

УДК 621.585.2:4

*О.Ю. Пилипенко,
Я.І. Засядько,
канд. техн. наук
Національний університет
харчових технологій*

**ДОСЛІДНА УСТАНОВКА
ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ
ПО ВИВЧЕННЮ ПРОЦЕСІВ
ЗАМОРОЖЕННЯ ВОДИ
НА ВЕРТИКАЛЬНІЙ ТРУБІ**

Запропоновано диференціальне рівняння визначення швидкості замороження води на зовнішній поверхні труби. Представлено схему експериментальної установки, план та результати дослідів по визначенню швидкості замороження води та танення льоду на вертикальній циліндричній поверхні при її повздовжньому обтіканні теплоносієм. Наведено результати експериментів.

Ключові слова: Диференціальне рівняння, акумуляція холоду, експериментальна установка, лід, вода, визначення.

Проблема акумуляції холоду на підприємствах молокопереробної галузі набуває особливої актуальності в умовах значного зростання вартості енергоносіїв. Підприємства молочної промисловості відрізняються вкрай нерівномірним графіком енергоспоживання для виробництва штучного холоду. Це пояснюється піковим споживанням холоду для систем охолодження «льодяної води» на пастеризатори молока, яке, як правило, співпадає з добовими «піками» енергоспоживання.

Зменшення пікового енергоспоживання на виробництво холоду або перенесення «піків» на добові періоди помірного енергоспоживання за рахунок накопичення льоду у періоди мінімального енергоспоживання є перспективним методом оптимізації графіків енергоспоживання, що приводить до суттєвого зниження витрат [1, 2, 3].

На сьогодні методики розрахунку та конструювання акумуляторів холоду з фазовим переходом відсутні.

Наявні методики інженерних розрахунків акумуляторів холоду враховують лише балансові величини, тобто акумульовану масу льоду, і не дозволяють визначити тривалість наморозження. Поодинокі методики розрахунку тривалості процесу потребують введення параметрів, які є надзвичайно складними для визначення (приведена температура) [4].

Запропоновано математичну модель швидкості утворення льоду на вертикальній охолоджуваній трубі, а також наведено опис оригінальної експериментальної установки для валідації моделі. Модель відображає тепловий баланс протягом часу dt вертикальної циліндричної охолоджуваної з середини поверхні, ззовні якої відбувається заморожування шару льоду з води, що обтікає поверхню.

Рівняння (1) вирішується за допомогою чисельних методів у програмі MathCad.

Експериментальна установка для перевірки адекватності результатів розрахунку (рис. 1) використовує парокомпресійну холодильну машину з водяним конденсатором 4 (АК-ФВ4М) для охолодження робочих ділянок 19, 20, 21.

Бак з оборотною водою 40 оснащено змієвиком 39 та ТЕН-ами 41, за допомогою яких забезпечується задана температура води. Для циркуляції оборотної води через дослідні апарати використано відцентровий насосам 42.

Окрім вказаного, дослідну установку оснащено: манометром високого тиску 1, манометром низького тиску 3, спареним двоблочним реле тиску 2, ручним кутовим вентилям 5, регенеративним теплообмінником 8, ресивером холодоагенту 6, фільтром осушником 9, соленоїдним вентилям 10, ніпелем Шредера 11, оглядовим віконцем

© Пилипенко О.Ю., Засядько Я.І., 2012

з гігрометром 12, шаровими вентилями 13 та 14, регенеративним теплообмінником 15 типу труба біля труби, ручними регулювальними вентилями 16, 17, 18, мембранними вентилями 22, 23, 24, манометрами низького тиску 25, 26, 27, оглядовими віконцями 28, 29, 30, ручними голчастими (регулювальними) вентилями 31, 32, 33, шаровими вентилями 34, газовим нерозбірним фільтром з ніпелом Шредера 35, терморегулюючим клапаном 36, запірним мембранним клапаном 38, шаровим клапаном 37, шаровими водопровідними вентилями 43, 44, 50, 52, ручними запірно-регулюючими вентилями 45, 46, 47 та 49, шаровим водопровідним клапаном 54, ручним запірно-регулюючим клапаном 48, лічильником води 51, механічним фільтром 53.

