару льоду на межі 73 поділу. Коли товщина льоду досягає певного заздалегідь заданого значення (наприклад, 3мм), контролер 78 наказує джерелу 74 живлення подати короткий імпульс потужності на нагрівальний елемент 75. Тривалість імпульсу залежить від температури, що видається датчиком 76 температури, потужності, що видається джерелом 74 живлення, і фізичними властивостями матеріалу підкладки (наприклад, поверхні крила 80 літака і/або нагрівального елемента 75). Наприклад, тривалість імпульсу потужності, що подається, може виражатись Рівн. 1-1 Фіг.1.

В імпульсній протилідовій системі 70 застосовується другий датчик (не показаний) поблизу нагрівального елемента 75 для поліпшення регулювання потужності. Наприклад, коли гранична температура досягає певного значення при поданні імпульсної потужності, контролер 78 може наказати джерелу 74 живлення відключити потужність від нагрівального елемента 75 і, таким чином, скоротити енергоспоживання.

Експерименти з різними нагрівниками, наприклад, ВЧ нагрівником з втратами в діелектрику і нагрівником постійного струму, дають результати, відповідні вищеописаним теоретичним прогнозам. У деяких розглянутих тут варіантах здійснення, коли площа обмерзання дуже велика, щоб джерело живлення могло одночасно нагрівати всю площу, антиобмерзання можна здійснювати ділянкою за ділянкою. Наприклад, можна видалити лід з всієї структури, послідовно видаляючи лід з цих ділянок. Сили лобового опору літака можуть додатково видаляти лід з аеродинамічної поверхні. Однак, оскільки потрібний час, щоб велика частина крила 80 літака, повернена вперед, підтримувалась такою, що не замерзла (наприклад, роздільна смуга), може підвищитись середня потужність, виражена в Рівн. 6-3. В імпульсній протилідовій системі 70 можна використати інші нагрівники, наприклад, нагрівник на гарячому повітрі, що відбирається у компресора, який є у багатьох літаках.

Нагрівальні елементи, що використовуються в імпульсних протилідових системах

У деяких нижчеописаних варіантах описані нагрівальні елементи, що використовуються в різних імпульсних протилідових системах. Ці нагрівальні елементи отримують потужність від джерела живлення, наприклад, джерела живлення постійного струму, а потім розтоплюють граничний шар льоду на межі поділу. Коли граничний шар льоду розтоплений, лід видаляється або повторно заморожується в залежності від вимог, що більш детально описано нижче.

На Фіг.7 показана багатшарова структура 90 нагрівального елемента протилідового пристрою для видалення льоду зі структури 92, наприклад, шляхом подання потужності відповідно до рівнянь Фіг.1. Багатшарова структура 90 містить електричний і теплоізолятор 94 підкладки, електропровідний шар 96 і захисний шар 98. Шар 96 отримує потужність і перетворює її в тепло для видалення льоду зі структури 92 і/або запобігання його формуванню. Шар 96 є одним з різних описаних тут нагрівальних елементів. Згідно з одним варіантом здійснення багатшарова структура 90 містить сукупність окремих компонентів, приєднаних до структури 92, які створюють «осередки», в яких лід можна окремо видаляти (наприклад, видаляти осередок за осередком або ділянку за ділянкою).

Потужність, що подається на багатшарову структуру 90, складає від 10кВт/м^2 до 100кВт/м^2 . Відповідно, для подання такої потужності треба вибрати джерело живлення ємністю приблизно від 10кДж/м^2 до 100кДж/м^2 в залежності від необхідного часу видалення льоду і зовнішньої температури. Деякі джерела

живлення з такими характеристиками являють собою хімічні батареї, суперконденсатори, ультраконденсатори, електролітичні конденсатори, маховики, пов'язані з генераторами, перетворювачі постійного струму та інвертори і їх комбінації.

Сучасні хімічні батареї відрізняються високою щільністю накопиченої електричної енергії (наприклад, 60кДж/кг для свинцевої батареї). Однак, хімічні батареї мають порівняно низьку щільність потужності. Наприклад, автомобільний акумулятор може видавати приблизно до 1000А при дванадцяти вольтах протягом приблизно десяти секунд, що відповідає потужності близько 12кВт. Типовий автомобільний акумулятор має велику ємність, приблизно $Q \approx 12V \times 100A \times 3600 \text{сек.} = 4,3210^6 \text{Дж}$. Тому, для використання в імпульсних протиліодових системах і способах автомобільний акумулятор може ефективно видаляти лід з площі приблизно до 1,5м, що ідеально для автомобільного вітрового скла.

Суперконденсатори і ультраконденсатори відомі як хороші джерела пікової потужності і пікової ємності. Деякі суперконденсатори можуть нагромаджувати 10Дж/кг і видавати 1,5кВт/кг потужності (наприклад, суперконденсатор PC2500 виробництва Maxwell Technology). Як джерело живлення суперконденсатори можуть бути дуже придатними для використання з багатопотужною структурою 90 в імпульсних протиліодових системах.

Маховик, виконаний з легких композитних матеріалів і пов'язаний з генератором, забезпечує інший накопичувач енергії. Деякі маховики можуть акумулювати до 2 МДж/кг і, будучи пов'язані з генератором, можуть видавати щільність потужності близько 100кВт/кг. Наприклад, мотор-генератор спочатку діє як мотор, розкручуючи маховик до високої швидкості. Мотор використовує малопотужне джерело, наприклад, джерело у 100 ват або 1000 ват (наприклад, батарею). Коли потрібна пікова потужність, обмотки мотора відключаються від малопотужного джерела і підключаються до низькоомного навантаження (наприклад, електропровідного шару 96), тим самим перетворюючи кінетичну енергію, накопичену маховиком, в тепло.

Деякі варіанти застосування імпульсних протиліодових пристроїв передбачають використання високоомних електронагрівачів (наприклад, резистивного нагрівального елемента протиліодового пристрою автомобільного вітрового скла) і, тому, можуть потребувати високовольтного джерела живлення. Наприклад, протиліодовий пристрій автомобільного вітрового скла може використати від 120 вольт до 240 вольт. Ця напруга перевищує вихідну напругу звичайного автомобільного акумулятора (наприклад, близько 12 вольт) і суперконденсатора (наприклад, близько 2,5 вольт). Замість використання блока батарей для підвищення напруги, можна використати інвертори або ступінчасті перетворювачі постійного струму для збільшення напруги.

Тонкі електронагрівальні шари, наприклад, електропровідний шар 96 (Фіг.7) корисні для зниження енергоспоживання і теплової інерції антиобмерзання. Приклади матеріалів, які можна використати як шар 96, включають в себе тонку металеву фольгу, наприклад, фольгу з нержавіючої сталі, титанову фольгу, мідну фольгу і алюмінієву фольгу.. Можна також використати металеві напилення, сплави, провідні оксиди металів, провідні волокна (наприклад, вуглецеві волокна) і провідні фарби. Типова товщина шару 96 може складати приблизно від 50нм до 100мкм; однак можна використати та інші діапазони, наприклад, від 10нм до 1мм.

У деяких випадках захисний шар 98 здатний захищати шар 96 від несприятливого навколишнього середовища. Наприклад, шар 98 захищає шар 96 від стирання, ерозії, високошвидкісних ударів і/або подряпин. Захисний шар 98 може бути як діелектричним, так і провідним і накладатись безпосередньо на шар 96. Наприклад, шар 96 може мати порівняно високі теплові характеристики електропровідності і порівняно високу механічну міцність. Деякі приклади матеріалів, які можна використати як захисний шар 98, включають в себе TiN, TiCN, карбід вольфраму, WC, Al₂O₃, SiO₂, Cr, Ni, CrNi, TiO₂ і AlTiO. Захисний шар 98 можна накладати на шар 96 шляхом розпилення, хімічного осадження з парової фази (ХПО), фізичного осадження з парової фази (ФПО) і/або золь-гелевими методами (наприклад, за допомогою колоїдної зависі частинки оксиду кремнію, яка желеє з утворенням твердого тіла). Напилення, як відомо фахівцям в даній галузі, може включати в себе вміщення підкладки у вакуумну камеру. Плазма, що генерується пасивним газоподібним джерелом, (наприклад, аргон) генерує іонне бомбардування, направлене на ціль на підкладці, що приводить до «розпилення» матеріалу підкладки. Розпилений матеріал осаджується на стінках камери і на підкладці. Методи ХПО і ФПО відомі фахівцям в даній галузі.

Оскільки енергоспоживання імпульсних протиліодових пристроїв може залежати від властивостей підкладки, (наприклад, $\sqrt{\rho_{пс} \lambda_{п}}$ в Рівн. 1-1, 1-2, 1-4), потужність антиобмерзання можна знизити для матеріалів підкладки, що мають низьку щільність, високу теплоємність і/або низьку теплопровідність. Багато які полімери мають малий добуток ($\rho_{пс} \lambda_{п}$), тоді як метали мають великий добуток ($\rho_{пс} \lambda_{п}$). Тверді спінені матеріали також мають малий добуток ($\rho_{пс} \lambda_{п}$). Скло має добуток ($\rho_{пс} \lambda_{п}$) більш високий, ніж у звичайного полімеру, але порівняно більш низький, ніж у металів. В залежності від застосування теплоізолятор 94 підкладки може мати товщину приблизно від 100нм до 1мм, але звичайно приблизно від 0,1мм до 20мм.

На Фіг.8 показаний нагрівальний елемент 100 протиліодового пристрою, згідно з варіантом здійснення винаходу. Нагрівальний елемент 100 здатний розтоплювати граничний шар льоду на об'єкті, отримуючи імпульси енергії, наприклад, згідно з рівняннями Фіг.1. Наприклад, потужність можна подавати на нагрівальний елемент 100 на клеми 101 і 102, що дозволяє нагрівальному елементу 100 розтоплювати граничний шар льоду. Джерело живлення може подавати потужність на нагрівальний елемент 100 для розтоплення граничного шару льоду. В залежності від застосування нагрівального елемента 100 розтоплення граничного шару льоду може бути корисне для видалення льоду з поверхні об'єкта, запобігання його формуванню на поверхні і/або для зміни міцності прилипання і зміни коефіцієнта тертя між льодом і об'єктом. Елемент 100 може бути розміщений, наприклад, на, в або поряд з поверхнею об'єкта, що підлягає очищенню від льоду.

Аналіз імпульсної протиліодової системи

Нижче представлений аналіз деяких характеристик різних імпульсних протиліодових систем. Проілюстровані значення певних елементів, щоб показати, як тепло, що виділяється нагрівальними елементами, розсіюється в лід для видалення льоду з об'єкта.

На Фіг.9 показаний імпульсний протиліодовий пристрій 120. Лід 124 прилипає до теплопровідної підкладки 126, утворюючи межу поділу 122 лід-об'єкт. Нагрівальний елемент розташований на межі 122 поділу (наприклад, в підкладці 126) для полегшення подання імпульсів енергії на межу 122 поділу.

Підкладка 126 являє собою, наприклад, крило літака, вітрове скло, вікно, зовнішнє дзеркало, фару автомобіля, ротор вітряної установки, будівлю, дорожню конструкцію, міст, холодильник, антену, щоглу зв'язку, поїзд, залізничний шлях, тунель, дорожній знак, лінію електропередач, трос, конструкцію фунікулера або трос фунікулера.

На Фіг.10 показана відстань розсіяння тепла за час t (наприклад, t_1 і t_2), через лід 124 і підкладку 126, під тиском температури T на межі 122 поділу лід-об'єкт. По осі X 123 відкладена відстань під прямим кутом до межі 122 поділу (Фіг.9); і по осі Y 125 відкладена температура T . Кожна крива t_1 або t_2 виражає час для відстані поширення тепла в теплопровідну підкладку 126 і лід 124 по обидві сторони межі 122 поділу. Показано, що пік кожної кривої t_1 і t_2 відповідає точці 127 плавлення на осі Y 125, тобто температурі, достатній для розтоплення граничного шару льоду на межі 122 поділу.

Дві криві t_1 і t_2 залежать від імпульсної потужності, яка розтоплює граничний шар льоду. Показано, що t_1 менше t_2 і відповідає більш високій щільності потоку енергії. Оскільки імпульсна кількість енергії, що подається під кожною кривою t_1 і t_2 , достатня для розтоплення граничного шару льоду на межі поділу 122, переважно подавати таку імпульсну енергію згідно з t_1 , щоб забезпечувати більш високу щільність потоку енергії, але, загалом, меншу потужність у порівнянні з t_2 .

Зокрема, розглянемо наступне рівняння для часу розсіяння t на довжину L в напрямі осі X 123:

$$t = L^2 / D \quad (\text{Рівн. 10-1})$$

де: D - коефіцієнт температуропровідності, що виражається у вигляді:

$$D = \lambda / \rho c \quad (\text{Рівн. 10-2})$$

де: λ - коефіцієнт теплопровідності; ρ - щільність матеріалу; c - питома теплоємність матеріалу. Більш короткі імпульси потужності, що подаються на межу 122 поділу, нагрівають більш тонкі граничні шари льоду. Регулюючи тривалість потужності нагрівання, можна краще сфокусуватися на межі 122 поділу, де це необхідно. Час t і енергія Q , що подається на межу поділу для нагрівання граничного шару льоду 124 від температури T навколишнього середовища до точки 127 плавлення, задовольняють рівнянням, розглянутим в зв'язку з Фіг.1. Згідно з рівняннями Фіг.1 видалення льоду за допомогою пристрою 120 дозволяє економити енергію. Крім того, час t між імпульсами нагрівання можна регулювати згідно зі швидкістю наростання льоду і допустимою товщиною льоду. Наприклад, коли товщина льоду на крилі літака досягає близько 3мм, механізм зворотного зв'язку дозволяє пристрою 120 видалити лід 124, згідно з розглянутим в зв'язку з Фіг.6.

На Фіг.11 показана залежність часу видалення льоду і енергії видалення льоду (наприклад, теплової енергії) від щільності потужності нагрівання для однієї імпульсної протиліодової системи, що застосовується для вітрового скла автомобіля. Наприклад, шар провідного оксиду індію-олова (ITO) товщиною 0,5мкм, накладений на одну сторону вітрового скла, виконаного зі скла і що має розміри 10см×10см×5мм, можна використати як нагрівальний елемент в імпульсній протиліодовій системі. Коли лід наростає на вітровому склі до товщини близько 2см при зовнішній температурі близько -10°C, на нагрівальний елемент надходять імпульси потужності змінного струму частотою близько 60Гц для нагрівання граничного шару льоду. Коли граничний шар льоду розтоплений, сила тяжіння може видалити лід. Теплова енергія Q , необхідна для розтоплення граничного шару льоду, може залежати від часу і щільності потужності, з якою потужність надходить на нагрівальний елемент. На Фіг.11 показана така залежність, де по осі Y 132 відкладений час видалення льоду і енергія видалення льоду, а по осі X 133 відкладена щільність потоку енергії нагрівання W ; час виражений в секундах, а енергія в кілоджоулях/м².

Дві діаграми 130 і 131, по суті, відповідають теоретичним прогнозам, поданим в Рівн. 1-4 на Фіг.1. Наприклад, діаграми 130 і 131 показують, що час видалення льоду обернено пропорційний квадрату щільності потоку енергії W , тоді як теплова енергія Q приблизно обернено пропорційна першій мірі щільності потоку енергії W . Відповідно, така імпульсна протиліодова система знижує величину середньої потужності, що подається на нагрівальний елемент для видалення льоду з об'єкта або запобігання його утворенню на ньому.

ВЧ протиліодові системи

ВЧ протиліодові системи використовуються, наприклад, для видалення льоду з поверхні об'єкта. Як було вказано вище, ВЧ протиліодові системи можуть розтоплювати граничний шар льоду на межі поділу об'єкта і льоду, що дозволяє порушувати, змінювати і/або ліквідувати прилипання льоду. Після порушення прилипання льоду, лід може бути видалений з поверхні, наприклад, під дією сили тяжіння і/або вітру.

На Фіг.12 показана ВЧ протиліодова система 140 згідно з одним варіантом здійснення. ВЧ протиліодова система 140 містить біфілярну котушку 141, встановлену на діелектричній підкладці 142. Лід і/або сніг 143 прилип до поверхні 144 діелектричної підкладки 142. Котушка 141 може бути покрита діелектричним шаром для запобігання механічним пошкодженням і впливам навколишнього середовища і/або для запобігання електричному пробію повітря. Витки котушки 141 рознесені на діелектричній підкладці 142 на відстань D . При поданні потужності на котушку 142, наприклад, відповідно до рівнянь Фіг.1, ВЧ протиліодова система 140 порушує або змінює прилипання льоду і/або снігу 143 до поверхні 144. Тепер опишемо ілюстративні експлуатаційні характеристики ВЧ протиліодової системи 140.

Звичайний лід має ємність на квадратний метр:

$$C_L \cong \frac{1,2 \times 10^{-11} \phi}{D(m)} \frac{\phi}{m^2} \quad (\text{Рівн. 12-1})$$

і ВЧ провідність на квадратний метр

$$G_{\text{л}} = \frac{0,53 \cdot 10^{-4}}{D(\text{м})} \cdot e^{6670 \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T(\text{К})} \right)} \left(\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}^2} \right) \quad (\text{Рівн. 12-2})$$

де: D виражається в метрах, T - в Кельвінах. Електричний пробій повітря відбувається при напрузі $V_{\text{пр}}$ близько

$$V_{\text{пр}} \approx 2,4 \times 10^6 D(\text{м}) \quad (\text{Рівн. 12-3})$$

Якщо обчислювати на рівні моря і використати електричне поле повітряного пробою близько 30кВ/см, то середньоквадратичне значення (СКЗ) напруги $V_{\text{пр}}$ складає приблизно

$$V_{\text{пр}} \approx 1,7 \times 10^6 D(\text{м}) \quad (\text{Рівн. 12-4})$$

Переважно максимальна напруга визначається рівною близько 70% від $V_{\text{пр}}$ в (Рівн. 10-4) з міркувань безпеки.

Відповідно, V_{max} дорівнює

$$V_{\text{max}} = 0,7 \cdot 1,7 \times 10^6 D(\text{м}) \approx 1,2 \times 10^6 D(\text{м}) \quad (\text{Рівн. 12-5})$$

Об'єднуючи Рівн. 12-2 і 12-5, максимальна потужність нагрівання дорівнює

$$\begin{aligned} W_{\text{max}}(T) &= G_{\text{л}} \cdot V_{\text{max}}^2 = \\ &= 0,763 \cdot 10^6 \cdot D(\text{м}) \cdot e^{6670 \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{T} \right)} \end{aligned} \quad (\text{Рівн. 12-6})$$

Час видалення льоду ВЧ протилідової системи 140 евристично визначають, подаючи «безпечні» напруги згідно з наступним рівнянням:

$$W(T, V) = W_{\text{max}}(T) \cdot \left(\frac{V}{V_{\text{max}}} \right)^2 \quad (\text{Рівн. 12-7})$$

Припустимо, в котушці 141 намотані проводи товщиною 0,5мм і на неї подана безпечна напруга 600 вольт СКЗ, тоді час видалення льоду ВЧ протилідової системи 140 евристично визначається рівним близько тринадцяти секунд для розтоплення граничного шару льоду 143 на поверхні 144 при зовнішній температурі -30°C. Інші значення часу видалення льоду евристично визначені рівними близько 4,3 секунд при зовнішній температурі -20°C і близько 1,2 секунд при зовнішній температурі -10°C.

Було виявлено, що звичайна швидкість наростання льоду не перевищує 1,5мм/хв. Відповідно, якщо бажано скинути лід 143 з поверхні 144 приблизно кожні три хвилини, наближені середні потужності для видалення льоду можна визначити так:

$$1,75 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } -30^\circ\text{C} \quad (\text{Рівн. 12-8})$$

Щільність потужності, що використовується для підтримки роздільної смуги, вільної від льоду, шириною 0,2 дюйма, визначається шляхом додавання щільності потужності захисної смуги шириною вісім дюймів до кожної з щільності потужності Рівн. 10-8, передбачаючи, що звичайна щільність потужності дорівнює 40кВт/м². Наприклад, звичайна щільність потужності для роздільної смуги шириною 5 мм із захисною смугою шириною 8 дюймів визначається таким чином:

$$W = 40(\text{кВт/м}^2) - 0,2"/8" = 1 \text{ кВт/м}^2 \quad (\text{Рівн. 12-9})$$

Відповідно, додавання Рівн. 10-9 до щільності потужності Рівн. 12-8 дає наступні результати:

$$4,1 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } -30^\circ\text{C} \quad (\text{Рівн. 12-10})$$

Тому щільність потужності ВЧ протилідової системи 140 при -30°C (наприклад, 4,1кВт/м²) складає лише близько 10% від щільності потужності, що розвивається відомим нагрівником постійного струму.

На Фіг.13 показана ще одна ВЧ протилідова система 150. ВЧ протилідова система 150 містить сукупність електродів 154, встановлених на діелектричній підкладці 152 у вигляді гребінчастої електронної схеми. ВЧ протилідова система 150 видаляє лід 151 з поверхні 156 за рахунок подання електричної потужності на електроди 154 від ВЧ джерела живлення 155 змінного струму. ВЧ протилідова система 150 має характеристики антиобмерзання, в яких щільність потужності нагрівання, по суті, залежить від розмірів a і b, де a - відстань між електродами 154 і b - ширина електрода. Згідно з одним варіантом здійснення електроди 154 сплетені в сітку.

Показані електрична потужність, що подається на електроди 154, електричні силові лінії 153, що йдуть від електродів 154. У ВЧ протилідовій системі 150 провідність G схеми пропорційна ємності C схеми на квадратний метр, зумовленої лініями 153 електричного поля над діелектричною підкладкою 152. Наприклад,

$$G \propto C \left(\frac{C}{G} \right) = \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\sigma} \right) \quad (\text{Рівн. 13-1})$$

де: ε_0 - діелектрична проникність вакууму (наприклад, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), ε - відносна діелектрична проникність льоду; σ - електропровідність льоду. Припустивши $a=b$, отримаємо:

$$C \propto G \propto \frac{1}{l} \cdot \frac{b}{a} \cdot \varepsilon \varepsilon_0 \propto \frac{1}{l} \cdot \frac{\sigma}{l} \quad (\text{Рівн. 13-2})$$

де: l дорівнює a плюс b , що також іменується як період структури. Середнє електричне поле E дорівнює:

$$E \approx V/l \quad (\text{Рівн. 13-3})$$

де: V - СКЗ напруга, що подається на схему ВЧ протиліодової системи 150. Відповідно, потужність W нагрівання на кубічний метр дорівнює:

$$W = GV \propto \frac{\sigma V^2}{l} \propto \sigma \cdot l \cdot E^2 \quad (\text{Рівн. 13-4})$$

Таким чином, якщо максимальна потужність W_{\max} нагрівання обмежується у ВЧ протиліодовій системі 150 максимально можливим електричним полем E_{\max} (наприклад, полем пробоя), то W_{\max} задовольняють рівнянню:

$$W_{\max} \propto \sigma \cdot l \cdot E_{\max}^2 \quad (\text{Рівн. 13-5})$$

Тому, згідно з цим варіантом здійснення, W_{\max} зростає лінійно зі зростанням l . Крім того, об'ємна щільність $W_{\text{газ}}^V$ для W_{\max} не залежить від l , оскільки

$$W_{\max}^V = \frac{W_{\max}}{l} \propto \sigma \cdot E_{\max}^2 \quad (\text{Рівн. 13-6})$$

Тому, щоб підтримувати постійну W , E зменшують зі зростанням l . Відповідно, E можна зменшувати, щоб не було коронного розряду (наприклад, корисно при використанні полімерних підкладок та ізоляції електродів).

В експерименті, ВЧ протиліодова система 150 працювала при -12°C з різними потужностями нагрівання і напругами і з електродами, що мають розміри $a=b=75\text{мкм}$ (наприклад, при покритті поліімідною плівкою товщиною 5мкм , наприклад, каптоновим поліімідом «Каптон»). Були отримані наступні результати:

$$\begin{cases} W = 1\text{кВт/м}^2, \text{ при } V = 80\text{В} \\ W = 2\text{кВт/м}^2, \text{ при } V = 120\text{В} \end{cases} \quad (\text{Рівн. 13-7})$$

При заданні нових розмірів, $a=b=500\text{мкм}$ (наприклад, періоду структури в мм), напруга, яка підтримує потужність, росте як корінь квадратний з відношення нового і попереднього періодів структури, що дає

$$\begin{cases} V' = \sqrt{\frac{500\text{мкм}}{75\text{мкм}}} \cdot 80\text{В} \approx 207\text{В} (1\text{кВт/м}^2) \\ V' = \sqrt{\frac{500\text{мкм}}{75\text{мкм}}} \cdot 120\text{В} \approx 310\text{В} (2\text{кВт/м}^2) \end{cases} \quad (\text{Рівн. 13-7})$$

Одна перевага ВЧ протиліодової системи 150 полягає в тому, що її схему можна виготовити без застосування фотолітографії, навіть на викривлених поверхнях. Напруженість електричного поля також може знижуватися з швидкістю, яка, по суті, дорівнює зростанню l .

Гребінчаста схема для використання у ВЧ протиліодовій системі

Нижче описані варіанти здійснення і аналіз гребінчастих схем, які можна використати як нагрівальні елементи у ВЧ протиліодових системах. Нагрівальні елементи можуть мати можливість приймати ВЧ потужність змінного струму від джерела живлення змінного струму і можуть використовуватись для розтоплення граничного шару льоду на межі поділу. Коли граничний шар льоду розтоплений, лід можна видалити або повторно заморозити в залежності від вимог, наприклад, згідно з описаним нижче в розділі «Способи регулювання коефіцієнта тертя».

На Фіг.14 показаний аналіз ВЧ протиліодової системи 140, зображеної на Фіг.13. У цьому аналізі, для l визначається поліпшене відношення a/b .

Наприклад,

$$G \propto \frac{1}{l} \cdot G' \quad (\text{Рівн. 14-1})$$

де: G' - провідність одного осередку. Оскільки провідність пропорційна ємності, то G' пропорційна

ємності одного осередку, що виражається таким чином:

$$G' \propto C' \propto \frac{Q}{V} \propto \int_{a/2}^{(a+b/2)} \frac{E_y \cdot dx}{V} = \quad (\text{Рівн. 14-2})$$

$$= \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2a+b}{2a} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{a+1}{2a} \right)$$

З Рівн. 14-2 можна визначити потужність нагрівання таким чином:

$$W \propto GV^2 \propto \frac{G'}{I} \cdot V^2 \propto \frac{V^2}{I} \cdot \ln \left(\frac{a+1}{2a} \right) \quad (\text{Рівн. 14-3})$$

$$W \propto \frac{V^2}{I} \cdot \ln \left(\frac{a+1}{2a} \right) =$$

$$= \frac{E^2}{I_{\max}} \cdot a^2 \cdot \ln \left(\frac{a+1}{2a} \right) \quad (\text{Рівн. 14-4})$$

де: $0 \leq a \leq 1$. Згідно з діаграмою на Фіг.14, коли E підтримується постійною, максимальна потужність W_{\max} нагрівання досягає точки 159, де $a/l=0,576$ (наприклад, наближення $a \approx b$ порівняно добре, оскільки $l=a+b$). Потужність W нагрівання, коли $a=b=0,5l$, дорівнює приблизно 97% максимальної потужності нагрівання W_{\max} . Діаграма на Фіг.14, також ілюструє відношення 10% і 90% у відповідних точках 157 і 158, де потужність нагрівання W виявляється рівною 17% і 43% максимальної потужності W_{\max} нагрівання. Навпаки, коли підтримується постійна напруга, збільшення потужності нагрівання досягається за рахунок збільшення ширини електродів, наприклад, розміру «b».

