

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.4.141463

УДК 69.621.58

І.І. Пуховий*, А.М. Постоленко
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ЗМІНА ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗРОСТАННЯ КОНГЛОМЕРАТІВ БУРУЛЬОК НА ГОРИЗОНТАЛЬНИХ НАСАДКАХ ПРИ РОЗПИЛЕННІ ВОДИ ФОРСУНКОЮ

Проблематика. Бурульки можуть використовуватись для отримання й акумулювання льоду з використанням природного і штучного холоду. При льодоутворенні можливо використовувати теплоту фазового переходу (вода–лід) $r_0 = 334$ кДж/кг у системах вентиляції та теплонасосних системах опалення і гарячого водопостачання, які сприяють економії енергії і дають змогу відмовитися від використання природного газу, розширити зону застосування теплових насосів на країни з морозними зимами, а також зменшити встановлену потужність теплогенеруючого обладнання. Для кристалізаторів-підігрівачів повітря важливо знати допустиму відстань між сусідніми лінійними насадками, що забезпечує прохід повітря без зрошення сусідніх рядів і відстань між ярусами лінійних насадок, яка залежить від довжини бурульок.

Мета дослідження. Дослідити експериментально процеси утворення льоду в конгломератах бурульок на горизонтальних трубних насадках. Отримати математичні залежності для визначення швидкості росту конгломератів бурульок у довжину та швидкості зростання крижаних оболонок навколо насадок у поперечному напрямку за постійної поверхневої густини зрошення форсункою залежно від часу льодоутворення.

Методика реалізації. Морозне повітря з температурою нижче 0 °С підігрівається теплотою кристалізації води, що диспергована форсункою. Вода, потрапляючи на горизонтальні насадки, перетворюється на лід, формуючи конгломерати з бурульок. Чим нижча температура довкілля, тим більший економічний і енергетичний ефект при підігріванні повітря перед випарниками теплових насосів і калориферами систем вентиляції. Накопичений лід може бути використаний у цілях холодопостачання влітку, що збільшить економічний ефект.

Результати дослідження. Швидкість росту бурульок у довжину – це відношення середньої довжини бурульок на трубі до часу їх формування. Згідно з отриманими експериментальними даними, швидкість росту бурульки в довжину за постійної витрати води форсункою майже не залежить від діаметра труби та матеріалу, з якого вона виготовлена. В той же час температура зовнішнього повітря значно впливає на швидкість росту бурульок у довжину. Процес росту бурульки в довжину відбувається зі зниженням швидкості росту її по довжині за постійної подачі води. Зі збільшенням діаметра трубної насадки швидкість зростання льоду на насадці по радіусу, перпендикулярному до осі труби в сторону сусідніх насадок, збільшується. Це пов'язано з кращим переохолодженням води, яка на трубі більшого діаметра долає більший шлях до горизонтальної площини, що проходить через центр труби.

Висновки. Вивчено закономірності зростання бурульок на стендах із різними насадками і способами їх зрошення. Отримані результати дають змогу розраховувати відстань між горизонтальними насадками для попередження блокування льодом проходу повітря і відстань між ярусами насадок, що забезпечує мінімальну відстань між ярусами бурульок перед видаленням їх із насадок.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; лід; теплота кристалізації; утворення бурульок; швидкість намерзання бурульок; зростання льоду між рядами насадок; вентиляція; опалення; теплові насоси.

Вступ

Використання відновлюваних джерел енергії постійно збільшується. В Європейському Союзі поставлена задача виробляти до 2050 р. 50 % енергії на основі природного середовища. Споживання традиційних (невідновлюваних) видів енергоресурсів призводить до посилення парникового ефекту і зміни клімату на планеті.