Установка оснащена приладами автоматики та автоматичного фіксування значень температур. Температури вимірюються за допомогою хромель-капельних термопар.

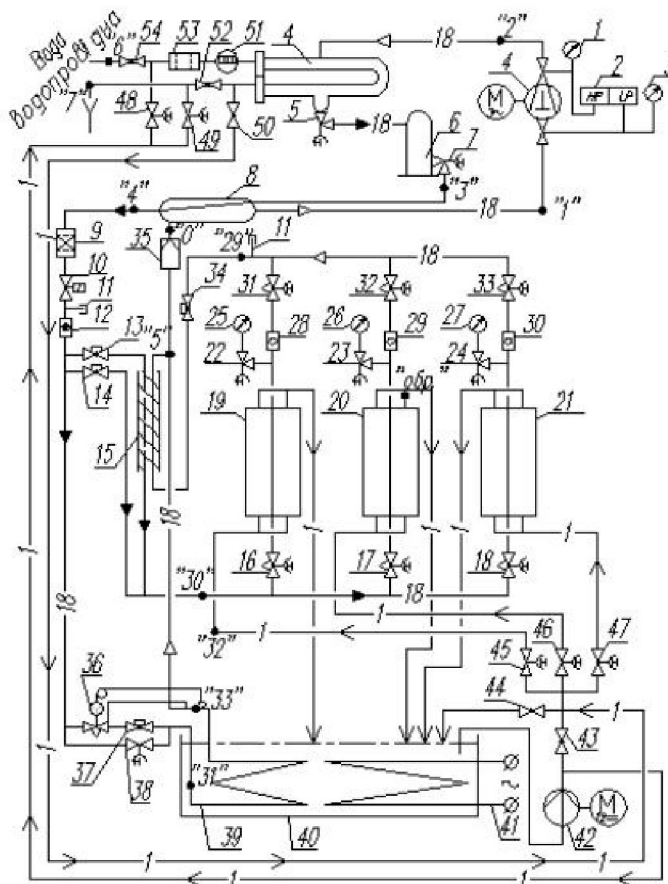


Рис. 1. Схема дослідної установки

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{\theta_0 - t_0}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{л}}} \cdot \ln \left(\frac{d_{\text{зов}} + 2 \cdot X}{d_{\text{зов}}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\text{м}}} \cdot \ln \left(\frac{d_{\text{зов}}}{d_{\text{вн}}} \right) + \frac{1}{\alpha_0 \cdot d_{\text{вн}}} - \alpha_w \cdot (d_{\text{зов}} + 2 \cdot X) \cdot \left[(t_w - \theta_0) + \frac{\omega^2 \cdot \left(2 + \frac{1}{Pr^w} \right)}{3 \cdot C_p^w \cdot g} \right]}{\rho \cdot (d_{\text{зов}} + 2 \cdot X)} \quad (1)$$

де $d_{\text{зов}} = 10$ мм та $d_{\text{вн}} = 8$ мм — діаметри труби зовнішній та внутрішній, $\lambda_{\text{м}} = 375$ Вт/(м·К) — теплопровідність матеріалу труби, X — товщина шару льоду, $\lambda_{\text{л}} = 2,32$ Вт/(м·К) — теплопровідність льоду, Pr^w — число Прандтля, c_p^w — ізобарна теплоємність, t_w — температура води, $\theta_0 = 0$ °С — температура поверхні льоду, t_0 — температура кипіння холодоагенту, $s = 301000$ кДж/м³ — теплота фазового переходу приведена до одиниці об'єму, α_0 — коефіцієнт тепловіддачі при кипінні, α_w — конвективний коефіцієнт тепловіддачі води, w — швидкість руху теплоносія, $g = 9,807$ м/с² — прискорення вільного падіння.

Температури води та киплячого холодильного агенту змінювалися в межах: вода 1 ч 25 °С; холодоагент +10 ч -20 °С.