На Фіг.15 показаний ряд типів 160-163 гребінчастої схеми. Гребінчасту схему (Фіг.15), можна використати в протильодовій системі, наприклад, описаній в розділі «ВЧ протильодові системи» і в розділі «імпульсні протильодові системи». Гребінчасту схему (вигляд 160) спочатку монтують шляхом жорсткого анодування однієї сторони (наприклад, «жорсткий анодований шар 172») товстої алюмінієвої фольги 171. Жорстко анодовану алюмінієву фольгу 171/172 прикріплюють до полімерної підкладки 174 за допомогою адгезиву 173 (вигляд 161). Прикріпивши жорстко анодовану алюмінієву фольгу 171/172 до полімерної підкладки 174, формують електроди шляхом травлення і/або літографування алюмінієвої фольги 171 із загальної структури, (вигляд 162), наприклад, літографовані краї 175. Після цього структуру згинають або підганяють під потрібну форму в залежності від вибору конструкції. Сторону алюмінієвої фольги 171, що залишилась відкритою, жорстко анодують для інкапсуляції сформованих електродів і для закладення тріщин в жорсткому анодованому шарі 172, які виникають при згинанні, як показано на вигляді 163.

На виглядах 160-163 представлений один спосіб формування гребінчастої схеми, можливі інші способи формування гребінчастої схеми. Приклади інших способів включають травлення і/або літографування мідної фольги для формування мідних електродів і прикріплення мідних електродів до каптової підкладки. Приклад мідної гребінчастої схеми на каптової підкладці показаний на Фіг.16.

На Фіг.16 показані два види гребінчастої схеми 180 згідно з одним варіантом здійснення. Гребінчаста схема 180 містить мідний анод 181, гребінчастий електрод 182, мідний катод 183 і каптову підкладку 184. Гребінчаста схема може бути сформована аналогічно поданій на Фіг.15. Вигляд 185 являє собою вигляд зверху. Згідно з виглядом 186, крок гребінчастої схеми 180 визначає дистальний проміжок між електродами гребінчастого електрода 182. Крок гребінчастої схеми 180 може також визначати дистальний проміжок між електродами мідного аноду 181. Зсув гребінчастої схеми 180 задає проміжок між електродами гребінчастого електрода 182 і електродами мідного аноду 181. Ширина гребінчастої схеми 180 визначає розмір по ширині електродів аноду 181. Ширина гребінчастої схеми 180 також може визначати розмір по ширині електродів гребінчастого електрода 182.

Гребінчасту схему 180 можна використати для зміни тертя між об'єктом і льодом і/або снігом шляхом подання електричної напруги на гребінчастий електрод 182. Наприклад, на гребінчастий електрод 182 можна подавати постійний струм згідно з рівняннями Фіг.1. В іншому прикладі, на гребінчастий електрод 182 можна подавати змінний струм.

Гребінчаста схема 180 змінює коефіцієнт тертя межі поділу поверхні об'єкта і льоду в поєднанні з природною зміною тертя між об'єктом і льодом або снігом при зміні температури. Наприклад, сталевий об'єкт «ковзне тіло» ковзає по льоду з швидкістю 3,14м/сек., коефіцієнт тертя ковзного тіла на льоду падає від 0,025 при -15°C до 0,01 при -1°C . Для збільшення температури льоду, що знаходиться в безпосередньому контакті з ковзним тілом, гребінчаста схема 180 може або нагріти безпосередньо лід за допомогою ВЧ електричних полів, або нагріти поверхню ковзного тіла.

Гребінчаста схема 180 може бути встановлена на поверхні ковзного тіла, яка звичайно контактує з льодом і снігом. Для нагрівання поверхні ковзного тіла, на гребінчасту схему 180 можна подавати напругу постійного або змінного струму. Наприклад, подаючи на поверхню ковзного тіла електричну потужність відповідно до рівнянь (Фіг.1), можна нагрівати лід і/або поверхню і змінювати коефіцієнт тертя між поверхнею ковзного тіла і льодом.

ВЧ електричну потужність змінного струму подають на гребінчасту схему 180, щоб безпосередньо нагрівати лід. При надходженні ВЧ потужності на електроди гребінчастої схеми 180 лінії електричного поля, наприклад, лінії електричного поля 153 (Фіг.15), проникають в граничний шар льоду і генерують в льоді тепло в кількості:

$$W_H = \sigma_L \cdot E^2 \quad (\text{рівн. 16-1})$$

де: W_H - потужність нагрівання у ватах на кубічний метр; σ_L - електропровідність льоду; E - напруженість електричного поля. Електричне поле проникає в лід або сніг на глибину, приблизно рівну відстані або кроку між електродами гребінчастої схеми 180. Відповідно, потужність нагрівання W_H задовольняє рівнянню:

$$W_H \approx \sigma_L \cdot \frac{V^2}{d^2} \quad (\text{Рівн. 16-2})$$

де: V - СКЗ напруга змінного струму. Потужність W_H в Рівн. 16-2 означає електричну потужність на одиницю об'єму, але важливіше знати потужність W на квадратний метр межі поділу лід/ковзний об'єкт. Щоб оцінити потужність на квадратний метр W_{KB} , треба помножити потужність W_H на товщину шару, що нагрівається, приблизно d , як показано вище. Тому, потужність на квадратний метр W_{KB} виражається рівнянням:

$$W_{KB} \approx \sigma_L \cdot \frac{V_2}{d} \quad (\text{Рівн. 16-3})$$

Потужність нагрівання на квадратний метр W_{KB} може обмежуватись електричним пробоем повітря, що відбувається при напруженості електричного поля $E_{пр}$, тому

$$\frac{V}{d} \leq E_{пр} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ В/м} \quad (\text{Рівн. 16-4})$$

З Рівн. 16-3 і 16-4 можна вивести співвідношення для максимальної потужності нагрівання високочастотним полем з розрахунку на одиницю площі ковзного об'єкта:

$$W_{KB} \leq \sigma_L \cdot d \cdot E_{пр}^2 \quad (\text{Рівн. 16-5})$$

Для практично чистого льоду при -10°C , електропровідність льоду на високих частотах (наприклад, понад 10кГц) дорівнює приблизно $2 \times 10^{-5} \text{ См/м}$. Підставивши в Рівн. 16-5 значення електропровідності σ_L , напруженості електричного поля $E_{пр}$ і відстані $d \approx 0,25 \text{ мм}$ (наприклад, типовий розмір у ВЧ протилідових пристроях), можна отримати максимальну межу потужності ВЧ нагрівання:

$$W_{KB} \leq 45 \text{ кВт/м}^2 \quad (\text{Рівн. 16-6})$$

Більш точне значення потужності, що використовується для підвищення температури граничного шару льоду на ΔT , можна обчислити згідно з наступним рівнянням:

$$W_{швид} = I_p \cdot a \cdot v \cdot \rho \cdot C \cdot \Delta T \quad (\text{Рівн. 16-7})$$

де: v - швидкість ковзного тіла; ρ - щільність льоду або снігу; a - ширина ковзного тіла; C - питома теплоємність льоду; I_p - довжина розсіяння тепла у льоді або в снігу. Довжина розсіяння тепла I_p виражається як

$$I_p = \sqrt{D \cdot t} \quad (\text{Рівн. 16-8})$$

де: t - час, протягом якого конкретна ділянка льоду контактує з ковзним тілом, що виражається як

$$t = \frac{L}{v} \quad (\text{Рівн. 16-9})$$

де: L - довжина ковзного тіла, D - коефіцієнт розсіяння тепла, що виражається у вигляді

$$D = \frac{\lambda}{C \cdot \rho} \quad (\text{Рівн. 16-10})$$

де: λ - коефіцієнт теплопровідності льоду або снігу. Підставляючи Рівн. 16-8, 16-9 і 16-10 в Рівн. 16-7, дістаємо наступну оцінку для зміни коефіцієнта тертя між льодом і ковзним тілом:

$$W_{швид} = a \cdot \Delta T \cdot \sqrt{v \cdot \lambda \cdot C \cdot L \cdot \rho} \quad (\text{Рівн. 16-11})$$

Як практичний цифровий приклад, для двох лиж із загальною шириною близько $a = 10^{-1} \text{ м}$ і довжиною $L = 1,5 \text{ м}$ може бути використана гребінчаста схема 180 для зміни коефіцієнта тертя між лижами і снігом. Припустимо, лижі переміщуються зі швидкістю $v = 10 \text{ м/сек}$. Щільність снігу ρ складає

$$\rho = 3 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3 \quad (\text{Рівн. 16-12})$$

зміна температури граничного шару снігу ΔT дорівнює

$$T=1^{\circ}\text{C} \quad (\text{Рівн. 16-13})$$

і питома теплоємність снігу C дорівнює

$$C=2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K} \quad (\text{Рівн. 16-14})$$

Виходячи з цих значень, можна обчислити оцінку енергоспоживання

$$W_{\text{швид}} \cdot W_{\text{швид}} = 134 \text{ Вт} \quad (\text{Рівн. 16-15})$$

Оскільки лише мала частка лиж може насправді знаходитись в контакті зі снігом в будь-який даний момент часу, оцінку енергоспоживання $W_{\text{швид}}$ можна додатково знизити до частки $W_{\text{швид}}$ або $W_{\text{швид-частка}}$ таким чином:

$$W_{\text{швид-частка}} = \frac{W}{H \cdot a \cdot L} \quad (\text{Рівн. 16-16})$$

де: W - вага лижника; H - міцність на стиснення снігу в паскалях (Па). Для важкого лижника (наприклад, 100кг) і $H=105\text{Па}$, $W_{\text{швид-частка}}$ буде складати

$$W_{\text{швид-частка}} \approx 6,6\% \quad (\text{Рівн. 16-17})$$

Відповідно, ВЧ потужність, необхідна для зміни коефіцієнта тертя буде

$$W_{\text{швид}} = 134 \text{ Вт} \times 0,066 \approx 9 \text{ Вт} \quad (\text{Рівн. 16-18})$$

Хоча даний варіант здійснення показує приклад застосування гребінчастої схеми 180 (наприклад, застосовно до лиж), фахівцям в даній галузі очевидно, що гребінчасту схему можна застосовувати для зміни коефіцієнта тертя між льодом і поверхнями інших об'єктів, включаючи, наприклад, сноуборди і снігоступи.

Аналіз ВЧ протилідової системи

Нижче представлений аналіз і деяких експлуатаційних характеристика різних ВЧ протилідових систем. Значення певних компонентів змінюються для ілюстрації різних умов, наприклад, умов навколишнього середовища, що змінюються, і/або режимів теплопередачі, що змінюються.

На Фіг.17 показана діаграма 190 частотної залежності електропровідності льоду і діелектричної проникності льоду. По осі Y 193 відкладена проникність ϵ , а по осі X 194 відкладена частота. Діаграма 190 також демонструє потужність ВЧ нагрівання для гребінчастих схем, наприклад, гребінчастої схеми 180 (Фіг.16).

Коли електропровідний матеріал знаходиться в електричному полі E , генерується об'ємна щільність тепла W , що виражається таким чином:

$$W = \sigma E^2 \quad (\text{Рівн. 17-1})$$

де: σ - електропровідність матеріалу (наприклад, електропровідність льоду). З Рівн. 17-1 виявляється, що щільність тепла пропорційна електропровідності і квадрату напруженості електричного поля. Тому, для підвищення швидкості нагрівання і, отже, скорочення часу видалення льоду, можна збільшити електропровідність льоду і/або напруженість електричного поля.

Електропровідність льоду залежить від температури, частоти і домішок в льоді. Електропровідність льоду зростає за рахунок регулювання частоти потужності змінного струму, що використовується для зміни коефіцієнта тертя між льодом і поверхнею об'єкта. При цьому, частотну залежність електропровідності льоду можна виразити так:

$$\sigma'(\omega) = \sigma_s + \frac{\omega^2 \tau_D^2 (\sigma_{\infty} - \sigma_s)}{1 + \omega^2 \tau_D^2} \quad (\text{Рівн. 17-2})$$

де: σ_s і σ_{∞} - статична і ВЧ електропровідності льоду, відповідно; ω - кругова частота потужності змінного струму; τ_D - час релаксації діелектрика для льоду.

Згідно з діаграмою 190, електропровідність змінюється зі зростанням частоти в температурних умовах близько $-10,1^{\circ}\text{C}$. Наприклад, згідно з кривою 191, електропровідність зростає зі збільшенням частоти, а згідно з кривою 192 електропровідність знижується зі збільшенням частоти. Відповідно, криві 191 і 192 ілюструють різні способи зміни електропровідності межі поділу лід-об'єкт шляхом регулювання частоти потужності ВЧ нагрівання.

Згідно з діаграмою 190 при $-10,1^{\circ}\text{C}$, лід має електропровідність близько $0,1 \text{ См/м}$ при частоті близько 10 кГц . Електропровідність льоду експонентно знижується при зниженні температури. Відповідно, електропровідність льоду при -30°C буде приблизно на порядок величини менше електропровідності льоду при -10°C .

Розміри нагрівального елемента ВЧ протилідового пристрою, наприклад, гребінчастої схеми 180 (Фіг.16), можуть залежати від електропровідності льоду і бажаної швидкості нагрівання. Відповідно, при генеруванні кількості теплоти на квадратний метр W в товщині граничного шару льоду з використанням прикладеної напруги V при відстані d між електродами, напруженість електричного поля E виражається

рівнянням:

$$E=V/d \quad (\text{Рівн. 17-3})$$

Кількість теплоти на квадратний метр W визначається

$$W'=Wd \quad (\text{Рівн. 17-4})$$

Об'єднавши Рівн. з 17-1 по 17-4, отримаємо наступний вираз для потужності нагрівання на квадратний метр:

$$W'=\sigma V^2/d \quad (\text{Рівн. 17-5})$$

Наприклад, звичайна щільність нагрівання для автомобільного вітрового скла складає близько 1кВт/м^2 , і напруга V складає близько 100 вольт. Використовуючи ці значення і значення електропровідності льоду, отримуємо з Рівн. 17-5 значення близько 0,1мм для кроку між електродами. В інших варіантах здійснення може бути отримане інше значення.

На Фіг.18 показана ілюстративна схема 200, що характеризує ВЧ протиліодовий пристрій згідно з одним варіантом здійснення. Схема 200 містить джерело 201 живлення змінного струму, конденсатор 203, конденсатор 204, резистор 202 і резистор 205. Резистор 202 підключений до джерела живлення 201 і конденсатора 203 і має опір $R_{вн}$, що виражає внутрішній опір джерела 201 живлення. Резистор 205 підключений паралельно з конденсатором 204 і має опір $R_{л}$, що виражає опір льоду. Конденсатор 204 має ємність $C_{л}$, що виражає ємність шару льоду. Конденсатор 203 підключений до резистора 205 і конденсатора 204 і має ємність $C_{д}$, що виражає ємність захисного діелектричного шару на протиліодових електродах, наприклад, котушці 141 (Фіг.12). Схема 200 являє собою принципову електричну схему для моделювання і аналізу деяких протиліодових систем.

На Фіг.19-23 зображені діаграми, що ілюструють деякі випробувальні аналізи схеми 200 згідно з одним варіантом здійснення, в якому схема 200 має шар діелектрика, який оточує електроди (наприклад, така схема, як гребінчаста схема 180, Фіг.16, з діелектричним шаром, який оточує електроди). У цьому середовищі схему 200 можна охарактеризувати за допомогою Таблиці 19-1:

Таблиця 19-1

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &:= 8,85 \cdot 10^{12} \\ f &:= 10, 100 \dots 1 \cdot 10^9 \\ \omega(f) &:= 2\pi f \\ T &:= 243, 244 \dots 273 \\ \tau_0 &:= 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left[6670\left(\frac{1}{T} - \left(\frac{1}{253}\right)\right)\right] \\ \epsilon_r(T) &:= 25047/T \\ \epsilon_{inf} &:= 3,2 \\ \sigma_{inf}(T) &:= 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot \exp\left[6670\left(\frac{1}{253} - \frac{1}{T}\right)\right] \\ \sigma_0 &:= 10^{-8} \\ \sigma(f, T) &:= \sigma_{inf} + \frac{(\epsilon_r(T) - \epsilon_{inf})}{1 + (\tau_0(T) \cdot \omega(f))^2} \\ \sigma(f, T) &:= \left[\frac{(\sigma_{inf}(T) - \sigma_0) \cdot (\tau_0(T) \cdot \omega(f))^2}{1 + (\tau_0(T) \cdot \omega(f))^2} \right] + \sigma_0 \\ d &:= 10^{-7}, 2 \cdot 10^{-7} \dots 3 \cdot 10^{-5} \\ \epsilon_d &:= 9,9 \\ C_d(d) &:= \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{8d} \end{aligned}$$

$$f := 2,5 \cdot 10^{-4}$$

$$V = 500$$

$$R_{\text{ли}} := 0$$

$$R_s(f, T, d) := \frac{4 \left(\frac{3}{2} l - 2d \right)}{\sigma(f, T)}$$

$$C_s(f, T, d) := \frac{\epsilon_s \epsilon_{\infty}(f, T)}{4 \left(\frac{3}{2} l - 2d \right)}$$

$$Z_s(f, T, d) := \frac{R_s(f, T, d)}{2\pi \cdot f \cdot C_s(f, T, d) \cdot \left(R_s(f, T, d) + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_s(f, T, d)} \right)}$$

$$Z(f, T, d) := Z_s(f, T, d) + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(d)}$$

$$I(f, T, d) := \frac{V}{R_{\text{ли}} + Z(f, T, d)} \pi$$

$$P_s(f, T, d) := V \cdot \text{Re}(I(f, T, d))$$

$$\epsilon_s := 80$$

$$\sigma_s = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$R_s(d) := \frac{4 \left(\frac{3}{2} l - 2d \right)}{\sigma_s}$$

$$C_s(d) := \frac{\epsilon_s \epsilon_{\infty}}{4 \left(\frac{3}{2} l - 2d \right)}$$

$$Z(f, d) := \frac{R_s(d)}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(d) \cdot \left(R_s(d) + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(d)} \right)}$$

$$Z_s(f, d) := Z(f, d) + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(d)}$$

$$I_s(f, d) := \frac{V}{R_{\text{ли}} + Z_s(f, d)}$$

$$P_B(f, d) := V \cdot \text{Re}(I_B(f, d)),$$

де: ϵ_0 - діелектрична проникність вакууму; f - зростаюча частота; ω - кругова частота як функція f ; T - зростаюча зовнішня температура в °K; τ_D - час релаксації діелектрика для льоду; ϵ_s - статична діелектрична проникність льоду; ϵ_{inf} - високочастотна діелектрична проникність льоду; σ_{inf} - високочастотна електропровідність льоду; σ_0 - статична електропровідність льоду; ϵ - діелектрична проникність льоду (наприклад, як функція частоти f і температури T); σ - електропровідність льоду (наприклад, як функція частоти f і температури T); d - товщина захисного діелектричного шару; ϵ_d - діелектрична проникність захисного діелектричного шару l ; V - напруга; Z_L - імпеданс льоду (наприклад, як функція частоти f , температури T і відстаней d); $Z(f, T, d)$ - повний імпеданс схеми, включаючи лід, що покриває електроди (наприклад, як функція частоти f , температури T і відстаней d); I - струм, що подається (наприклад, як функція частоти f , температури T і відстаней d); P_L - потужність, що подається для нагрівання льоду (наприклад, як функція частоти f , температури T і відстаней d); ϵ_B - діелектрична проникність води; C_B - ємність води; $Z(T, d)$ - повний імпеданс схеми, включаючи воду, що покриває електроди (наприклад, як функція частоти f і відстані d); I_B - струм, що подається (наприклад, як функція частоти f і відстані d); P_B - потужність, що надходить у воду (наприклад, як функція частоти f і відстані d). Електричну потужність обчислювали для обох з наступних випадків: коли лід покриває електроди і коли лід розтанув, і вода контактує з електродами.

На Фіг.19 показана залежність потужності нагрівання, що генерується в дистильованій воді (діаграма 210) при 20°C і в льоді (діаграма 211) при -10°C від товщини діелектричного покриття електродів. На Фіг.19 по осі Y 213 відкладена потужність нагрівання на м², а по осі X 212 відкладена товщина діелектричного покриття в метрах. Згідно з даним варіантом здійснення покриття являє собою покриття з оксиду алюмінію. Частота потужності змінного струму дорівнює близько 2кГц при напрузі близько 500 вольт СКЗ. При товщині покриття близько 25мкм, потужність нагрівання для води і льоду приблизно однакова.

На Фіг.20 показана залежність потужності нагрівання, що генерується в дистильованій воді (діаграма 220) при 20°C і в льоді (діаграма 221) при -10°C від частоти. На Фіг.20 по осі Y 223 відкладена потужність нагрівання у Вт/м², а по осі X 222 відкладена частота в Гц. При частоті близько 20кГц потужності нагрівання для води і льоду рівні. Це корисно для узгодження потужностей нагрівання для води і льоду, щоб уникнути холодних або гарячих ділянок на протилідовому пристрої, на яких лід тане.

На Фіг.21 показана залежність потужності нагрівання, що генерується в льоді (діаграма 230) від

температури. На Фіг.21, по осі Y 231 відкладена потужність нагрівання у Вт/м², а по осі X 232 відкладена температура в °K. Відповідно, діелектричне покриття на електродах ВЧ протиліодового пристрою можна використати для регулювання продуктивності протиліодового пристрою.

На Фіг.22 показана залежність коефіцієнта теплопередачі (Вт/м²·K) від швидкості повітря (м/сек.) (діаграма 240). На Фіг.22 по осі Y 241 відкладений коефіцієнт теплопередачі, а по осі X 242 відкладена швидкість v. Фіг.22 може допомогти у визначенні ВЧ потужності для видалення льоду і/або запобігання утворенню льоду на плоскому вітровому склі. Розмір вітрового скла дорівнює 0,5м у варіанті здійснення, що описується, схема 200 діє як ВЧ протиліодовий пристрій в режимі видалення льоду і в режимі запобігання утворенню льоду на вітровому склі. У Таблиці 19-2 показаний файл MathCad, що використовується для обчислення коефіцієнта конвективного теплообміну для вітрового скла автомобіля:

Таблиця 19-2

$$\begin{aligned} v &:= 1, 1, 1 \dots 30 \\ L &:= 0,1, 0,2 \dots 1 \\ Re_{\text{air}} &:= 10^5 \\ v &:= 1,42 \cdot 10^{-5} \\ Re_L(v, L) &:= \frac{v \cdot L}{\nu} \\ k &:= 0,0235 \\ Pr &:= 0,69 \\ Re_L(20, 0,5) &= 7,042 \times 10^5 \\ h(v, L) &:= \frac{k}{L} \cdot \left[0,568 Re_L^{1/4} \cdot Pr^{1/4} + 0,036 Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/4} \cdot \left[1 - \left(\frac{Re_L(v, L)}{Re_L(20, 0,5)} \right)^{1/4} \right] \right] \end{aligned}$$

де: v - швидкість автомобіля; L - довжина поверхні вітрового скла; Re - діапазон числа Рейнольдса від 105 до 107; h (v, L) - коефіцієнт теплопередачі (наприклад, як функція швидкості і L); k - коефіцієнт теплопровідності повітря; Pr - число Прандтля для повітря; ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря. В даному варіанті здійснення коефіцієнт теплопередачі h (v, L) при швидкості близько 30м/сек, і довжині близько 0,5 метрів дорівнює 89,389Вт/м²·K. Відповідно, Фіг.22 графічно показує (діаграма 240) співвідношення між коефіцієнтом теплопередачі h (v, L) і швидкістю повітря.

На Фіг.23 показана залежність мінімальної ВЧ потужності W_{min} схеми 200 від зовнішньої температури T (в °C) для швидкостей автомобіля 10м/сек, (діаграма 252), 20м/сек, (діаграма 251) і 30м/сек, (діаграма 250). На Фіг.23 по осі Y 253 відкладена мінімальна ВЧ потужність W_{min} у Вт/м², а по осі X 254 відкладена температура T. Мінімальна потужність нагрівання W_{min} для підтримки зовнішньої поверхні вітрового скла при температурі близько 1°C показана в Таблиці 19-3 (файл MathCad):

Таблиця 19-3

$$\begin{aligned} S &:= 0, 0,1, \dots 2 \\ T &:= 0, -1, \dots -30 \end{aligned}$$

$$W_{\text{min}}(v, L, T, S) := h(v, L) \cdot S \cdot (1 - T), \text{ де } S - \text{площа вітрового скла.}$$

Відповідно, діаграми 250, 251 і 252 можуть допомагати в прийнятті рішень відносно потужності, що подається згідно зі швидкістю v автомобіля з використанням схеми 200.

Фіг.24-26 графічно ілюструють інший аналіз схеми 200 (Фіг.18), в якому схема 200 має діелектричний шар, що покриває електроди (наприклад, гребінчаста схема 180 (Фіг.16) з діелектричним шаром, що покриває електроди). У цьому варіанті здійснення схему 200 можна охарактеризувати за допомогою Таблиці 24-1 (файл MathCad):

Таблица 24-1

$$\epsilon_0 := 8,85 \cdot 10^{-12}$$

$$f := 10, 100 \dots 1 \cdot 10^5$$

$$\omega(f) = 2\pi f$$

$$T := 243, 244 \dots 273$$

$$\tau_0(T) := 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left[6670\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{253}\right)\right]$$

$$\epsilon_s(T) := 25047/T$$

$$\epsilon_{inf} := 3,2$$

$$\sigma_{inf}(T) := 1,8 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left[6670\left(\frac{1}{253} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

$$\sigma_0 := 10^{-4}$$

$$\nu(\varepsilon, T) := \epsilon_{inf} + \frac{(\epsilon_s(T) - \epsilon_{inf})}{1 + (\tau_0(T) \cdot \omega(\varepsilon))^2}$$

$$\sigma(f, T) := \left[\frac{(\sigma_{inf}(T) - \sigma_0) (\epsilon_p(T) \cdot \omega(f))^2}{1 + (\tau_p(T) \cdot \omega(f))^2} \right] + \sigma_0$$

$$d := 10^{-7}, 2 \cdot 10^{-7} \dots 3 \cdot 10^{-5}$$

$$\epsilon_d := 9,9$$

$$C_t(d) := \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{8d}$$

$$l := 2,5 \cdot 10^{-4}$$

$$V = 500$$

$$R_{\text{вх}} = 0$$

$$R_s(f, T, d) := \frac{4 \left(\frac{3}{2} l - 2d \right)}{\sigma(f, T)}$$

$$C_s(f, T, d) := \frac{\varepsilon_0 \varepsilon(f, T)}{4 \left(\frac{3}{2} l - 2d \right)}$$

$$Z_s(f, T, d) := \frac{R_s(f, T, d)}{2\pi \cdot f \cdot C_s(f, T, d) \cdot \left(R_s(f, T, d) + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(f, T, d)} \right)}$$

$$Z(f, T, d) := Z_s(f, T, d) + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(d)}$$

$$I(f, T, d) := \frac{V}{R_{\text{вх}} + Z(f, T, d)} \pi$$

$$P_L(f, T, d) := V \cdot \text{Re}(I(f, T, d))$$

$$\varepsilon_s = 80$$

$$\sigma_s = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$R_s(d) := \frac{4 \left(\frac{3}{2} l - 2d \right)}{\sigma_s}$$

$$C_s(d) := \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s}{4 \left(\frac{3}{2} l - 2d \right)}$$

$$Z(f, d) := \frac{R_s(d)}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(d) \cdot \left(R_s(d) + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(d)} \right)}$$

$$Z_s(f, d) := Z(f, d) + \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot i \cdot C_s(d)}$$

$$I_s(f, d) := \frac{V}{R_{\text{вх}} + Z_s(f, d)} \pi$$

$$P_B(f, d) := V \cdot \text{Re}(I_B(f, d)),$$

де: змінні такі ж, як в Таблиці 19-1, але з іншими значеннями. Наприклад, σ_B - це електропровідність води з тим же значенням 5×10^{-4} См/м.