Холод, що приходить із космосу, застосовується в енергетиці і для акумулювання холоду зими на літо наморожуванням льоду. Цей

метод, із розвитком холодильної техніки, стали поступово забувати. Кліматичні ресурси із заготівлі льоду є в північних країнах Європи: в Україні, Білорусі, Прибалтиці, Росії, Казахстані, Туркменії, Киргизстані, Китаї, Монголії, Японії та Кореї, в Північній і Південній Америці – США, Канаді, Чилі й Аргентині. В інших країнах такі можливості є в горах. Відомо, що на кожні 200 м висоти температура падає приблизно на 1 градус, тому сніг і морози є навіть в Африці. Холод із льоду можна віднести до відновлюваних джерел енергії. Розрахун-

* corresponding author: ivan@puh.com.ua

ки показали, що витрати енергії на виробництво і акумулювання льоду (холоду) з подальшим використанням влітку зменшуються порівняно з його виробництвом холодильними машинами в 18–51 раз при виробництві на місці акумулювання і споживання [1]. Використання бурульок для виробництва льоду рекомендується в районах з м'якими зимами або нестійкими морозами [2].

При льодоутворенні можливо використовувати теплоту фазового переходу (вода–лід) $r_0 = 334$ кДж/кг у теплонасосних системах опалення [3], які сприяють економії енергії і дають змогу відмовитися від використання природного газу, а також розширити зону застосування теплових насосів на країни з морозними зимами. Розробки [4] демонструють використання теплоти кристалізації води для підігрівання повітря перед подачею в традиційні системи вентиляції та їх важливу роль.

Теплоту кристалізації води застосовують у винаході “Система опалення будівлі І.І. Пухового”, що включає обігрів буферної зони (БЗ) пасивної системи сонячного опалення в нічний період і за відсутності прямого сонячного випромінювання. Система дає змогу економити високопотенційну енергію на опалення житлової зони й одночасно акумулювати холод, який може використовуватися в подальшому і сприяти економії електроенергії. Крім того, система знімає пікові навантаження в морози і знижує встановлену потужність традиційних джерел енергії в житлових зонах. Пошук технологій замерзання води за температур у БЗ на 6–10 градусів вищих, ніж у навколишньому середовищі, і привів до застосування й дослідження бурульок, які мають зростаючу розвинену поверхню теплообміну, що розглядалося нами в [4, 5].

У [4] наведені результати досліджень авторів з утворення бурульок на дроті з ніхромового дроту діаметром 0,5 мм і на трубах різних діаметрів із різних матеріалів. На трубах із полімерних матеріалів по обидва боки утворювалося 2 ряди бурульок. Отримано залежності для розрахунку маси льоду від часу і температури.

В експериментах Л. Макконен і Ф. Ятка [7] на кабелях різних діаметрів до 50 мм продемонстровано, що відстань між бурульками Z становить переважно 24–25 мм, а наші дослідження [4] на дроті діаметром 0,5 мм дають приблизно вдвічі менші результати – 5–10 мм.

При обтіканні бурульок поперечним потоком повітря (вітер) коефіцієнт тепловіддачі від

води на бурульці до повітря має степеневу залежність і знижується зі збільшенням діаметра в степені 0,35–0,4 (змінюється від 27 до 80 Вт/(м²·К)). Там же встановлено, що при вільній конвекції тепловіддача не залежить від діаметра бурульок. В експериментальних і теоретичних дослідженнях темпів росту одиночної бурульки як функції температури, швидкості подачі води та швидкості вітру, що проведені Н. Маєно, Т. Такахаші та Л. Макконен [6, 7], зазначено, що довжина бурульки збільшується внаслідок зниження росту тонких дендритних кристалів у переохолодженій краплі води на кінчику бурульки, і, таким чином, ріст відбувається в поздовжньому напрямку. З іншого боку, діаметр збільшується за рахунок заморожування плівки води, яка тече вздовж стінки бурульки. Співвідношення темпів росту довжин і діаметра становило 8:32. Зі зменшенням температури та збільшенням швидкості вітру інтенсивність росту збільшується в обох напрямках: у поздовжньому (в довжину) та в поперечному (діаметра). Збільшення витрати води призводить до зменшення темпів росту в довжину, але суттєво не впливає на темпи збільшення діаметра, що підтверджено і в дослідах, проведених автором [8]. Товщина плівки за ламінарної течії зростає з витратою в степені 0,33.

