

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.2.167530

УДК 621.577.63, 551.332

І.І. Пуховий\*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

\*corresponding author: ivan@puh.com.ua

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИГОТОВЛЕННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ОРЕБРЕНИХ ЛЬОДЯНИХ ТРУБ МЕТОДОМ НАМОРОЖУВАННЯ У ФОРМІ З ДИСКРЕТНОЮ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ

**Проблематика.** Підігрівання повітря взимку в діапазоні температур доквілля нижче  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  можливе теплотою фазового переходу води в лід. Підігріте повітря зменшує витрату енергії в системах вентиляції, в теплових насосах типу повітря–вода і повітря–повітря та в котлах і печах для горіння палива, в період пікових навантажень на системи тепlopостачання, що дає можливість зменшити установлену потужність теплогенеруючого обладнання і економити традиційну енергію.

**Мета дослідження.** Експериментальні дослідження і комп'ютерне моделювання технології отримання льодяних труб із внутрішнім та зовнішнім оребрением методом дискретного накладання теплоізоляції для одержання поперечних і поздовжніх ребер.

**Методика реалізації.** Повітря з температурою нижче  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  пропускають через льодяні оребрени із середини труби, занурені у воду або зрошені водою, для використання підігрітого до  $-2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$  повітря в системах вентиляції, теплових насосах, системах горіння палива і в буферних зонах будівель у період морозів. Проведено експериментальні роботи з виготовлення оребрених льодяних труб у морозильній камері та моделювання в SolidWorks.

**Результати дослідження.** Отримані кільцеві внутрішні ребра мають округлу форму через бокове перетікання теплоти і дають можливість одержати коефіцієнт оребрения 1,3–2. При накладанні окремих елементів поздовжньої теплоізоляції отримуються труби з внутрішнім перерізом у формі багатокутника з числом кутів, що відповідає кількості елементів. Зовнішні ребра неможливо було експериментально утворити при накладанні внутрішніх теплоізоляційних елементів через низький теплообмін труби з повітрям всередині вертикальної труби, розміщеної в морозильній камері. У результаті моделювання за вимушеної подачі повітря у внутрішню трубу для двох елементів теплоізоляції, розміщених симетрично, отримано овальну форму перерізу труби з льоду.

**Висновки.** Чим нижча температура доквілля, тим більший економічний і енергетичний ефект. Льодяні оребрени труби доцільно використовувати для підігрівання морозного повітря і акумулювання холоду, наприклад для створення льодяних декоративних ваз, у яких поміщають ємності з напоями різної форми. Це є елементом новизни для готельно-ресторанного бізнесу.

**Ключові слова:** коефіцієнт оребрения; підігрів повітря; теплоізоляція; енергетичний ефект; льодяна труба; наморожування.

### Вступ

Відновлювані джерела енергії економлять викопне паливо і сприяють при цьому зменшенню викидів парникових газів у атмосферу Землі, попереджаючи негативні зміни клімату. Теплота кристалізації води є відновлюваним джерелом енергії для холодних країн і країн із континентальним кліматом. Але для її використання потрібні нетрадиційні технічні рішення.

Труби з льоду можуть бути застосовані для підігрівання морозного повітря теплотою кристалізації води [1–3] перед:

- калориферами вентиляційних установок;
- випарниками теплових насосів;
- подачею повітря на горіння в котлах і печах.

Такі труби при підігріванні повітря занурюють у воду [4] або зрошують водою. Аналіз теплопередачі при замерзанні води показує, що термічний опір тепловіддачі в повітря є найбільшим. І його можна зменшити завдяки оребрению.

У [5] оребрения виконували приморожуванням окремо виготовлених ребер, що є трудомістким способом. У патенті України [2] автором запропоновано виготовляти оребрени труби методом заморожування (лиття) у формі за негативних температур.

### Постановка задачі

Стаття присвячена експериментальним дослідженням і комп'ютерному моделюванню

технології отримання льодяних труб із внутрішнім та зовнішнім оребренням методом дискретного накладання теплоізоляції для одержання поперечних і поздовжніх ребер.

### Лабораторні моделі та методика виготовлення труби із внутрішнім оребренням

Моделі форм для досліджень показано на рис. 1 і 2. Для проведення експерименту використовувалась полівінілхлоридна труба довжиною 220 мм.