Фіг.24-26 графічно ілюструють залежність потужності нагрівання, що генерується в дистильованій воді (діаграми 261, 270, 281 відповідних Фіг.24, 25 і 26) при 20°C і в льоді (графіки 260, 271, 280 відповідних Фіг.24, 25 і 26) при -10°C, які відрізняються товщиною діелектричного шару: 10^{-5} м (Фіг.24), 10^{-6} м (Фіг.25), $2 \cdot 10^{-5}$ м (Фіг.26). Потужність нагрівання, показана на Фіг.24, 25 і 26, залежить від частоти потужності змінного струму. При зростанні частоти величина потужності, що подається, яка використовується для розтоплення граничного шару льоду, вирівнюється. Напруга змінного струму складає близько 500В. При товщині покриття близько 10мкм (10^{-5} м) відповідна потужність нагрівання для води і льоду практично рівні, як показано на Фіг.24.

Фіг.27-29 графічно ілюструють деякі випробувальні аналізи схеми 200, в яких схема 200 застосовується для ковзного тіла, детально описано нижче. У цьому варіанті здійснення враховується зміна температури снігу під ковзним тілом. Схему 200 можна охарактеризувати наступною Таблицею 26-1 (файл MathCad):

Таблиця 26-1

$$\rho := 300 \text{ кг/м}^3$$

$$x := 0, 0,0001 \dots 0,1 \text{ м}$$

$$C := 2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}$$

$$\lambda := 0,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$$

$$W := 1 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$$

$$D := \frac{\lambda}{C \rho}$$

$$D = 3,333 \times 10^{-7}$$

$$y(x,t) := \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}}$$

$$\Delta(x,t) := \frac{W}{\lambda} \cdot \sqrt{4 \cdot D \cdot t} \int_{y(x,t)}^{\infty} (1 - \operatorname{erf}(z)) dz$$

$$t := 0, 0,001 \dots 1 \text{ с}$$

$$a := 0,1 \text{ м}$$

$$L := 1,5 \text{ м}$$

$$v := 1, 2 \dots 30$$

$$W_{\text{швид}}(\Delta, v) := a \cdot \Delta \cdot \sqrt{v \cdot \lambda \cdot C \cdot L \cdot \rho}$$

$$W_{\text{швид}}(1, 10) = 134,164 \text{ Вт}$$

де: ρ - щільність снігу; x - відстань в снігу від ковзного тіла; C - теплоємність снігу; λ - коефіцієнт теплопровідності снігу; W - потужність нагрівання; D - коефіцієнт температуропроводності снігу; t - тривалість подання потужності; a - ширина ковзного тіла; L - довжина ковзного тіла; v - швидкість ковзного тіла; y - змінна інтегрування; $W_{\text{швид}}$ - потужність нагрівання по відношенню до швидкості ковзного тіла; Δ - температура перегріву.

На Фіг.27 показана залежність температури перегріву Δ (наприклад, в °C) від відстані до ковзного тіла. На Фіг.27 по осі Y 295 відкладена температура перегріву Δ (°C), а по осі X 294 відкладена відстань від ковзного тіла (в метрах). При потужності нагрівання W близько 1кВт/м², діаграми 290, 291, 292 і 293 ілюструють температурну залежність імпульсів нагрівання, що мають приблизну тривалість $t=0,1$ сек., 0,2сек., 0,5сек. і 1сек., відповідно. На Фіг.28 показана залежність температури межі поділу сніг/ковзний об'єкт від часу (діаграма 300) при поданні ВЧ потужності щільністю 1000Вт/м². На Фіг.28 по осі Y 301 відкладена температура перегріву Δ (°C), а по осі X 302 показаний час (в секундах).

На Фіг.29 представлена потужність нагрівання, необхідна для підвищення температури межі поділу на 1°C при переміщенні ковзного тіла з швидкістю v близько 30м/сек. На Фіг.29 по осі Y 311 відкладена потужність нагрівання $W_{\text{швид}}$, а по осі X 312 відкладена швидкість v . В даному прикладі, коли ковзне тіло переміщається з швидкістю близько 5м/сек., потужність нагрівання складає близько 100 ват. Потужність нагрівання $W_{\text{швид}}$ побудована як функція швидкості v (графік 310).

На Фіг.30-35 показані діаграми, що ілюструють аналіз теплопередачі за допомогою конвекції для протиліодової системи і теплопередачі через підкладку для ВЧ протиліодової системи. У цьому прикладі ілюстративно характеризується стаціонарне рішення, наприклад, постійна потужність. На Фіг.30 показана залежність коефіцієнта теплопередачі h_k від швидкості повітря (діаграма 320) в припущенні, що аеродинамічна поверхня є циліндричною (передній край крила літака). На Фіг.30 по осі Y 321 відкладений коефіцієнт теплопередачі h_k , а по осі X 322 відкладена швидкість v . Коефіцієнт теплопередачі h_k для аеродинамічної поверхні можна обчислити згідно з Таблицею 30-1:

Таблиця 30-1 (файл MathCad1)

$$v := 25$$

$$D := 0,03$$

$$v := 10, 11 \dots 100$$

$$h_{k,1\sigma}, \text{ B} := \frac{v^{0,5}}{2^{0,25}} \cdot \frac{0,199 \cdot 0,024 \cdot 0,25^{0,25}}{(1,2 \cdot 10^{-3})^{0,41}} = \text{Вт/м}^2 \cdot \text{K}$$

$$h_{k,1\sigma}, \text{ C} (354) = 141,357 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$$

$$h_{k,1\sigma}, \text{ D} (0,0254) = 330,668 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$$

де: v - швидкість повітря; D - діаметр аеродинамічної поверхні. Приблизно половину коефіцієнта теплопередачі h можна приписати передній ділянці аеродинамічної поверхні при використанні числа Рейнольдса близько $1,9 \times 10^5$.

Коефіцієнт теплопровідності h_k близько 165Вт/м²·K, що використовується у ВЧ протиліодовому пристрої, генерує потужність W близько 4,5кВт на квадратний метр. Протиліодовий пристрій містить полімерний шар товщиною d з коефіцієнтом теплопровідності λ_d . Лід наростає на протиліодовому пристрої товщиною L . Коефіцієнт теплопровідності льоду це λ , і товщина нагрітого граничного шару в льоді приблизно дорівнює одній міжелектродній відстані, тобто близько 0,25мм. Статичну температуру перегріву граничного шару льоду $\Delta = T_{\text{меж}} - T_{\text{зов}}$, де: $T_{\text{меж}}$ - температура межі, $T_{\text{зов}}$ - зовнішня температура, можна

обчислити згідно з Таблицею 30-2 (файл MathCad):

Таблиця 30-2

$$W := 4500 \text{ Вт/м}^2$$

$$d := 0.002 \text{ м}$$

$$h := 165 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$L := 0, 0.0001 \dots 0.01 \text{ м}$$

$$l := 0.0001, 0.0002 \dots 0.01 \text{ м}$$

$$\lambda_a := 2.22 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$\lambda_d := 0.75 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$\Delta(L, l, \lambda_d) := W \cdot d \cdot \left[\frac{h \cdot L + (\lambda - l \cdot h) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-L}{l}\right) \right)}{h \cdot (\lambda \cdot d + l \cdot \lambda_d) + \lambda \cdot \lambda_d} \right]$$

На Фіг.31 показана залежність перегріву Δ в °С стаціонарного стану (стаціонарного рішення) від товщини льоду в метрах. На Фіг.31 по осі Y 335 відкладений перегрів Δ , а по осі X 336 відкладена товщина L. Діаграма 330 показує залежність перегріву стаціонарного стану в °С від товщини льоду в метрах, при припущенні наявності теоретично довершеного ізолюючого шару між протилідовим пристроєм і аеродинамічною поверхнею, а діаграма 331 показує залежність при наявності тефлонової плівки товщиною 2мм між протилідовим пристроєм і аеродинамічною поверхнею. Продуктивність антиобмерзання досягає максимуму, коли товщина льоду перевищує приблизно 1мм (точка 333 для теоретично довершеного ізолюючого шару і точка 334 для тефлонової плівки товщиною 2мм).

На Фіг.32 показана залежність перегріву Δ в °С стаціонарного стану від розміру електрода в метрах (діаграма 340), при припущенні наявності довершеного ізолюючого шару і товщині льоду 1мм. На Фіг.32, по осі Y 341 відкладений перегрів Δ , а по осі X 342 відкладений розмір l електрода. В даному прикладі можна спостерігати кипіння в прилеглому шарі льоду. Кипіння пояснюється випаровуванням льоду (наприклад, пара) і свідчить про перегрів більше, ніж на 110°C.

При експлуатації протилідовий пристрій може мати більш високу продуктивність, ніж в лабораторних умовах. Наприклад, фізичні властивості атмосферного льоду, наростаючого на аеродинамічній поверхні, інші, ніж у суцільного льоду. Атмосферний лід може містити воду, яка не замерзла, і/або пухирці газу. Ці включення атмосферного льоду можуть знижувати теплопровідність і щільність льоду. Наприклад, теплопровідність води дорівнює близько 0,56Вт/м·К, а теплопровідність суцільного льоду дорівнює близько 2,22Вт/м·К. Граничний шар льоду (наприклад, шар льоду, що примикає до протилідового пристрою) тепліше іншого льоду і може містити воду. Протилідовий пристрій, що використовується, з теплообміном можна моделювати шляхом апроксимації коефіцієнта теплопровідності льоду λ , числом в межах 0,5Вт/м·К до 2,22Вт/м·К. Приклад розрахований згідно з Таблицею 30-3:

Таблиця 30-3

$$W := 4500 \text{ Вт/м}^2$$

$$d := 0.002 \text{ м}$$

$$h := 165 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$L := 0, 0.0001 \dots 0.01 \text{ м}$$

$$l := 0.0001, 0.0002 \dots 0.01 \text{ м}$$

$$\lambda := 1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$\lambda_a := 0.75 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$\Delta(L, l, \lambda_a) := W \cdot d \cdot \left[\frac{h \cdot L + (\lambda - l \cdot h) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-L}{l}\right) \right)}{h \cdot (\lambda \cdot d + l \cdot \lambda_a) + \lambda \cdot \lambda_a} \right]$$

На Фіг.33 показана залежність перегріву Δ в °С стаціонарного стану (стаціонарного розв'язання) від товщини льоду в метрах. На Фіг.33 по осі Y 355 відкладений перегрів Δ , а по осі X 356 відкладена товщина L. Діаграма 350 показує залежність перегріву стаціонарного стану в °С від товщини льоду в метрах, при припущенні наявності теоретично довершеного ізолюючого шару між протилідовим пристроєм і аеродинамічною поверхнею, а діаграма 351 показує залежність при наявності тефлонової плівки товщиною 2мм між протилідовим пристроєм і аеродинамічною поверхнею. Продуктивність антиобмерзання досягає максимуму, коли товщина льоду перевищує приблизно 1мм (точка 352 для теоретично довершеного ізолюючого шару і точка 353 для тефлонової плівки товщиною 2мм).

Неоднорідний розподіл електричної потужності поблизу протилідових електродів також може викликати кипіння граничного шару льоду. Наприклад, локальна щільність потужності на поверхні електрода може перевищувати середню потужність приблизно на порядок величини внаслідок флуктуації

напруженості електричного поля. При цьому, в тих місцях, де потужність перевищує середню потужність, електрод може нагрівати граничний шар льоду швидше, ніж в інших місцях, з утворенням пари.

Результати розв'язання, що залежить від часу, можуть відрізнятися від результатів стаціонарних розв'язань. Наприклад, оскільки лід є матеріалом з низьким коефіцієнтом теплопровідності, при поданні ВЧ потужності на граничний шар льоду, «теплова хвиля» розповсюджується через лід. Відповідно, тонкий шар льоду можна вважати теплоізолюваним шаром льоду. При цьому, протиліодовий пристрій може подавати потужність переважно тільки в цей шар. Температурні криві, що залежать від часу, $\Delta(x, t)$ (діаграми 360, 361, 362 і 363 Фіг.34) можна обчислити згідно з Таблицею 30-4:

Таблиця 30-4 (файл MathCad)

$$\begin{aligned} \rho &:= 920 \text{ кг/м}^3 \\ C &:= 2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \\ x &:= 0, 0,0001..0,1 \text{ м} \\ \lambda &:= 1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} \\ W &:= 4,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2 \\ D &:= \lambda / \rho \cdot C \\ y(x, t) &:= \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}} \\ \Delta(x, t) &:= \frac{W}{\lambda} \cdot \sqrt{4 \cdot D \cdot t} \cdot \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}}} (1 - \operatorname{erf}(z)) dz \\ t &:= 0, 0,1 .. 1000 \text{ с} \\ D &= 5,435 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

де: ρ - щільність льоду; C - теплоємність льоду; λ - коефіцієнт теплопровідності льоду; x - відстань від нагрівника; W - потужність, що подається на квадратний метр, D - коефіцієнт теплопровідності; t - тривалість подання потужності (наприклад, в імпульсі нагрівання). На Фіг.34 показані діаграми 360, 361, 362 і 363 для відповідних значень часу 200сек., 100сек., 25сек. і 5сек., коли потужність W близько $4,5 \text{ кВт/м}^2$ надходить в атмосферний лід, що є сумішшю суцільного льоду, води, яка не замерзла, і пухирців газу, що має коефіцієнт теплопровідності $1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. На Фіг.34 по осі Y 365 відкладений перегрів Δ , а по осі X 366 відкладена відстань x від нагрівника.

Температура граничного шару (тобто температура граничного шару льоду) має типовий час розсіювання T , обчислений згідно з Таблицею 30-5:

Таблиця 30-5

$$\begin{aligned} L &:= 10 \\ \tau &:= L^2 / D \\ \tau &= 184 \text{ с} \end{aligned}$$

На Фіг.35 показана залежність температури межі поділу від часу, демонструючи залежність граничної температури перегріву Δ в $^{\circ}\text{C}$ від часу. На Фіг.35 по осі Y 371 відкладена температура перегріву Δ , а по осі X 372 відкладений час. При поданні короткого імпульсу нагрівання теплової енергії можна звести до мінімуму і все ж розплавити граничний шар льоду. Наприклад, теплову енергію можна обчислити згідно з Таблицею 30-6:

Таблиця 30-6 (файл MathCad)

$$\begin{aligned} \Delta(x) &:= \frac{W}{\lambda} \cdot \sqrt{4 \cdot D \cdot t} \cdot \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D \cdot t}}} (1 - \operatorname{erf}(z)) dz \\ \Delta(t) &:= 2 \cdot \frac{W}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} \\ t(\Delta) &:= \left(\frac{\Delta \cdot \lambda}{2W} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{D} \\ Q(W) &:= \left(\frac{\Delta \cdot \lambda}{2} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{D \cdot W} \end{aligned}$$

де: t - час, необхідний для досягнення потрібної температури перегріву Δ граничного шару льоду; Q - повна теплова енергія, необхідна для досягнення цієї температури. Як і на Фіг.1, повна теплова енергія Q може бути, по суті, обернено пропорційна потужності, що подається W , щоб протиліодовий пристрій мав більш високий ККД, і щоб економити повну електричну потужність.

Протиліодові системи з теплопередачею

У нижченаведених варіантах здійснення описані протиліодові системи з теплопередачею. Протиліодові системи з теплопередачею можна використати для видалення льоду з поверхні об'єкта. У

деяких варіантах здійснення системи можна використати для розтоплення граничного шару льоду і зміни коефіцієнта тертя на межі поділу поверхні об'єкта з льодом. Такі протиліодові системи з теплопередачею нагромаджують теплову енергію і періодично переносять теплову енергію від джерела нагрівання (або джерела тепла) на нагрівальний елемент.

На Фіг.36 показана протиліодова система 460 з теплопередачею. Протиліодова система 460 з теплопередачею представлена в двох станах - 460A і 460B. Протиліодова система 460 з теплопередачею містить джерело 464 живлення, теплоізолятор 462, нагрівальний елемент 466, мембрану 470 і клапан 468 мембрани. Протиліодова система 460 з теплопередачею здатна видаляти лід 472 з поверхні (наприклад, включаючи зовнішню поверхню 471 мембрани 470) об'єкта, наприклад, літака, крила літака, вітрового скла автомобіля, човна, літака, дороги, тротуару, морозильника, холодильника, бігової доріжки і вікна. Протиліодова система 460 з теплопередачею може забезпечувати акумуляцію тепла, що дозволяє подавати, по мірі необхідності, накопичене тепло у вигляді теплових імпульсів на межу поділу лід-об'єкт. Джерело 464 живлення може включати в себе джерело живлення, що перемикається, батарею, конденсатор, маховик і/або високовольтне джерело живлення. Як конденсатор можна використати суперконденсатор або ультраконденсатор.

У стані 460A мембрана 470 надувається газом через клапан 468 мембрани. Як газ можна використати повітря або інші гази, що володіє властивістю теплоізоляції. При поданні потужності на нагрівальний елемент 466 потужність перетворюється в деяку кількість теплової енергії, яка зберігається в нагрівальному елементі 466. Теплова енергія, збережена в нагрівальному елементі 466, переноситься в граничний шар 473 за рахунок здування мембрани 470, як показано в стані 460B. При здуванні мембрани 470 теплова енергія переноситься з нагрівального елемента 466 в граничний шар 473 для розтоплення граничного шару 473, внаслідок чого відбувається видалення льоду 472. Стан 460B підтримується стільки часу, скільки необхідно для розтоплення граничного шару льоду 472.

На Фіг.37 показана протиліодова система 480 з теплопередачею. Протиліодова система 480 з теплопередачею проілюстрована в двох станах - 480A і 480B. Протиліодова система 480 з теплопередачею містить джерело 484 живлення, теплоізолятор 486 і нагрівальний елемент 482. Протиліодова система 480 з теплопередачею здатна видаляти лід 492 з поверхні 491 об'єкта 493. Об'єкт 493 може відноситися до класу розглянутих вище об'єктів. Протиліодова система 480 з теплопередачею може забезпечувати акумуляцію тепла, що дозволяє подавати, по мірі необхідності, накопичене тепло у вигляді теплових імпульсів на межу поділу лід-об'єкт, щоб розтоплювати граничний лід.

У стані 480A нагрівальний елемент 482 показаний у вигляді двох шарів 482A і 482B, між якими укладений теплоізолятор 486. Теплоізолятор 486 рухомо встановлений між шарами 482A і 482B нагрівальних елементів, що дозволяє цим шарам при ковзанні приходити в контакт один з одним, як показано в стані 480B. Джерело 484 живлення подає деяку величину потужності на нагрівальний елемент 482. Як джерело живлення може виступати один або декілька джерел живлення. При поданні потужності на нагрівальний елемент 482 відбувається перетворення потужності в теплову енергію. Коли шар 482A приходить в контакт з шаром 482B, теплова енергія переноситься від нагрівального елемента 482 в граничний шар льоду 492 в кількості, достатній для розтоплення цього граничного шару. Шари 482A і 482B нагрівального елемента часто переміщуються відносно один одного, внаслідок чого теплоізолятор 486 періодично здійснює теплоізоляцію шарів 482A і 482B і обумовлює періодичне перенесення теплової енергії в граничний шар льоду на поверхні 491. Періодичне перенесення теплової енергії забезпечує подання середньої енергії в граничний шар для підтримки об'єкта вільним від льоду.

Нагрівальний елемент 482 може бути виконаний з провідного матеріалу, наприклад, у вигляді фольги з металу або металевого сплаву, тонкого шару металу на діелектричній підкладці, тонкого шару оксиду металу на підкладці, провідної полімерної плівки, провідної фарби, провідного адгезиву, дрової сітки і провідних волокон. Приклади прозорих провідників включають в себе SnO₂, ITO, TiN і ZnO. Приклади провідних волокон включають в себе вуглецеві волокна.

На Фіг.38 показана протиліодова система 500 з теплопередачею. Протиліодова система 500 з теплопередачею містить джерело 504 живлення, нагрівальний елемент 502, водяний насос 508, бак 506 і трубку 510. Протиліодова система 500 з теплопередачею здатна діяти як накопичувач тепла, що дозволяє подавати накопичене тепло у вигляді імпульсу тепла на межу поділу лід-об'єкт на поверхні 511. При поданні потужності на нагрівальний елемент 502, потужність перетворюється в теплову енергію. Нагрівальний елемент 502 підвищує температуру теплопровідної рідини в баку 506. Як теплопровідна рідина може бути використана вода або інша теплопровідна рідина. Насос 508 прокачує теплопровідну рідину через трубку 510. При закачуванні теплопровідної рідини в трубку 510 теплова енергія переноситься в граничний шар льоду 512 на поверхні 511. Внаслідок перенесення теплової енергії в граничний шар лід 512 відлипає від поверхні 511. Згідно з одним варіантом здійснення, насос 508 часто прокачує теплопровідну рідину через трубку 510, викликаючи періодичне перенесення теплової енергії в граничний шар, щоб подавати на межу поділу середню теплову енергію, необхідну для підтримки об'єкта вільним від льоду.

На Фіг.39 показана імпульсна протиліодова система 520, де показані відмінності протиліодових систем з теплопередачею (Фіг.37 і 38) від раніше описаних систем, наприклад, системи 10 (Фіг.1). У цьому варіанті здійснення лід 528 прилипає до поверхні 531 на межі поділу об'єкт-лід, прилеглої до поверхні 531. Імпульсна протиліодова система 520 містить джерело 524 живлення, один або декілька нагрівальних елементів 526 і шари 522A і 522B. Імпульсна протиліодова система 520 здатна видаляти лід 528 з поверхні 531 шару 522B. Наприклад, шар 522B є вітровим склом, з якого треба видалити лід.

Нагрівальні елементи 526 вбудовані в шар 522B і електрично підключені до джерела 524 живлення, щоб отримувати від нього потужність. Шари 522A і 522B виконані з практично прозорого матеріалу для використання у вітровому склі або як останнє.

Коли джерело 524 живлення подає потужність на нагрівальні елементи 526 (які також можуть бути прозорими), теплова енергія випромінюється від нагрівальних елементів 526 і порушує прилипання льоду 528 до поверхні 531 шару 522B. Джерело 524 живлення подає потужність на нагрівальні елементи 526 згідно з рівняннями Фіг.1. Як джерело 524 живлення може бути використаний одне або декілька джерел

живлення, наприклад, як на Фіг.36.

При поданні потужності на нагрівальні елементи 526 відбувається перетворення потужності в деяку кількість теплової енергії. Теплова енергія переноситься в граничний шар льоду 528 на поверхні 531 для порушення прилипання льоду 528 до поверхні 531. Потужність передається на нагрівальні елементи 526 частими імпульсами для періодичного перенесення теплової енергії в граничний шар протягом періодів, що виражаються Рівн. 1-1.

Для порівняння, джерело живлення протиліодової системи з теплоперенесенням, наприклад, джерела 484 і 504 живлення (Фіг.37 і 38) подають потужність на нагрівальні елементи, які, в свою чергу, виробляють теплову енергію. Протиліодова система з теплоперенесенням зберігає теплову енергію до подання теплової енергії на межу поділу лід-об'єкт.

Нагрівальні елементи 526 імпульсної протиліодової системи 520 можуть бути виконані, наприклад, з фольги з металевого сплаву, тонкого шару металу на діелектричній підкладці, тонкого шару оксиду металу на підкладці, практично прозорого провідника, провідної полімерної плівки, провідної фарби, провідного адгезиву, дрової сітки і/або провідних волокон. Приклади прозорих провідників включають в себе SnO₂, ITO, TiN і ZnO. Приклади провідних волокон включають в себе вуглецеві волокна. Нагрівальні елементи 526 можуть також включати в себе напівпровідникові пристрої, здатні перетворювати потужність в теплову енергію. Завдяки використанню множинних нагрівальних елементів 526, сумарне енергоспоживання можна сегментувати або визначати окремо. Наприклад, сегмент 535 поверхні 531 вимагає істотно менше енергії для розтоплення граничного шару льоду в цій ділянці в порівнянні з розтопленням граничного шару льоду в цій ділянці для всієї поверхні 531. Відповідно, миттєве енергоспоживання для порушення прилипання льоду 528 знижується, коли послідовне подання імпульсів на сегменти або ділянки приводить до часткового відлипання льоду 528 від всієї поверхні 531 протягом часу.

На Фіг.40 показана протиліодова система 540 з теплопередачею. Протиліодова система 540 з теплопередачею містить провідник 542 тепла (наприклад, «гарячу плиту»), діелектричну пластину 546 і нагрівальний елемент 544 (наприклад, тонку металеву фольгу). Протиліодова система 540 з теплопередачею здатна розтоплювати граничний шар льоду 545 на об'єкті, подаючи імпульси теплової енергії в лід 545. Наприклад, протиліодова система 540 з теплопередачею може знаходитись на поверхні об'єкта, внаслідок чого, подання потужності нагрівання на нагрівальний елемент 544 приводить до розтоплення граничного шару льоду 545.

Провідник 542 тепла перетворює потужність в теплову енергію, яка переноситься від провідника 542 тепла на нагрівальний елемент 544 через отвори 547 в діелектричній пластині 546. В одному прикладі провідник 542 тепла вібрає, внаслідок чого, коли провідник 542 тепла контактує з нагрівальним елементом 544, провідник 542 тепла переносить теплову енергію на нагрівальний елемент 544, який розтоплює граничний шар льоду. В залежності від застосування протиліодової системи 540 з теплопередачею, розтоплення граничного шару льоду може бути корисне для видалення льоду з поверхні об'єкта, для запобігання його формуванню на поверхні або для зміни міцності прилипання і зміни коефіцієнта тертя між льодом і об'єктом.

Протиліодова система 540 з теплопередачею використовується як «імпульсне гальмо», в якому імпульс нагрівання переноситься від провідника 542 тепла на нагрівальний елемент 544, коли провідник 542 тепла торкається нагрівального елемента 544, приєднаного до основи ковзного тіла, яке межує з льодом. При необхідності гальмування, провідник 542 тепла торкається нагрівального елемента 544 протягом декількох мілісекунд, через отвори 547 в діелектричній пластині 546, створюючи «гарячі плями», на яких лід тоне. Після прибирання провідника 542 тепла, розтоплені плями звичайно замерзають протягом декількох мілісекунд, забезпечуючи зв'язки між основою ковзного тіла і льодом.

Одним з параметрів імпульсного гальма є час, необхідний для розтоплення і подальшого замерзання льоду/снігу. Коли відбувається граничне охолодження між льодом або снігом і основою ковзного тіла, час охолодження можна оцінити згідно з виразом:

$$t_{\text{охол}} \approx \left[\frac{Q}{S} \cdot \frac{1}{(T_m - T) \left(\sqrt{\lambda_{\text{сніг}} \cdot \rho_{\text{сніг}} \cdot c_{\text{сніг}}} + \sqrt{\lambda_{\text{лиж}} \cdot \rho_{\text{сніг}} \cdot c_{\text{сніг}}} \right)} \right]^2 \quad (\text{Рівн. 40-1})$$

де: T_m - температура танення льоду; T - зовнішня температура; λ - коефіцієнт теплопровідності; ρ - щільність матеріалу; c - теплоємність матеріалу (нижній індекс «сніг» означає лід і/або сніг, і нижній індекс «лиж» означає матеріал, що використовується як основа ковзного тіла); W - потужність на квадратний метр; Q - теплова енергія, що виділяється; S - площа основи ковзного тіла.

