

## ШВИДКІСТЬ ЛЬОДОУТВОРЕННЯ НА ВЕРТИКАЛЬНИХ ОХОЛОДЖУВАНИХ ТРУБАХ

Пилипенко О.Ю., Засядько Я.І., канд. техн. наук, професор

Національний університет харчових технологій, м. Київ

Представлено результати досліджень швидкості льодоутворення на вертикальній циліндричній поверхні. Зроблено первинний аналіз дослідних даних. За наведеними графіками зміни температури вузлових точок холодильної машини побудовано робочий цикл установки, який демонструє малий паровміст хладону на вході до дослідних ділянок. Графіки зміни температур аргументують стаціонарність роботи холодильної установки під час дослідів. Наведені дослідні дані зміни товщини льоду в часі мають чітко виражену залежність від температур води та кипіння. Наведено асимптотичні значення товщини льоду та час виходу на асимптоту. Зазначено, що за значних теплових напорів процес льодоутворення є нестабільним.

**Ключові слова:** дослідні дані, зміна температури, швидкість льодоутворення, асимптотичне значення, лід, час наморозування

The article presents the results of the ice build up time rate obtained within the experiments carried out on the specifically designed stand. An extensive analysis of the data has been conducted aimed at the clearing up the mechanism of heat transfer influence upon the speed of ice generation. A set of common features typical for all series of experiment has been drawn out.

**Keywords:** experiments, ice build up, analysis of the data, heat transfer, speed, ice generation

Експериментально досліджувалася швидкість утворення льоду на вертикальній циліндричній поверхні [1]. У процесі проведення дослідів контролювалися та реструвалися температури дослідних ділянок та у характерних точках холодильної установки з заданим кроком по часу. Швидкість льодоутворення вимірювалася за допомогою системи відеофіксації процесу. Детально експериментальна установка та методики проведення дослідів описано в [1].

На основі одержаного масиву даних температур для кожного дослідів побудовано графіки зміни температур вузлових точок в контурі холодильної установки у абсолютному часі (рис. 1). За початок координат у часі прийнято момент появи льоду на трубі.

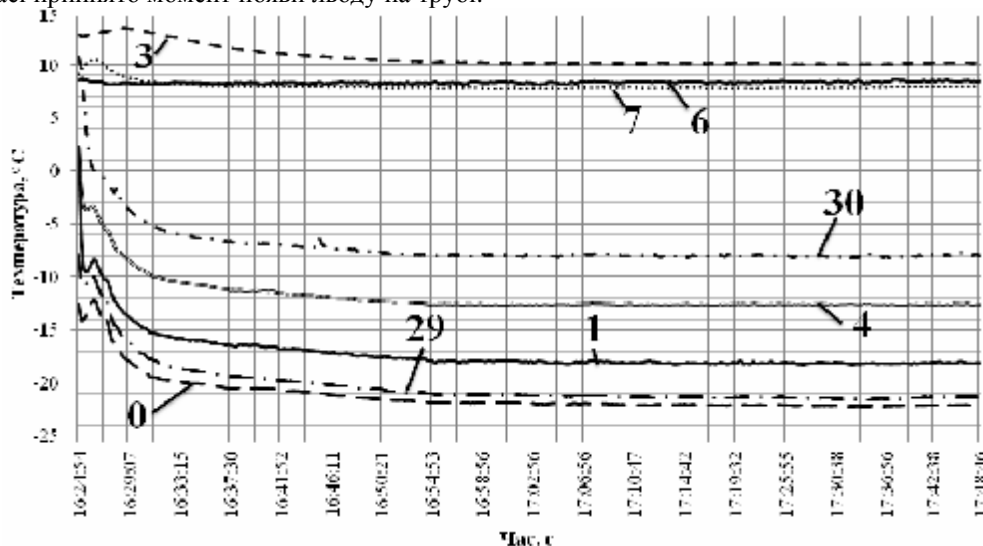


Рис. 1 – Зміна температури вузлових точок за  $t_0 = -10^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,5^\circ\text{C}$

0 – пари на вході до РТО; 1 – всмоктування; 3 – рідкий фреон на виході з конденсатора; 4 – переохолоджена рідина після РТО; 6, 7 – вода на вході та виході до конденсатора, 29 – пара з дослідних секцій після дроселювання; 30 – переохолоджена рідина перед дроселюванням до дослідних секцій. Нумерація ліній відповідає нумерації термопар [1]

Рисунок 1 свідчить про стаціонарність процесу у контурі холодильної установки.