Рис. 1. Модель із поперечною ізоляцією



Рис. 2. Модель із поздовжньою ізоляцією

Модель була зроблена зі шматка каналізаційної труби, до якої кріпилось днище з лінолеуму. Такі геометричні розміри пояснюються тим, що морозильна камера, в якій проводились досліди, мала обмежений об'єм. Товщина стінки матеріалу — 3 мм. Зовнішній діаметр — 116 мм, внутрішній діаметр — 110 мм. Ізоляційні деталі виконувались із поролону, який має коефіцієнт теплопровідності  $0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$ . Теплопровідність матеріалу труби —  $0,18 \text{ Вт/м}\cdot\text{°С}$ .

Експеримент проводився у декількох варіантах, у яких змінювалися крок ізоляції та її товщина. Кроком ізоляції будемо називати відстань між центрами ізоляційних стрічок шириною 15 мм. Залежно від цього дещо варіювались результати. Вода попередньо доводилась до кипіння для дегазації з метою попередження утворення в льоду повітряних пухирців. Після цього вода заливалась у форму. Потім заповнена водою труба ставилась у морозильну камеру на 7–10 год. З часом льодяна труба виймалась із форми після короточасного перебування у приміщенні. Труба розрізалась перед фотографуванням плавленням, виконувались фотографічні знімки та вимірювались необхідні характеристики оребрення.

Здійснено оцінювання теплових потоків, термічних опорів і різниць температур на неізольованих ділянках форми і в місцях розташування теплоізоляції.

На ділянці без ізоляції:

– коефіцієнт теплопередачі  $K = 11,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;

– густина теплового потоку:

$$q = K\Delta t = 11,5 \cdot 15 = 172 \text{ Вт/м}^2;$$

– перепад температур на трубі, у неізольованих місцях —  $2,9 \text{ °С}$ .

На ділянці з ізоляцією:

– коефіцієнт теплопередачі  $K = 0,92 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;

– густина теплового потоку під ізоляцією:

$$q = K\Delta t = 0,92 \cdot 15 = 13,8 \text{ Вт/м}^2;$$

– перепад температур на стінці, у місцях, покритих ізоляцією, —  $0,23 \text{ °С}$ .

Відношення теплових потоків для різних ділянок:  $q_r / q_{із} = 172 / 13,8 = 12,5$ .

Таким чином, принаймні в центрі теплоізоляції тепловий потік більш ніж на порядок менший, аніж на неприкритій ізоляцією трубі, що викликає утворення льоду різної товщини.

Вигляд труби з поперечним оребренням показаний на рис. 3. Ребра мають округлу форму через неодномірність теплового потоку.

Під час виготовлення моделі для отримання поздовжніх ребер на форму було накладено 5 теплоізоляційних стрічок. Отримали льодяну трубу, переріз якої має геометричну форму п'ятикутника через те, що з утворенням льоду теплота не тільки передається по радіусу, а й перетікає на сусідні ділянки і на бокову частину ізоляції (рис. 4). По центру неізольованих ділянок теплові потоки найбільші, тому лід утворюється більшої товщини. Накладання поздовжньої ізоляції не дає бажаного оребрення

льодяної труби, але таким способом можна змінювати форму перерізу каналу льодяної труби.

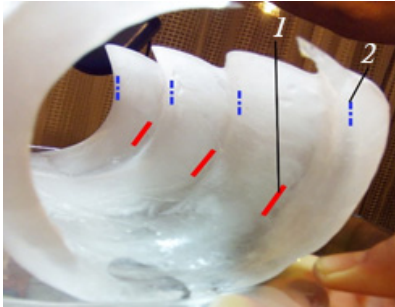


Рис. 3. Отримана льодяна труба з поперечною ізоляцією (крок – 40 мм, товщина ізоляції – 40 мм): 1 – впадини (місця, де накладалась ізоляція); 2 – ребра (місця без ізоляції)

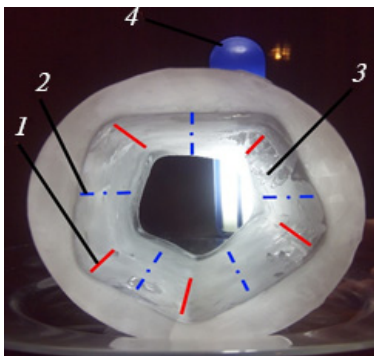


Рис. 4. Отримана льодяна труба з поздовжньою ізоляцією (крок – 60 мм, товщина ізоляції – 30 мм): 1 – впадини (місця, де накладалась ізоляція); 2 – ребра (місця без ізоляції); 3 – дендрити; 4 – джерело світла (настільна лампа)

Для детальнішого вивчення нестационарних процесів при формуванні ребрих труб проведено моделювання в системі SolidWorks.