На Фіг.41 показана система 560 теплопередачі, яка була виконана і перевірена, відповідно до варіанту здійснення, поданому на Фіг.36. Згідно з цим варіантом здійснення, система 560 теплопередачі містить два алюмінієвих диски 562 і 563 близько шести дюймів в діаметрі і товщиною 1мм. Згідно з одним варіантом здійснення, внутрішні поверхні дисків 562 і 563 відшліфовані і відполіровані для зниження оптичної випромінювальної здатності. Зовнішні поверхні дисків 562 і 563 анодовані в приблизно 15% розчині сірчаной кислоти для отримання плівки оксиду алюмінію товщиною від 10мкм до 12мкм (жорстке анодування). Диски 562 і 563 приєднані до плексигласового кільця 569 гумовим ущільнювальним кільцем 570В. Диски 562 і 563 також приєднані до плексигласового кільця 572 і, таким чином, до клапана 571, ущільнювальним кільцем 570А.

Система 560 теплоперенесення також містить нагрівальний елемент 565, приєднаний до диска 563 і здатний приймати електричну потужність від джерела 566 живлення для перетворення цієї потужності в теплову енергію. Нагрівальний елемент 565 містить вуглецеву фольгу, інкапсульовану в каптонову поліімідну підкладку 568. Термопара 564 може бути приєднана до диска 563 через отвір 579 в нагрівальному елементі 565 за допомогою теплопровідного клею. Згідно з одним варіантом здійснення, термопара 564 здатна контролювати температуру диска 562, коли нагрівальний елемент 565 переносить тепло на диск 563. Згідно з одним варіантом здійснення, джерело живлення 566 являє собою джерело

живлення постійного струму, здатний видавати близько 20В.

Вакуумний насос може підключатись до клапана 571, щоб приводити «холодний» і «гарячий» диски в контакт і переносити теплову енергію від гарячого диска до холодного диска. Наприклад, коли джерело 566 живлення подає потужність на нагрівальний елемент 565, останній перетворює потужність в теплову енергію і переносить цю енергію на диск 563, тим самим створюючи гарячий диск. Вакуумний насос відкачує повітря з камери 573, щоб камера стиснулась і диск 562 стикнувся з диском 563 (наприклад, з холодним диском). Коли диск 562 торкається диска 563, тепла енергія диска 563 переноситься на диск 562. Коли перенесення теплової енергії більше не потрібно, вакуумний насос накачує повітря в камеру, щоб розділити диски 562 і 563.

При температурі близько -10°C і при наявності льоду, що наріс на диску 562, і коли система 560 теплопередачі знаходиться у вертикальному положенні, потужність приблизно 10-25 ват, подана на нагрівальний елемент, нагріває диск 563 приблизно до 20°C . Коли вакуумний насос відкачує повітря з камери 573, внаслідок чого диски 562 і 563 торкаються один одного, лід 577 видаляється з диска 562, наприклад, під дією сили тяжіння. Хоча в камері 573 звичайно використовується повітря, альтернативно, в камері 573 можна використати інші теплоізолюючі гази.

Аналіз протиліодової-системи з теплопередачею

У нижченаведеному описі проаналізовані різні протиліодові системи з теплопередачею і показані їх експлуатаційні характеристики. Наприклад, проаналізовані характеристики різних матеріалів, наприклад, льоду при певній температурі, теплоємність якого відома (наприклад, C_p на Фіг.18). У цих аналізах, значення компонентів ілюструють різні умови, наприклад, умови навколишнього середовища і/або режими теплопередачі.

На Фіг.42-46 показані графіки, що ілюструють один ілюстративний аналіз протиліодової системи з теплопередачею. У цьому прикладі протиліодова система з теплопередачею містить перший і другий провідники тепла і нагрівальний елемент, які мають рівні теплоємності. Система характеризується природним конвективним теплообміном Nu через повітряний зазор, в якому нагрівальний елемент нагріває перший провідник тепла, щоб другий провідник тепла нагрівався до температури близько $275,5^{\circ}\text{K}$, коли два провідники тепла контактують один з одним. Таку систему можна охарактеризувати за допомогою Таблиці 42-1 (обчислюючи число Нуссельта для природної конвекції повітря між дисками 562, 563 (Фіг.41):

```

Tabl42-1 (Фіг.41) MuthCad)
v := 1,57*10^-5
L := 0,3125
g := 9,8
beta := 1/273
Pr := 0,69
Tn := 273
Ta := 243, 244 .. 273
Tn(Tn) := 2Tn - Tn^1.5
Delta(Tn) := Tn(Tn) - Tn

```

(тобто різниця температур між нагрівником і навколишнім середовищем)

$$Ra_L(T_n) = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot Pr(\Delta(T_n))}{\nu^2}$$

$$Ra_L(243) = 1,276 \times 10^4$$

$$Nu_1(T_n) := 0,0605 Ra_L(T_n)^{1/3}$$

$$Nu_2(T_n) := \left[1 + \left[\frac{0,104 Ra_L(T_n)^{0,292}}{1 + \left(\frac{6310}{Ra_L(T_n)} \right)^{0,96}} \right] \right]^{1/3}$$

де: T_n - температура матеріалу підкладки (диска 562); T_n - температура нагрівального елемента (диска 563); ν - кінематична в'язкість повітря; L - відстань між дисками 562 і 563, g - прискорення вільного падіння; β - коефіцієнт теплового розширення повітря; Pr - число Прандтля для повітря; T_n - температура танення льоду; T_n - зростаюча температура диска 562; Δ - різниця температур; Ra - число Релея для повітря; Nu_1 і Nu_2 - числа Нуссельта.

Відповідно на Фіг.42 показана (діаграма 580) залежність числа Нуссельта від зовнішньої температури (холодного диска 562). Таблиця 42-2 дозволяє обчислити швидкість природної конвективної теплопередачі між дисками 562, 563:

Таблиця 42-2 (файл MathCad)

$$\lambda_b = 0,025$$

$$W_k(T_n) := \frac{\lambda_b \cdot Nu(T_n) \cdot \Delta(T_n)}{L}$$

$$\frac{W_k(243)}{2} := 91,337 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

де: λ_b - коефіцієнт теплопровідності повітря; $W_k/2$ - середня швидкість теплопередачі, коли нагрівник нагріває диск 563 від T_n до T_n . На Фіг.42 по осі Y 581 відкладене Nu конвекції, а по осі X 582 відкладена температура T_n матеріалу підкладки. Середні втрати тепла W_k через повітряний зазор показані на Фіг.43 (діаграма 590). На Фіг.43 по осі Y 591 відкладене конвективне перенесення тепла $W_k/2$, а по осі X 592 відкладена температура T_n матеріалу підкладки.

На Фіг.44 показане перенесення тепла W_{i3} через задню ізоляцію (наприклад, ізоляцію на задній стороні першого провідника тепла, діаграма 600). У цьому варіанті здійснення ізоляція являє собою жорстку поліуретанову піну, що має товщину l близько 0,025м і коефіцієнт теплопровідності λ_b близько 0,026. Перенесення тепла W_{i3} можна обчислити згідно з Таблицею 42-3 (втрати тепла через задній ізолюючий шар):

Таблиця 42-3 (файл MathCad)

$$W_{i3}(T_n) := \lambda_b \cdot \Delta(T_n) / l$$

$$W_{i3}(243) / 2 := 31,4 \text{ Вт/м}^2$$

Відповідно, випромінювальне перенесення тепла W_b через повітряний зазор можна обчислити згідно з Таблицею 42-4 (втрати тепла через випромінювання)

Таблиця 42-4 (файл MathCad)

$$\varepsilon := 0,04$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$$

$$W_b(T_n) := \varepsilon \cdot \sigma (T_n(T_n) + T_a)^4 - T_a^4$$

$$W_b(243) = 12,502 \text{ Вт/м}^2$$

де: ε - випромінювальна здатність дисків 562 і 563; σ - постійна Больцмана. На основі Таблиці 42-4 можна побудувати діаграму випромінювального перенесення тепла W_b (діаграма 600) як функції температури T_n на Фіг.44 (T_n і T_a визначені вище). На Фіг.44 по осі Y 601 відкладене випромінювальне перенесення тепла W_b , а по осі X 602 відкладена температура T_n матеріалу підкладки.

На Фіг.45 показані сумарні середні втрати тепла W (діаграма 610) від нагрівального елемента. На Фіг.45 по осі Y 611 відкладені сумарні середні втрати тепла W , а по осі X 612 відкладена температура T_n матеріалу підкладки. Оскільки температура нагрівального елемента періодично змінюється від T_T до T_n , середня різниця температур між нагрівальним елементом і навколишнім середовищем складає приблизно $(3/4) \cdot (T_n - T_n)$. Сумарні середні втрати тепла W можна обчислити згідно з Таблицею 42-5 (сумарні втрати тепла в довілля):

Таблиця 42-5 (файл MathCad)

$$W(T_n) := 3/4 \cdot (W_k(T_n) + W_{i3}(T_n) + W_b(T_n))$$

$$W(243) = 197,907 \text{ Вт/м}^2$$

$$W(253) = 127,163 \text{ Вт/м}^2$$

$$W(263) = 63,602 \text{ Вт/м}^2$$

На Фіг.46 показана середня потужність $W_{\text{сер}}$ від джерела живлення, що використовується в протиліодовій системі з теплопередачею. На Фіг.46 по осі Y 623 відкладена середня потужність $W_{\text{сер}}$, а по осі X 624 відкладена температура. Результати середньої потужності показані як функція трьох зовнішніх температур холодної пластини T_n (діаграми 620, 621 і 622). Сумарна величина теплової енергії Q , необхідна для нагрівання нагрівального елемента від температури T_n матеріалу підкладки до T_n обчислюється у вигляді двох компонентів Q_1 і Q_2 . Q_1 - це теплова енергія, зумовлена теплоємністю нагрівального елемента, а Q_2 - це теплова енергія, яка переноситься від нагрівника в навколишнє середовище (сумарні втрати енергії з системи). Сумарну величину теплової енергії Q можна обчислити згідно з наступною Таблицею 42-6:

Таблиця 42-6 (файл MathCad)

```

d := 0,001
t := 1, 2 .. 300
C_n := 500
λ_n := 170
ρ := 2700
C_n := 2000
ρ_k := 920
λ_k := 2
Q_1(T_n) := d C_n ρ_k (T_n(T_n) - T_k)
Q_2(T_n) := 8,505 × 10^4 W/m^2
Q_2(T_n) := W(T_n)

```

де: d - товщина нагрівального елемента; t - тривалість теплообміну (наприклад, теплового імпульсу); C - теплоємність матеріалу; λ - коефіцієнт теплопровідності; ρ - щільність матеріалу (нижній індекс «л» означає лід і/або сніг, і нижній індекс «п» означає матеріал підкладки для більшості алюмінієвих сплавів); T_n - температура підкладки; T_n - температура нагрівального елемента; і T_т - температура льоду. Середню потужність від джерела живлення, що використовується в цій протиліодовій системі з теплопередачею (антиобмерзання кожні три хвилини (180сек.)), можна обчислити згідно з Таблицею 42-7:

Таблиця 42-7 (файл MathCad)

```

W_n(t, T_n) := Q_2(T_n) / t - W(T_n)
W_n(180, 213) = 670,407 Вт/м² (діаграма 620)
W_n(180, 253) = 464,843 Вт/м² (діаграма 621)
W_n(180, 263) = 366,107 Вт/м² (діаграма 622)

```

Протиліодова система з вищезазначеними характеристиками корисна як протиліодовий пристрій аеродинамічної поверхні (наприклад, крила літака). Така протиліодова система може бути виконана з алюмінієвого сплаву товщиною 1мм і встановлена позаду передньої кромки малої аеродинамічної поверхні, тобто, передньої відкритої частини крила літака. В даному прикладі, аеродинамічна система має розмах близько 20см і товщину близько 5см; розміри протиліодового пристрою становлять 20см×10см. При швидкості повітря близько 142км/год, і приблизно -10°С. Краплями води діаметром близько 20мкм на аеродинамічній поверхні утворюється атмосферний лід. Коли лід виростає приблизно до 5-10мм, комп'ютерна система (наприклад, контролер 78 (Фіг.6)) наказує джерелу живлення приступити до антиобмерзання, щоб розтопити граничний шар льоду на аеродинамічній поверхні, щоб істотно змінити і/або ліквідувати прилипання льоду до аеродинамічної поверхні. Тоді лід можна буде видалити з аеродинамічної поверхні силою лобового опору. Така система очищення аеродинамічної поверхні була побудована і перевірена, демонструючи продуктивність, вельми близьку до теоретичних прогнозів, наведених в Таблиці 42-7.

Способи регулювання коефіцієнта тертя

Нижченаведені варіанти здійснення передбачають зміну коефіцієнта тертя між поверхнею об'єкта (наприклад, що входить до складу ковзного тіла) і льодом або снігом. Система, подібна системі 40 (Фіг.4), використовує рівняння Фіг.1, щоб впливати на коефіцієнт тертя між ковзним тілом і снігом (наприклад, як описано для Фіг.47 і 48). Така система дозволяє збільшувати або зменшувати силу зчеплення між поверхнею поділу і снігом, що визначається конкретним застосуванням. Наприклад, в деяких описаних тут ковзних тілах така система використовується як імпульсне гальмо для гальмування ковзного тіла при його переміщенні по снігу.

На Фіг.47 і 48 показані характеристики ковзного тіла, наприклад, лижі або автомобільної шини. Ковзне тіло містить підкладку 632 ковзного тіла і нагрівальний елемент 633. Нагрівальний елемент 633 приєднаний до підкладки 632 ковзного тіла і може безпосередньо контактувати з льодом і/або снігом 630. Нагрівальний елемент 633 здатний приймати потужність від джерела живлення, наприклад, відповідно до рівнянь для Фіг.1.

На Фіг.48 показаний розподіл температури в підкладці 632 ковзного тіла і льоду 630 при поданні потужності на нагрівальний елемент 633 у вигляді імпульсу. Наприклад, на Фіг.48 показана відстань розсіяння тепла вздовж осі X 636 протягом часу t через лід 630 і підкладку 632 як функція зміни температури T вздовж осі T 639 на межі поділу лід-об'єкт. Крива t₁ виражає зміну температури, зумовлену розсіянням тепла в льоді 630 і в підкладці 632 при даній тривалості імпульсу. Показано, що пік t₁ кривої відповідає певній температурі 638 на осі T 639. Температури 638 досить для розтоплення граничного шару льоду 630. Зафарбована ділянка (m) під кривою t₁ являє собою розтоплений граничний шар.

До подання потужності на нагрівальний елемент 633 температура зовнішнього середовища представлена точкою 637. При поданні імпульсу потужності на нагрівальний елемент 633, температура елемента 633 починає рости і переходить в лід 630 на відстань 631 (відстань граничного шару льоду 630) і в підкладку 632. Ця температура росте до точки 635, де лід починає танути, і продовжує рости протягом

тривалості імпульсу потужності. Теплова енергія розтоплює тонкий граничний шар (m) льоду 630. Після відключення потужності від нагрівального елемента 633, температура починає падати нижче точки плавлення 635, крива t_2 . По мірі зниження температури нагрівального елемента прилипання льоду 630 до підкладки 632 ковзного тіла змінюється внаслідок повторного заморожування. Повторне заморожування збільшує прилипання льоду 630 до підкладки 632 і сприяє гальмуванню ковзного тіла на межі поділу нагрівального елемента 633.

Згідно з цим варіантом здійснення характеристики ковзного тіла задовольняють рівнянням Фіг.10. Наприклад, час t розсіяння на довжину L в напрямі осі X 636 можна виразити таким чином:

$$t = L^2/D \quad (\text{Рівн. 11-1})$$

де D - коефіцієнт теплопровідності, що виражається як

$$D = \lambda / \rho c \quad (\text{Рівн. 11-2})$$

де: λ - коефіцієнт теплопровідності; ρ - щільність матеріалу; c - теплоємність матеріалу. Відповідно, рівняння 11-1 і 11-2 показують, що теплова енергія, поглинена льодом 630 і підкладкою 632, розсіюється на відстань, пропорційну квадратному кореню з часу t . Чим менше тривалість подання потужності на нагрівальний елемент 633, тим тонше граничний шар льоду, що зазнає впливу. Час t і енергія Q , що подається на нагрівальний елемент 633 для нагрівання граничного шару льоду 630 від зовнішньої температури T до точки плавлення T_f (точка плавлення 638) - задовольняють рівнянням, розглянутим для Фіг.1.

На Фіг.49 показане одне ковзне тіло 640 для ілюстрації змін тертя на межі поділу лід-об'єкт. Ковзне тіло 640 містить акриловий повзун 644, датчик 642 сили і нагрівальний елемент 646, наприклад, титанову фольгу товщиною від 12,5мкм до 25мкм. Ковзне тіло 640 використовує нагрівальний елемент 646, який розтоплює граничний шар льоду 641, що примикає до ковзного тіла 640, за рахунок подання в шар імпульсів теплової енергії, наприклад, згідно з рівняннями для Фіг.1. Потужність можна подавати на нагрівальний елемент 646 на клеми 645 і 647, внаслідок чого нагрівальний елемент 646 розтоплює граничний шар льоду 641. Після розтоплення граничному шару льоду 641 дозволяють повторно замерзнути внаслідок більш низької зовнішньої температури, що забезпечує зв'язок між льодом 641 і повзуном 644.

Датчик 642 сили отримує інформацію про силу, прикладену повзуном 644 до льоду 641. Датчик 642 сили може передавати цю інформацію на контролер 643 для визначення, як подавати потужність на нагрівальний елемент 646. Джерело живлення, аналогічне описаному вище, може подавати потужність на нагрівальний елемент 646 для розтоплення граничного шару льоду 641. Розтоплення граничного шару льоду 641 приводить до зміни міцності прилипання льоду 641 до ковзного тіла 640 і зміни коефіцієнта тертя між льодом 641 і повзуном 644.

На Фіг.50 і 51 показане використання ковзного тіла 650 у вигляді лижі 654. Ковзне тіло 650 містить металеві нагрівальні елементи 652, наприклад, титанову фольгу, пов'язану з поверхнею 651 лижі, яка контактує зі снігом 653. Нагрівальні елементи 652 здатні розтоплювати шар граничного снігу, взаємодіючого з поверхнею 651, за рахунок подання імпульсів енергії в шар снігу 653, наприклад, згідно з рівняннями для Фіг.1. Потужність подається на нагрівальні елементи 652 одним з декількох описаних тут пристроїв. Після розтоплення граничного шару снігу 653, він повторно заморожується внаслідок більш низької зовнішньої температури і забезпечує зв'язок між снігом 653 і поверхнею 651. Зв'язок забезпечує підвищене зчеплення зі снігом 653 за рахунок зміни коефіцієнта тертя між льодом і ковзним тілом 650.

Ковзне тіло 650 може також містити кріплення 658, показане на Фіг.51. Перемикач 660 розміщений на кріпленні 658 для управління режимом подання потужності на нагрівальні елементи 652. Як перемикач 660 може бути використаний механічний перемикач. Перемикач 660 може також містити ручний перемикач, перемикач руху лижі, перемикач, реагуючий на тиск, акселерометр, перемикач з дистанційним управлінням і/або датчик руху. Кожний перемикач можна використати в ковзному тілі 650, щоб активувати нагрівання і повторне заморожування граничного шару льоду для забезпечення потрібного коефіцієнта тертя.

Зокрема, на Фіг.50 додатково показано, як нагрівальні елементи 652 можуть бути прислані до лижі 654. Згідно з Фіг.51, лижний черевик 656 вставлений в кріплення 658. Лижний черевик 656, при бажанні, можна використати для управління перемикачем 660, щоб подавати потужність на нагрівальні елементи 652. Потужність може подаватися від джерел живлення. Коли черевик 656 перемикає перемикач 660, останній проводить потужність від джерела живлення на нагрівальні елементи 652 для розтоплення граничного шару снігу 653, і, таким чином, для зміни коефіцієнта тертя між лижею 654 і снігом 653.

На Фіг.52 показане ковзне тіло у вигляді сноуборду 674. Ковзне тіло 670 містить нагрівальні елементи 672, прислані до нижньої поверхні 675 сноуборду 674. Поверхня 675 контактує зі снігом в ході експлуатації сноуборду 674. Експлуатаційні характеристики ковзного тіла 670 можуть бути такими ж, як у лижі 654 (Фіг.50 і 51). Нагрівальні елементи 672 можуть також бути вбудовані в сноуборд 674, але знаходиться в тепловому зв'язку з поверхнею 675, згідно з одним варіантом здійснення.

На Фіг.53 показане ковзне тіло 680 у вигляді черевика 684. Ковзне тіло 680 містить металеві нагрівальні елементи 682, наприклад, титанову фольгу, приєднану до каблук 688 і підошви 686, каблук 688 і підошва 686 контактують зі снігом або льодом, коли людина йде по снігу або льоду. Нагрівальні елементи 682 можуть також бути вбудовані в черевик 684 (або каблук 686) за умови, що вони знаходяться в тепловому зв'язку із зовнішньою поверхнею каблук 688. Нагрівальні елементи 682 можуть бути виконані у вигляді тонкої провідної плівки (наприклад, плівки з TiN, плівки з Cr), напленої або на полімерну підкладку (наприклад, каптон, ABS), або на керамічну підкладку (наприклад, стеклокераміку, діоксидцирконієву кераміку). На нагрівальні елементи 682 подається енергія, внаслідок чого нагрівальні елементи 682 розтоплюють граничний шар льоду, що примикає до каблук і/або підошви 688, 686. Після розтоплення граничного шару льоду або снігу, йому дозволяють повторно замерзати під дією зовнішньої температури, що забезпечує зв'язок льоду або снігу з каблуком і/або підошвою 688, 686. Потужність надходить як

описано для Фіг.1. Як джерело живлення використовують малу батарею 683 (наприклад, батарею типу D-елемент). Перемикач 48 (Фіг.4) підключає потужність від джерела живлення до нагрівальних елементів 682. Коли користувач перемикає перемикач, останній проводить потужність від батареї 683 на нагрівальні елементи 682 для розтоплення граничного шару льоду або снігу і зміни коефіцієнта тертя між черевиком 684 і льодом або снігом, що сприяє підвищенню зчеплення черевика 684.

На Фіг.54 показане ковзне тіло 690 у вигляді шини 692. Ковзне тіло 690 містить металеві нагрівальні елементи 694, впроваджені в шину 692. Потужність надходить на нагрівальні елементи 694, внаслідок чого нагрівальні елементи 694 розтоплюють граничний шар льоду або снігу 693. Після розтоплення граничного шару льоду, він повторно заморожується під дією зовнішньої температури і забезпечує зв'язок між льодом/снігом 693 і шиною 692. Потужність можна подавати на нагрівальні елементи 694 одним з декількох вказаних способів. Ковзне тіло 690 використовує як джерело живлення, наприклад, автомобільний акумулятор.

В іншому прикладі нагрівальні елементи 694 включають в себе тонкі металеві проводи, здатні приймати потужність і перетворювати цю потужність в теплову енергію для розтоплення граничного шару льоду/снігу 693, що контактує з шиною 692. Крім того, ковзне тіло 690 може містити контролер 78 (Фіг.6), для управління поданням потужності (Фіг.1). Згідно з варіантом здійснення, користувач активує перемикач, що дозволяє подавати потужність на нагрівальні елементи 694, коли це необхідно для забезпечення додаткового зчеплення шини 692 з поверхнею дороги, покритою льодом і снігом 693. Коли користувач перемикає перемикач, натискаючи спеціальну кнопку на панелі управління автомобіля, перемикач проводить потужність від джерела живлення на нагрівальні елементи 694 для розтоплення граничного шару льоду і снігу 693 і, таким чином, для зміни коефіцієнта тертя між шиною 692 і льодом і снігом, що пориває поверхню дороги, коли граничний шар повторно заморожується і підвищує зчеплення шини 692 на снігу/льоду 693.

Таким чином, нагрівальні елементи 694 можуть діяти як «імпульсні гальма», видаючи імпульс нагрівання на межу поділу між шиною 692 і снігом/льодом 693. Наприклад, коли необхідно гальмування, граничний шар льоду розтоплюється. Коли імпульс припиняється, розтоплені плями на шині 692 звичайно повторно заморожуються за декілька мілісекунд під дією зовнішньої температури, забезпечуючи сильні зв'язки між шиною 692 і льодом/снігом 693. Ці зв'язки сприяють гальмуванню руху шини 692 відносно льоду/снігу 693. Для більш швидкого охолодження розтопленого граничного шару льоду використовується елемент Пельтьє 695.

Прикладом елемента Пельтьє 695 є термоелектричний модуль, що складається з масиву гранул з напівпровідника, легованого телуридом вісмуту, який має один тип носіїв заряду (наприклад, позитивний або негативний) для перенесення основного струму. Пари гранул з позитивними і негативними основними носіями заряду мають таку конфігурацію, що вони електрично з'єднані послідовно, але термічно з'єднані паралельно. Металізовані керамічні підкладки можуть забезпечувати платформу для гранул. Термоелектричні модулі можуть функціонувати самостійно або групами з послідовними, паралельними або послідовно-паралельними з'єднаннями.

При поданні напруги постійного струму на елемент Пельтьє 695, позитивні і негативні носії заряду в масиві гранул поглинають теплову енергію з однієї поверхні підкладки і виділяють її на протилежній поверхні підкладки. Підкладка, на якій відбувається поглинання теплової енергії, може знижувати температуру без використання рухомих деталей, компресорів або газів. Протилежна підкладка, на якій відбувається виділення теплової енергії, в результаті, нагрівається.

На Фіг.55 показана конфігурація ковзного тіла 700, що ілюструє, як ковзне тіло впливає на тертя з примикаючим снігом або льодом. Ковзне тіло 700 містить сукупність металевих нагрівальних елементів, впроваджених в ділянку 704, що ілюструє електропровідну гуму шини. Потужність подають на нагрівальні елементи 712, щоб розтоплювати граничний шар льоду 714. Після розтоплення граничного шару льоду він повторно заморожується під дією зовнішньої температури і забезпечує зв'язок між льодом 714 і ковзним об'єктом 700.

Нагрівальний елемент 712 являє собою тонкий металевий провід, здатний приймати потужність і перетворювати цю потужність в теплову енергію для розтоплення граничного шару льоду 714, що контактує з ковзним тілом 700. Тонкий електричний ізолятор 706 близько нагрівального елемента оточує нагрівальний елемент 712. Коли нагрівальний елемент приймає потужність від джерела 702 живлення, нагрівальні елементи 712 перетворюють потужність в теплову енергію за допомогою питомого опору. Теплова енергія проводиться (лінії 710 теплового випромінювання) в лід 714 і ділянку, що нагрівається 708, в якій граничний шар льоду 714 розтоплюється. Розтоплений граничний лід змінює коефіцієнт тертя між ковзним тілом 700 і льодом 714, внаслідок чого зчеплення між ковзним тілом 700 і льодом 714 збільшується. Коефіцієнт тертя змінюється внаслідок танення і повторного замерзання, коли електрична потужність подається і відключається від нагрівального елемента 712. Наприклад, імпульс електричної потужності, що має тривалість згідно з Рівн. 1.4 для Фіг.1, розтоплює граничний шар льоду 714, оскільки він перетворюється в теплову енергію нагрівальним елементом 712. Коли імпульс електричної потужності спадає, ділянка 708 отримує можливість повторного замерзання, під дією більш низької зовнішньої температури і льоду 714, що не розтанув. Таким чином, розтоплення і повторне заморожування льоду 714 змінює коефіцієнт тертя і підвищує зчеплення і гальмування, коли, наприклад, ковзне тіло 700 є таким об'єктом, як шина або лижа.