Температури на стороні всмоктування вийшли на стаціонарні значення за 240 с (6 хв.) і в подальшому їх зміна була у межах  $3^\circ\text{C}$ .

Тиск у контурі холодильної установки виходив на задані рівні менше, ніж за 60 с від моменту відкриття (закриття) відповідного вентиля. На момент появи льоду (початку досліду) тиск був стабільним про що свідчить журнал дослідів. Розбіжність часу стабілізації по температурі та тиску пояснюється швидкістю розповсюдження збурень у тепловій та гідродинамічній системах. Швидкість розповсюдження збурень у гідравлічній системі визначається швидкістю звуку в середовищі системи, а розповсюдження збурення в тепловій системі визначається тепловою інерційністю системи, що і призводило до відносно більш повільного вирівнювання температури у контурі холодильної установки.

В залежності від температур води та киплячого холодильного агента тривалість зони стабілізації скорочується до 0 с.

Всі досліди тривали більше, ніж 1000 с, і відповідно, тривалістю стабілізації температур порівняно із загальною тривалістю процесу можна знехтувати.

Наведений на рис. 1 дослід продовжувався 5000 с, відповідно тривалість зони стабілізації температури складає 4,8%.

Для оцінки роботи холодильної установки в цілому за визначеними температурами та тиском у вузлових точках побудовано цикли роботи холодильної машини (рис. 2.). Для побудови циклів використано середнє значення температур в стаціонарному режимі роботи.

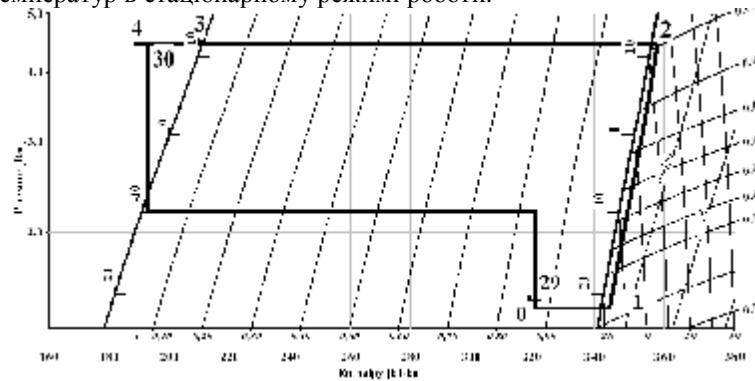


Рис. 2 – Цикл холодильної установки -  $t_0 = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,5\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 2. підтверджує повне заповнення робочих ділянок хладоном.

Для балансування продуктивності компресора та дослідних ділянок використано дроселювання паро-рідинної суміші. Процес 0-1 відбувався в регенеративному теплообміннику. Завдяки переохолодженню 3-4 докипанням 0-1 було захищено компресор від гідроудару. Температура рідкого холодильного агента перед входом у дослідні апарати перевищує температуру рідини після регенеративного теплообмінника, що пояснюється нагріванням хладону під час руху по неізолюваному мідному трубопроводу. Додаткове дроселювання 29-0 відбувалося за рахунок гідравлічних втрат в трубопроводах та лінійних компонентах, що з'єднують дослідні ділянки та регенеративний теплообмінник.

З рис. 2 видно, що рідкий холодильний агент до випарних систем дослідних ділянок надходив в переохоложеному стані, і паровміст на вході до випарників був незначний. Так для дослідів з  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,5\text{ }^\circ\text{C}$  та з  $t_0 = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,5\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2) він складав  $X = 5,7\%$  та  $X = 1,5\%$  відповідно, для дослідів з  $t_0 = -16\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,0\text{ }^\circ\text{C}$  –  $X = 4\%$ , а в досліді з  $t_0 = -5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,15\text{ }^\circ\text{C}$  –  $X < 0$ .

Побудовано графіки зміни температури в дослідних апаратах (рис.3).

Дані на рисунку 3 дають підставу стверджувати, що досліди відбувалися за сталих умов в стаціонарному режимі роботи холодильної установки. Зміна температури води по висоті дослідних ділянок не перевищувала  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$  і під час дослідів рівномірно зростала не більше, ніж на  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$ .

Зміна температури на поверхні мідної труби у часі має асимптотичний характер, що пояснюється поступовим зниженням температури поверхні із збільшенням товщини льоду.

