Автореф
3-62

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ І СПОРТУ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ХОЛОДУ

ЗІМІН ОЛЕКСІЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 621.184.

ОТРИМАННЯ БІНАРНОГО ЛЬОДУ В ЛЬОДОГЕНЕРАТОРІ ШНЕКОВОГО ТИПУ

05.05.14 - Холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса-2012

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Одеській державній академії холоду МОНМС України

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент
Мнацаканов Георгій Костянтинович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Радченко Микола Іванович,
завідувач кафедри кондиціонування і рефрижерації Миколаївського Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

кандидат технічних наук, доцент
Красновський Ігор Наумович,
начальник дослідно-випробувального центру Українського науково-дослідного і проектно-конструкторського інституту побутового машинобудування.

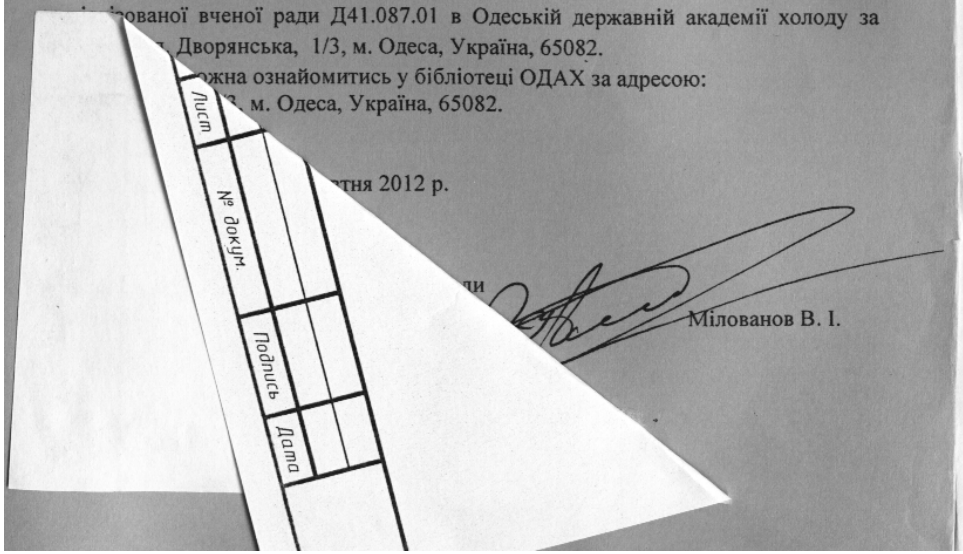
Захист дисертації відбудеться «26» листопада 2012 р. в ауд. 108 о 14^{00} на засіданні ...ованої вченої ради Д41.087.01 в Одеській державній академії холоду за ...Дворянська, 1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

...жна ознайомитись у бібліотеці ОДАХ за адресою: ...3, м. Одеса, Україна, 65082.

...тня 2012 р.

...ди

Мілованов В. І.



xv1077
Інститут холоду ОНАХТ бібліотека
ГАЛУЗЕВИЙ ВІДДІЛ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Бінарний лід – екологічно чистий, енергоємний холодоносій, що широко застосовується нині в різних галузях харчової промисловості, а також у процесі кондиціонування повітря. Теоретичні й експериментальні дослідження властивостей бінарного льоду у процесах його здобування і застосування започатковані в 90-х роках і тривають дотепер.

Цей холодоносій є водним розчином солі, спирту або гліколю, у якому деяка частина води перебуває у твердій фазі, причому розміри кристалів льоду не перевищують 1 мм. Основний ефект від використання бінарного льоду полягає у високій питомій енергетичній ефективності розчину, яку досягають за рахунок енергії фазового переходу під час танення кристалів льоду, що відбувається за постійної температури середовища. Малі розміри кристалів льоду дають змогу транспортувати суміш по звичайних трубопроводах, причому перекачуванню піддаються навіть суспензії, що містять до 60% льоду за об'ємом. Якщо вміст льоду становить 20-25% за об'ємом, різниця ентальпій розчину досягає 100 кДж/кг і більше, що вище за енергетичні можливості однофазних холодоносіїв.

Існує ряд методів, які слугують підґрунтям для створення генераторів бінарного льоду :

- циклічне видалення льоду, що наростає, під час підводжування зовнішній теплоти з подальшим подрібненням льоду;
- безперервне видалення льоду з поверхонь теплообміну за допомогою скребків, щіток, фрез або шнека;
- запобігання прилипанню льоду до стінок льодогенератора шляхом використання спеціальних покриттів на металевих поверхнях льодогенератора;
- використання ефекту переохолодження води з подальшою кристалізацією в усьому об'ємі посудини з ініціацією утворення первинних ядер ультразвуком або механічним шоком;
- з використанням стану речовини біля потрійної точки: поблизу потрійної точки лід формується за умов часткового переходу рідини в пару під час падіння тиску;
- застосування гідрофобних систем, в у яких первинний холодоагент, що не змішується, випаровується у двофазному розчині, що подається.

Одними з широко використовуваних апаратів для здобування бінарного льоду є скребкові льодогенератори. Це апарати безперервної дії, що дають змогу дістати лід практично відразу після включення в роботу.

Шнекові льодогенератори, які входять до групи скребкових льодогенераторів, традиційно використовуються для отримання лускатого льоду завтовшки 1.5-2 мм з частотою обертання шнека 2-3 об/хв. За умов роботи з підвищеною частотою обертання в затопленому теплообміннику шнекового генератора можна отримувати бінарний лід. Крім того, шнек також виконує транспортну функцію, дозволяючи безпосередньо подавати холодоносій з певною

концентрацією льоду до споживача. Незважаючи на все вищевикладене, процеси льодоутворювання, які відбуваються в теплообмінних апаратах цих льодогенераторів, недостатньо вивчені.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з програмою фундаментальних та пошукових досліджень, відповідаючи Постанові Верховної Ради України про затвердження програми енергоефективності за Кіотським договором від 1 березня 2010г., указу президента України №174 от 28.02.08 «Про невідкладні заходи щодо забезпечення ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів», Енергетичної стратегії України на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням уряду від 15 березня 2006 року № 145-р.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є визначення раціональних конструктивних характеристик і режимів роботи генератора бінарного льоду шнекового типу.

Завдання дослідження :

1. Розробка математичної моделі процесів теплопередачі під час льодоутворення у шнековому генераторі бінарного льоду.
2. Здобування залежностей для розрахунку продуктивності шнекового генератора і визначення теплофізичних характеристик бінарного льоду.
3. Проведення експериментального дослідження моделі шнекового генератора бінарного льоду. Отримання експериментальних даних за залежністю продуктивності генератора від частоти обертання шнека і температури води, що подається. Порівняння розрахункових результатів з експериментальними даними.
4. Розробка методу розрахунку продуктивності генератора бінарного льоду шнекового типу.
5. Розробка рекомендацій щодо вибору раціональних конструктивних характеристик і режимів роботи генератора бінарного льоду шнекового типу.