На Фіг.56 показане ковзне тіло у вигляді гусениці 724, наприклад, що використовується для снігоступу. Ковзне тіло 720 містить нагрівальні елементи 722, впроваджені в гусеницю 724. Потужність надходить на нагрівальні елементи 722, внаслідок чого нагрівальні елементи 722 розтоплюють граничний шар льоду, що примикає до гусениці 724. Коли граничний шар льоду розтоплений і потужність більше не надходить, розтоплений граничний шар води повторно замерзає внаслідок зовнішньої температури і забезпечує зв'язок льоду з гусеницею 724. Ковзне тіло 720 використовує як джерело живлення, наприклад, акумулятор.

Ілюстративно гусениця 724 показана навколо гусеничних коліс 725. Нагрівальні елементи 722 можуть бути у вигляді тонких металевих проводів або у вигляді тонкої металевої фольги, що перетворюють(є) потужність в теплову енергію для розтоплення граничного шару льоду, що контактує з гусеницею 724. Користувач, при бажанні, може активувати перемикач, щоб подати потужність на нагрівальні елементи 722,

наприклад, коли користувач визначає необхідність в додатковому зчепленні між гусеницею 724 і землею, покритою льодом і снігом. Коли користувач перемикає перемикач, перемикач проводить потужність від джерела живлення (наприклад, акумулятора снігоступу) на нагрівальні елементи 722 для розплавлення граничного шару льоду/снігу, щоб змінити коефіцієнт тертя між гусеницею 724 і снігом, підвищивши зчеплення гусениці 724 зі снігом внаслідок подальшого повторного замерзання.

На Фіг.57 показане одне ковзне тіло 780 у вигляді лижі 782; лижа 782 показана більш детально на вигляді 781. Ковзне тіло 780 містить нагрівальний елемент 784 і може мати експлуатаційні характеристики, як у лижі 654 (Фіг.50 і 51). Нагрівальний елемент 784 може бути виконаний, наприклад, з титанової фольги або стійких до стирання провідних фарб (наприклад, фарб на основі нікелю або срібла), або у вигляді напиленого шару TiN. Нагрівальний елемент 784 приєднаний до поверхні лижі 782 (встановлений для забезпечення теплового зв'язку з поверхнею), щоб безперервно контактувати зі снігом і розтоплювати граничний сніг або лід, як описано для Фіг.1.

На вигляді 781 представлений спосіб приєднання нагрівального елемента 784 до лижі 782. Наприклад, нагрівальний елемент 784 приєднаний до лижі 782 за допомогою стійок 783. Стійки 783 звичайно виконані у вигляді металевих провідників, що служать клемами електричної шини, а також для захисту нагрівального елемента 784 від пошкоджень. Стійки 783 можна використати для передачі потужності від джерела живлення на нагрівальний елемент 784, щоб розтоплювати граничний шар снігу і, таким чином, змінювати коефіцієнт тертя між лижею 782 і снігом.

Нагрівальний елемент 784 містить, наприклад, захисне покриття 785, що захищає від пошкодження каменями. Нагрівальний елемент 784, стійки 783 і підкладка 786 можуть бути такими, що замінюються. Коли нагрівальний елемент 784 містить провідний шар фарби, подряпини можна виправляти за допомогою фарб для дрібного ремонту.

На Фіг.58 показане ковзне тіло 800 у вигляді шини 802, згідно з варіантом здійснення. Ковзне тіло 800 містить нагрівальний блок 806 і необов'язкову випускні підсистему 804. Підсистема 804 випуску повітря може містити випуск холодного повітря автомобільного кондиціонера. Нагрівальний блок 806 може містити нагрівальну лампу або інший нагрівальний пристрій для нагрівання ділянки 805 шини 802 імпульсною або безперервною тепловою енергією. Ковзне тіло 800 може використати як джерело живлення автомобільний акумулятор.

Згідно з варіантом здійснення, елемент 806 нагрівального блока містить і використовує випуск кондиціонера або двигуна автомобіля. В іншому варіанті здійснення нагрівальний блок 806 містить або використовує водорозпилювач, який створює найдрібніші крапельки води. Крапельки води покривають автомобільну шину тонкою водяною плівкою, яка замерзає при контакті з льодом, тим самим забезпечуючи сильні зв'язки між шиною і льодом.

Згідно з ще одним варіантом здійснення нагрівальний блок 806 містить гарячий циліндр, що торкається шини, і може обертатись разом з шиною. Гарячий обертаний циліндр може нагріватись системою електроживлення автомобіля, автомобільним кондиціонером і/або вихлопними газами автомобіля.

У робочому прикладі нагрівальний блок 806 здатний приймати потужність і перетворювати цю потужність в теплову енергію, щоб розплавляти граничний шар льоду 810 в ділянці 807 контакту з шиною 802. Коли нагрівальний блок 806 отримує енергію від джерела живлення, він перетворює її в теплову енергію і утворює нагріту ділянку 805. В зв'язку з малою тривалістю впливу нагрівання, нагрівається звичайно тільки тонкий шар гуми шини. При обертанні шини 802 нагріта ділянка 805 розтоплює граничний шар льоду 810 в ділянці 807. Коли шина продовжує обертатись, розтоплений шар льоду повторно замерзає в ділянці 808 і змінює коефіцієнт тертя між шиною 802 і льодом 810 в ділянці 809, тим самим створюючи зв'язок між шиною 802 і льодом 810, що приводить до зростання зчеплення між шиною 802 і льодом 810.

Оскільки шина 802 має значну площу контакту з льодом 810, гума шини 802 звичайно повторно охолоджується раніше, ніж буде знов нагріта нагрівальним блоком 806. Таким чином, в додатковому охолодженні звичайно не буває необхідності, коли зовнішня температура нижче точки плавлення льоду. Проте, додаткове охолодження може використовуватись, наприклад, холодне повітря з автомобільного кондиціонера можна використати для охолодження шини через випускні підсистему 804.

Оскільки нагрівальний блок 806 може видавати імпульсну теплову енергію, коефіцієнт тертя може дискретно змінюватися внаслідок розтоплення і повторного заморожування граничного льоду 810 при поданні і відключенні електричної потужності (наприклад, шина 802 постійно нагрівається і охолоджується під час обертання). Згідно з варіантом здійснення, нагрівальний блок 806 може містити нагріту металеву щітку, притиснуту до шини, що обертається 802. Тепловий потік від щітки до поверхні 801 шини 802 нагріває тонкий шар гуми шини, спричиняючи подальше розтоплення граничного льоду.

Середня потужність, що використовується нагрівальним блоком 806, звичайно залежить від зовнішньої температури і швидкості автомобіля, але може бути в межах від 10 ват до 100 ват. У деяких екстремальних випадках вона може бути в межах від 1 вата до 1000 ват. Крім того, в залежності від температурних і швидкісних умов період, протягом якого гума шини 802 нагрівається нагрівальним блоком 806, знаходиться в межах від 3мсек. до 100мсек., але, в більш екстремальних випадках, може складати від 1мсек. до 1сек. Час повторного заморожування може бути приблизно таким же, як для імпульсної протилідової системи, наприклад, для Фіг.1-6 (звичайно в межах від 1мсек. до 100мсек.). Цей час можна регулювати так, щоб забезпечити максимальне зчеплення, коли велика частина ділянки контакту шини з дорогою повторно заморожена.

На Фіг.59 показана конфігурація одного ковзного тіла 820. Ковзне тіло 820 містить межу 825 поділу ковзного тіла і лампу 826 фотоспалаху. Лампа 826 фотоспалаху здатна освітлювати поверхню поділу ковзного тіла 825 імпульсом світла (наприклад, спалахом світла). Лампа 826 фотоспалаху отримує потужність від джерела живлення 822 для розтоплення граничного шару льоду 821. Лампа 826 фотоспалаху видає імпульси світла на тонкий зачорнений шар 827 граничного льоду 821. Типова тривалість і енергія для одного імпульсу лампи 826 складає від 1мсек. до 10мсек., генеруючи енергію приблизно від 1Дж до 100Дж.

Згідно з варіантом здійснення, одиничний спалах від лампи 826 фотоспалаху розтоплює граничний шар льоду 821, коли лампа 826 фотоспалаху опромінює межу 825 поділу ковзного тіла. Межа 825 поділу

ковзного тіла є прозорою і перетворює енергію спалаху в теплову енергію, коли світло падає на зачорнений шар 827. Наприклад, світло від лампи 826 (наприклад, видиме світло або інфрачервоне світло) поглинається шаром 827 і перетворюється в теплову енергію. Потім перетворена тепла енергія поглинається в граничному шарі льоду 821, що примикає до ковзного тіла 820. При поглинанні енергії граничним шаром 821 шар розтоплюється. Потім шар повторно заморожується під дією зовнішньої температури для забезпечення зв'язку між ковзним тілом 824 і льодом 821.

Аналіз зміни коефіцієнта тертя

Нижче наведені аналізи, в яких коефіцієнт тертя змінюється на межі поділу лід-об'єкт або на межі поділу сніг-об'єкт. Ці аналізи можуть експериментально і графічно ілюструвати зміну коефіцієнта тертя.

На Фіг.60 показана діаграма 830, що ілюструє співвідношення між коефіцієнтами тертя певних ковзних тіл і напругою, поданою на нагрівальні елементи, приєднані до ковзних тіл. Для зарядки конденсатора 2,35 мкФ використали електричну схему (Фіг.2). Потім конденсатор розряджали через нагрівальний елемент. На Фіг.60 по осі Y відкладена сила тертя, а по осі X 832 відкладена напруга. Діаграма 830 дозволяє розрізнити два аналогічних ковзних тіла, кожне з яких має нагрівальний елемент (один нагрівальний елемент містить титанову фольгу товщиною близько 12,5мкм, а інший нагрівальний елемент містить титанову фольгу товщиною близько 25мкм). При поданні близько 50В потужності на нагрівальні елементи коефіцієнт тертя між ковзними тілами і снігом змінюється, як показано. При напрузі близько 100В коефіцієнти тертя ковзних тіл по снігу починають відрізнятися один від одного. Відповідно, товщина матеріалу нагрівального елемента, по суті, не залежить від напруги, приблизно, до 100В, що може впливати на конструктивні рішення.

На Фіг.61 показана діаграма 840, що ілюструє співвідношення між силою тертя спокою деяких ковзних тіл і нормальним тиском, що надається ковзним тілом на сніг. На Фіг.61 по осі Y 841 відкладена сила тертя спокою, а по осі X 842 відкладений нормальний тиск. Діаграма 840 дозволяє розрізнити два аналогічних ковзних тіла, кожне з яких має нагрівальний елемент (один нагрівальний елемент містить титанову фольгу товщиною близько 12,5мкм, а інший нагрівальний елемент містить титанову фольгу товщиною близько 25мкм). На двох нижченаведених діаграмах показана сила тертя спокою для тих же ковзних тіл без подання імпульсів нагрівання. Інші експериментальні дані, наприклад, напруга постійного струму (90В), температура (-11°C) і конденсатор, що використовується в схемі на Фіг.2, показані на вставці.

На Фіг.62 показана діаграма 850, що ілюструє співвідношення між коефіцієнтами тертя деяких ковзних тіл і напруженням, поданим на приєднаний нагрівальний елемент, згідно з варіантом здійснення. На Фіг.62 по осі Y 853 відкладена сила тертя, а по осі X 852 відкладена напруга. Діаграма 850 дозволяє розрізнити два аналогічних ковзних тіла, кожне з яких має нагрівальний елемент (один нагрівальний елемент містить титанову фольгу товщиною близько 12,5мкм, а інший нагрівальний елемент містить титанову фольгу товщиною близько 25мкм). Кожне ковзне тіло має середню криву, що визначається діапазоном коефіцієнтів тертя, пов'язаних з конкретним прикладеною напругою. Наприклад, ковзне тіло з нагрівальним елементом у вигляді титанової фольги товщиною 25мкм, має коефіцієнт тертя, що змінюється в межах від 4,9Н до 6Н (точка 851). На Фіг.62 показано, що імпульсне гальмо добре працює навіть, коли зовнішня температура дуже близька до точки плавлення (-2°C) хороша гальмова сила досягається навіть при -0,5°C.

На Фіг.63 показана діаграма 860, що ілюструє співвідношення між коефіцієнтами тертя одного ковзного тіла і часом ковзання з постійною швидкістю 3,5мм/сек. На Фіг.63 по осі Y 863 відкладена сила тертя, а по осі X 864 відкладений час. Згідно з варіантом здійснення було подано чотири коротких імпульси потужності нагрівання, протягом яких ковзне тіло переміщалося з швидкістю близько 3,5мм/сек. Конденсатор 1,36мкФ розряджався на нагрівальний елемент при напрузі близько 110 В в чотирьох імпульсах 861. Тривалість імпульсів нагрівання складала близько 2,5мс. Нагрівальний елемент, приєднаний до ковзного тіла, приймав потужність від джерела живлення протягом обмеженого часу (імпульсу потужності), наприклад, згідно з рівняннями для Фіг.1. Нагрівальний елемент перетворював цю потужність в теплову енергію і подавав теплову енергію на межу поділу поверхні з льодом. Нагрівальний елемент розтоплював граничний шар снігу або льоду, що примикає до ковзного об'єкта. Розтоплення граничного шару змінює прилипання снігу на поверхні ковзного тіла і змінює коефіцієнт тертя між ковзним тілом і снігом або льодом. Протягом кожного імпульсу 861, коефіцієнт тертя змінюється. Зміна коефіцієнта тертя між ковзним тілом і снігом приводить до того, що ковзне тіло чинить опір ковзанню, тобто сила тертя зростає. Це показано на Фіг.63 у вигляді гострих піків сили тертя. Змінюючи енергію імпульсу та інтервали між імпульсами, можна досягти потрібної величини сили тертя. Фахівцям в даній галузі зрозуміло, що таке регульоване гальмо можна зв'язати з системою вимірювання швидкості, щоб забезпечити лижу системою «круїз-контроль»: лижник може задати потрібну максимальну швидкість для себе і своїх дітей, щоб забезпечити безпеку лижної прогулянки.

На Фіг.64 показана діаграма 870, що ілюструє інше співвідношення між коефіцієнтами тертя одного ковзного тіла і напругою, що подається на приєднаний нагрівальний елемент, згідно з варіантом здійснення. На Фіг.64 по осі Y 871 відкладена сила тертя, а по осі X 872 відкладена напруга. Напругу змінювали, щоб визначити коефіцієнти тертя в залежності від потужності. При поданні потужності з напругою 50В на нагрівальні елементи, коефіцієнт тертя змінювався. При близько 90В коефіцієнт тертя ковзного тіла відносно снігу досягає насичення, після чого залишається майже постійним приблизно до 110В. Відповідно, напруга від 90В до 110В може забезпечувати зростання коефіцієнта тертя, яке практично не залежить від напруги між 90В і 110В. Ця інформація корисна при виборі джерела живлення для ковзного тіла.

На Фіг.65 і 66 показані діаграми, що ілюструють теплову енергію Q і час охолодження $t_{\text{охол}}$ ковзного тіла. На Фіг.65 по осі Y 881 відкладене розсіювання тепла в снігу L_p , а по осі X 882 відкладений час. На Фіг.66 по осі Y 891 відкладена тепла енергія, а по осі X 892 відкладений опір нагрівника. Протягом перших 10 мілісекунд нагрівання тепло проникає в сніг тільки на глибину тридцять шість мікрон. Такий тонкий шар снігу має малу теплоємність, тому для нагрівання його до точки плавлення (тобто 273°K) потрібна мала енергія. Нижченаведена Таблиця 65-1 дозволяє обчислити повну енергію $Q(\Delta, R)$, що використовується для розтоплення десятимікронного шару льоду і для нагрівання граничного матеріалу снігу і льоду на $\Delta^\circ\text{C}$. Коли потужність нагрівання не залежить від T , результат наведений в Таблиці 65-1:

Таблиця 65-1

$$N = 10^4, 2 \cdot 10^4 \dots 10^5$$

$$\lambda_{\text{лиж}} = 0,2$$

$$\rho_{\text{лиж}} = 1000$$

$$C_{\text{лиж}} = 1,54 \cdot 10^3$$

$$i \rho_{\text{сніг}} = 300$$

$$C_{\text{сніг}} = 2,2 \cdot 10^3$$

$$\lambda_{\text{сніг}} = 0,2$$

$$D_{\text{сніг}} = \lambda_{\text{сніг}} / (\rho_{\text{сніг}} \cdot C_{\text{сніг}}) \text{ с}$$

$$R = 0,1, 0,2 \dots 10 \text{ Ом}$$

$$C = 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-4} \dots 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ф}$$

$$t(R, C) = R \cdot C$$

$$D_{\text{лиж}} = \lambda_{\text{лиж}} / (\rho_{\text{лиж}} \cdot C_{\text{лиж}})$$

$$\Delta = 0,01, 0,02 \dots 10$$

$$t = 0, 10^{-4} \dots 10^{-2}$$

Згідно з Фіг.65 і 66 довжина розсіяння тепла L_p (тобто діаграма 880, Фіг.65) виражається так:

$$L_p(t) = \sqrt{D_{\text{лиж}} \cdot t}$$

$$L_p(10^{-2}) = 5,505 \times 10^{-5}$$

$$L_p(1) = 5,505 \times 10^{-4}$$

$$L_p(0,1) = 1,741 \times 10^{-4}$$

$$L_p(0,01) = 5,505 \times 10^{-5}$$

$$V = 100$$

$$S = 0,0025$$

$$W(R) = V^2 / 2RS$$

$$d_{\text{нагр}} = 1,25 \cdot 10^{-5}$$

$$C_{\text{нагр}} = 523$$

$$\rho_{\text{нагр}} = 4,5 \cdot 10^3$$

$$L_{\text{розтопл}} = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$q_{\text{розтопл}} = 3,33 \cdot 10^3$$

$$Q = \frac{\pi d^2 S}{4R^2(R)} \left[\sqrt{D_{\text{лиж}} \cdot \lambda_{\text{лиж}}} + \sqrt{D_{\text{нагр}} \cdot \lambda_{\text{нагр}}} \right]^2 + d_{\text{лиж}} \cdot C_{\text{лиж}} \cdot \rho_{\text{лиж}} (T_T - T) + d_{\text{нагр}} \cdot C_{\text{нагр}} \cdot \rho_{\text{нагр}} (T_T - T)$$

$$C(\Delta, R) = \frac{2Q(\Delta, R)}{R^2}$$

$$C(20, 2,5) = 8,464 \times 10^{-4}$$

$$\Delta = 20$$

$$C_{\text{нагр}} \cdot S \cdot \rho_{\text{нагр}} \cdot \Delta \cdot C_{\text{нагр}} = 1,471$$

$$L_{\text{розтопл}} \cdot \rho_{\text{сніг}} \cdot S \cdot q_{\text{розтопл}} = 2,498$$

де: S - площа нагрівника; T_T - температура танення; T - зовнішня температура; λ - коефіцієнт теплопровідності; ρ - щільність матеріалу; C - теплоємність матеріалу (нижній індекс «лід» означає лід і/або сніг, нижній індекс «лиж» означає матеріал підкладки, наприклад, лижі або сноуборду, нижній індекс «нагр» означає нагрівальний елемент); Q - тепла енергія; D - коефіцієнт температуропровідності; Δ - зміна температури; t - час; V - напруга; d - товщина; R - опір; W - потужність на квадратний метр; $L_{\text{розтопл}}$ - товщина розтопленого шару; $i q$ - прихована теплота плавлення. Для дуже коротких імпульсів майже вся тепла енергія Q використовується для розтоплення тонкого шару снігу (діаграма 890, Фіг.66); теплоємність снігу і лижі дають малий внесок в Q . Розрахунок часу повторного заморожування показаний в Таблиці 65-2:

Таблиця 65-2

$$\lambda_{\text{дерева}} = 0,5$$

$$\lambda_{\text{лими}} = 0,5$$

$$I_{\text{дерева}}(A, R) = \left[\frac{2Q(\Delta, t)}{\Delta \cdot \sqrt{\lambda_{\text{дерева}} \cdot \rho_{\text{лими}} \cdot C_{\text{лими}}} + \sqrt{\lambda_{\text{лими}} \cdot \rho_{\text{дерева}} \cdot C_{\text{дерева}}}} \right]$$

$$I_{\text{дерева}}(20, 1) = 0,013 \text{ "л"}$$

Таблиця 65-3 ілюструє типові ємності звичайних батарей, що використовуються як джерела живлення в пристрої імпульсного гальма. Наприклад, пару малих батарей AA можна використати в пристрої імпульсного гальма для лижних гонок протягом близько однієї години.

Таблиця 65-3

Розмір батарей	Тип	Напруга	Ампл.	Висот.
1 AA, Duracell пара	звичайний	1,5 3	3,85 5,7	4,275 8,55
2 C, Duracell пара	звичайний	1,5 3	7,8 15,6	11,7 23,4
3 D, Duracell пара	звичайний	1,5 3	15 30	22,5 45
4 D, Varta пара	звичайний	1,5 3	16,5 33	24,75 49,5
5 9v, Duracell пара 4 штуки	звичайний	9 18 36	0,58 1,16	5,22 10,44 20,88
-- перетворювач не потрібен --				
6 Тип D TL2300/SD, Li пара	Li-іонна перезарядж.	3,6 7,2	16,5 33	59,4 (\$20,65) 118,4 (\$41,30)
7 DP TL5137/TDD, Li	Li-іонна перезарядж.	3,6	35	126 (\$48,93)
8 AA TL5104/PT2 AA, Li	Li-іонна перезарядж.	3,6	2,1	7,56
9 C TL2200/SC, Li, 7200 мА·год. пара	Li-іонна перезарядж.	3,6 7,2	7,2 14,4	25,92 (\$16,73) 52

На Фіг.67 показаний аналіз ковзного тіла 900, що ілюструє посилення тертя для варіанту здійснення, в якому ковзне тіло являє собою шину 902 з різними тепловими зонами. Згідно з цим аналізом: φ_0 - зона нагрівання; φ_1 - зона повітряного охолодження; φ_2 - зона розтоплення; φ_3 - зона повторного заморожування; φ_4 - зона зв'язування; ω_0 - кутова швидкість шини; v_0 - лінійна швидкість автомобіля; R - радіус шини 902; i A - ширина шини 902. Передбачаючи, що зона нагрівання φ_0 рівномірно нагрівається повною потужністю w' , отримуємо наступний вираз для щільності потужності на квадратний метр:

$$w = \frac{w'}{R \cdot \varphi_0 \cdot A} \quad (\text{Рівн. 67-1})$$

Кожна точка в зоні нагрівання φ_0 може бути «поверхнево нагрітою» за час t , що виражається як

$$t = \frac{\varphi_0}{\omega} = \frac{\varphi_0 R}{v} \quad (\text{Рівн. 67-2})$$

$$Q = t \cdot w = \frac{w' \cdot \varphi_0 \cdot R}{R \cdot \varphi_0 A \cdot v_0} = \frac{w'}{A \cdot v_0}$$

Наприклад, при $v_0=30\text{м/сек.}$ (108км/год.) і $\varphi_0 R=0,1\text{м}$, отримуємо щільність енергії

$$Q = t \cdot w = \frac{w' \cdot \varphi_0 \cdot R}{R \cdot \varphi_0 A \cdot v_0} = \frac{w'}{A \cdot v_0} \quad (\text{Рівн. 67-3})$$

Оцінюючи мінімальну Q і передбачаючи товщину розтопленого льоду рівною 10мкм, отримуємо

$$Q = d \cdot q \cdot \rho_{\text{л}} \quad (\text{Рівн. 67-4})$$

де: d - товщина розтопленого шару в зоні φ_2 , ρ щільність льоду, q - прихована теплота плавлення. Відповідно,

$$d \cdot q \cdot \rho_n = \frac{w'}{A \cdot v_0} \quad (\text{Рівн. 67-5})$$

і, отже,

$$w' = A \cdot v_0 \cdot d \cdot q \cdot \rho_n \quad (\text{Рівн. 67-6})$$

Тепер оцінімо зону повторного заморожування, яка збільшує коефіцієнт тертя до $\mu=0,5$. Наприклад, при нормальному тиску $2 \cdot 10^5$ Па, сила тертя на квадратний метр, відповідна $\mu=0,5$, дорівнює 105 Па. Для межі поділу лід/гума міцність злипання на зсув складає близько 1 Мпа. Таким чином, для повторного заморожування може зажадатись тільки близько 10% площі контакту лід/шина (тобто зона повторного заморожування φ_3), щоб забезпечити $\mu=0,5$. Коли розтоплений шар льоду має товщину близько 3,3 мм, енергоспоживання складає близько 500 ват для швидкості v_0 , рівної близько 108 км/год. Для швидкості v_0 близько 7,2 км/год, при тій же товщині енергоспоживання складає лише близько 33 ват.

При швидкості v_0 20 км/год, кожна точка поверхні шини може знаходитись в контакті з льодом протягом

$t = \frac{2 \cdot 10^{-1} \text{ м}}{6 \text{ м/с}} = 30 \text{ мс}$. Цей час доступно для дій розтоплення і повторного заморожування і досить великий для здійснення цих дій.

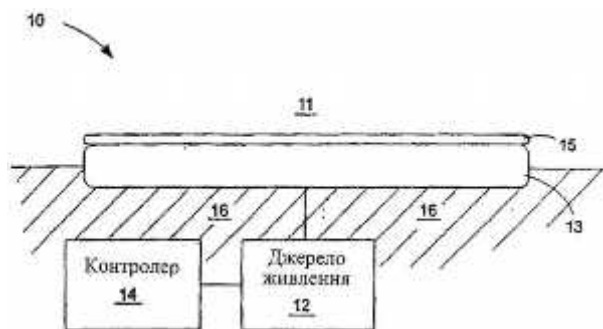
На Фіг.68 і 69 представлені експериментальні результати, в яких тертя об лід знижується або за рахунок подання ВЧ потужності (Фіг.68), або за рахунок подання низькоенергійних імпульсів нагрівання (Фіг.69). На Фіг.68 по осі Y 915 відкладена сила тертя, а по осі X 914 відкладений час в секундах. Наприклад, на Фіг.68 показана сила тертя (Н) в залежності від часу для ковзного тіла при руху по льоду із зовнішньою температурою T близько -5°C , нормальним тиском P близько 42 кПа і швидкості ковзання близько 1 см/сек. В цьому варіанті здійснення система, що змінює тертя, містить гребінчасту схему, прикріплену до основи ковзного тіла, яка межує з льодом. Гребінчаста схема також містить мідні електроди, що мають мікелектродну відстань близько 75 мм. Джерело живлення видає на електроди ВЧ напругу змінного струму близько 30 В СКЗ з частотою близько 20 кГц. Електроди генерують в льоді тепло з щільністю близько 100 Вт/м^2 . Коли ковзне тіло рухається з швидкістю близько 1 см/сек, і на електроди надходить потужність, сила тертя знижується приблизно на 40%. Наприклад, джерело живлення видає на електроди ВЧ потужність в момент часу 910 (поблизу моменту часу t , рівного 10 сек.). Електроди перетворюють потужність в теплову енергію, яка розсіюється у напрямі до льоду. Ковзне тіло починає ковзати в момент часу 912, тобто приблизно в момент часу t , що дорівнює 13 сек. У цьому варіанті здійснення ВЧ потужність відключається в момент часу 911 (тобто приблизно в момент часу t , що дорівнює 28 сек.). Без подання ВЧ потужності тертя об лід зростає з 4 Н до 7 Н. Остання являє собою фонову силу тертя об лід при відсутності подання потужності на ковзне тіло, яке зупиняється в момент часу 913 (тобто поблизу моменту часу t , що дорівнює 33 сек.).