Стаціонарний режим роботи холодильної установки підтверджується поступовою (плавною) зміною температур у характерних точках холодильної установки (рис. 1).

Оскільки киплячий фреон заповнював трубу практично повністю, що підтверджується рис. 2, а висота робочої вертикальної ділянки складала лише 0,3 м, то можна стверджувати, що вплив гідростатичного стовпа рідини на температуру кипіння незначний. Відповідно, температура кипіння та поверхні труби по висоті робочої ділянки відрізнялися на незначні величини. Таку стабільність температур і демонструють термометри з різницею показів менше  $1,0\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3).

Товщина льоду визначалася за допомогою системи відео- та фото-спостереження. Відповідно до методики вказаної в [1] оброблено відео- та фото-файли. Складено таблиці зміни товщини льоду в часі, за якими побудовано графіки.

У процесі проведення дослідів на температуру кипіння  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$  було завантажено дві робочі секції, оскільки за високих різниць температур суттєво збільшилися теплонаходження.

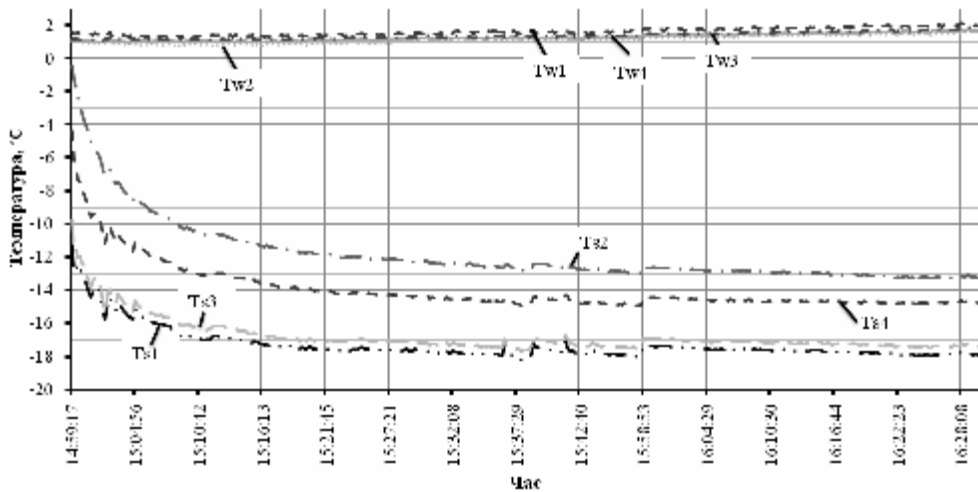


Рис. 3 – Зміна температур дослідної ділянки №2 в досліді з  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$  та  $t_w = +1,5\text{ }^\circ\text{C}$   
 $T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}$  – температура води по висоті апарату,  $T_{s1}, T_{s2}, T_{s3}, T_{s4}$  – температура на поверхні мідної труби по висоті апарату

Отримані дослідні дані об'єднано за температурою води. Кожне об'єднання (серія) дослідів складається з трьох або чотирьох дослідів з різною температурою кипіння. Оброблені серії даних представлено у вигляді узагальнених графіків (рис.4 – 7).

Загальний характер зміни товщини льоду в часі на всіх графіках (рис. 4 ÷ 7) є асимптотичним. Час виходу на асимптотичне значення та його значення суттєво залежать від температури води  $t_w$  та кипіння холодильного агенту  $t_0$ . Загальною є очікувана закономірність, за якою асимптотична товщина льоду зростає при зниженні температури кипіння  $t_0$  та температури води  $t_w$ . За одночасного пониження температур спостерігається максимальне асимптотичне значення товщини льоду.

Розглянемо окремо характері зміни кривих на рис. 4 ÷ 7.

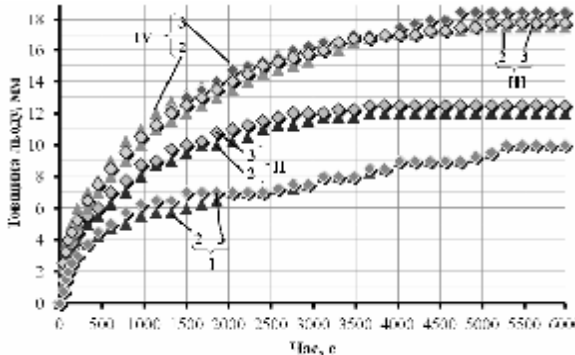


Рис 4 - Зміна товщини льоду в серії дослідів №1  
 2, 3 – номери дослідних ділянок; I -  $t_0 = -5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,2\text{ }^\circ\text{C}$ ; II -  $t_0 = -9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,5\text{ }^\circ\text{C}$ ; III -  $t_0 = -16\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1\text{ }^\circ\text{C}$ ; IV -  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +1,5\text{ }^\circ\text{C}$ .