Об'єкт дослідження – шнековий льодогенератор установки отримання бінарного льоду.

Предметом дослідження є процеси теплопередачі в теплообмінному апараті шнекового генератора бінарного льоду.

Методи дослідження: теоретичне й експериментальне дослідження шнекового генератора бінарного льоду.

Наукова новизна роботи визначається тим, що вперше:

- розроблено фізичну і математичну моделі процесів теплопередачі під час льодоутворювання у шнековому генераторі бінарного льоду з урахуванням всіх теплових потоків. Досліджено характер співвідношення теплових потоків при зміні частоти обертання шнека від 0,1 об/сек до 10 об/сек. Здобуто залежності для оцінення впливу конструктивних характеристик і режимів роботи генератора на його масову продуктивність і концентрацію льоду в суміші на виході з генератора.
- отримано експериментальні дані за залежністю продуктивності генератора бінарного льоду шнекового типу від частоти обертання шнека та температури води яка подається в теплообмінник. За наявності попереднього охолодження води до температури близької до кріоскопічної продуктивність генератора зростає більш ніж в 4 рази. Експериментальні дані підтверджують адекватність розробленої теоретичної моделі у діапазоні частот обертання шнека n=0,1÷2,6 об/сек.
- визначено і досліджено область режимів роботи генератора бінарного льоду, що відповідає максимальній продуктивності апарату. Для типорозмірного ряду генераторів з діаметром теплообмінника D=0,04÷0,12 м існує зона максимальної продуктивності, що відповідає діапазону частот обертання шнека n=1÷2 об/сек.

Достовірність наукових положень і результатів підтверджено результатами експериментально-розрахункових досліджень та високоякісним і кількісним погодженням здобутих результатів.

Практичне значення отриманих результатів :

- розроблено метод розрахунку продуктивності генератора бінарного льоду шнекового типу;
- розроблені практичні рекомендації з конструювання й оптимізації режимів роботи генераторів бінарного льоду шнекового типу;
- матеріали дисертаційного дослідження використовують у навчальному процесі на кафедрі холодильних машин і установок ОДАХ в курсі практичних, лабораторних занять і дипломного проектування з холодильних установок, починаючи з 2007 року.

Особистий внесок здобувача.

Особисто розроблена математична і фізична модель шнекового генератора бінарного льоду та метод розрахунку продуктивності апарата, створена експериментальна установка, проведено цикл експериментально-розрахункових досліджень, проаналізовані та узагальнені отримані результати.

Апробація результатів роботи.

Дисертацію обговорено на засіданнях кафедри холодильних машин і установок Одеської державної академії холоду. За темою дисертації виголошено доповіді на І-ій Міжнародній науково-технічній конференції "Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування і рефрижерації" (м. Миколаїв, 2008 р.); на І-ій Міжнародній науково-технічній конференції "Інновації в суднобудуванні і океанотехніки", (м. Миколаїв, 2010 р.); на Міжнародній конференції з елементами наукової школи для молоді "Інноваційні розробки в області техніки і фізики низьких температур" (м. Москва, 2010 р. і 2011 р.); на 5-ій, 6-ій і 7-ій Міжнародних науково-технічних конференціях "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології" (м. Одеса, 2007 – 2011 рр.).

Публікації.

Основні результати роботи викладено у 10 опублікованих працях, у тому числі: в 4 статтях у фахових журналах, затверджених ВАК України і 6 тезах доповідей на конференціях в Україні і за кордоном.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 60 найменувань. Роботу викладено на 110 сторінках друкарського тексту. Матеріали дослідження узагальнено у 32 малюнках і 3 таблицях.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обгрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано цілі та основні завдання дослідження, схарактеризовано наукову новизну і практичну цінність здобутих результатів.

У **першому розділі** розкрито поняття бінарного льоду як ефективного й екологічно безпечного холодоносія, розглянено сфери його застосування, вивчено особливості процесів кристалізації води і танення льоду, подано сучасну методику визначення теплофізичних властивостей бінарного льоду, проведено порівняльний аналіз різних методів здобування бінарного льоду.

Бінарний лід застосовують для акумуляції холоду в різних охолоджувальних системах, для охолодження риби і м'яса, продуктів рослинного походження, молочних продуктів і напоїв, для здобування штучного снігу як засобу (або засобів) пожежогасіння, в системах комфортного кондиціонування повітря, а також на холодильному транспорті. У більшості випадків специфіка використання холодоносія передбачає наявність додаткових якісних вимог до складу бінарної суміші. Основні параметри суміші, які потрібно врахувати у разі використання в теплообмінних апаратах, насосах і магістральних трубопроводах, – це робоча температура суміші, розміри кристалів льоду та їхня концентрація.

Принцип роботи більшості сучасних генераторів бінарного льоду не дає змоги загалом контролювати процес льодоутворювання, внаслідок чого розмір кристалів льоду та їхня концентрація в суміші є величиною неврегульованою. Крім того, у зв'язку з цією невпорядкованістю, виникає обов'язкова потреба в додатковому резервуарі – акумуляторі бінарного льоду. Використовуючи шнековий генератор можна здобути бінарну суміш із заданими розмірами кристалів і концентрацією льоду. До того ж у деяких випадках цей генератор можна застосувати без акумулятора холоду, якщо подавання холодоносія до споживача здійснюється безпосередньо шнеком.

Здійснюючи розрахунки, пов'язані з використанням бінарного льоду, вживають умовні величини, теплофізичні властивості, що характеризують його. Їх розраховують залежно від властивостей льоду і води, а також від концентрації льоду в суміші.

На підставі аналізу сучасних тенденцій у сферах застосування і здобування бінарного льоду висунено робочу гіпотезу за визначенням раціональної конструкції і режимів роботи генератора шнекового типу, а також поставлено завдання справжньої роботи.

У другому **розділі** вивчено процеси льодоутворювання і теплопередачі під час наморожування льоду на охолоджуваній поверхні. З цього питання проаналізовано роботи зарубіжних (Weisser, Bell, Skelland) і вітчизняних (А. Г. Ткачев, Н. А. Бучко, В. Б. Ржевська, С. Г. Чукліна та Е. Г. Парцхаладзе) авторів.

Процес кристалізації льоду на теплообмінній поверхні, межовий шар якої безперервно порушується турбулентним потоком суміші з кристалами льоду, дуже складний. Разом з основним процесом кристалізації відбувається танення й руйнування кристалів у вільному об'ємі апарату. Джерела в зарубіжній літературі вказують на суперечність і недостатню вивченість цього питання. Необхідно було розробити фізичну і математичну модель процесів теплопередачі у шнековому льодогенераторі, яка враховуватиме конструктивні особливості апарату, умови теплопередачі, теплофізичні властивості рідини і зміну фракції льоду в суміші.