**Моделювання в системі SolidWorks.** Для підтвердження експериментів із круговими внутрішніми льодяними ребрами була створена аналогічна модель у системі SolidWorks (рис. 5).

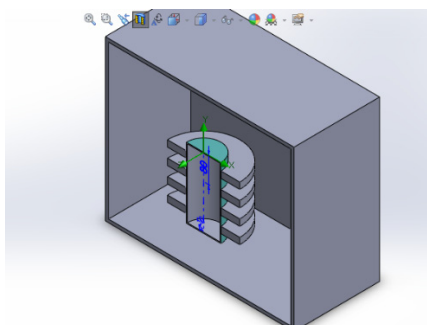


Рис. 5. Зображення моделі в системі SolidWorks у розрізі

Ціллю моделювання було створення віртуальної моделі, яка відповідає фізичній. Розглядалась нестационарна задача вільної конвекції рідини у великому об'ємі (морозильній камері). Геометричні розміри віртуальної моделі були аналогічні описаній вище фізичній моделі з вільною конвекцією.

Після встановлення початкових і граничних умов та обчислення програмою заданого проекту отримали результати, показані на рис. 6. Можна спостерігати завихрення потоку повітря між ребрами та найбільше охолодження води і льоду внизу та зверху форми.

Розгляд динаміки процесу зміни температури показує, що температура з 16 °С опустилась до 0 °С лише за 25000 с. Лінія зниження температури з часом має вигляд кривої з невеликим вигином вниз, що показує зменшення темпів охолодження води з часом.

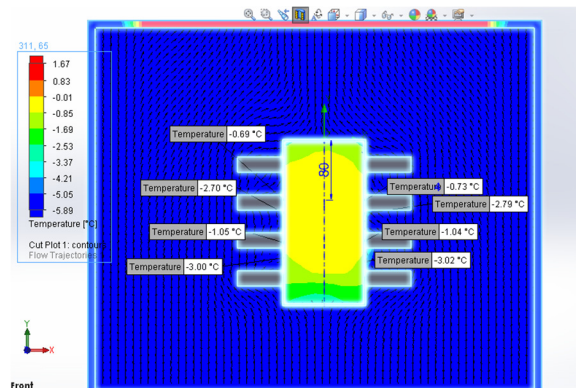


Рис. 6. Розподіл температур по довжині труби в SolidWorks за вільної конвекції

Для нестационарного режиму отримано результати за час близько 32000 с. Можна побачити, що в місцях без ізоляції температура на стінці труби дещо нижча, ніж у місцях з ізоляцією, приблизно на 3 градуси. Тобто більше теплоти передається саме в місцях без ізоляції, де всередині труби й виникають потовщення льоду або ребра. Отримані результати підтверджують реальні експерименти. Фізичний час моделювання – 32000 с – є близьким до 8 год. Час моделювання збігається з часом фізичного експерименту.

Запропоновано змоделювати вплив інтенсифікації теплообміну – подавати холодне повітря зі сталою швидкістю, яку можна змінювати. Експерименти з вимушеною конвекцією були проведені в SolidWorks на моделі, зображеній на рис. 7. Модель складається з двох труб. У внутрішній трубці міститься вода.

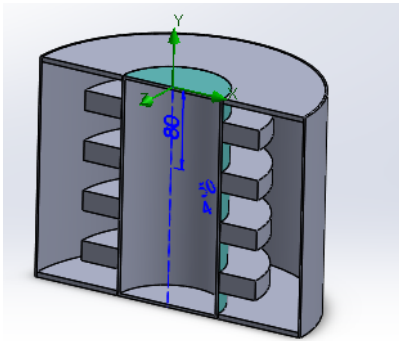


Рис. 7. Форма для моделювання в розрізі

Через кільцевий канал, утворений зовнішньою трубою, пропускається холодне повітря із заданою швидкістю.