В дослідях з додатними температурами кипіння, тиск кипіння встановлювався за рахунок поступового зниження тиску в трубах дослідних апаратів з тиску конденсації. Початком дослідів вважався момент стабільної роботи установки на заданих параметрах протягом 2 хв.

При тисках кипіння вище 1 бара з льодоутворенням на поверхні теплообміну, послідовність встановлення заданого тиску кипіння аналогічна дослідів з додатними температурами кипіння. Початком дослідів вважався момент появи першої криги на трубі або встановлення заданого тиску кипіння.

В дослідях з тиском кипіння нижче 1 бара, встановлення заданих параметрів відбувалося за рахунок подавання рідкого холодильного агенту після конденсатора до попередньо звакуумованих апаратів. Початок дослідів — поява першого льоду на будь-якому апараті.

За допомогою системи автоматичної реєстрації температур стінки труби та води в трьох апаратах одночасно та відео фіксації зміни товщини льоду одержано графіки температури води та стінки в кожному апараті (рис. 2) графіки зміни товщини льоду в процесі замороження води та танення льоду (рис. 3).

Для дослідів, відображених на рис. 2 та 3: температура кипіння хладону R12 -20 °С, середня температура води в досліді +2 °С; витрата води через апарат № 3 0,0001287 м³/с, № 2 — 0,0001277 м³/с.

Система відео спостереження, зібрана на базі демонстраційної програми Active WebCam, автоматично фіксувала зображення кожні 5 с одночасно з усіх апаратів та заносила його до відео файлів кожного апарату.

Усі відеофайли перекодовувалися з формату AWLive у формат AVI за допомогою програми Active WebCam Video Editor. Кожне відео імпортувалося до програми Windows Movie Maker де розбивалося на окремі кадри. Знаючи час початку запису відео та крок запису кадрів, вираховувався час появи льоду на трубі. З встановленим кроком у часі, кратним 5 с, обиралися окремі кадри та зберігалися в

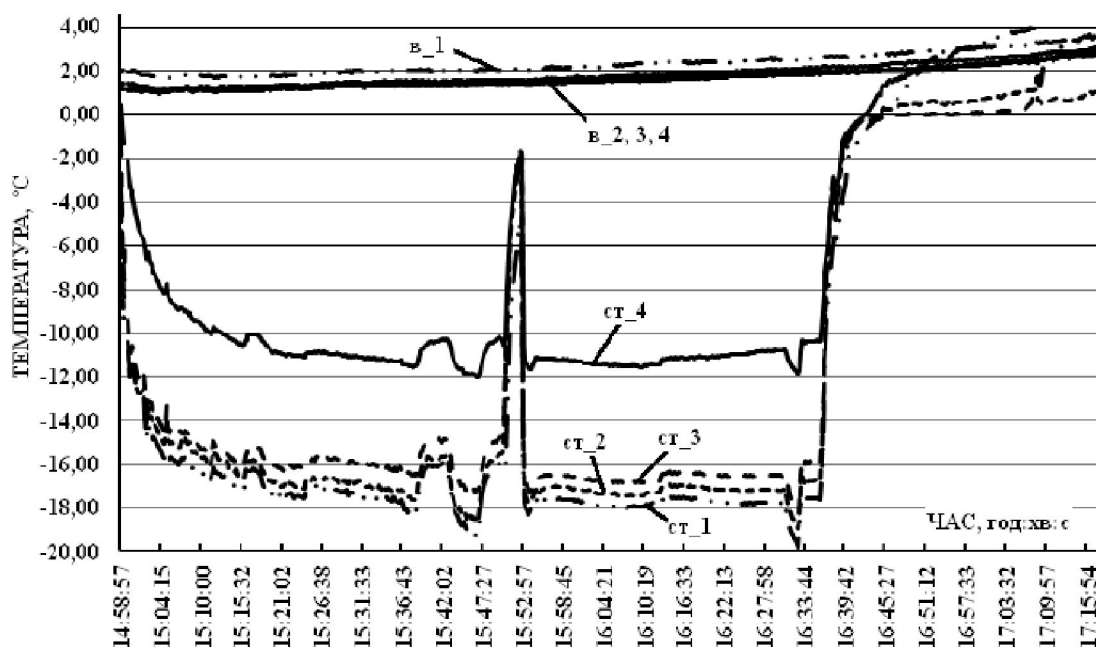


Рис. 2. Зміна температур поверхні труби та води на апараті №3.