Для кристалізаторів-підігрівачів повітря [4] з дротяними, трубчастими або іншими лінійними насадками важливо знати допустиму відстань, що забезпечує прохід повітря без зрощення сусідніх рядів при заданому часі безперервної роботи, та відстань між ярусами лінійних насадок, що залежить від довжини бурульок.

Постановка задачі

Мета роботи – визначити залежності зміни параметрів зростання конгломератів бурульок на горизонтальних насадках для проектування кристалізаторів-підігрівачів повітря з більш повним використанням води: насадки розміщують у 3–4 яруси. До завдання цього дослідження входить визначення швидкості росту параметрів бурульок у місці їх прикріплення до насадок і вниз у довжину.

Формування бурульки та швидкість її зростання в довжину

Формування льоду на горизонтальній циліндричній насадці можна розділити на утво-

рення наросту льоду на верхній поверхні труби і формування льоду у вигляді бурульок (рис. 1).

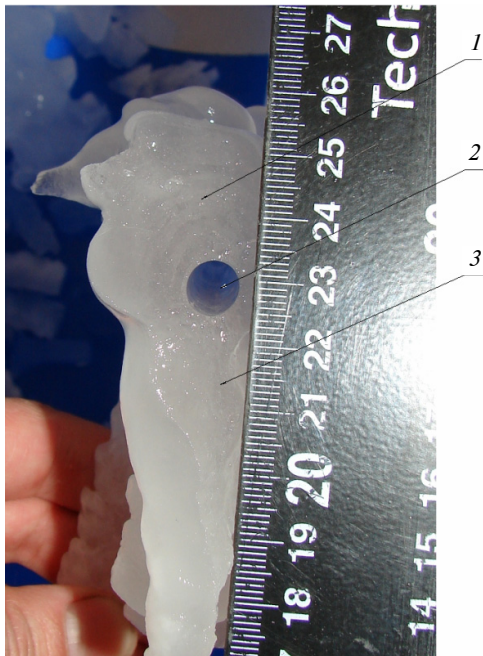


Рис. 1. Поперечний переріз намороженого на алюмінієвій трубці діаметром 8 мм масиву льоду (поверхнева густина зрошення форсункою $G = 0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ і середня температура зовнішнього повітря $t_n = -10,3 \text{ }^\circ\text{C}$): 1 – масив льоду, наморожений над трубою; 2 – отвір від труби; 3 – основа бурульки

Для підвищення ефективності використання води та збільшення компактності установок кристалізаторів-підігрівачів повітря бажано застосовувати 3-4 ряди насадок, що розміщені одна над одною. Для визначення відстані між ярусами, за максимальної фіксованої довжини бурульок, використовуємо значення швидкості зростання бурульки в довжину.

В [4] описані стенди з використанням насадок із ніхромового дроту діаметром 0,5 мм і труб різного діаметра при зрошенні насадок форсунками. При цьому витрата води змінювалась збільшенням кількості форсунок.

Відносна швидкість зростання бурульок за отриманими експериментальними даними для ніхромового дроту ді-

аметром 0,5 мм та дроту зі сталі діаметром 3 мм (при розпиленні води ударом) становить від 10 до 17 мм/(год \cdot °C).

На рис. 2 наведені результати експериментів для труб: залежність частки намороженого в бурульках льоду від діаметра труби насадки для сталеві труби діаметром $d_{\text{тр}} = 20 \text{ мм}$ за середньої температури навколишнього повітря $t_n = -4,1 \text{ }^\circ\text{C}$ і постійної поверхневої густини зрошення форсункою $G = 0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$. Значення останньої вибиралось на основі літературних даних і пробами як оптимальне для бурульок довжиною до 1 м.

З графіка видно, що за однакової температури навколишнього повітря та постійної витрати води форсункою зі збільшенням діаметра труби насадки частка намороженого льоду в бурульках зменшується.