Прийняті позначення:

α_x – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до холодоносію, Вт/(м²·К);
$\alpha_в$ – коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки, Вт/(м²·К);
t_x – середня температура холодоносія, °С;
$t_в$ – температура води, °С;
$t_{пр}$ – приведена температура води, °С;
$t_{ст}(y,\tau)$ – розподіл температур за товщиною стінки, °С;
$t_л(y,\tau)$ – розподіл температур за товщиною льоду, °С;
$\delta_{ст}$ – товщина стінки, м;
$\lambda_{ст}$ – теплопровідність матеріалу стінки, Вт/(м·К);
$\delta_л(y,\tau)$ – товщина шару льоду, м;
$\lambda_л$ – теплопровідність льоду, Вт/(м·К);
Δ – проміжок між стінкою і крайкою шнека, м;
$\rho_л$ – густина льоду, кг/м³;
$P_л$ – механічна напруга під час зрізування льоду, Н/м²;
r_0 – прихована теплота кристалізації, кДж/кг;
n – частота обертання шнека, сек$^{-1}$;
D_1 – внутрішній діаметр теплообмінної труби, м;
D – зовнішній діаметр шнека, м;
d – діаметр вала шнека, м;
L – робоча довжина теплообмінної труби, м;
s – крок витків шнека, м.

Сумарні питомі теплові потоки, що виникають у процесі льодоутворювання у шнековому льодогенераторі бінарного льоду в нескінченно малий проміжок часу $d\tau$:

$$dq_0=dq_1+dq_2+dq_3, \text{ Вт/м}^2, \qquad (1)$$

де dq_1 – питомий тепловий потік, що виникає під час кристалізації льоду, Вт/м²;

dq_2 – питомий конвективний тепловий потік, що надходить від рідини до поверхні льоду, з урахуванням кількості теплоти, яка виділяється в рідині під час роботи сил тертя, Вт/м²;

dq_3 – питомий тепловий потік, що виникає під час пластичної деформації в процесі зрізування льоду шнеком, Вт/м².

На початковому етапі завдання робимо такі припущення:

- фронт кристалізації є пласким з урахуванням малої товщини льоду, який наморожується за один оберт шнека, одновимірне завдання;
- температура води, що надходить до генератора, близька до кріоскопічної.

Спочатку було розглянено процес наморожування льоду в довільному поперечному перерізі теплообмінної труби за умов $0<\delta_{л_i}<\delta_л$, за час τ_i, що відповідає одному оберту шнека $0<\tau_i<(1/n)$, оскільки передбачаємо, що в межах цього перерізу фізичні властивості суміші води і льоду постійні.

Після визначення теплових потоків відповідно до рівняння (1) було отримано умову Стефана в такому вигляді:

$$\frac{t_{cm} - t_x}{\frac{\delta_л(\tau)}{\lambda_л} + \frac{\Delta}{\lambda_л} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_x}} = \alpha_в \cdot (t_{np} - t_{cm}) + (r_0 \cdot \rho_л + P_л)\frac{d\delta_л}{d\tau} \qquad (2)$$

Були введені додаткові змінні.

Умовна швидкість наростання шару льоду, м/сек :

$$w_л = \frac{\alpha_в \cdot (t_{np} - t_{cm})}{(r_0 \cdot \rho_л + P_л)} \qquad (3)$$

Умовна товщина шару постійного термічного опору, м :

$$\delta_т = \Delta + \lambda_л \cdot (\frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_x}) \qquad (4)$$

Максимальна товщина намороженого шару льоду, м :

$$\delta_{max} = \lambda_л \cdot (\frac{t_{cm} - t_x}{\alpha_в \cdot (t_{np} - t_{cm})} - (\frac{\Delta}{\lambda_л} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_x})) \qquad (5)$$

Розв'язанням рівнянь (2 – 5) став вираз для визначення товщини наморожуваного льоду, м :

$$\delta_л = \frac{\delta_{max} \cdot \delta_т}{\delta_{max} + \delta_т}(\sqrt{1 + \frac{2 \cdot w_л \cdot (\delta_{max} + \delta_т)}{n \cdot \delta_т^2}} - 1) \qquad (6)$$

Під час руху елементарної ділянки поперечного зрізу від початкової зони льодоутворення до точки виходу суміші з апарата масова концентрація льоду $\xi_л$ у постійному об'ємі безперервно збільшується.

Якщо розглянути інтервал часу, рівний одному оберту шнека, тоді об'єм зрізаного льоду дорівнюватиме величині $\Delta V_л=\delta_л\cdot(\pi\cdot D)\cdot\Delta L$, де ΔL – довжина елементарної ділянки теплообмінної поверхні, м. Загальний об'єм цієї ділянки $\Delta V=0.25\cdot\pi\cdot(D^2- d^2)\cdot\Delta L$. Зміну масової концентрації льоду в часі можна записати як:

$$\frac{d\xi_л}{d\tau} = \frac{\Delta V_л \cdot \rho_л}{\Delta V \cdot \rho_в} \cdot n = \frac{4 \cdot \delta_л \cdot D \cdot \rho_л \cdot n}{(D^2 - d^2) \cdot \rho_в} \qquad (7)$$

У рівнянні (7) вводимо припущення: товщина льоду, що наростає, зі збільшенням масової концентрації льоду в суміші змінюється незначно, тому її товщину можна взяти за константну $(\delta_л)_{\xi=idem}$=const.

Елементарна ділянка рухається уздовж осі шнека з лінійною швидкістю $w'=n\cdot s$. Масова концентрація льоду змінюється від 0 до $\xi_{л\ вых}$. На підставі загальної довжини ділянки L час руху елементарної ділянки до кінця теплообмінної зони можна визначити так: $\tau=L/(n\cdot s)$.

В результаті після розв'язання рівняння (7) було здобуто вираз для визначення масової концентрації льоду в суміші на виході з генератора:

$$\xi_{л\ вых} = \frac{4 \cdot \delta_л \cdot D \cdot L \cdot \rho_л}{(D^2 - d^2) \cdot s \cdot \rho_в} \qquad (8)$$

У подальшому відповідно до розрахункових залежностей було визначено вплив конструктивних особливостей і режимних параметрів льодоутворювання на характеристики теплопередачі і продуктивність генератора бінарного льоду.

Відповідно до рівняння (1) можна визначити співвідношення питомих теплових потоків в апараті з урахуванням припущення про те, що товщина наморожуваного льоду незначно змінюється за довжиною апарата. Залежності розподілу теплових потоків під час кристалізації льоду в досліджуваному генераторі показано на рис.1.

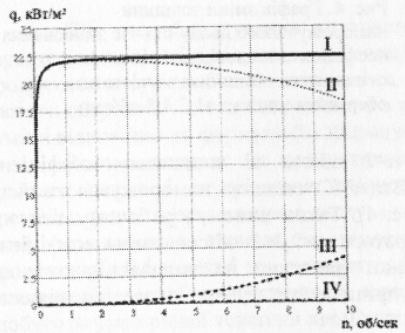


Рис. 1. Залежності розподілу питомих теплових потоків під час змінювання частоти обертання шнека
I - $q_0=f(n)$; II - $q_1=f(n)$; III - $q_2=f(n)$; IV - $q_3=f(n)$.