ст._1, ст._2, ст._3, ст._4 — температури стінки; в_1, в_2, в_3, 4 — температури води

окремих файлах малюнків з розширенням jpeg. Обрані малюнки імпортувалися до програми AutoCad, де масштабувалися. Командою вимірювання лінійного розміру в програмі AutoCad по масштабованому зображенню визначалася середня товщина льоду на трубі. За результатами вимірювань усіх малюнків відео файлу формувалася таблиця дослідних даних зміни товщини льоду у часі.

На рис. 2 та 3 процес замороження води триває з 14:58:51 до 16:34:51, а танення льоду з 16:34:51 до 17:16:51, що відображається різкою зміною характеру кривих. Так на рис. 2 відключення подачі рідкого холодоагенту до дослідного апарату (початок дослідів на танення льоду) призводить до різкого одночасного зростання температури стінки труби. На рис. 3 перехід до танення льоду характеризується падінням товщини льоду на поверхні труби.

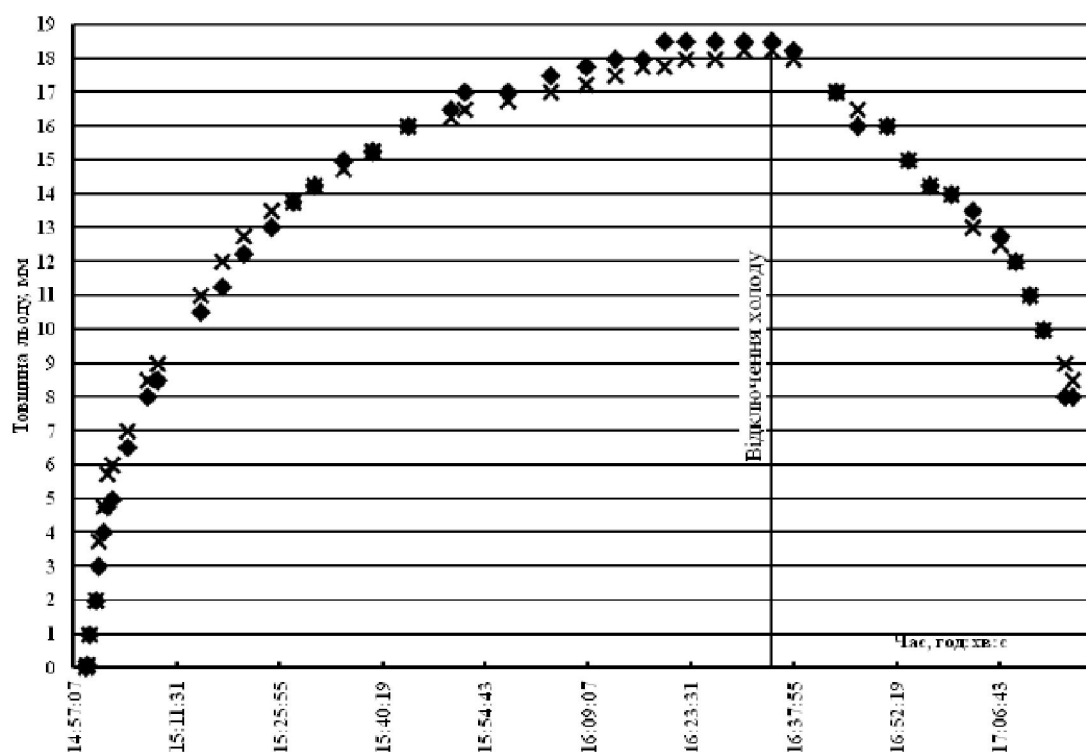


Рис. 3. Зміна товщини льоду при замороженні води та таненні льоду на апаратах №2 та №3.