Цей ефект пов'язаний із теплообмінними процесами, що проходять на кінчику бурульки і характеризують зростання бурульки в довжину. Як показують дослідження, проведені в цьому напрямі [5, 6], бурулька на кінчику має діаметр 5–5,5 мм, а всередині – канал із переохолодженою водою, що не замерзла, діаметром 2,5–3 мм. По поверхні бурульки стікає тонка плівка води, яка формує на кінчику бурульки краплю, що звисає. Коли капля досягає діаметра 5–5,5 мм, вона відривається, і починається процес формування наступної краплі. Чим більше води потрапляє в основу бурульки, тим частіше краплі відриваються від кінчика бурульки. Таким чином, процес утворення льо-

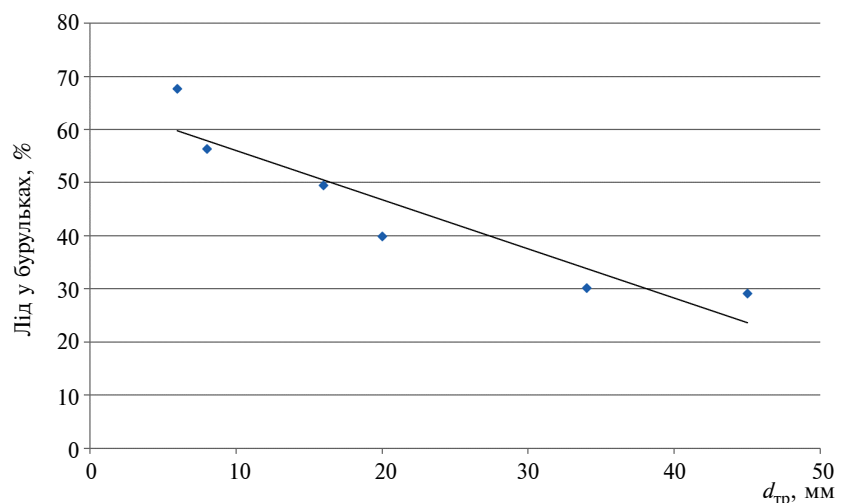


Рис. 2. Частка намороженого в бурульках льоду залежно від діаметра труби за середньої температури морозного повітря $t_n = -4,1 \text{ }^\circ\text{C}$ і постійної поверхневої густини зрошення форсункою $G = 0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$

ду на кінчику бурульки сповільнюється, і бурулька росте в довжину повільніше зі збільшенням витрати води. Спостерігали випадки, коли бурулька зовсім припиняла подовжуватись за надмірної витрати води форсункою.

Швидкість росту бурульок у довжину – це відношення середньої довжини бурульок на трубі до часу їх формування. Отримано значення швидкості росту бурульок від температури зовнішнього повітря для постійної поверхневої густини зрошення форсункою $G = 0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$, труб діаметром від 6 до 45 мм за середньої температури зовнішнього повітря від -4 до -14 °С. Після проведення експерименту лінійкою вимірювалась довжина отриманих бурульок.

На рис. 3 показана залежність швидкості росту бурульки v_l у довжину від температури зовнішнього повітря t_n , що була отримана в результаті проведених досліджень. Як видно з отриманих експериментальних даних, швидкість росту бурульки в довжину за постійної витрати води форсункою майже не залежить від діаметра труби та матеріалу, з якого вона виготовлена. В той же час температура зовнішнього повітря значно впливає на швидкість росту бурульок у довжину. Для краплі, що звисає на кінчику бурульки, площа теплообміну залишається майже постійною. Її поверхню, що контактує з повітрям, можна оцінити від 0,3 до 0,5 від бокової поверхні кулі [5, 6]. Таким чином, кількість теплоти, що передається через бокову поверхню краплі конвекцією, залежить від коефіцієнта тепловіддачі, а відповідно, і швидкості руху потоку повітря. В дослід-