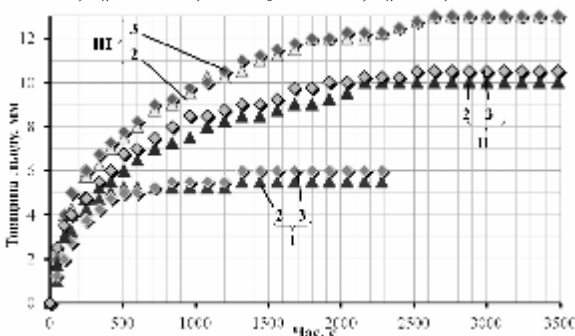


Рис 5 - Зміна товщини льоду в серії дослідів №2  
 2, 3 – номери дослідних ділянок; I -  $t_0 = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +4,6\text{ }^\circ\text{C}$ ; II -  $t_0 = -16\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +4\text{ }^\circ\text{C}$ ; III -  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +4\text{ }^\circ\text{C}$ .

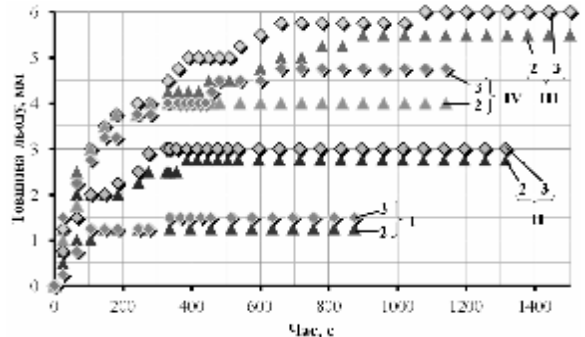


Рис 6 – Зміна товщини льоду в серії дослідів №3

2, 3 – номери дослідних ділянок; I -  $t_0 = -5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +8\text{ }^\circ\text{C}$ ; II -  $t_0 = -9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +7,5\text{ }^\circ\text{C}$ ; III -  $t_0 = -14\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +7\text{ }^\circ\text{C}$ ; IV -  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +8\text{ }^\circ\text{C}$ .

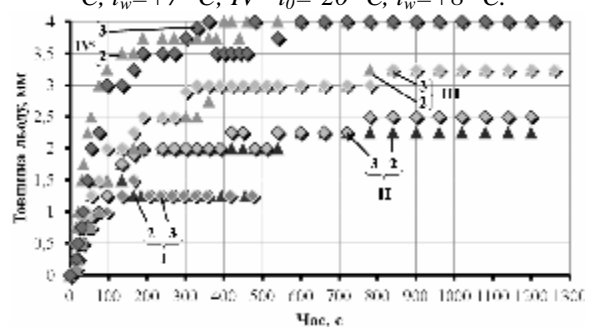


Рис 7 – Зміна товщини льоду в серії дослідів №4  
 2, 3 – номери дослідних ділянок; I -  $t_0 = -4\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +10\text{ }^\circ\text{C}$ ; II -  $t_0 = -9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +10\text{ }^\circ\text{C}$ ; III -  $t_0 = -15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +10\text{ }^\circ\text{C}$ ; IV -  $t_0 = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_w = +10\text{ }^\circ\text{C}$ .

В серії дослідів №1 (рис. 4.) за температури води  $t_w = +1 \div +2$  °С, дослідні точки, що утворюють криві III ( $t_0 = -16$  °С) та IV ( $t_0 = -20$  °С), близько співпадають. Існує незначна розбіжність в асимптотичному значенні, крива III має асимптотичне значення  $\approx 17,5$  мм, а IV -  $\approx 18,25$  мм. Час виходу на асимптоту однаковий і складає 5000 с.

Точки кривої II (рис.4) за температур  $t_0 = -9$  °С,  $t_w = +1,5$  °С виходять на асимптотичне значення 12 мм приблизно за 3600 с.