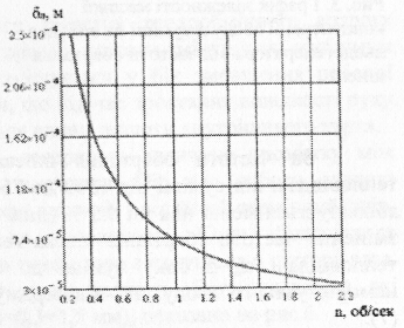


Рис. 2. Залежність товщини льоду, що наростає, в робочому діапазоні частоти обертання шнека генератора (n=0,3÷2 об/сек).

Під час здобування якісного бінарного льоду розмір крижаних часток у розчині коливається від 30 мкм до 250 мкм. Таким чином, можна визначити

робочий діапазон частот обертання шнека генератора для цих умов у режимі отримання бінарного льоду n=0,3÷2 об/сек (рис.2).

На рисунку 3 подано графік залежності масової концентрації льоду на виході з льодогенератора від частоти обертання шнека. Із графіка випливає, що масова концентрація льоду в суміші на виході з апарата в робочому діапазоні частоти обертання коливається від 4% до 25%. За класифікацією З. Р. Горбіса, потік суміші бінарного льоду в теплообміннику належить до грубодисперсного наскрізного потоку рідинної суспензії. Відповідно до залежностей, отриманих автором для цих суспензій, під час збільшування концентрації суспензії від 5% до 30%, коефіцієнт тепловіддачі з боку суспензії до шару льоду знижується вдвічі.

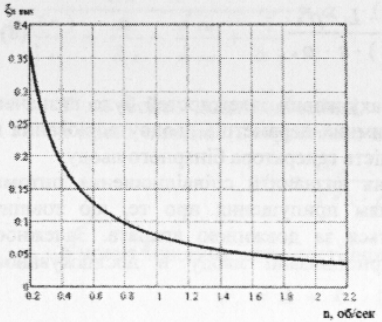


Рис. 3. Графік залежності масової концентрації льоду в суміші на виході з льодогенератора від частоти обертання шнека.

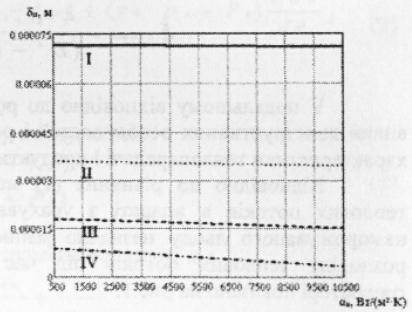


Рис. 4. Графік зміни товщини намороженого льоду під час змінювання коефіцієнта тепловіддачі від води до стінки теплообмінника за частоти обертання шнека n=1;2;4;8 об/сек.

За частоти обертання шнека n=2 об/сек зі зниженням коефіцієнта тепловіддачі від суміші від 1500 до 750 Вт/(м²·К) товщина намороженого льоду збільшується менш ніж на 0.5 % (див. рис. 4). Таким чином, у робочому діапазоні змінення частоти обертання шнека генератора n=0,3÷2 об/сек, зміна коефіцієнта тепловіддачі α_w з боку суміші до стінки фактично не впливає на товщину намороженого льоду, що підтверджує припущення під час складання рівняння (7).

Виникнення чітко вираженої області найбільшої продуктивності льодогенератора, поданої на рис. 5, пов'язане з гіперболічною залежністю товщини, що наростає, від частоти обертання (рис. 2). Фізична картина цього явища така: за низької частоти обертання шнека вплив частоти обертання на товщину зрізуваного льоду незначний, теплота внутрішнього тертя у русі суміші мала, продуктивність льодогенератора зростає за параболою.

Наведену температуру води, яка циркулює через внутрішню трубу теплообмінника генератора, визначають за формулою:

$$t_{пр}=t_в+t_{екв}= t_в+2.81\cdot w_в^2\cdot(2+1/Pr_в)/C_{рв},\ ^\circ C, \quad (9)$$

де $t_{екв}$ – еквівалентна температура, °С, підігрівання рідини, що відбувається внаслідок роботи сил внутрішнього тертя.

З подальшим збільшенням частоти обертання товщина льоду, який зрізується, зменшується. Через те що теплота внутрішнього тертя суміші q_2, що рухається, зростає в квадратичній залежності, продуктивність досягає максимуму і починає різко спадати.

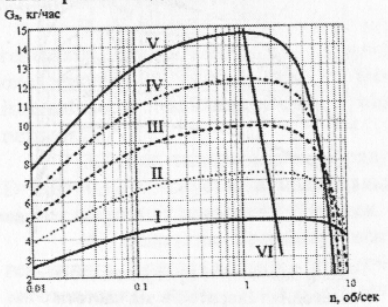


Рис. 5. Залежності продуктивності шнекових генераторів з діаметрами теплообмінника D=0.04;0.06;0.08;1;0.12 м від частоти обертання шнека.

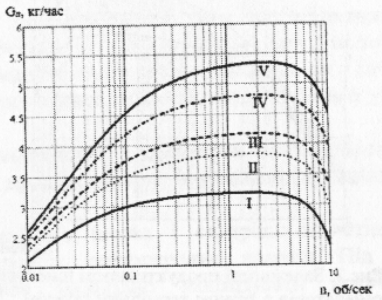


Рис. 6. Залежності продуктивності шнекових генераторів з різним проміжком Δ=0.0015÷0.0003 м від частоти обертання шнека.

Під час збільшування внутрішнього діаметру теплообмінного апарату характер залежності продуктивності генератора від частоти змінюється: максимум продуктивності стає більше вираженим і зміщується у бік зменшення робочої частоти обертання шнека. Це пов'язано з тим, що під час зростання швидкості руху суміші відповідно до формули (9) збільшується вплив теплоти внутрішнього тертя.

Значно впливає на продуктивність генератора величина проміжку між крайкою шнека і внутрішньою стінкою генератора. Під час роботи апарата проміжок заповнюється шаром льоду, що має високий постійний термічний опір, який перешкоджає відведенню теплоти до холодоносія. Коли збільшується проміжок від 0,5 мм до 1 мм, продуктивність генератора знижується в півтора раза. Залежності масової продуктивності генератора від частоти обертання шнека, які здобуто за умов різної товщини проміжку (Δ=0,3÷1,5 мм), показано на рис.6.

На відміну від міри впливу проміжку, вплив величини термічного опору стінки теплообмінника $R_{ст}$ значно менший. Відповідно до графіка, поданого на рис. 7, спостерігаємо, що масова продуктивність генератора знижується на 10 – 12% під час зростання термічного опору в 5 разів. Це пов'язано з тим, що термічний опір стінки $R_{ст}$ у кілька разів менший від термічного опору шару льоду, який перебуває в проміжку шнека, що знижує його вплив на інтенсивність льодоутворювання.