Експерименти проводились для швидкостей 2, 4 і 6 м/с для поперечної кільцевої ізоляції. Результати для 2 і 6 м/с показані на рис. 8 і 9. Перехід через температуру 0 °С для відповідних швидкостей відбувається приблизно через 22, 18 і 12 тисяч секунд. Увігнутий вниз характер кривої зміни температури зберігається. При зростанні швидкості повітря різниця температур між ізолюваною та голою ділянками збільшується. Відзначимо, що за всіх швидкостей повітря до кінця процесу моделювання вода в моделі має мінусову температуру, тобто вона є переохолодженою відносно температури кристалізації.

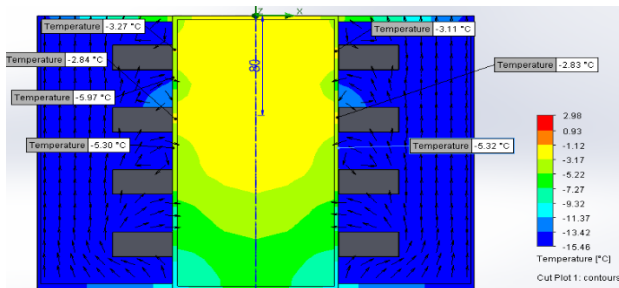


Рис. 8. Температурне поле по перерізу труби (час 30000 с, швидкість 2 м/с)

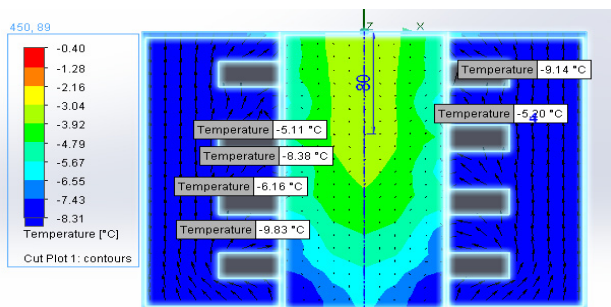
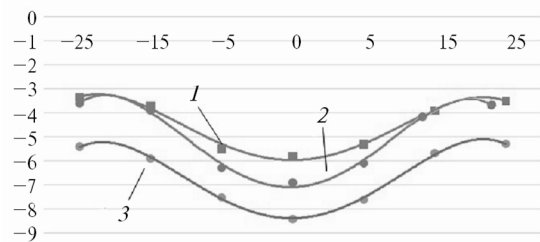


Рис. 9. Температурне поле в трубі (час 20000 с, швидкість 6 м/с)

Визначимо режим течії для змодельованого процесу. При цьому знаходимо число Рейнольдса, яке для різних швидкостей становить відповідно 15700, 31500 і 47200 при використанні для кільцевого каналу еквівалентного діаметра труби 0,1 м і в'язкості  $12,7 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Проведено моделювання на формі такого ж діаметра, як і у фізичному експерименті за природної та за вимушеної конвекції. Результати моделювання для вільної конвекції збігаються з результатами досліджень при фізичному експерименті. Графік розподілу температури по довжині труби між ізоляцією зображено на рис. 10. Є невелика асиметрія на рисунку близько 0,2–0,4 °С через різну тепловіддачу на фронтальній і тильній сторонах основи теплоізоляції на формі.

Рис. 10. Зміна температури стінки форми вздовж труби між двома елементами кільцевої теплоізоляції зі сторони повітря і теплоізоляції (мінімум кривих – при контакті труби з повітрям) за вимушеної конвекції і швидкостей: 1 –  $w = 2$  м/с; 2 –  $w = 4$  м/с; 3 –  $w = 6$  м/с (цифри зверху показують відстань від точки мінімуму в міліметрах)

### Коефіцієнт оребрення труби з кільцевими ребрами

Для отриманих труб із висотою ребер від 5 до 15 мм були розраховані коефіцієнти оребрення. Коефіцієнтом оребрення називають відношення площі поверхні оребреної труби до зовнішньої площі поверхні гладкої труби. Площа гладкої труби знаходилась при використанні діаметра труби в центрі впадин. Коефіцієнт оребрення в загальній формі:

$$\psi = F_{\text{ор}} / F_{\text{гл}}$$

Розраховувались труби з поперечною ізоляцією. Розрахунки показали, що найбільший коефіцієнт оребрення – 1,36 – отримано за кроку між ребрами 40 мм і за товщини ізоляції 60 мм; зі збільшенням товщини ізоляції він зростає, і можна прогнозувати, що він досягатиме 2 зі збільшенням ширини і товщини ізоляції.