Згідно з цим варіантом здійснення, безперервне подання ВЧ потужності підвищує температуру льоду, тим самим знижуючи силу тертя без розтоплення льоду, і, таким чином, змінює коефіцієнт тертя.

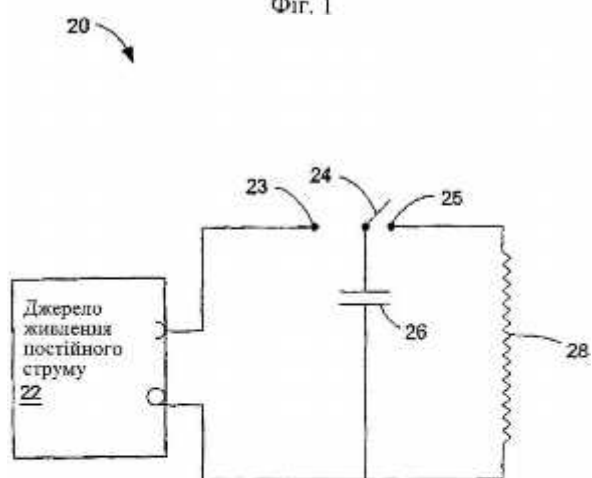
На Фіг.69 показана сила тертя (Н) в залежності від часу для ковзного тіла, яке рухається по снігу при зовнішній температурі T близько -10°C , нормальному тиску P близько 215 кПа і швидкості v ковзання близько 3 мм/сек. На Фіг.69 по осі Y 925 відкладена сила тертя, а по осі X 926 відкладений час в секундах. Згідно з цим варіантом здійснення система, що змінює тертя, містить нагрівник з титанової фольги. Короткі імпульси нагрівання потужності постійного струму надходять на нагрівник в моменти часу 922 і 923, викликаючи зменшення тертя об сніг, на відміну від ефекту гальмування, описаного в тій же системі вище. Головною відмінністю цього варіанту здійснення є імпульсне гальмування. Як показано на Фіг.69, величини енергії нагрівання недостатньо для розтоплення снігу. У відсутності розтопленого шару повторного замерзання не відбувається, тому гальмування відсутнє. Проте, оскільки нагрівник нагріває сніг, тертя знижується. В експерименті, показаному на фіг. 69, поверхня снігу нагрівається імпульсами від -10°C до приблизно -1°C . Ковзне тіло відчуває швидке збільшення тертя спокою між льодом і ковзним тілом в момент часу 921 (наприклад, поблизу моменту часу t , що дорівнює 31 сек.). Джерело живлення видає на електроди імпульс потужності в моменти часу 922 і 923 (час t , що дорівнює 38 сек. і 42 сек., відповідно). У цьому варіанті здійснення, ковзне тіло зупиняється в момент часу 924, коли час t дорівнює 50 сек.

Згідно з деякими варіантами здійснення, електроди гребінчастої схеми виконані з твердих провідних матеріалів, наприклад, нітриду титану, оксиду цирконію, легованих іншими оксидами (наприклад, оксидом ітрію), а також з фольги з титану і нержавіючої сталі з покриттям TiN, для підвищення стійкості схеми до стирання. Інші варіанти здійснення можуть передбачати захист електродів покриттями із захисних плівок, наприклад, оксиду алюмінію.

Вищенаведений опис потрібно розглядати як ілюстративний матеріал, що не передбачає обмеження.



Фиг. 1



Фиг. 2

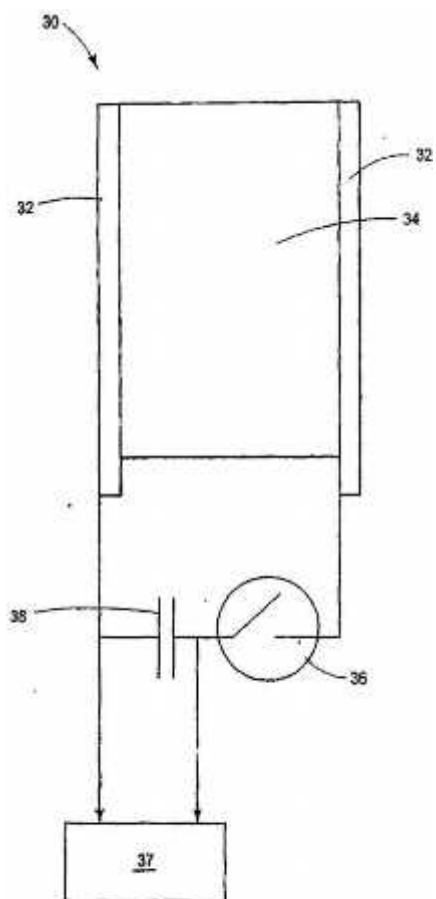


Fig. 3

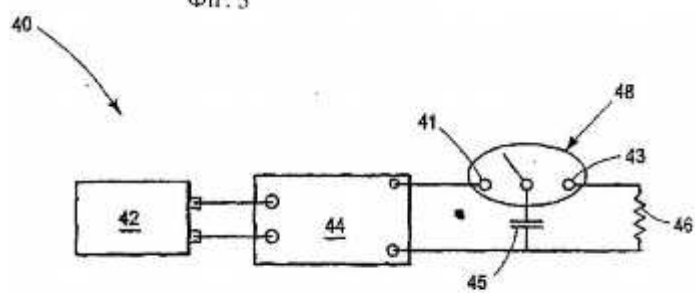


Fig. 4

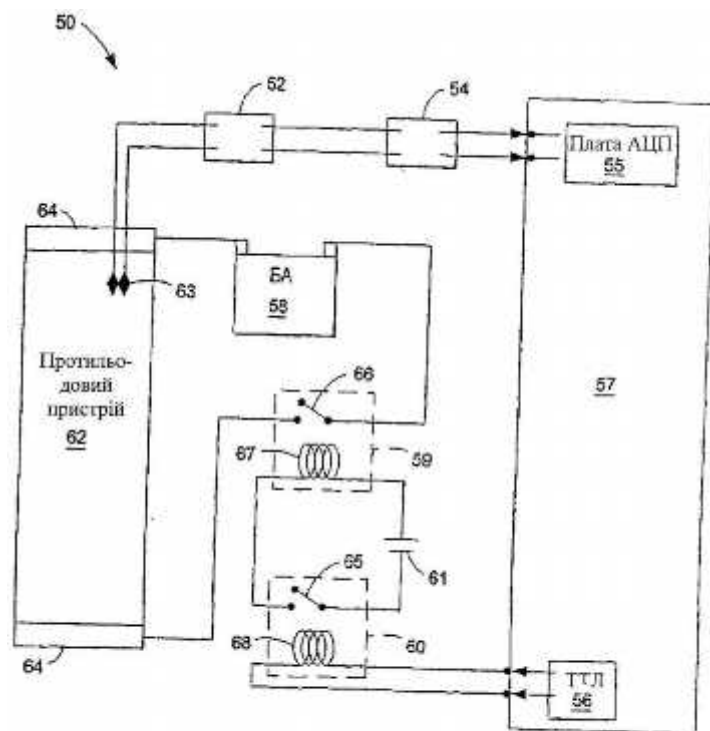


Fig. 5

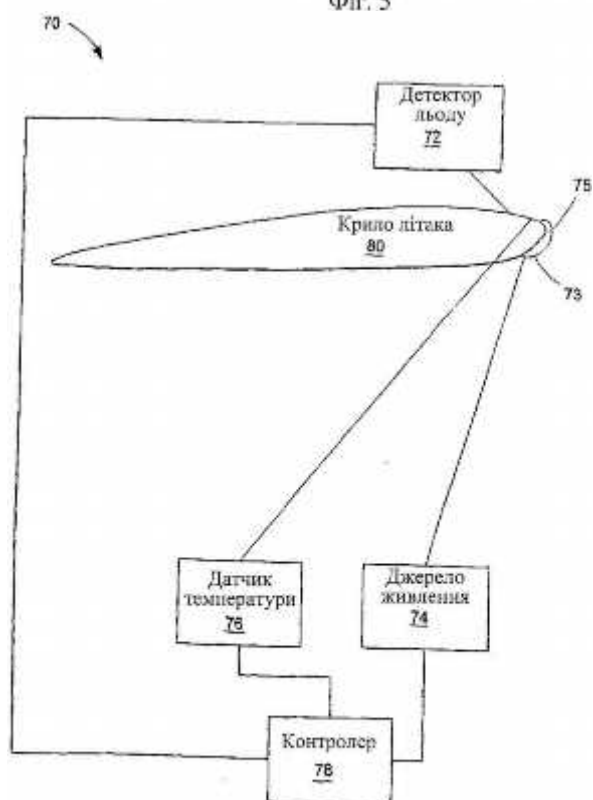


Fig. 6

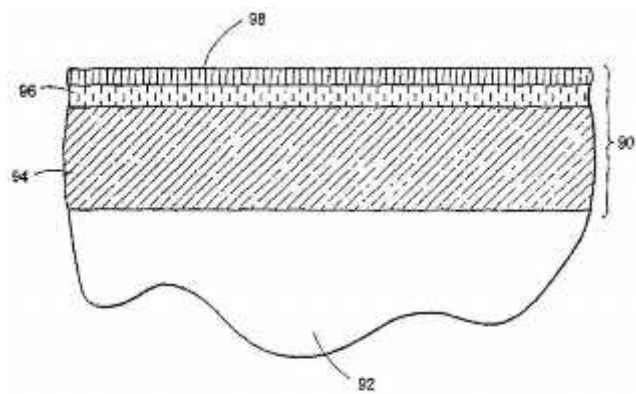


Fig. 7

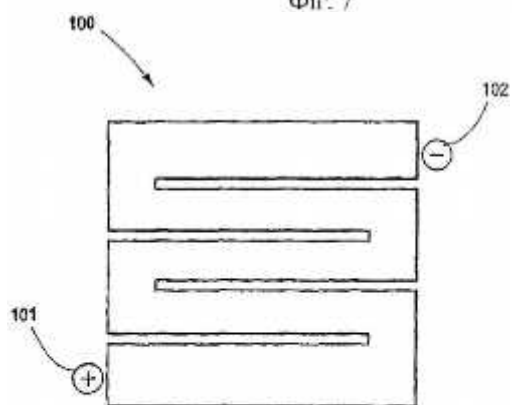


Fig. 8

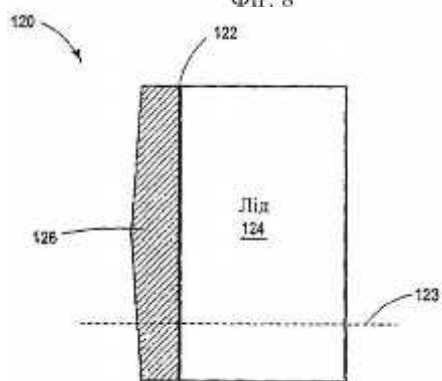


Fig. 9

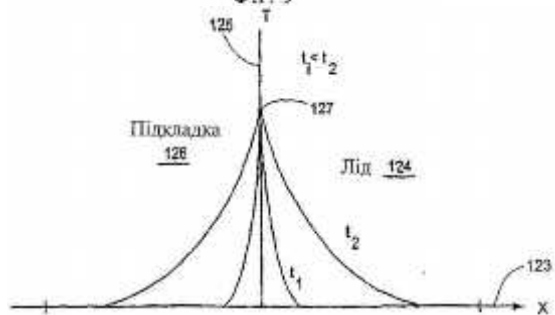


Fig. 10

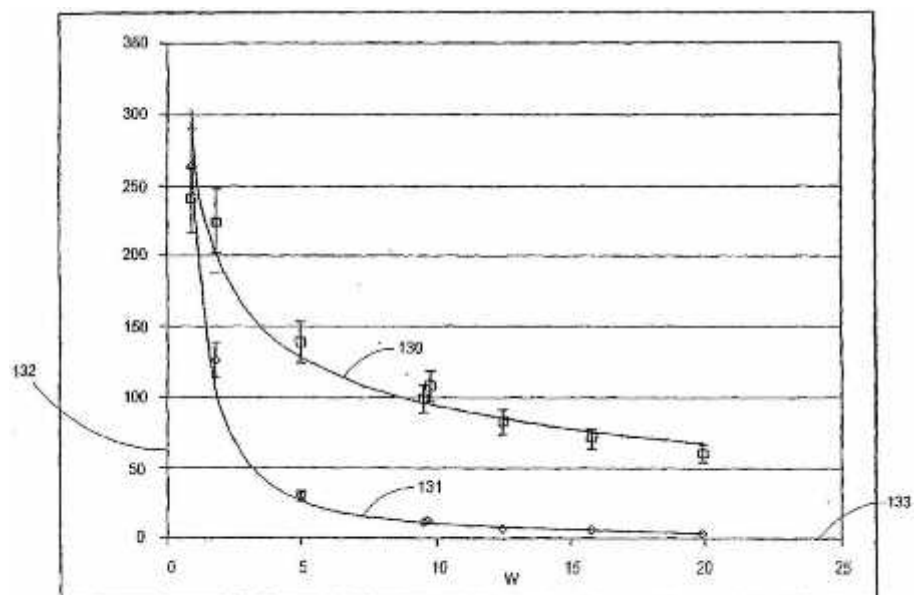


Fig. 11

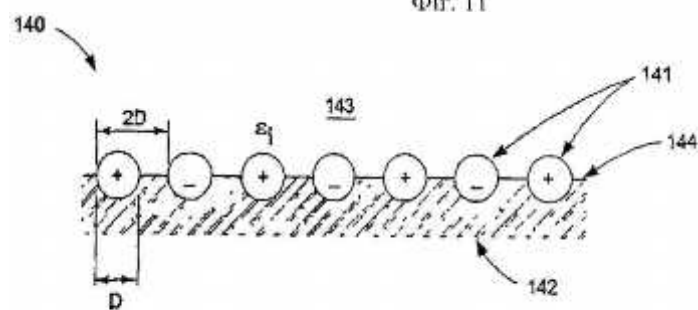


Fig. 12

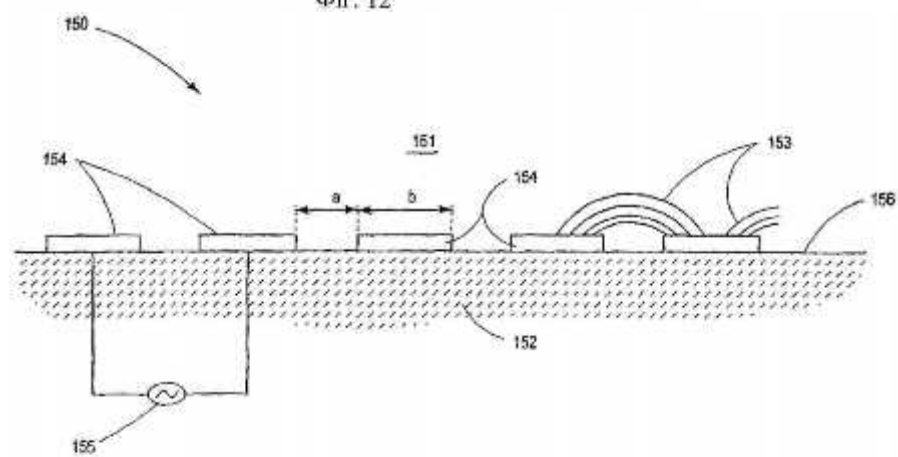


Fig. 13

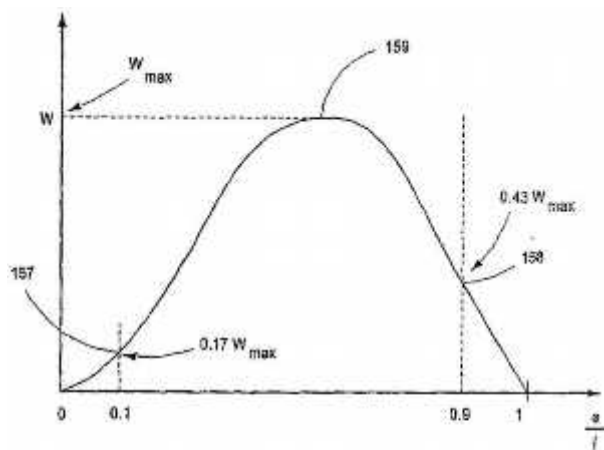


Fig. 14

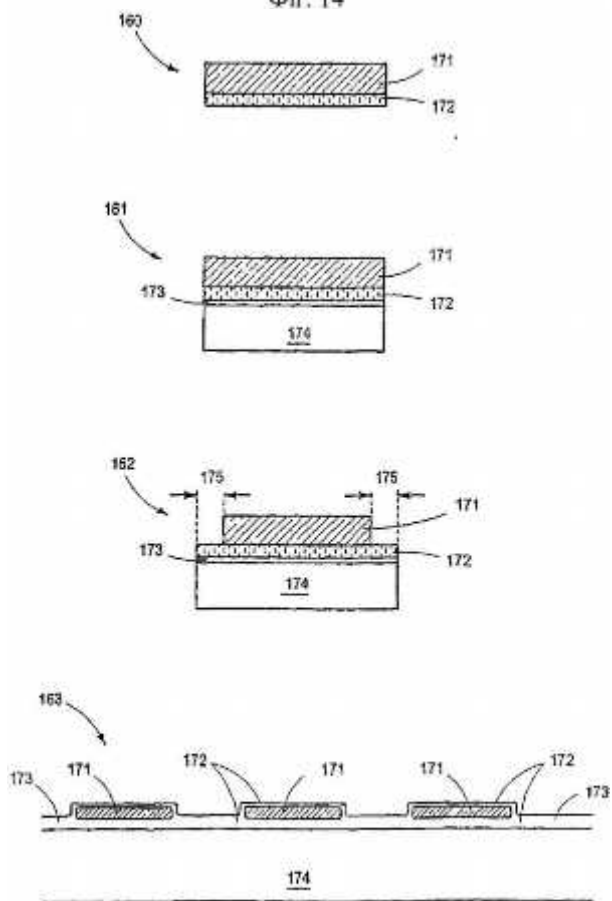


Fig. 15

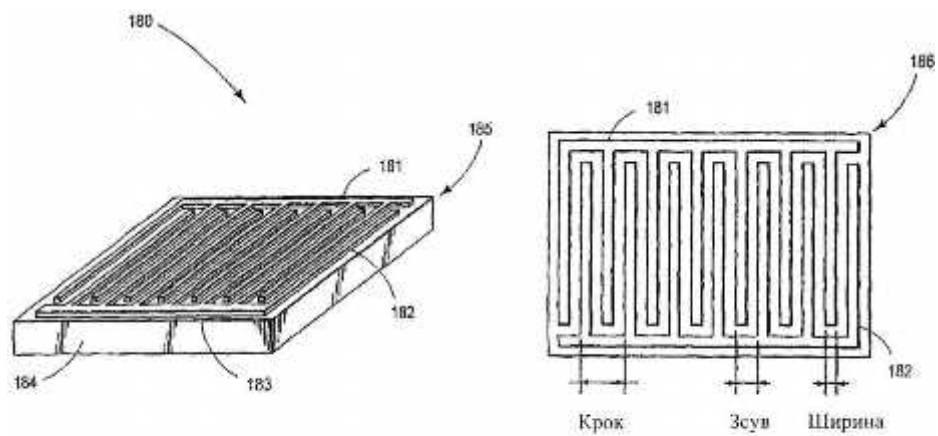


Fig. 16

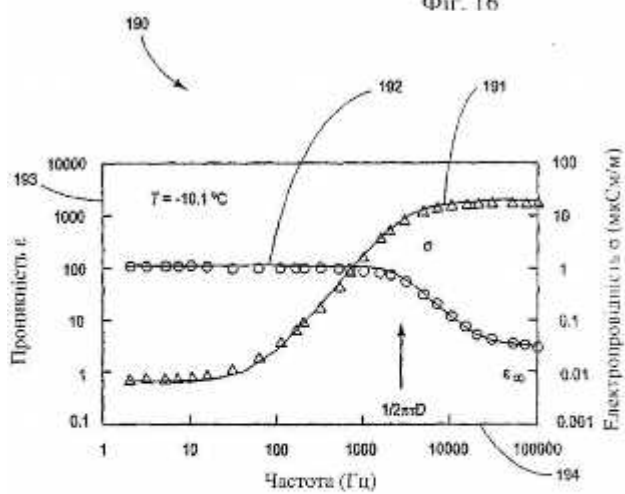


Fig. 17

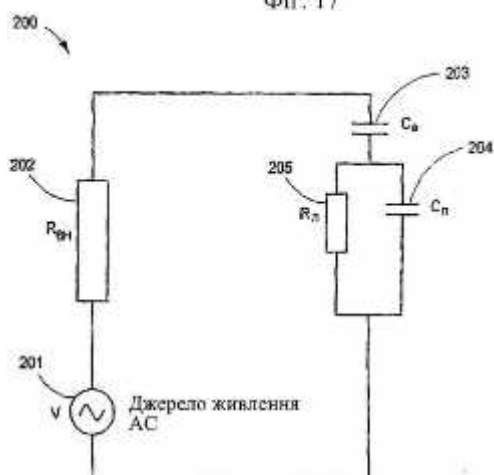


Fig. 18

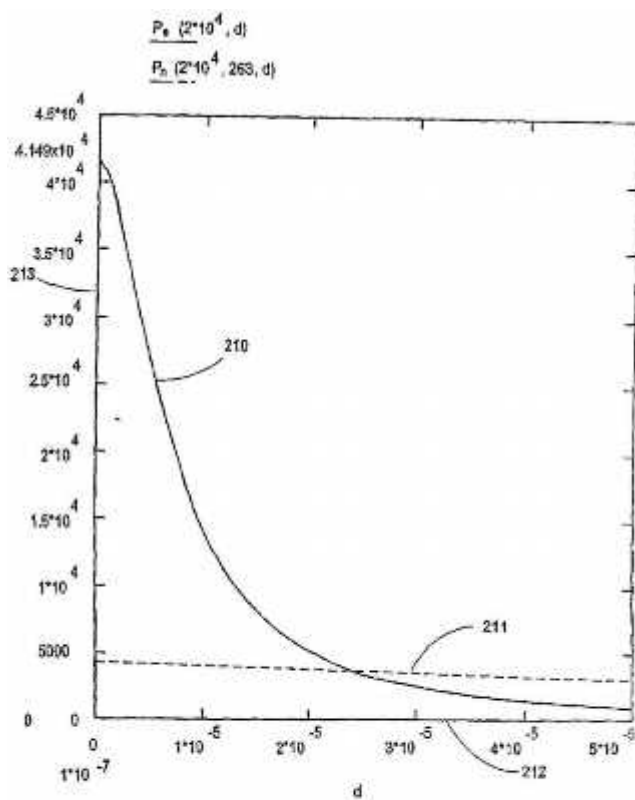


Fig. 19

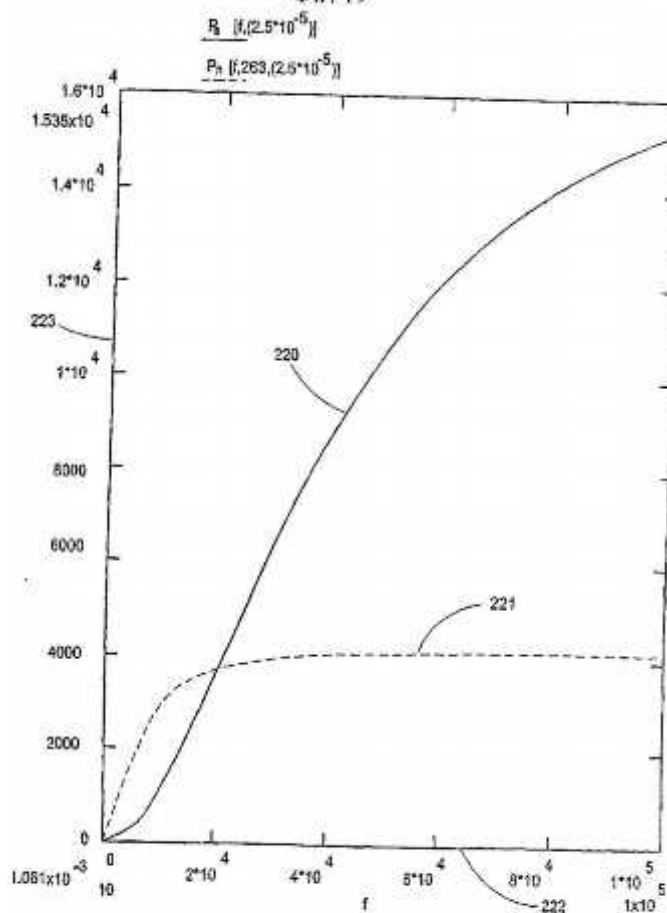


Fig. 20

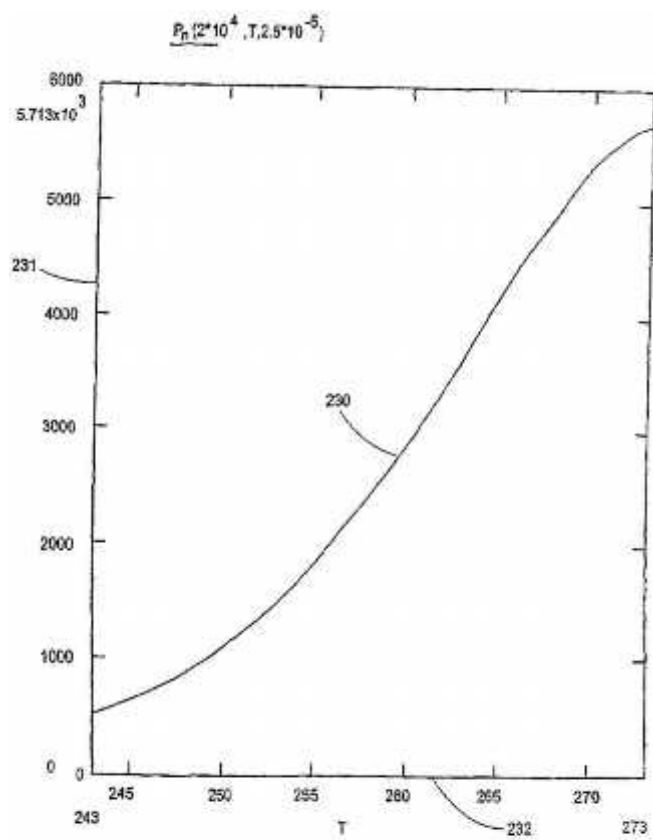


Fig. 21

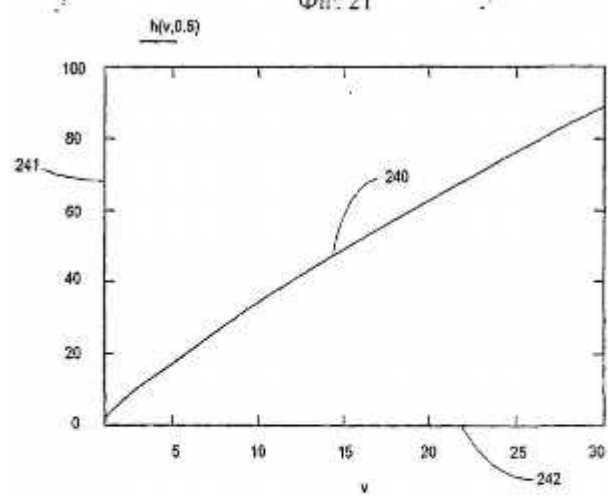


Fig. 22

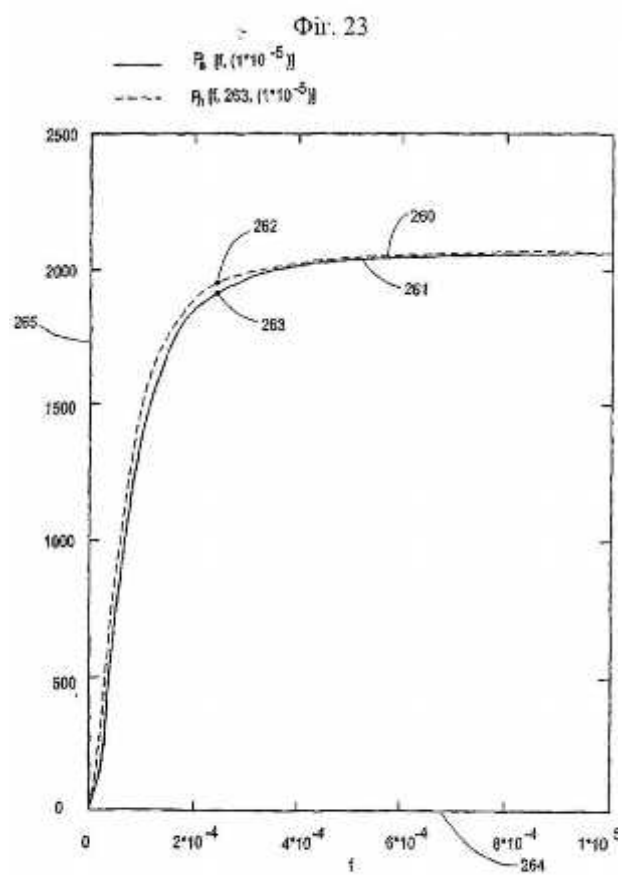
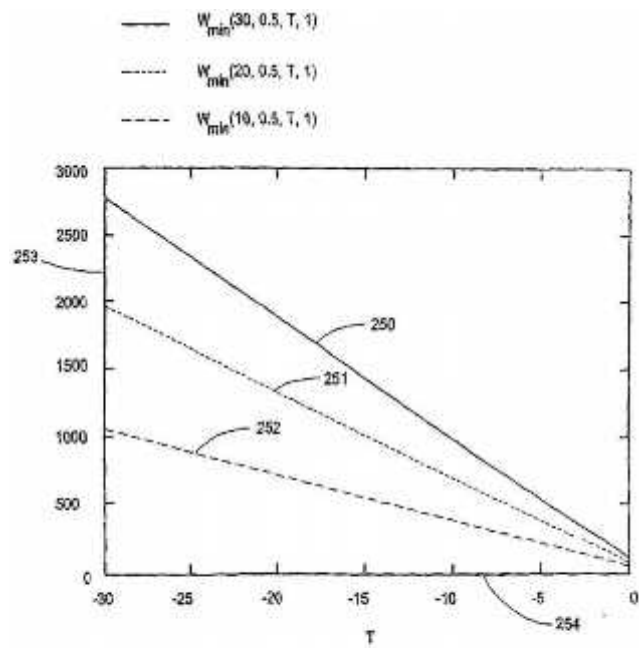