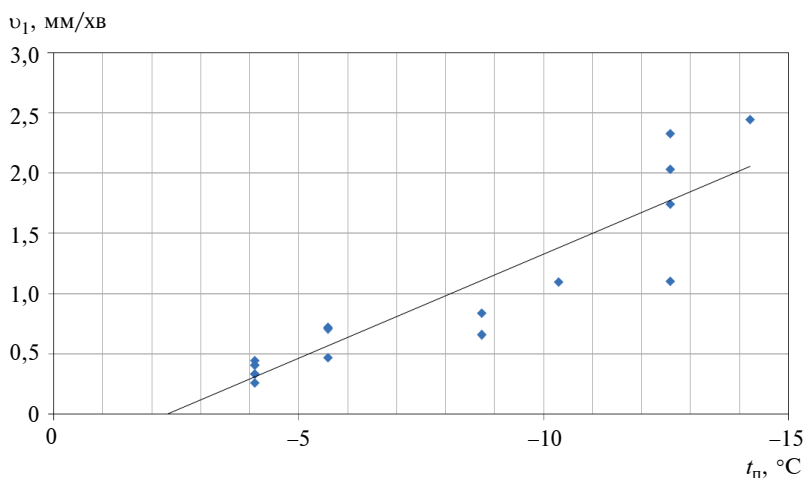


Рис. 3. Залежність швидкості росту бурульки v_l у довжину від температури зовнішнього повітря t_n для $d_{\text{тр}} = 6\text{--}45$ мм і постійної густини зрошення $G = 0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$

женні мала місце вільна конвекція і вплив швидкості не вивчався. Основним чинником, що впливає на швидкість росту бурульки в довжину, є температура зовнішнього повітря. Отримано математичну залежність визначення швидкості росту бурульки в довжину для $d_{\text{тр}} = 6\text{--}45$ мм у діапазоні температур зовнішнього повітря t_n від -4 до -15 °С та за постійної поверхневої густини зрошення $G = 0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$:

$$v_l = -0,17 \cdot t_n - 0,4,$$

де v_l – швидкості росту бурульки в довжину, мм/хв, t_n – температура навколишнього повітря, °С.

Процес подовження бурульки відбувається зі зниженням швидкості росту її по довжині за постійної подачі води. В момент, коли переохолоджена вода не досягає кінчика бурульки, а замерзає на її стінках (бурулька росте в поперечному напрямку, збільшується діаметр бурульки), ріст бурульки в довжину припиняється.

У випадку, коли вода для живлення бурульки потрапляє з поверхні труби чи льодяного наросту, а витрата води форсункою постійна, найбільш інтенсивно зростають бурульки, на живлення яких потрапляє менше води на початковому етапі формування. В цей час площа теплообміну найменша. Таким чином, за рівних умов (температури зовнішнього повітря та поверхневої густини зрошення) більше льоду утворювалось у бурульках (розміщених нижче наросту на насадці) на трубах малого діаметра.

У той же час частка льоду, що утворюється на поверхні труби, прямо пропорційна площі її поверхні і тим більша, чим більший діаметр насадки.

Відносна швидкість зростання оболонки льоду в горизонтальній площині в місці закріплення бурульок на насадках

При розрахунках кристалізаторів води з лінійними насадками необхідно знати відстань між ними, виходячи з умови блокування проходу повітря при зрошенні сусідніх рядів бурульок.

Під час експериментів вимірювались товщини отриманих крижаних наростів на циліндричних насадках, маса льоду, що