### Дослідження утворення льодяних труб із зовнішнім оребренням

Зовнішні ребра на льодяних трубах можуть бути практично використані для інтенсивного заморожування труб і льодяних циліндрів із порожниною, що використовуються як акумулятори холоду та, наприклад, для охолодження напоїв у посудинах і пляшках, які вставляються в отвір циліндрів, при їх подачі на святкові столи у домашніх умовах та в готельно-ресторанному бізнесі.

Для проведення експерименту використовувались дві труби: сталева оцинкована труба діаметром 150 мм і довжиною 220 мм та полівінілхлоридна труба діаметром 190 мм і довжиною 220 мм, які з'єднувались між собою на основі. Металева труба є внутрішньою в системі, пластикова, відповідно, – зовнішньою. Також, у іншому варіанті експерименту, використовувались 2 полівінілхлоридні труби.

Вода заливалась між трубами, а у внутрішній трубці накладалась дискретно теплоізоляція. Бажаного результату не було одержано ні у фізичному досліді, ні при моделюванні для режиму вільної конвекції через низьку інтенсивність теплообміну.

Для отримання бажаного результату, тобто зовнішніх ребер на поверхні труби, запропоновано впускати повітря із різною фіксованою швидкістю для збільшення тепловіддачі. Саме такі експерименти були проведені у SolidWorks. Моделювання виконувались із використанням двох труб і двох стрічок ізоляції, розміщених одна навпроти одної (рис. 11).

Експерименти проводились для декількох значень швидкостей холодного повітря на вході у внутрішню трубу. Результати отримані для швидкостей 2, 4 і 6 м/с та часу близько 12000 с. Розміщення поздовжньої ізоляції показано на рис. 11 для швидкості 6 м/с, де різниця температур найбільша. Різниця температур внутрішньої труби під ізоляцією і на голій трубці досягає 4 °С. Як видно, вплив теплоізоляції поширюється і на ділянки поряд із нею. На часі близько 300 с почалось замерзання води, і різниця температур між водою і повітрям зменшується до 3000 с на 4 °С. Зі збільшенням часу замерзання води приблизно до 3 год, для отримання труб, різниця практично стає непомітною, що свідчить про майже повне її замерзання. Отримана льодяна труба матиме зовнішню овальну форму.

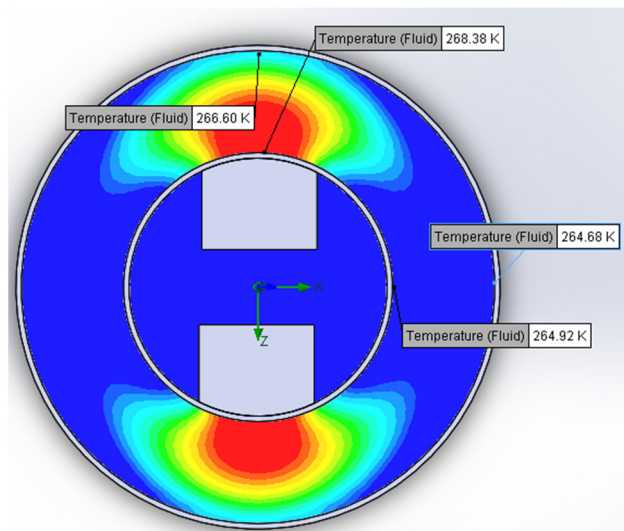


Рис. 11. Розподіл температур по перерізу форми з поздовжньою теплоізоляцією ( $w = 6$  м/с)

Після задання усіх необхідних параметрів отримали такі результати. На рис. 12 продемонстровано розподіл температури по периметру внутрішньої стінки внутрішньої труби між центральними точками для двох шарів ізоляції, розміщеними одна навпроти одної. Найвища температура під ізоляцією, найнижча – на позначці 90°, тобто на середині шляху між ізоляціями, на непокритій ізоляцією ділянці форми. Всі три залежності, отримані для різних швидкостей, показують майже рівність температур на симетричних ділянках форми. Також аналіз показує, що зі збільшенням швидкості різниця температур на ділянках з та без ізоляції зростає.