Fig. 24

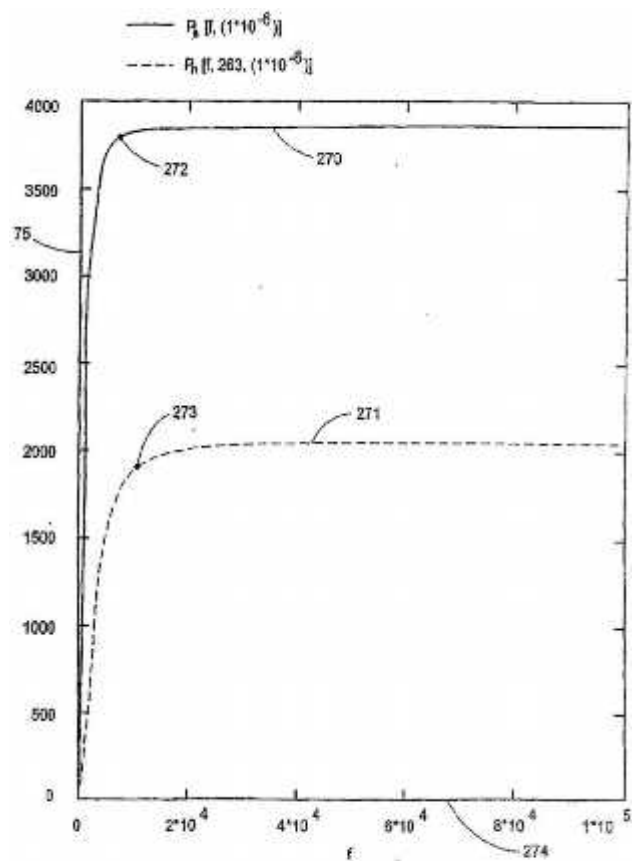


Fig. 25

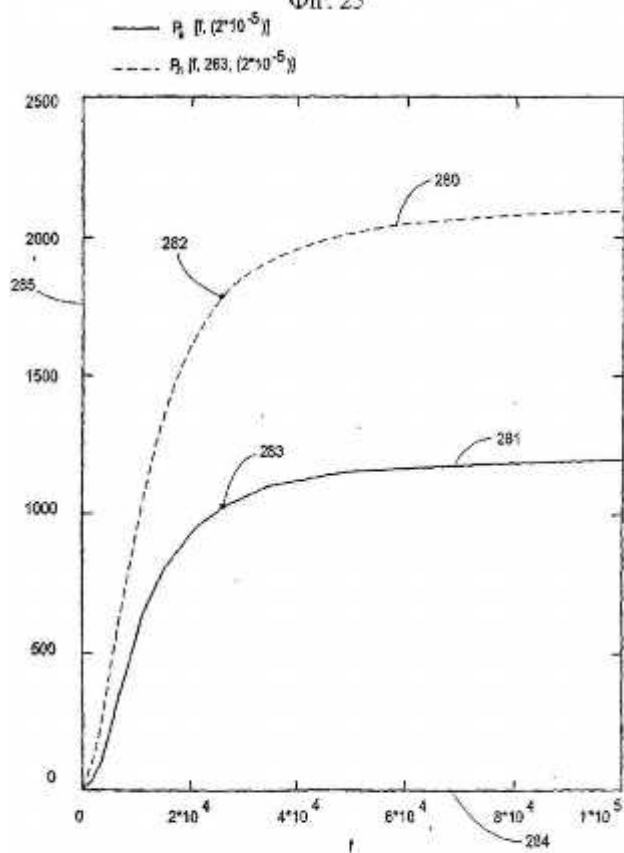
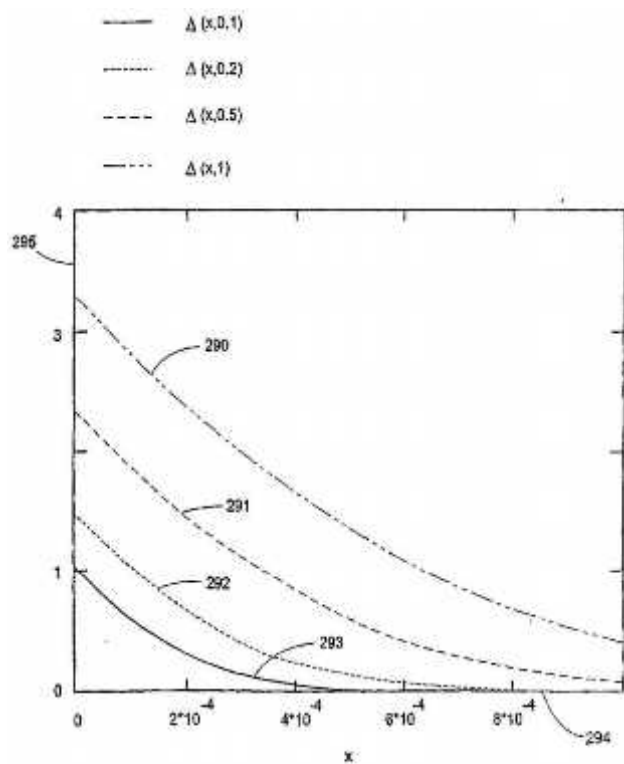


Fig. 26



$\Delta(0, t)$

Fig. 27

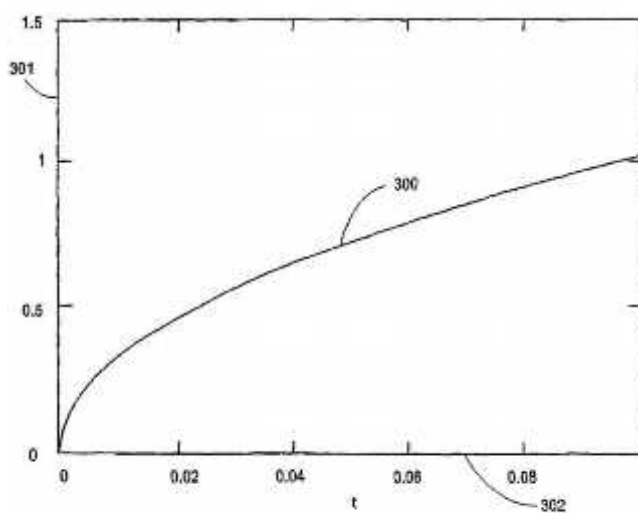
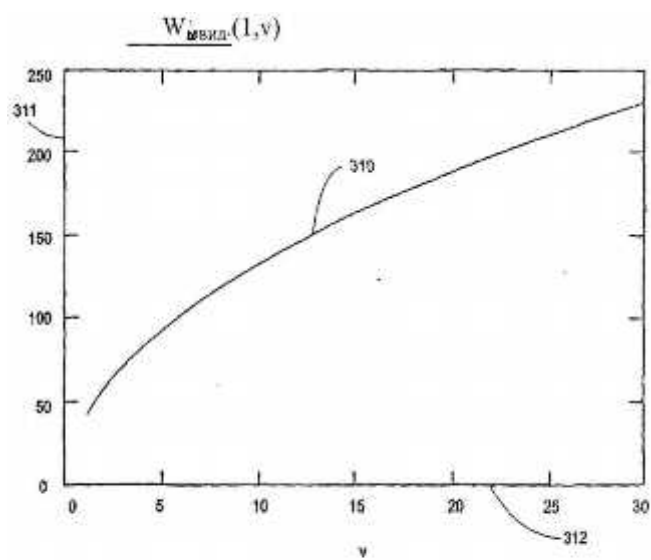
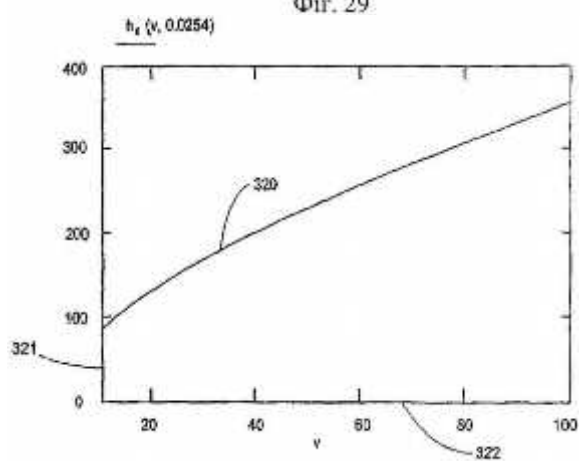


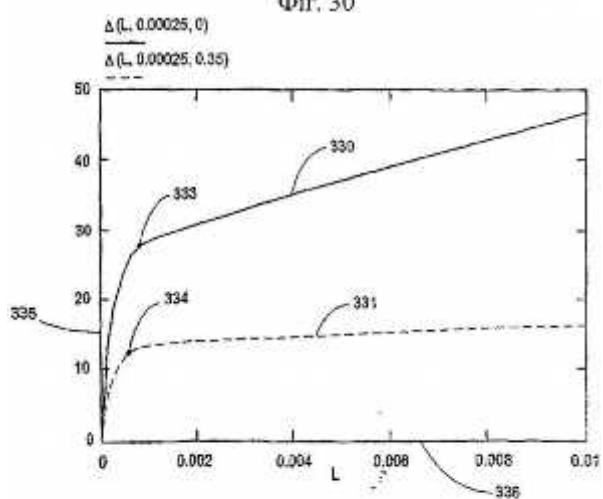
Fig. 28



Фиг. 29



Фиг. 30



Фиг. 31

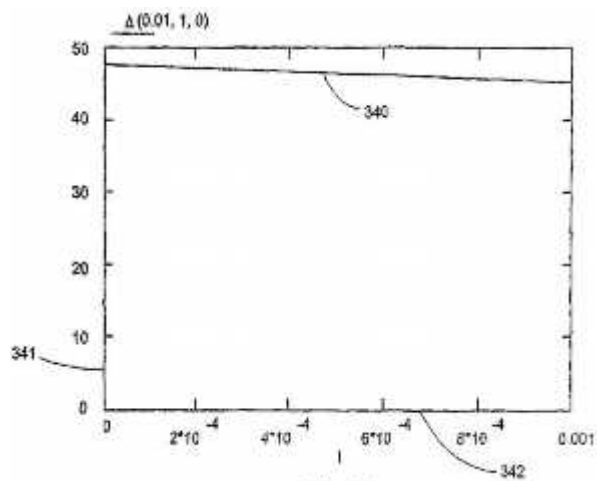


Fig. 32

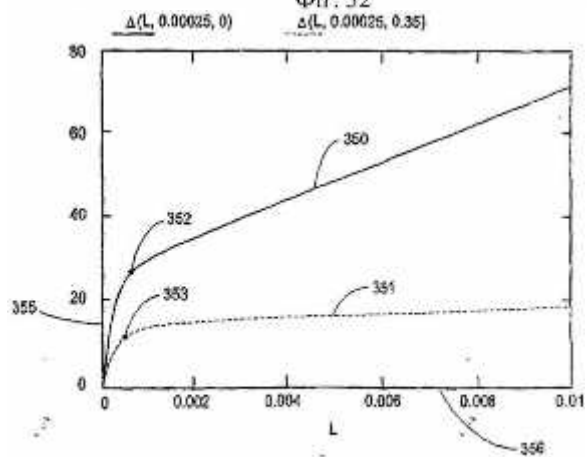


Fig. 33

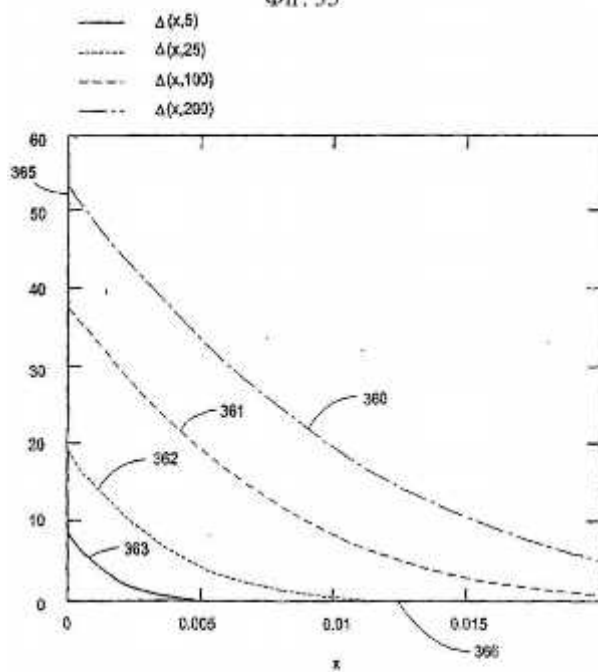


Fig. 34

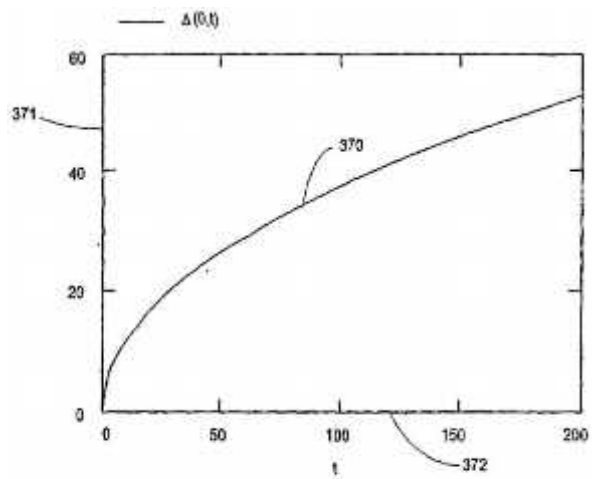


Fig. 35
460

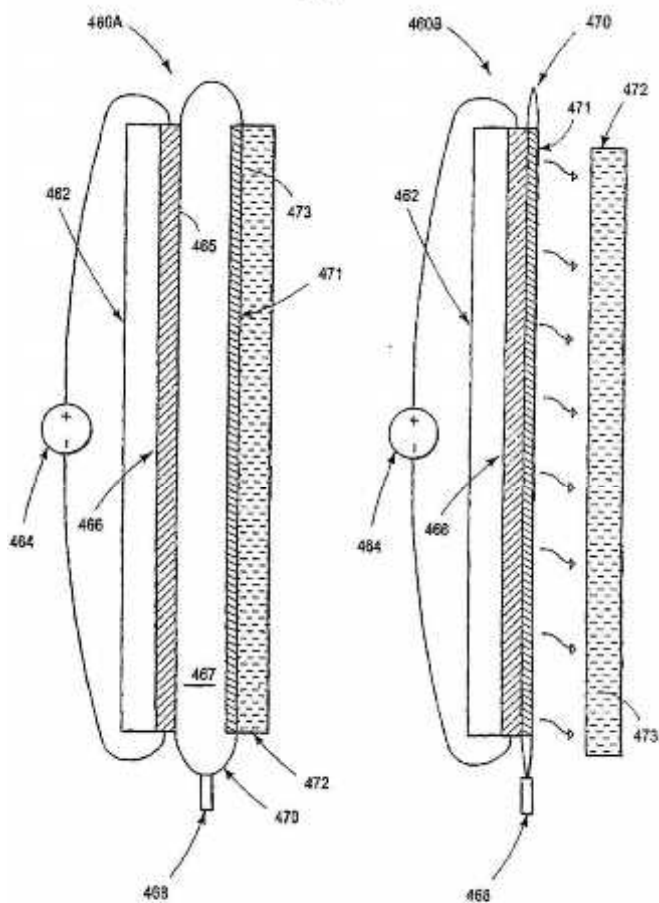


Fig. 36

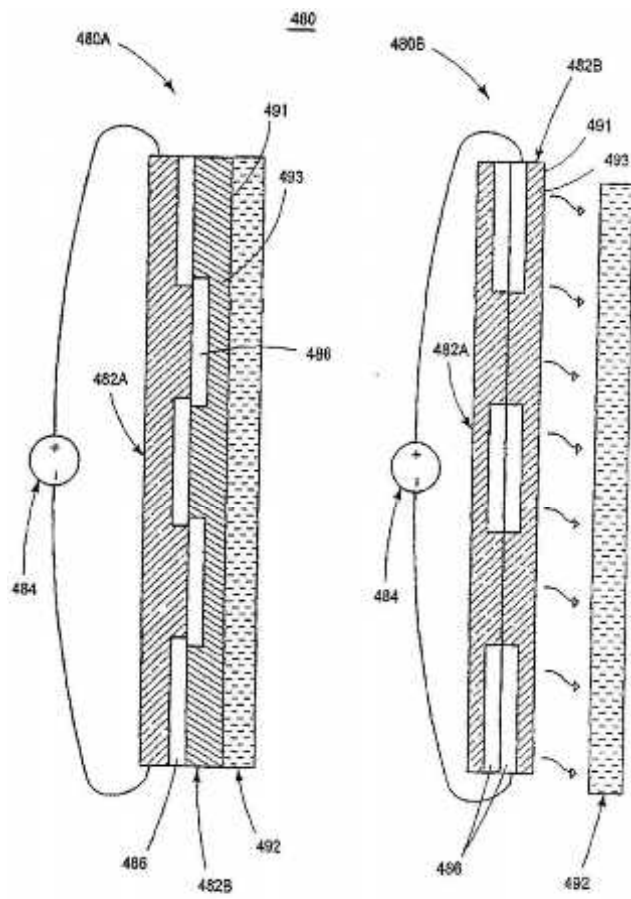


FIG. 37

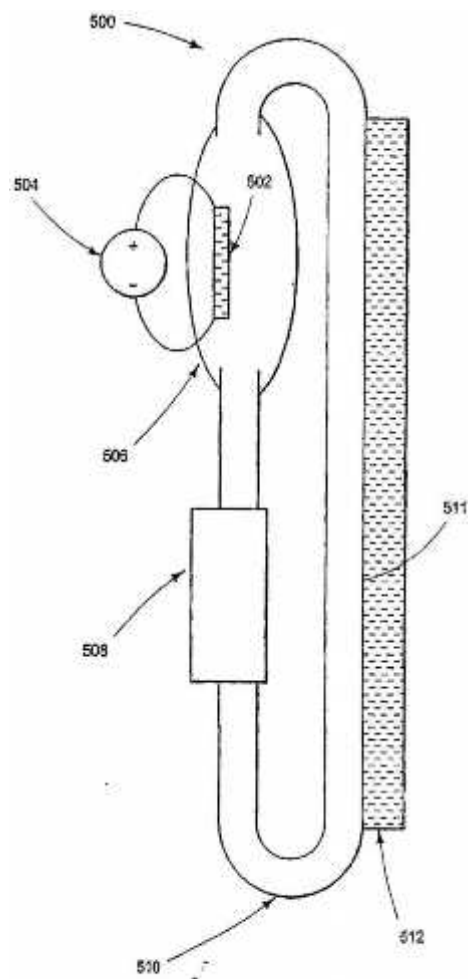


FIG. 38

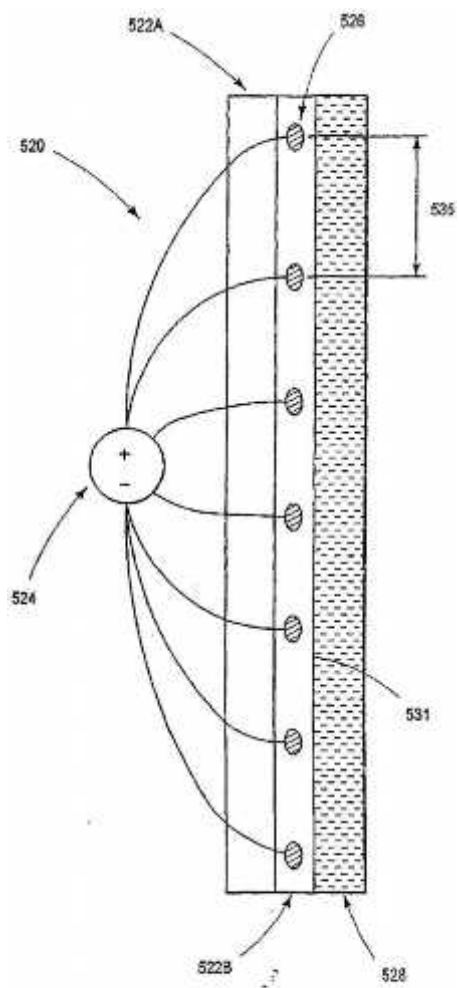


Fig. 39

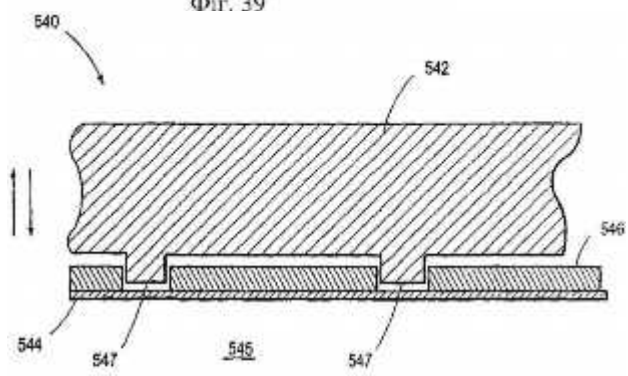


Fig. 40

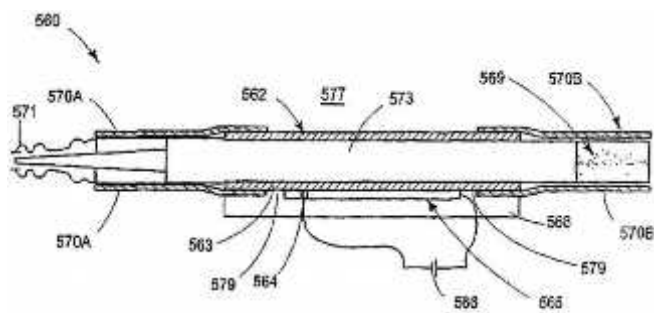


Fig. 41

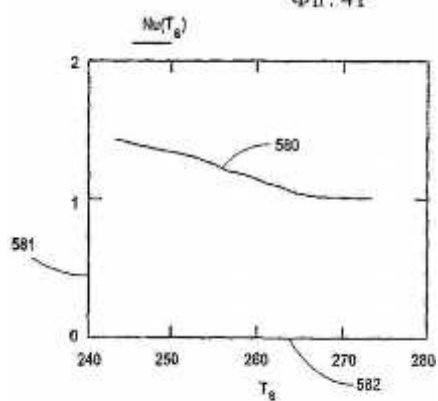


Fig. 42

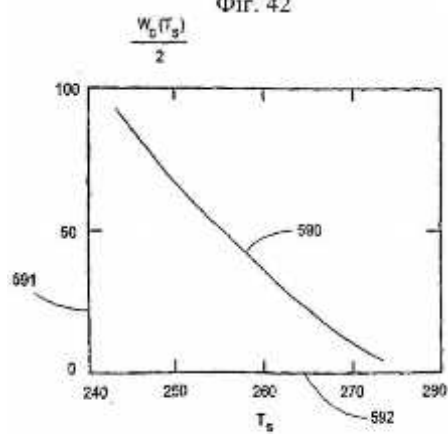


Fig. 43

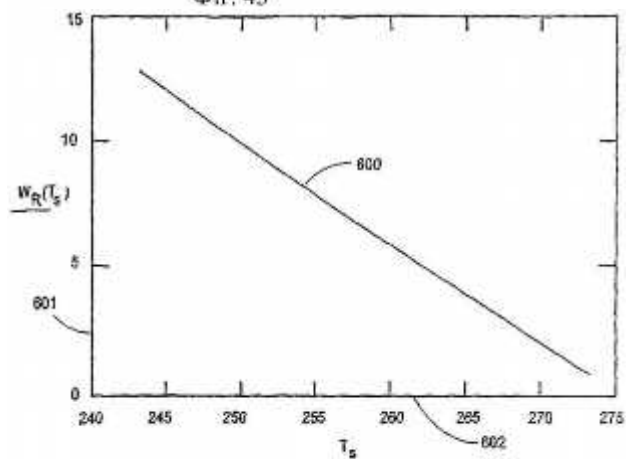
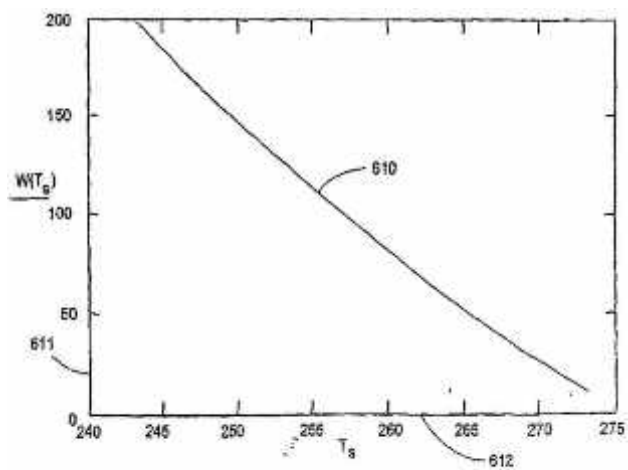
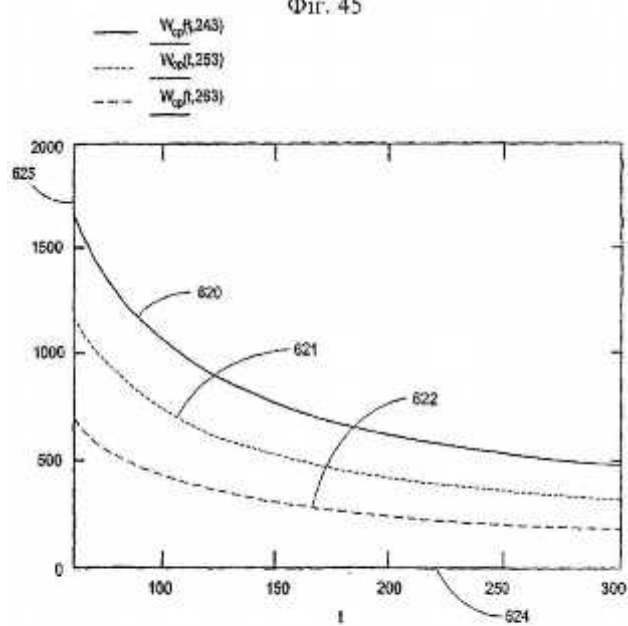