Зниження середньої температури холодоносія (холодоагенту) за температури води, що подається на генератор, близької до кріоскопічної, збільшує

масову продуктивність апарата фактично за лінійною залежністю. Відповідно до графіка, поданого на рис. 8, фіксуємо, що зі зниженням середньої температури холодоносія вдвічі тобто з t_x= – 10 °С до t_x= – 20 °С, значення масової продуктивності генератора зростає також майже в два рази.

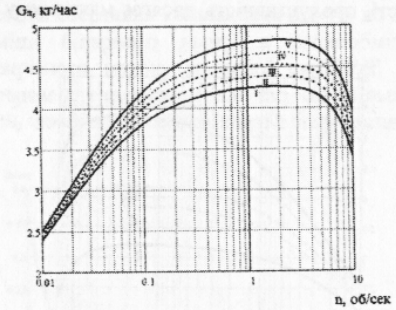


Рис.7. Залежності продуктивності шнекових генераторів з різним термічним опором стінки теплообмінника за $R_{ст}=(15\div3)\cdot10^{-5}$ (м²·К)/Вт від частоти обертання шнека.

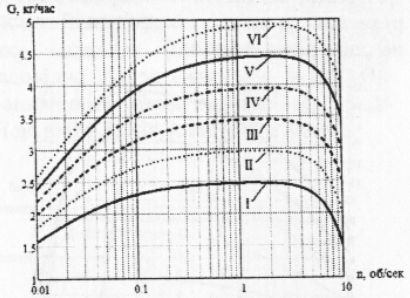


Рис.8. Залежності продуктивності шнекових генераторів від частоти обертання шнека під час знижування температури холодоносія від t_x=-10 °С до t_x=- 20 °С.

При проектуванні генератора бінарного льоду потрібно враховувати, що холодопродуктивність холодильної машини установки має відповідати кількості теплоти, що відводиться у процесі льодоутворювання в генераторі (рис.9).

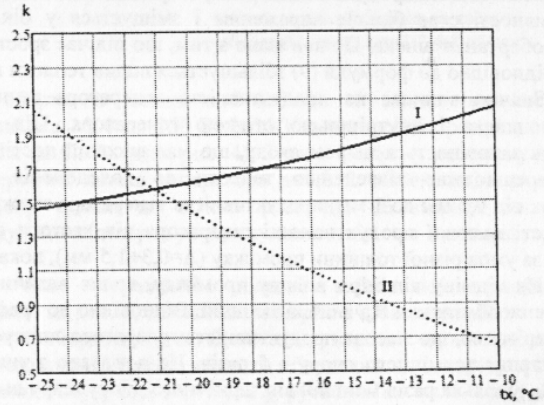


Рис.9. Залежності співвідношень холодопродуктивності компресора $Q_{0к}$ і сумарної кількості теплоти Q_0, що відводиться в генераторі, до ефективної потужності компресора N_e, зі зміною температури холодоносія t_x за частоти обертання шнека генератора n=1 об/сек.

I – $k_1=(Q_{0к}/N_e)=f(t_x)$; II – $k_2=(Q_0/N_e)=f(t_x)$.

На підставі вищевикладеного було зроблено висновки:

1. Змінюючи частоту обертання шнека генератора, можна дістати кристали льоду різних лінійних розмірів. Відповідно до отриманих розрахункових залежностей на стадії проектування генератора можна вибрати раціональні конструктивні характеристики теплообмінного апарата і шнека, робочу температуру холодоагенту і частоту обертання шнека з метою здобування бінарного льоду із заданими характеристиками.

2. У процесі льодоутворювання за температури води, що надходить у генератор, близької до 0 °С, основним теплопритоком, який потрібно відвести в охолоджувальне середовище, є прихована теплота льодоутворювання. Вплив інтенсивності тепловіддачі від суміші до стінки теплообмінника за цих умов незначний.

3. Для типорозмірного ряду генераторів з діаметром теплообмінника D=0,04÷0,12 м існує зона максимальної продуктивності, що відповідає діапазону частот обертання шнека n=1÷2 об/сек.

4. Величина проміжку між крайкою шнека і внутрішньою стінкою генератора значно впливає на інтенсивність теплопередачі апарата. Під час виготовлення пари теплообмінник-шнек необхідно мінімізувати величину проміжку, враховуючи температурне розширення металів і допуски, необхідні за умов роботи вала в підшипниках.

5. Термічний опір стінки теплообмінника генератора впливає на інтенсивність теплопередачі незначно. З урахуванням температурних коливань і високих навантажень на розрив під час зрізування льоду доцільніше використати для виготовлення теплообмінника генератора неіржавні сталі великої тривкості.

6. Зниження визначальної температури холодоносія (холодоагенту), що циркулює крізь теплообмінний апарат, призводить до пропорційного збільшення продуктивності апарата. Проте оскільки зі зниженням цієї температури зростають витрати на здобування холоду, то оптимізувати цей параметр можна, лише комплексно аналізуючи роботу холодильної машини з урахуванням умов роботи та особливостей холодоносія (холодоагенту).

У **третьому розділі** описано експериментальне дослідження процесу отримання бінарного льоду. Визначено мету і поставлено завдання експерименту, а також розроблено методику, на підставі якої був спроектований і виготовлений експериментальний стенд.

Принцип дії установки описано нижче (рис. 10). У компресорі 1 стискаються пари холодоагенту, подаються у повітряний конденсатор 2, конденсуються і дроселюються крізь капілярну трубку 4 у випарник змійовикового типу 5. У випарнику агент кипить за рахунок відводжування теплоти від розчину етилового спирту (ξ=0,5), який знаходиться в ізольованому резервуарі 6. Пари агенту повертаються в компресор. Температура охолодження розчину регулюється за допомогою терморегулятора 16.