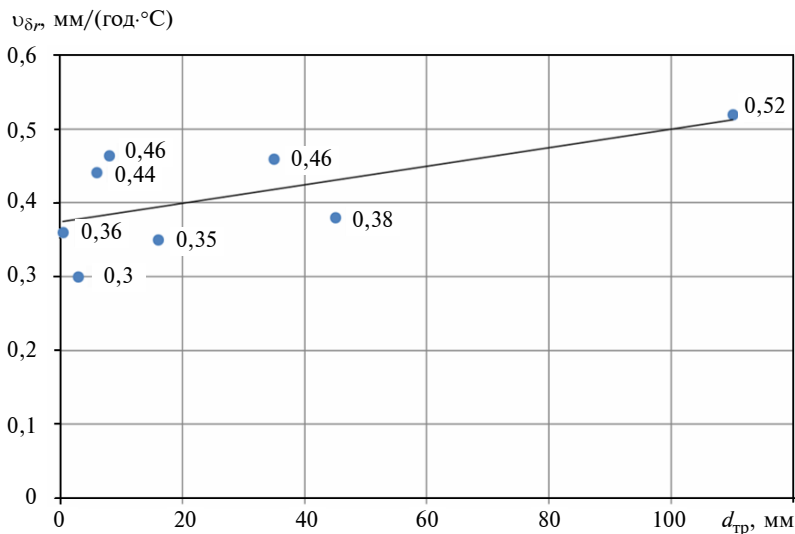


Рис. 4. Залежність відносної швидкості росту крижаного наросту на поверхні циліндричної насадки v_{δ_r} , мм/(год·°C) від діаметра насадки $d_{тр}$, мм, для $d_{тр} = 6-110$ мм, температур зовнішнього повітря t_n від -4 до -15 °C і постійної поверхневої густини зрошення форсункою $G = 0,014$ кг/(с·м²)

утворилась навколо дроту діаметром 0,5 мм та на трубах, і за нею розраховувалися об'єм льоду та радіальне збільшення товщини льодового наросту R . Отримані значення R відносилися до часу в годинах і до різниці температур між 0 °C і температурою морозного повітря. Отримано математичну залежність визначення швидкості росту крижаного наросту v_{δ_r} , мм/(год·°C), для $d_{тр} = 6-110$ мм у діапазоні температур зовнішнього повітря t_n від -4 до -15 °C і за постійної поверхневої густини зрошення форсункою $G = 0,014$ кг/(с·м²):

$$v_{\delta_r} = 0,001 \cdot d_{тр} + 0,37,$$

де v_{δ_r} – швидкість росту крижаного наросту, мм/(год·°C), $d_{тр}$ – зовнішній діаметр трубної насадки, мм.

Зауважимо, що в силу малої товщини наросту час для зручності покладали в годинах, а оскільки різниці температур у градусах Цельсія і Кельвіна однакові, то v_{δ_r} буде виражатися також у мм/(год·K).

На рис. 4 наведені значення v_{δ_r} залежно від діаметра насадки. Як видно, зі збільшенням

діаметра швидкість зростання льоду на насадці по радіусу, перпендикулярному до осі бурульок, у бік сусідніх насадок збільшується, що, очевидно, пов'язано з кращим переохолодженням води, яка на трубці більшого діаметра долає більший шлях до горизонтальної площини, що проходить через центр труби.

Висновки

Вивчено закономірності зростання бурульок на стендах із різними насадками і способами їх зрошення.

За великих витрат води бурульки зростають тільки в поперечному напрямку – діаметрально.

Навколо горизонтальної насадки утворюється крижана оболонка, яка при тонких бурульках приблизно дорівнює їх середньому діаметру.

Відносна швидкість наростання оболонки v_{δ_r} залежить від діаметра насадок і становить 0,3–0,5 мм/(год·°C) для $d_{тр} = 6-110$ мм, температур зовнішнього повітря t_n від -4 до -15 °C і за постійної поверхневої густини зрошення форсункою $G = 0,014$ кг/(с·м²). У дослідях отримано зростання величини v_{δ_r} зі збільшенням діаметра насадок.

Швидкість зростання бурульок у довжину становить 0,3–2,5 мм/хв для $d_{тр} = 6-45$ мм, температур зовнішнього повітря t_n від -4 до -15 °C і постійної густини зрошення форсунки $G = 0,014$ кг/(с·м²).