Fig. 44



Фиг. 45



Фиг. 46



Фиг. 47

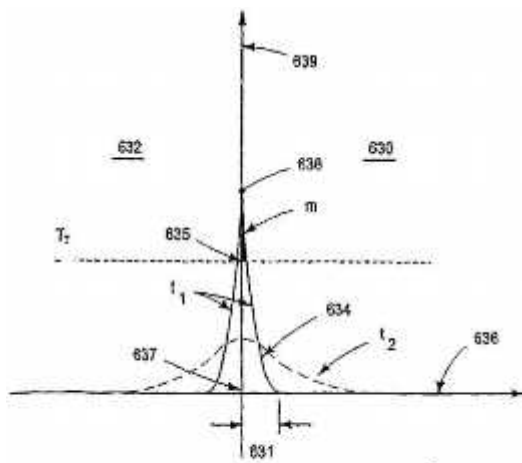


Fig. 48

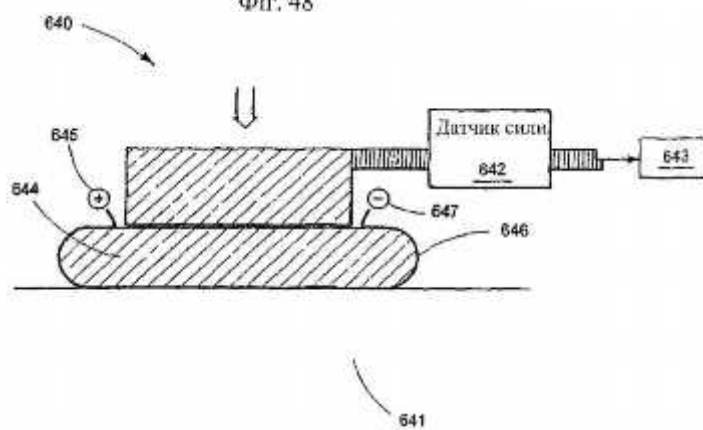


Fig. 49

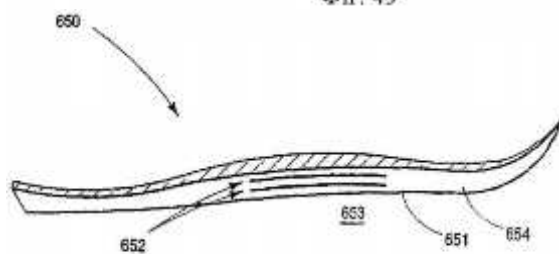


Fig. 50

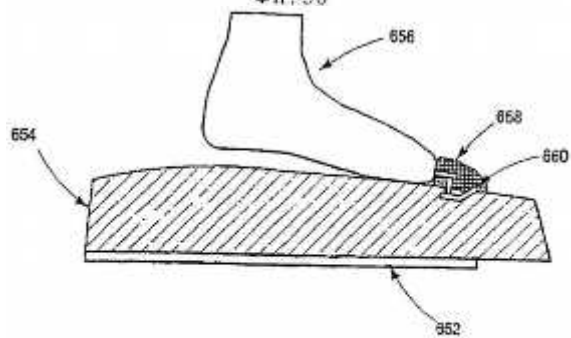


Fig. 51

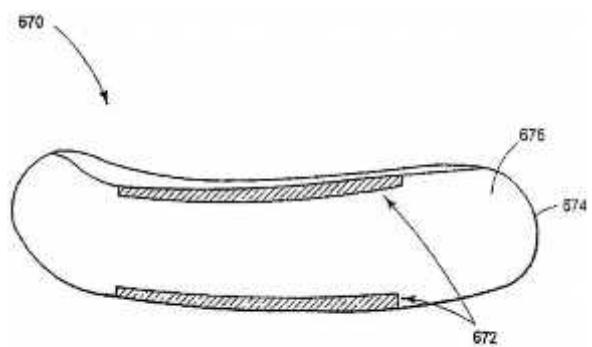


Fig. 52

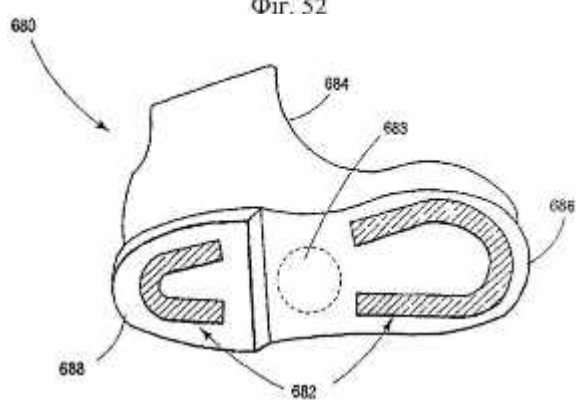


Fig. 53

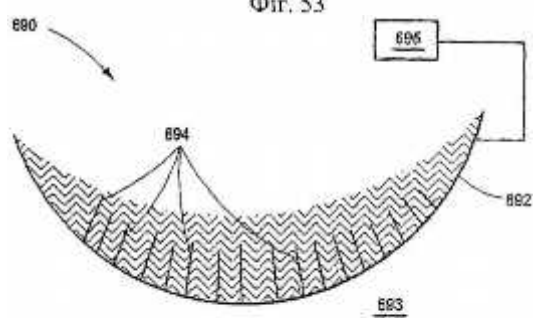


Fig. 54

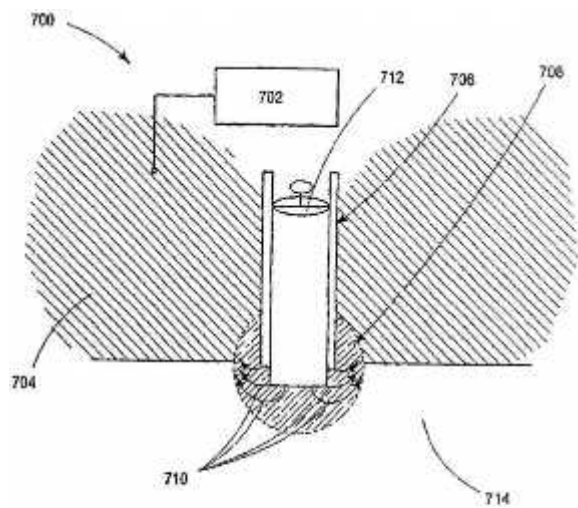


Fig. 55

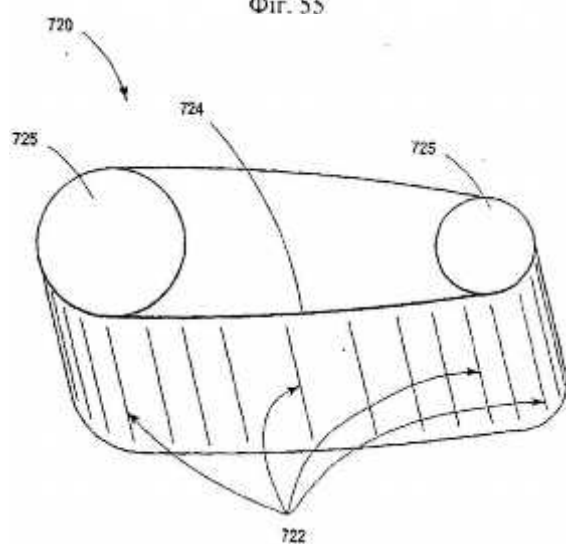


Fig. 56

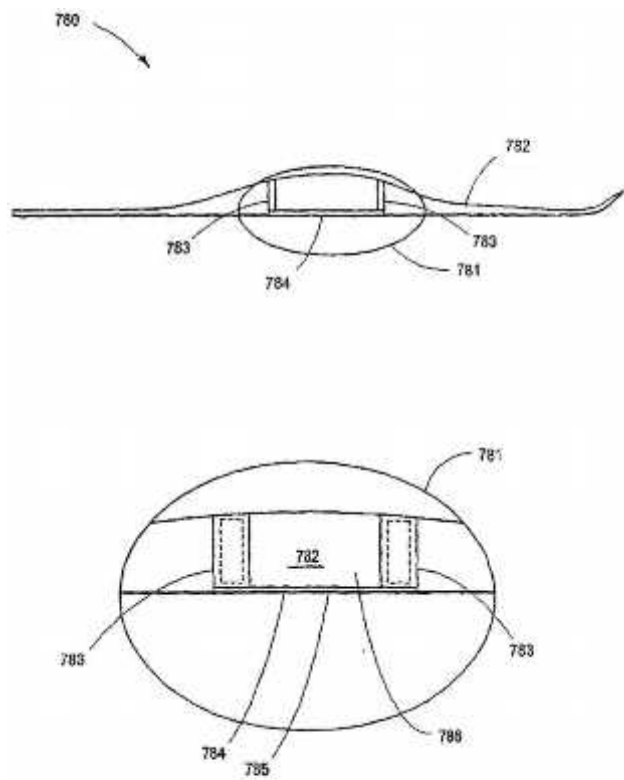


Fig. 57

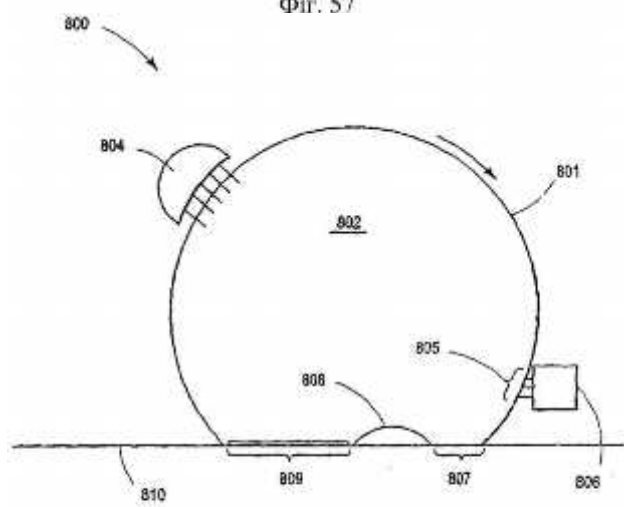
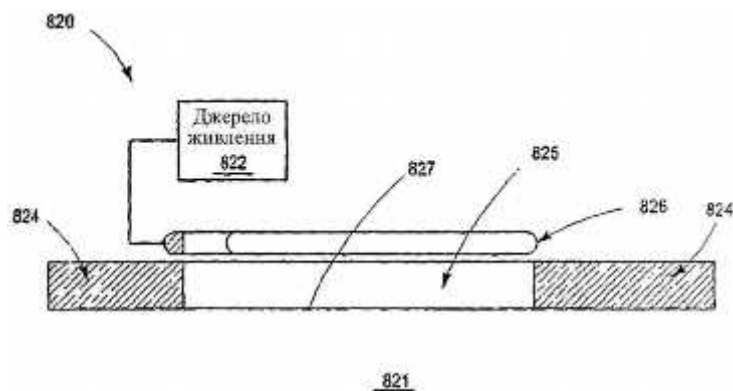
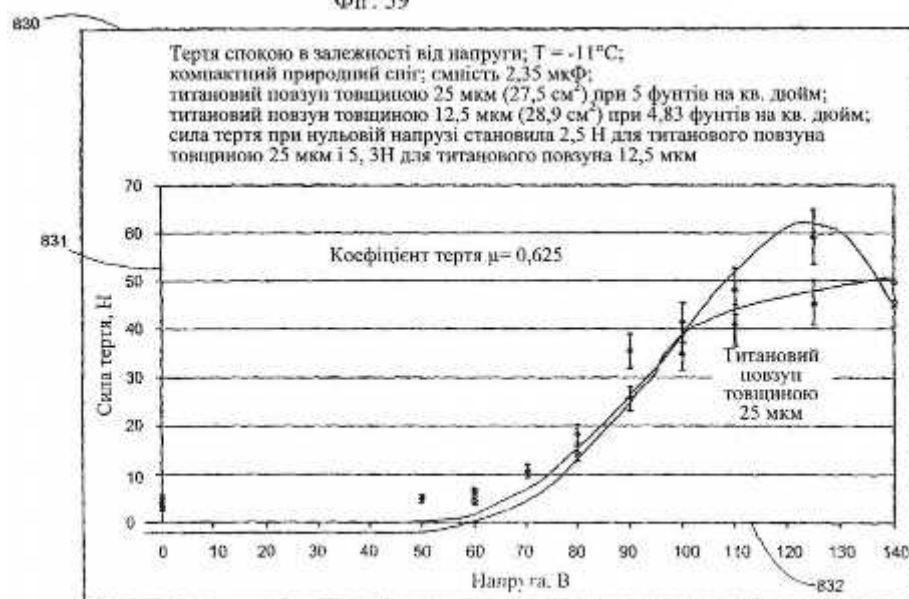


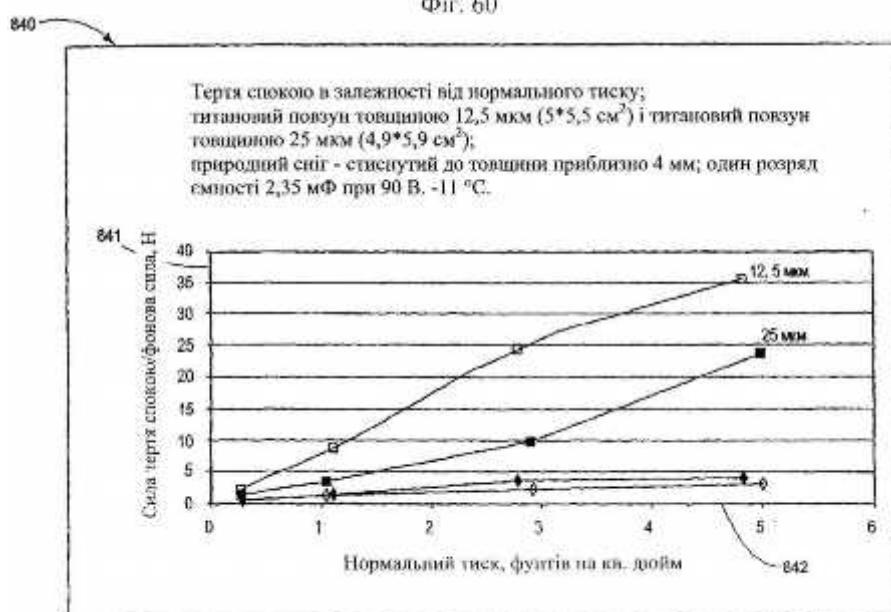
Fig. 58



Фіг. 59



Фіг. 60



Фіг. 61

850

Тертя спокою в залежності від напруги; $T = -2^{\circ}\text{C}$;
компактний природний сніг; конденсатор 2,35 мкФ;
титановий повзун товщиною 25 мкм ($27,5\text{ см}^2$) при 5 фунтах на кв. дюйм;
титановий повзун товщиною 12,5 мкм ($28,9\text{ см}^2$) при 4,83 фунтах на кв.
дюйм; сила тертя при нульовій напрузі складала 2,5 Н для титанового
повзуна товщиною 25 мкм та 3 Н для титанового повзуна товщиною
12,5 мкм

863

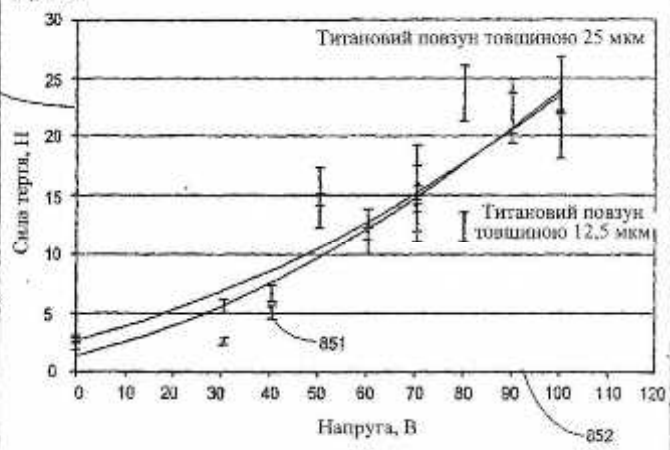


Fig. 62

860

Титановий повзун, $R=3\text{ Ом}$, $5*5,5\text{ см}^2$;
компактний природний сніг, -11°C , 4 розряди конденсатора 1,36 мкФ
при 110 В від час руху;
35 кПА—5 фунтів на кв. дюйм ($\sim 21,7$ фунтів); швидкість ковзання
приблизно 3,5 мм/сек.

863

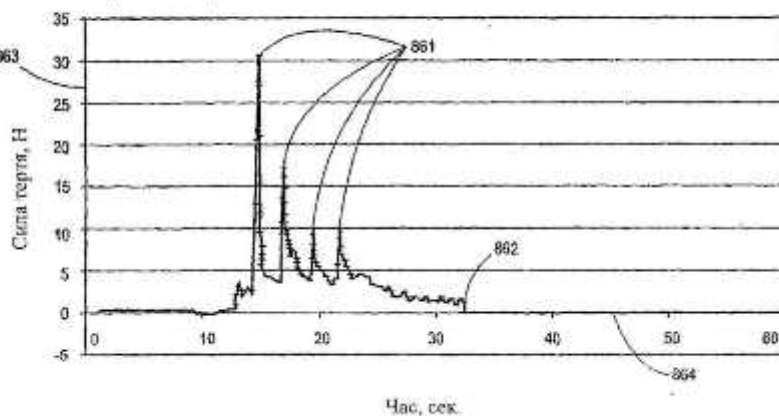
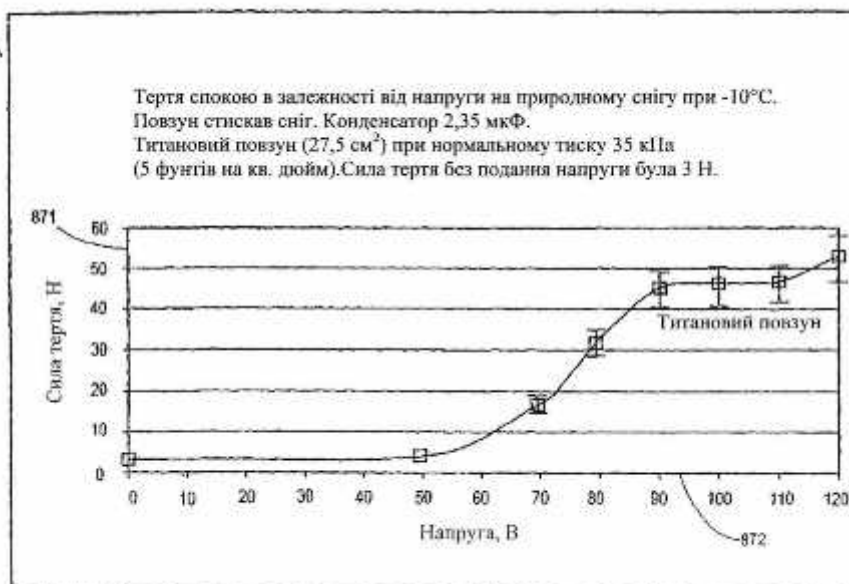
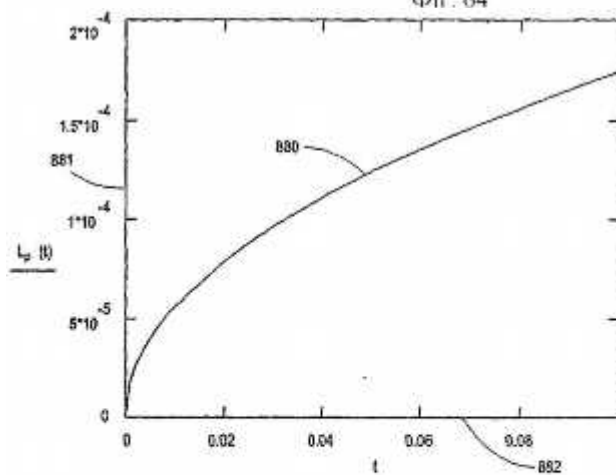


Fig. 63

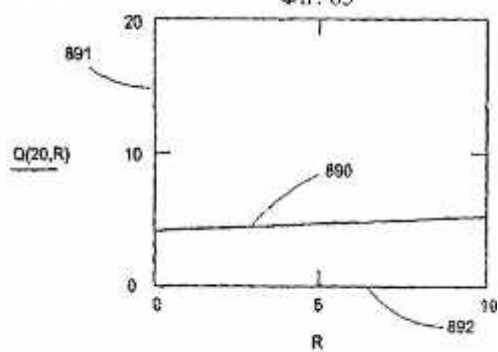
870



Фиг. 64



Фиг. 65



Фиг. 66

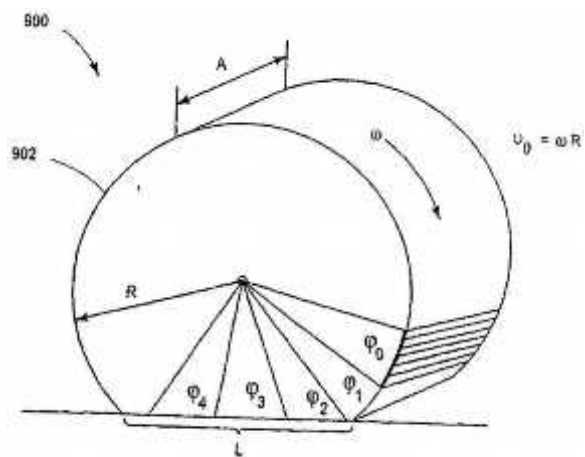


Fig. 67

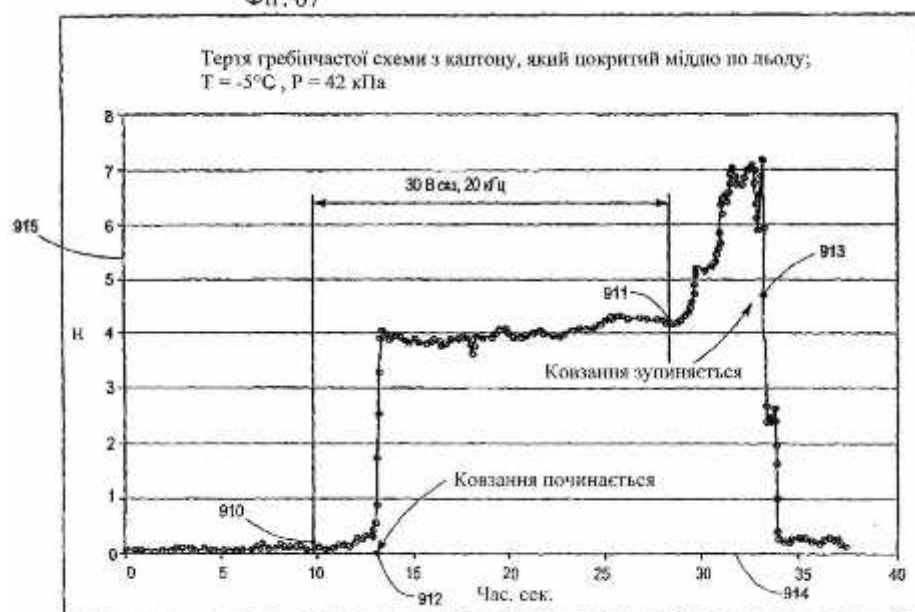


Fig. 68

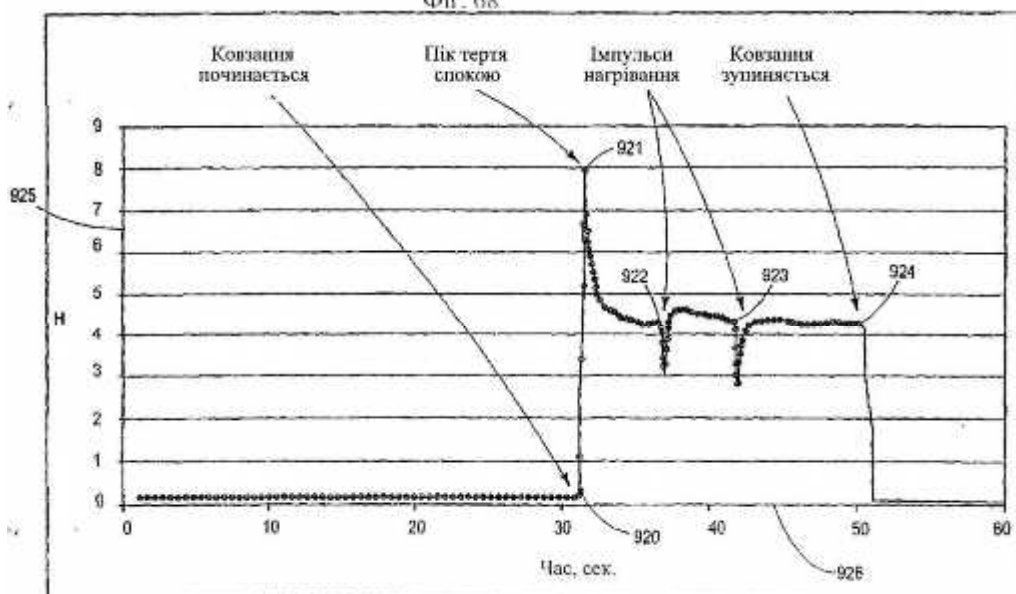


Fig. 69