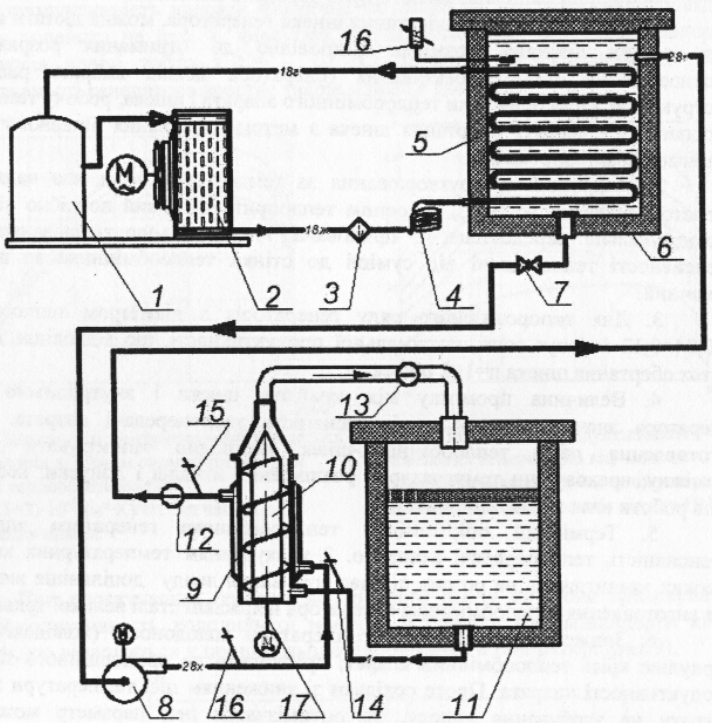


Рис. 10. Експериментальний стенд для досліджування шнекового генератора бінарного льоду

1 – мотор-компресор; 2 – повітряний конденсатор; 3 – фільтр-осушувач; 4 – пристрій, що дроселює; 5 – змійовиковий випарник; 6 – резервуар холодоносія; 7 – регулювальна засувка; 8 – циркуляційний насос; 9 – теплообмінник генератора; 10 – шнек генератора; 11 – акумулювальний резервуар; 12 – крильчастий витратомір ЛК-15г; 13 – витратомір бінарного льоду; 14, 15, 16 – рідинні ртутні термометри типу ТЛ-4; 17 – тахометр; 18 – терморегулятор ТАМ 110.

У другому контурі охолоджений холодоносій забирається з нижньої частини резервуару 6 відцентровим насосом 8, прокочується через зовнішню трубу теплообмінника генератора 9 і, після отеплення, поступає назад в резервуар 6. На лінії подання холодоносія знаходяться також регулююча засувка 7 і крильчатий витратомір 12.

Теплообмінник генератора 9 є теплоізольованим апаратом типу «труба в трубі», через зовнішню трубу якого циркулює охолоджувальний розчин, та

усередині обертається шнек 10. Матеріал теплообмінної труби – латунь, шнек виготовлено з неіржавної сталі. Із підтопленої нижньої частини труби вода забирається обертовим шнеком і розподіляється по внутрішній стінці теплообмінника. За рахунок відбирання теплоти у води циркулівним холодоносієм на внутрішніх стінках теплообмінника утворюється лід. Обертовий шнек зрізує лід. Суміш утвореної води та льоду зі збільшенням концентрації прокочується через трубу і подається в ізольований резервуар 11. У резервуарі 11 за рахунок різниці щільності лід накопичується у верхній частині, а з нижньої частини крижана вода надходить до теплообмінника.

У першій частині експерименту потрібно було визначити вплив температури води, що подається на генератор, на середню об'ємну концентрацію льоду на виході. Коли проводять цей етап експерименту, температура води, що подається на генератор, у міру охолоджування рідини в акумулювальному резервуарі поступово знижується. Решту параметрів, такі як, швидкість обертання шнека, а також температуру і витрату холодоносія, що подається в генератор, під час цієї частини експерименту підтримують як постійні.

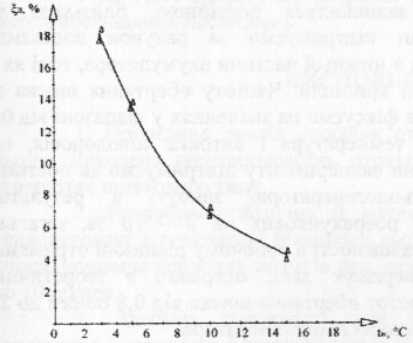


Рис. 11. Графік залежності об'ємної концентрації льоду на виході з генератора від температури води, що подається на генератор.

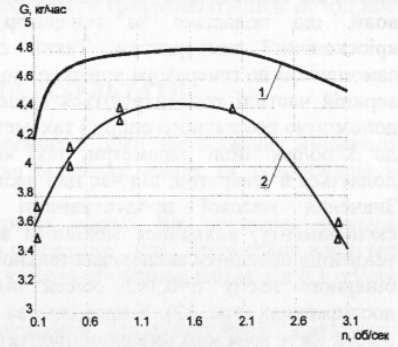


Рис.12. Графіки залежності масової продуктивності генератора від швидкості обертання шнека :
1 – теоретична; 2 – експериментальна.

Результати першої частини експерименту, які подано на рисунку 11, підтверджують значне збільшення продуктивності генератора по льоду, під час знижування температури води, що подається. Відповідно до експериментальних даних, у разі знижування температури води, що подається на генератор, з 15 °С до 3 °С об'ємна концентрація льоду на виході з генератора збільшилася в 4 рази. Низька продуктивність апарата за умови вищих від 10 °С температур води, що подається, пов'язана з двома чинниками. По перше, через інтенсивне перемішування шар переохолодженої рідини, що виникає в охолоджуваній поверхні, постійно дестабілізується теплою водою. Це призводить до зниження швидкості зростання

кристалів льоду на поверхні генератора. По-друге, кристали льоду, які відділяє обертовий шнек у процесі руху повністю або частково тануть, охолоджуючи основний потік рідини. Таким чином, більша частина теплообмінної поверхні генератора працює як інтенсивний водоохолоджувач. Площа поверхні генератора мала, час контакту потоку рідини з нею обмежений, результатом чого стає різке зниження концентрації льоду на виході з генератора.

Під час здійснювання першої частини експерименту спостерігаємо нестабільну роботу генератора за умови вищої ніж 15 °С температури води, яка подавалася, що відбувається також у разі збільшення частоти обертання шнека, більшої від 3 об/сек. Все це призводить до повного зникнення кристалів льоду на виході з апарату. Спираючись на вищевикладене, додамо, що зі збільшенням швидкості обертання шнека знижується час контакту потоку рідини з теплообмінною поверхнею. Одночасно, відповідно до формули Лейбензона, зростає в квадратичній залежності теплота внутрішнього тертя рухомої суміші. Вплив цих факторів спричиняє повне танення кристалів льоду до виходу їх з генератора.

У другій частині експерименту визначаємо залежність швидкості обертання шнека від масової продуктивності льодогенератора. У цьому випадку температура води, що подається на генератор, залишається постійною, близькою до кріоскопічної температури. Такий стан підтримуємо за рахунок подавання самопливом до генератора крижаної води з нижньої частини акумулятора, тоді як у верхній частині концентруються крижані кристали. Частоту обертання шнека за допомогою реостатного опору і тахометра фіксуємо на значеннях у діапазоні від 0.1 до 3 об/сек. Інші параметри, такі як, температура і витрата холодоносія, що подається в генератор, під час цієї частини експерименту підтримуємо як постійні. Значення масової продуктивності льодогенератора, здобуті в результаті експерименту, виявилися меншими від розрахункових на 7 – 10 %, загальна тенденція поведінки експериментальної залежності в робочому діапазоні отримання бінарного льоду n=0,3÷2 об/сек підтверджує дані, одержані в теоретичних дослідженнях (рис. 12). У проміжку за частот обертання шнека від 0,8 об/сек до 2,4 об/сек існує зона максимальної продуктивності льодогенератора.