Отримані результати дають змогу розраховувати відстань між горизонтальними насадками для попередження блокування льодом проходу повітря і відстань між ярусами насадок, що забезпечує мінімальну відстань між ярусами бурульок перед видаленням їх із насадок.

У подальшому слід провести дослідження з поступовою зміною витрати води для отримання розрахункових залежностей.

References

- [1] I.I. Pukhovoy and L.N. Lyakhovich, "Energy and environmental indicators of production and accumulation of ice, laid in winter in Ukraine", *Promyshlennaja Teplotehnika*, vol. 26, no. 5, pp. 537–541, 2004.
- [2] V.A. Bobkov, *Production and Application of Ice*. Moscow, SU: Pishhevaja Promyshlennost', 1977.
- [3] G.K. Voronovsky and I.V. Nedina, *Small Energy in the System of Economic Security of the State*. Kyiv, Ukraine: Znanija Ukrainy, 2006.
- [4] I.I. Pukhovoy and A.M. Postolenko, "Formation of ice in icicles and use of crystallization heat for air heating", *J. Eng. Phys. Thermophys.*, vol. 91, no. 3, pp. 800–806, 2018.
- [5] I.I. Pukhovoy, "Analysis of heat transfer during the growth of icicles, which are used to accumulate natural cold and air heating in heat supply systems", *Vidnovljivana Enerhetyka*, vol. 1, pp. 16–19, 2007.
- [6] L. Makkonen, "A model of icicle growth", *J. Glaciol.*, vol. 34, no. 116, pp. 64–70, 1988. doi: 10.3189/S0022143000009072
- [7] N. Maeno *et al.*, "Growth rates of icicles", *J. Glaciol.*, vol. 40, no. 135, pp. 319–326, 1994. doi: 10.3189/S0022143000007401
- [8] I.I. Puhovy *et al.*, "On the mechanism of buildup and formation of artificial icicles in ice production systems at the expense of natural cold", *Vidnovljivana Enerhetyka XXI Stolittja*, vol. 3-4, pp. 20–23, 2005.

И.И. Пуховой, А.М. Постоленко

ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОСТА КОНГЛОМЕРАТОВ СОСУЛЕК НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НАСАДКАХ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ВОДЫ ФОРСУНКОЙ

Проблематика. Сосульки могут использоваться для получения и аккумулирования льда с использованием естественного и искусственного холода. При льдообразовании возможно использовать теплоту фазового перехода (вода–лед) $r_0 = 334$ кДж/кг в системах вентиляции, а также в теплонасосных системах отопления и горячего водоснабжения, которые способствуют экономии энергии и позволяют отказаться от использования природного газа, расширить зону применения тепловых насосов на страны с морозными зимами, а также уменьшить установленную мощность теплогенерирующего оборудования. Для кристаллизаторов-подогревателей воздуха важно знать допустимое расстояние между соседними линейными насадками, которое обеспечивает проход воздуха без сращения соседних рядов, и расстояние между ярусами линейных насадок, которое зависит от длины сосулек.

Цель исследования. Исследовать экспериментально процессы образования льда в конгломератах сосулек на горизонтальных трубных насадках. Получить математические зависимости для определения скорости роста конгломератов сосулек в длину и скорости роста ледяных оболочек вокруг насадок в поперечном направлении при постоянной поверхностной плотности орошения форсункой в зависимости от времени льдообразования.

Методика реализации. Морозный воздух с температурой ниже 0 °С подогревается теплотой кристаллизации воды, диспергированной форсункой. Вода, попадая на горизонтальные насадки, превращается в лед, формируя конгломераты из сосулек. Чем ниже температура окружающей среды, тем больший экономический и энергетический эффект при подогреве воздуха перед испарителями тепловых насосов и калориферами систем вентиляции. Накопленный лед может быть использован в целях холодоснабжения летом, что увеличит экономический эффект.