+ та x — результати дослідів на другому та третьому апаратах відповідно

На рис. 2 видно температуру води в апараті під час проведення дослідів (в_1, 2, 3, 4) та температури стінки (ст_1, 2, 3, 4). Для розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі, використовувалася осереднена температура стінки в задані моменти часу.

Визначені товщини льоду в задані моменти часу (рис. 3) за запропонованою методикою є обґрунтованими та надійними, оскільки результати вимірювань на апаратах № 2 та № 3 мають максимальне відхилення 0,5 мм — у межах похибки визначення товщини льоду.

Криву замороження води можна апроксимувати за допомогою степеневої функції або експоненти. Характер зміни товщини якісно подібний графіку одержаному в результаті чисельного вирішення рівняння (1).

Висновки. 1. Враховуючи велику кількість одночасних вимірювань, одномоментне проведення дослідів на трьох апаратах, повторюваність отриманих результатів, можна зробити висновок про достовірність одержаних дослідних даних. 2. Крива

вимірних значень товщини наморозеного льоду у часі якісно відповідає чисельним рішенням запропонованого рівняння (1). 3. Корегуючий коефіцієнт, який, будучи введеним до рішення рівняння (1), дозволить розробити напівемпіричне рівняння для інженерних розрахунків тривалості заморожування певної кількості льоду або кількості льоду, наморозеної протягом заданого періоду роботи акумулятора. Коефіцієнт може бути знайдений на основі співставлення експериментальних даних із швидкості заморожування з розв'язком чисельного рішення рівняння (1).

ЛІТЕРАТУРА

1. Пилипенко О.Ю. Обґрунтування доцільності використання акумуляторів холоду з фазовим переходом / О.Ю. Пилипенко, Я.І. Засядько // Холодильна техніка і технологія. — 2008. — № 5 (115). — С. 11 — 15.
2. Пилипенко О.Ю. Варіанти оптимізації енергоспоживання на виробництво штучного холоду / О.Ю. Пилипенко, Я.І. Засядько // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. — 2010. — Вип. 24. — С. 54 — 62.
3. Хамие Х.Н. Разработка и исследование холодильной машины с аккумулятором холода: автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. / Х.Н. Хамие. — Махачкала: КГТУ, 2006. — 30 с.
4. Холодильні установки: в 2 кн. Кн. 2 / під ред. І.Г. Чумака. — К.: Либідь, 1995. — 224 с.

А.Ю. Пилипенко

Я.И. Засядько

Экспериментальная установка и результаты исследований по изучению процессов замораживания воды на вертикальной трубе

Предложено дифференциальное уравнение определения скорости замораживания воды на внешней поверхности трубы. Представлено схему экспериментальной установки, план и результаты экспериментов по определению скорости замораживания воды и плавлению льда на вертикальной цилиндрической поверхности при продольном движении теплоносителя. Приведены результаты экспериментов.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение, аккумуляция холода, экспериментальная установка, лёд, вода, определение.

O. Pilipenko

Y. Zasiadko

Experemental unit for studies into the processes of solidification and melting of ice on the vertical pipe

A differential equation aimed at the determination of ice build-up on the external tubular surface has been developed. An experimental rig for the studies into the ice time rate build-up and ice thawing is presented with the placements of all measuring devices and transducers. The details of the refrigeration contour operation have been analyzed together with its interaction with the water contour, in with the process of icing on the cooled vertical tubes takes place. A developed methodology and a program of experiments along with the ranges of phase flow rates and temperature are given in great details. The samples of the temperature — time histories at the characteristic points of the experimental rig illustrate the data sets obtained. An initial set of the ice growth time rate data along with the line depicting ice melting are also give within the article

Key words: cold accumulators, experimental unit, ice, water, measurements, determination.

e-mail: jimp@ukr.net

Одержана редколегією 20.09.2011 р.