Зі збільшенням частоти обертання до 4 об/сек робота генератора стає нестабільною. Концентрація кристалів льоду в потоці суміші непостійна. З подальшим збільшенням швидкості обертання шнека нестабільність зростає і поступово лід зникає загалом. На цій ділянці досліду експериментальні дані не відповідають теоретичному дослідженню, що можна пояснити сукупністю чинників, за яких відбувається утворення і відділення кристалів льоду. Відповідно до розрахункових залежностей товщина зрізуваного льоду стає меншою ніж 30 мкм за частоти обертання шнека вищого від 4 об/сек. Під час зрізування льоду виділяється теплота пластичної деформації, що концентрується в точці утворення зрізаного кристала. Вона відносно невелика, проте, на нашу думку, її дія в сукупності зі значно збільшеною теплотою внутрішнього тертя призводить до руйнування кристалів льоду.

Максимальна сумарна відносна похибка експериментальних даних становить 14,9%.

У **четвертому розділі,** відповідно до отриманих у результаті моделювання розрахункових залежностей, обґрунтовано цілі, методи й алгоритм розрахунку генераторів бінарного льоду шнекового типу, а також подано рекомендації з проектування генераторів бінарного льоду шнекового типу, запропоновано раціональні конструктивні характеристики апарату і режимні параметри роботи генератора та розглянено основи підбирання акумуляторів бінарного льоду.

Розрахунок генератора бінарного льоду шнекового типу залежно від початкових даних може відбуватися у двох головних напрямках:

- для генератора з відомими конструктивними характеристиками і режимом роботи можна визначити товщину зрізуваного льоду, концентрацію льоду на виході з апарата і продуктивність генератора;
- для проектованого генератора, залежно від необхідної товщини зрізуваного льоду і концентрації льоду у бінарній суміші на виході, визначають геометричні характеристики апарата і режими його роботи.

Алгоритм першого розрахунку: відповідно до розрахункових залежностей послідовно визначають проміжні змінні і шукані параметри.

У другому розрахунку потрібно використати графоаналітичний метод або метод послідовних наближень.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

1. Проведено аналіз способів отримання і сфер застосування бінарного льоду. Доведена перспективність отримання бінарного льоду як холодоносія в генераторі шнекового типу.

2. Розроблено фізичну й математичну моделі, що описують процеси теплопередачі в генераторі бінарного льоду шнекового типу. Досліджено характер співвідношення теплових потоків при зміні частоти обертання шнека від 0,1 об/сек до 10 об/сек.

3. Здобуто залежності для розрахунку продуктивності шнекового генератора і визначення теплофізичних характеристик бінарного льоду. Змінюючи частоту обертання шнека генератора, можна дістати кристали льоду різних лінійних розмірів. Відповідно до отриманих розрахункових залежностей на стадії проектування генератора можна вибрати раціональні конструктивні характеристики теплообмінного апарата і шнека, робочу температуру холодоагенту і частоту обертання шнека з метою здобування бінарного льоду із заданими характеристиками.

4. Теоретично встановлено й експериментально підтверджено, що для досліджуваного шнекового генератора бінарного льоду раціональною за продуктивністю є робота апарата за частот обертання шнека n=1,9÷2,1 об/сек. Дані узагальнено відповідно до теоретичних розрахунків на типорозмірний ряд апаратів з діаметром теплообмінника D=0,04÷0,12 м.

5. Температура води, яка поступає в теплообмінний апарат шнекового генератора бінарного льоду, значно впливає на його продуктивність. Експериментально встановлено, що зі знижуванням температури води, яку подають

у теплообмінник, з 15 °С до 3 °С об'ємна концентрація льоду в суспензії на виході з апарата збільшується у чотири рази. Шнековий генератор бінарного льоду необхідно використовувати разом з водоохолоджувачем.

6. Розроблено метод розрахунку продуктивності шнекового генератора бінарного льоду, який, на відміну від попередніх методів, ураховує всі теплові потоки, що виникають у процесі здобування льоду. Метод дозволяє оцінити енергетичну ефективність шнекового льодогенератора, як безпосередньо в роботі, так і на стадії проектування.

Основні положення дисертації викладено у таких працях:

1. Зимин А.В. Перспективы использования бинарного льда в охлаждающих системах холодильного транспорта / А.В. Зимин, С.Ю. Ларьяновский // Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології"(Одеса, 19-21 вересня, 2007) – Одеса, 2007. – С. 58.

Особистий внесок автора : досліджено перспективи використання бінарного льоду в охолоджувальних системах холодильного транспорту на підставі попереднього розрахунку й аналізу різних систем.

2. Зимин А.В. К вопросу использования бинарного льда как хладоносителя / А.В. Зимин, С.Ю. Ларьяновский // Тематичний збірник наукових праць «Обладнання та технології харчових виробництв», Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім.. М. Туган-Барановського. – 2009. – Віп.21. – С. 23–27.

Особистий внесок автора : на підставі матеріалів вітчизняних і зарубіжних джерел проведено порівняльний аналіз холодоносіїв і розглянено різні сфери застосування бінарного льоду.

3. Зимин А.В. Экспериментальное исследование влияния примесей при получении бинарного льда в шнековых льдогенераторах / А.В. Зимин // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології" (Одеса, 22-24 вересня, 2009). – Одеса, 2009. – С.103–104.

Особистий внесок автора : на підставі експериментальних даних проведено аналіз впливу домішок на процес отримання бінарного льоду.

4. Зимин А.В. Экспериментальное исследование генератора бинарного льда шнекового типа / А.В. Зимин // Холодильна техніка і технологія. – Одеса, 2010. – №2 (112). – С. 30–34.

Особистий внесок автора: спроектовано і виготовлено експериментальний стенд генератора бінарного льоду шнекового типу, експериментально визначено вплив температури води, що подається на генератор, на його продуктивність.

5. Зимин А.В. Исследование влияния изменения скорости вращения шнека в шнековых льдогенераторах на их производительность / А.В. Зимин // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Інновації в суднобудуванні і океанотехніці" (Миколаїв, 15–17 вересня, 2010). – Миколаїв, 2010. – С. 234–235.

Особистий внесок автора : проведено графоаналітичний аналіз впливу швидкості обертання шнека на продуктивність шнекового генератора.

6. Зимин А.В. Влияние частоты вращения шнека на производительность шнекового льдогенератора бинарного льда / А.В. Зимин, Г.К. Мнацаканов // Тезисы доклада международной конференции с элементами научной школы для молодежи "Инновационные разработки в области техники и физики низких температур". Москва МГУИЭ, 2010. – С. 126–128.

Особистий внесок автора: визначена область максимальної продуктивності для генератора бінарного льоду шнекового типу.