Результаты исследования. Скорость роста сосулек в длину – это отношение средней длины сосулек на трубе ко времени их формирования. Согласно полученных экспериментальных данных, скорость роста сосульки в длину при постоянном расходе воды форсункой почти не зависит от диаметра трубы и материала, из которого она изготовлена. В то же время температура наружного воздуха оказывает значительное влияние на скорость роста сосулек в длину. Процесс роста сосульки в длину происходит со снижением скорости ее роста по длине при постоянной подаче воды. С увеличением диаметра трубной насадки скорость роста льда на насадке по радиусу, перпендикулярному оси трубы в сторону соседних насадок, увеличивается. Это связано с лучшим переохлаждением воды, которая на трубе большего диаметра преодолевает больший путь к горизонтальной плоскости, проходящей через центр трубы.

Выводы. Изучены закономерности роста сосулек на стендах с различными насадками и способами их орошения. Полученные результаты позволяют рассчитывать расстояние между горизонтальными насадками для предупреждения блокировки льдом прохода воздуха и расстояние между ярусами насадок, обеспечивающее минимальное расстояние между ярусами сосулек перед удалением их из насадок.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии; лед; теплота кристаллизации; образование сосулек; скорость намораживания сосулек; рост сосулек между рядами насадок; вентиляция; отопление; тепловые насосы.

I.I. Puhoviy, A.M. Postolenko

CHANGE OF GEOMETRIC GROWTH PARAMETERS OF ICICLE CONGLOMERATES ON HORIZONTAL PIPE FITTINGS AT THE WATER SPRAY BY NUZZLE

Background. Icicles can be used to produce and store ice using natural and artificial cold. It is possible to use the heat of the phase transition (water–ice) $r_0 = 334$ kJ/kg in ventilation systems, and heat pump systems for heating and hot water supply during the ice accretion. It contributes to energy saving and allows avoiding the use of natural gas, expanding the application area of heat pumps to countries with frosty winters, and also reducing the installed capacity of heat generating equipment. For air crystallizer-heater pans, it is important to know the permissible distance between adjacent linear pipes, which ensures the passage of air without the fusion of adjacent rows and the distance between the tiers of linear pipes, which depends on the length of the icicles.

Objective. The aim of the paper is to investigate experimentally the processes of ice formation in icicle conglomerates on horizontal pipe fittings. Obtain mathematical dependencies for determining the rate of growth of icicle conglomerates in length and the rate of growth of ice shells around the pipes in the transverse direction at a constant surface irrigation density of the nozzle within ice accretion time.

Methods. Frosty air, with a temperature below 0 °C, is heated by the crystallization heat of water dispersed by the nozzle. Water, falling on the horizontal pipes, turns into ice, forming conglomerates of icicles. The economic and energy effect is bigger for lower environmental temperatures, when heating the air before the heat pump evaporators and the air-conditioning calorifiers. Accumulated ice can be used for cooling purposes in summer, increasing the economic effect.

Results. The icicle growth rate in length is the ratio of the average length of the icicles on the pipe to the period of their formation. From the experimental data obtained, the rate of icicle growth in length at a constant water spray by nozzle is almost independent of the pipe diameter and the constituent material. At the same time, the outside air temperature has a significant effect on the growth rate of icicles in length. The process of length growth of icicle occurs with a decrease in its growth rate along its length with a constant water supply. The bigger the pipe diameter, the bigger the ice growth rate on the pipe fitting along the radius perpendicular to the axis of the pipe toward the nearby pipe fittings. This is due to better water subcooling, on a pipe of a larger diameter, which overcomes a larger path to the horizontal plane passing through the center of the pipe.

Conclusions. The growth regularities of icicles on stands with different pipe fittings and methods of their irrigation are studied. The obtained results allow calculating the distance between the horizontal pipes to prevent the ice blocking of the air passage and the distance between the tiers of the pipes, ensuring a minimum distance between the icicle tiers before removing.

Keywords: renewable energy sources; ice; crystallization heat; icicle formation; icicle freezing speed; ventilation; heating; heat pumps.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
26 травня 2018 року

Прийнята до публікації
6 вересня 2018 року