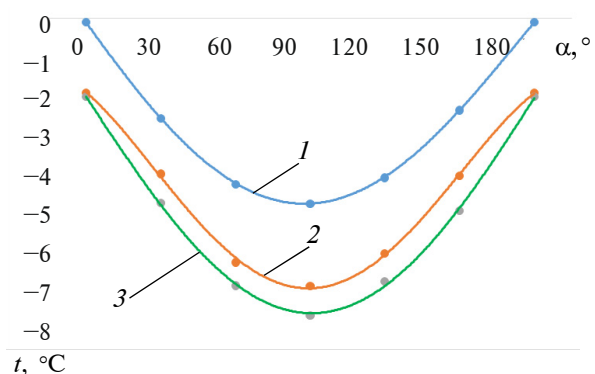


Рис. 12. Зміна температури стінки форми вздовж труби зі сторони повітря і теплоізоляції (мінімум повітря) за вимушеної конвекції за різних швидкостей: 1 –  $w = 2$  м/с; 2 –  $w = 4$  м/с; 3 –  $w = 6$  м/с (зверху показано кутові градуси)



Моделювання й експерименти показали, що різниця температур поверхні труби під ізоляцією і поверхню труби без ізоляції становить для випадку вимушеної конвекції повітря при отриманні зовнішніх ребер близько 4-5 °С.

Зі збільшенням часу висота льодяних ребер залишається однаковою, але збільшення товщини стінки труби під впадинами між ребрами збільшується.

Моделювання показало, що інтенсивність теплообміну в трубі з теплоізоляцією значно вища, ніж для аналогічного випадку для отримання внутрішніх кільцевих ребер і при обтіканні повітрям кільцевих теплоізоляційних елементів.

Зовнішні ребра можуть бути використані практично для інтенсивного заморожування льодяних циліндрів і в готельно-ресторанному бізнесі для охолодження пляшок із напоями (з урахуванням різної форми льодяних ємностей).

## References

- [1] I.I. Pukhovoy *et al.*, "Natural gas saving when replacing boilers with heat pumps and using the heat of water crystallization as an alternative to the heat of the soil", *Vidnovlyuvana Energetyka*, no. 1, pp. 15–19, 2006.
- [2] I.I. Pukhovoy, "Method of finned tubes manufacturing", UA Patent 118711, Aug. 28, 2017.
- [3] I.I. Pukhovoy and I.G. Varvara, "Method of production of smooth ice pipes by casting", UA Patent 120543, Nov. 10, 2017.
- [4] I.I. Pukhovoy and A.Ie. Denisova, "Analysis of air heating in winter in underground heat exchangers and in water bodies during water freezing on submerged pipes", *KPI Sci News*, no. 6, pp. 59–65, 2018. doi: 10.20535/1810-0546.2018.6.151645
- [5] E. Suprunov *et al.*, "The heat of water crystallization for heating the air in the channels with finned ice", in *Proc. X Int. Conf. Modern Problems of Scientific Support of Energy*, Kyiv, 2012, p. 186.

И.И. Пуховой

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ МЕТОДОМ НАМОРАЖИВАНИЯ В ФОРМЕ С ДИСКРЕТНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ

**Проблематика.** Подогрев воздуха зимой в диапазоне температур окружающей среды ниже –5 °С возможно проводить теплотой фазового перехода воды в лед. Подогретый воздух уменьшает расход энергии в системах вентиляции, в тепловых насосах типа воздух–вода и воздух–воздух, в котлах и печах для горения топлива, в период пиковых нагрузок на системы теплоснабжения, что позволяет уменьшить установленную мощность теплогенерирующего оборудования и экономить энергию.

**Цель исследования.** Экспериментальные исследования и компьютерное моделирование технологии получения ледяных труб с внутренним и наружным оребрением методом дискретного наложения теплоизоляции для получения поперечных и продольных ребер.

**Методика реализации.** Воздух с температурой ниже –5 °С пропускают через ледяные оребренные изнутри трубы, погруженные в воду или орошенные водой, для использования подогретого до –2-3 °С воздуха в системах вентиляции, тепловых насосах, системах горения топлива и в буферных зонах зданий в период морозов. Проведены экспериментальные работы по изготовлению оребренных ледяных труб в морозильной камере и моделирование в SolidWorks.