7. Зимин А.В. Математическая модель процессов льдообразования в шнековом генераторе бинарного льда / А.В. Зимин // Холодильна техніка і технологія. – Одеса, 2011, №2(124). – С. 32-34.

Особистий внесок автора: розроблена математична модель процесів льдоутворення в шнековому генераторі бінарного льоду.

8. Зимин А.В. Влияние конструктивных особенностей и режимных параметров льдообразования на производительность генератора бинарного льда шнекового типа / А.В. Зимин, Г.К. Мнацаканов // Холодильна техніка і технологія. – Одеса, №3(125). – С. 37-41.

Особистий внесок автора: на підставі математичної моделі і експериментальних даних визначено вплив конструктивних особливостей і режимних параметрів льдоутворення на продуктивність генератора бінарного льоду шнекового типу.

9. Зимин А.В. Оптимизация конструкции теплообменника и режимов работы генератора бинарного льда шнекового типа / А.В. Зимин, Г.К. Мнацаканов // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології"(Одеса, 14-16 вересня, 2011). – Одеса, 2011. – С.76–78.

Особистий внесок автора: проведена оптимізація конструкції теплообмінника і режимів роботи генератора з метою визначення області ефективної роботи апарату.

10. Зимин А.В. Работа шнекового льдогенератора в режиме получения бинарного льда / А.В. Зимин // Тезисы доклада международной конференции с элементами научной школы для молодежи "Инновационные разработки в области техники и физики низких температур". Москва МГУИЭ. – С. 92–94.

Особистий внесок автора: проведено аналіз методу здобування бінарного льоду в генераторах шнекового типу.

XV 1078
Інститут холоду
ОНАХТ
бібліотека

АННОТАЦИЯ

Зимин А.В. Получение бинарного льда в льдогенераторе шнекового типа. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – Холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Одесская государственная академия холода. Одесса 2012.

Работа посвящена вопросу получения бинарного льда в шнековых льдогенераторах. Бинарный лед - экологически чистый, энергоемкий хладоноситель, который широко применяется в настоящее время в разных отраслях пищевой промышленности, а также в процессе кондиционирования воздуха. Теоретические и экспериментальные исследования свойств бинарного льда в процессах его получения и применения были начаты в 90-х годах и продолжаются по сегодняшний день.

Бинарный лед или айс-сларри представляет собой водный раствор соли, спирта или гликоля, в котором некоторая часть воды находится в твердой фазе, причем размеры кристаллов льда не превышают 1 мм. Основной эффект при использования бинарного льда заключается в высокой удельной энергетической эффективности раствора, которую достигают за счет использования энергии фазового перехода во время таяния кристаллов льда, который происходит при постоянной температуре среды.

Шнековые льдогенераторы традиционно используются для получения чешуйчатого льда. Выбор рациональной конструкции и режимов работы генератора дает возможность получать бинарный лед с необходимыми параметрами, такими как размеры кристаллов и концентрация льда в смеси. Процессы льдообразования в аппаратах этого типа изучены недостаточно.

Разработана физическая и математическая модели, описывающие процессы теплопередачи при кристаллизации льда в генераторе шнекового типа. На основании моделей получены расчетные зависимости. Определена область работы аппарата в режиме получения бинарного льда. Проанализировано влияние конструктивных характеристик теплообменного аппарата и режимов работы на производительность генератора и теплофизические свойства бинарного льда. Определена и проанализирована область максимальной производительности генератора, возникающая при изменении частоты вращения шнека.

В соответствии с поставленной задачей спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд. Проведены эксперименты по изучению влияния частоты вращения шнека и температуры воды, подаваемой на генератор, на производительность генератора. Результаты, полученные при экспериментальном исследовании, подтверждают адекватность теоретических моделей.

Представлен метод расчета шнекового генератора бинарного льда, базирующийся на полученных теоретических зависимостях. На основании теоретических и экспериментальных исследований были даны рекомендации по

проектированию генераторов бинарного льда шнекового типа. Разработаны основы подбора аккумуляторов бинарного льда.

Ключевые слова: бинарный лед, шнековый льдогенератор, скребковый генератор, льдообразование, теплопередача.

THE SUMMARY

Alexey Zimin. Ice Slurry production in the ice slurry generator of screw type. – Manuscript.

Thesis for candidate degree of technical science according major 05.05.14 – "Refrigerating, vacuum and compressor technique, air conditioning." - Odessa State Academy of Refrigeration. Odessa 2012

The thesis is about Ice Slurry production in the ice slurry generator of screw type. Screw type ice slurry generators are commonly used for lamellar ice production. Construction and operation modes optimization for generator make possible to produce manufactured ice with desired parameters. Ice production processes in the apparatus for this type is not good enough studied. The mathematical model describing ice crystallization process in the screw type ice slurry generator is developed. On the model basis the rated dependences are defined. Nominal range of use for apparatus in Ice Slurry production mode is determined.

In accordance with assigned task the experimental stand is designed and manufactured. Experiments for studding screw rotation frequency effect and supplied water temperature effect to generator on generator duty. Derived results for research investigation are well fit with theoretical data.

Computing methods for screw type ice slurry generator which are based on derived theoretical dependences are proposed. On the ground of theoretical and research investigations the recommendations for screw type ice slurry generator design are made. The fundamentals of matching ice slurry accumulators are developed.

Key words: Ice Slurry, Ice Slurry Generator of Screw type, Scraper Generator, Ice Production, Heat Transfer.

АНОТАЦІЯ

Зімін О.В. Отримання бінарного льоду в льодогенераторі шнекового типу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.14 – холодильна, вакуумна і компресорна техніка, системи кондиціонування. – Одеська державна академія холоду. – Одеса, 2012.

Робота присвячена питанню отримання бінарного льоду в шнекових льодогенераторах, які традиційно використовуються для отримання лускатого льоду. Оптимізація конструкції і режимів роботи генератора дає змогу одержати

бінарний лід з потрібними параметрами. Процеси льодоутворювання в апаратах цього типу вивчені недостатньо. У дисертації розроблено математичну та фізичну модель, що описує процес кристалізації льоду в генераторі шнекового типу. На підставі зазначеної моделі отримані розрахункові залежності, а також визначена ділянка роботи апарата в режимі здобування бінарного льоду.

Відповідно до поставленого завдання спроектовано і виготовлено експериментальний стенд; проведено експерименти з метою вивчення впливу частоти обертання шнека і температури води, що подається на генератор, на продуктивність генератора. Результати, одержані в експериментальному дослідженні, добре узгоджуються з теоретичними даними.

У праці подано методи розрахунку шнекового генератора бінарного льоду, що базуються на здобутих теоретичних залежностях. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано рекомендації з проектування генераторів бінарного льоду шнекового типу, до того ж розроблено основи для підбирання акумуляторів бінарного льоду.

Ключові слова: бінарний лід, шнековий льодогенератор, скребковий генератор, льодоутворювання, теплопередача.