Крива I (рис. 4) має дещо відмінний характер зміни товщини льоду в часі. Протягом усього періоду наморожування льоду відбувалося повільне зростання товщини льоду і лише після 5000 с спостерігався вихід на асимптотичне значення. На нашу думку дану зміну характеру поведінки кривої можна пояснити зміною режиму тепловіддачі до холодильного агента. Можна стверджувати, що відбувається подавлення бульбашкового кипіння та перехід до конвективного теплообміну. Загальний температурний напір для даного досліді складає  $\Delta t = t_w - t_0 = 6,2$  °С, а якщо припустити, що поверхня льоду дорівнює 0 °С, то температурний напір стінка-фреон не перевищує 3 °С.

Загальний характер кривих серії дослідів №2 (рис. 5) утворених дослідними точками аналогічній серії №1. Вихід на асимптотичні значення відповідно: I –  $r = 5,75$  мм,  $\tau = 1300$  с; II –  $r = 10,25$  мм,  $\tau = 2500$  с; III –  $r = 13$  мм,  $\tau = 2650$  с.

Відхилення від загальної закономірності має серія дослідів №3: I –  $r = 1,25$  мм,  $\tau = 350$  с; II –  $r = 2,75$  мм,  $\tau = 400$  с; III –  $r = 5,75$  мм,  $\tau = 1200$  с; IV –  $r = 4,3$  мм,  $\tau = 650$  с. Більш низькими значеннями кривої IV відносно кривої III можна пояснити переважаючим впливом температури води над температурою кипіння. Так, для в досліді III  $t_w = +7$  °С, а IV  $t_w = +8$  °С. Можна припустити, що при збільшенні теплового потоку обумовленого збільшенням різниці температур поступово починає переважати конвективна складова теплообміну.

Висунуте припущення підтверджують досліди четвертої серії. Характер поведінки кривих (рис. 7) та закономірність асимптотичних значень та часу відповідає таким у серіях дослідів №1 та №2: I –  $r = 1,25$  мм,  $\tau = 150$  с; II –  $r = 2,25$  мм,  $\tau = 750$  с; III –  $r = 3,25$  мм,  $\tau = 800$  с; IV –  $r = 4$  мм,  $\tau = 600$  с. Однак, замість плавного виходу на асимптотичні значення криві різко змінюють повільне зростання на асимптоту. Час виходу на асимптоту від меншої різниці температур до більшої не зростає як в серіях №1÷3, а змінюється практично в хаотичному порядку.

Таким чином, можна стверджувати, що за великого температурного напору та відносно великих температур води режим накопичення льоду на теплообмінній поверхні є нестабільним. Тим більше, що в промисловості з температурою води більше  $+6 \div +8$  °С акумулятори холоду не працюють. З такими параметрами води та кипіння працюють лише льодогенератори безперервного принципу дії з максимальною товщиною льоду, що утворюється на теплообмінній поверхні, до 1,5 мм.

### **Висновки**

- Під час проведення досліджень холодильна установка працювала в стаціонарному режимі як по контуру води, так і холодильного агента.
- Час виходу температур холодильної установки та дослідної ділянки на стаціонарний режим є незначний у порівнянні з тривалістю досліді.
- Тиск кипіння холодильного агента в дослідних ділянках виходив на стаціонарний режим значно швидше, ніж температури поверхонь трубопроводів.
- Цикли холодильної установки побудовані для кожного досліді підтверджують балансування холодопродуктивності агрегату з тепловим навантаженням дослідних секцій за рахунок дроселювання парорідної суміші після дослідних апаратів, що свідчить про надійність та адекватність умов проведення досліді.
- До приладів регулювання заповнення дослідних секцій подається переохолоджена рідина (фреон), за рахунок чого після дросилування утворювалася мінімальна кількість пари (від 0 до 6 %).
- Результати кожного режиму досліджень є збіжними і добре усереднюються, а також відзначаються повторюваністю.
- За зниження температури води  $t_w$  спостерігається збільшення асимптотичного значення товщини льоду та часу на його досягнення.
- За зниження температури кипіння  $t_0$  спостерігається збільшення асимптотичного значення товщини льоду та часу на його досягнення.
- Велика різниця температур між водою та кипінням призводить до нестабільного процесу льодоутворення внаслідок збільшення впливу конвективного теплообміну між водою та поверхнею теплообміну.

### **Література**

1. Пилипенко О. Ю. Дослідна установка та результати досліджень по вивченню процесів замороження води на вертикальній трубі / О. Ю. Пилипенко, Я. І. Засядько // Наукові праці національного університету харчових технологій. – 2012. – № 42. – С. 11-17.