**Результаты исследования.** Полученные кольцевые внутренние ребра имеют округлую форму из-за бокового перетекания теплоты и дают возможность получить коэффициент оребрения 1,3-2. При наложении отдельных элементов продольной теплоизоляции получают трубы с внутренним сечением в форме многоугольника с числом углов, соответствующим количеству элементов. Внешние ребра невозможно было экспериментально сформировать при наложении внутренних теплоизоляционных элементов из-за низкого теплообмена трубы с воздухом внутри вертикальной трубы, размещенной в морозильной камере. В результате моделирования при вынужденной подаче воздуха во внутреннюю трубу для двух элементов теплоизоляции, размещенных симметрично, получена овальная форма сечения трубы из льда.

**Выводы.** Чем ниже температура окружающей среды, тем больший экономический и энергетический эффект. Ледяные оребренные трубы целесообразно использовать для подогрева морозного воздуха и аккумуляции холода, например для создания ледяных декоративных ваз, в которых помещают емкости с напитками разной формы. Это является элементом новизны для гостинично-ресторанного бизнеса.

**Ключевые слова:** коэффициент оребрения; подогрев воздуха; теплоизоляция; энергетический эффект; ледяная труба; намораживание.

## Висновки

Підтверджено запропоновану в патенті технологію отримання оребрених льодяних труб.

Досліджена технологія може бути використана для виробництва труб різної форми з матеріалів, що мають невеликий коефіцієнт теплопровідності у твердій фазі.

Отримані ребра мають округлу форму при їх виконанні кільцевими всередині та поздовжніми із зовнішньої сторони.

При накладанні окремих елементів поздовжньої зовнішньої теплоізоляції отримуються труби з внутрішнім перерізом у формі багатокутника з числом кутів, що відповідає кількості елементів.

Льодяні оребрені труби доцільно використовувати для підігрівання морозного повітря і акумулювання холоду, наприклад для створення льодяних декоративних ваз, у яких розміщують ємності з напоями різної форми.

I.I. Pukhovoy

EXPERIMENTAL PRODUCTION AND MODELING OF FINNED TUBES FORMATION BY FREEZING IN THE FORM WITH DISCRETE THERMAL INSULATION

**Background.** Air heating in winter in the range of ambient temperatures below  $-5^{\circ}\text{C}$  may be carried out by the heat of the phase transition of water into ice. Heated air reduces energy consumption in ventilation systems, in heat pumps such as air–water and air–air, in boilers and furnaces for fuel combustion, during peak loads on heat supply systems, that reduces the installed capacity of heat-generating equipment and save energy.

**Objective.** The aim of the study is experimental research and computer simulation of technology for producing ice pipes with internal and external fins by discrete thermal insulation for transverse and longitudinal ribs.

**Methods.** Air with a temperature below  $-5^{\circ}\text{C}$  is passed through ice finned from the inside pipes immersed in water or irrigated with water, for use heated to  $-2-3^{\circ}\text{C}$  air in ventilation systems, heat pumps, fuel combustion systems and in buffer zones of buildings during frost. Experimental work on the production of finned ice pipes in the freezer and modeling in SolidWorks has been carried out.

**Results.** The obtained ring interior edges are rounded due to the lateral flow of heat and provide an opportunity to obtain the coefficient of the fins of 1.3-2. When applying the individual elements of the longitudinal insulation, the pipe is obtained with an internal cross-section in the form of a polygon with the number of angles corresponding to the number of elements. External ribs could not be formed experimentally when applying internal thermal insulation elements due to the low heat exchange of the pipe with the air inside the vertical pipe placed in the freezer. In the simulation result in the forced supply of air into the inner tube of the two insulation elements arranged symmetrically, the oval cross-section tube of ice was received.

**Conclusions.** The lower the ambient temperature, the greater the economic and energy effect. Ice finned tubes should be used for heating frosty air and cold storage, for example, to create ice decorative vases, in which containers with drinks of different shapes are placed. This is an element of novelty for the hotel and restaurant business.

**Keywords:** finning coefficient; air heating; thermal insulation; energy effect; ice pipe; freezing.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
21 лютого 2019 року

Прийнята до публікації  
25 квітня 2019 року