

## ПРО КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ЛЬОДУ В БУРУЛЬКАХ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ

*Проведені дослідження утворення і зростання бурульок на дротяних насадках при розпиленні води ударом об тверду поверхню і форсункою за температур докільля  $-3 \dots -7$  °С. Досліди проведені на дротах діаметром 3 мм і 0,5 мм з відповідною відстанню між насадками 10 мм і 29 мм.*

*Отримані залежності для обчислення маси утвореного льоду в залежності від часу. Вивчено зростання бурульок на насадках в горизонтальній площині в часі та подовжж і вниз. Отримані значення швидкості зростання по радіусу біля 0,3 мм на градус і швидкості подовження – біля 1 мм за годину при температурі оточуючого повітря мінус 5 °С. Максимальна довжина бурульок залежить від відстані між насадками. Ця відстань перекривається льодом через певний час і подача води на бурульки блокується. Досягнуто зростання льоду між паралельними насадками на дроті діаметром 3 мм. Розраховані потрібні відстані між насадками для різних температур повітря. При використанні «бурулькових» пристроїв у якості підігрівачів повітря до розрахованих відстаней між насадками слід додати проміжок для проходу повітря через яруси бурульок.*

*Визначена середня теплова потужність установки з горизонтальними дротяними насадками, яка може бути використана для підігрівання повітря теплотою кристалізації води. З часом середня теплова потужність зростає, що пов'язано зі збільшенням поверхні теплообміну і збільшенням частки льоду, що утворюється з води, яка потрапила на поверхню насадки. Для перших 30 хв. роботи усереднене значення частки льоду, що утворився становить 8%. Через 7 год. роботи до 28% води, що потрапляє на насадки, перетворюється в лід. На 1 м<sup>2</sup> площі насадок можна отримати від 1 до 4 кВт середньої теплової потужності при температурах повітря  $-5 \dots -10$  °С. Зазначений підігрівач повітря не потребує значних капіталовкладень, споживає мінімальну кількість електроенергії, не потребує людської праці для видалення готового продукту, може бути механізована та автоматизована. Для збільшення кількості насадок без зростання сусідніх рядів запропоновано насадки розміщувати в шаховому порядку.*

**Ключові слова:** *відновлювані джерела енергії, лід, бурулька, підігрів повітря для вентиляції, теплота кристалізації, утворення бурульок, швидкість замерзання льоду.*

### Вступ.

Холод є відновлюваним джерелом енергії. Він застосовується в енергетиці і для акумулювання холоду зими на літо у вигляді льоду. Кліматичні ресурси, тобто зовнішнє повітря з температурами нижче нуля градусів Цельсія, є в багатьох країнах Європи, Азії та Америки. Такі можливості наявні також в горах завдяки зниженню температури зовнішнього повітря приблизно на 1 °С на кожні 200 м висоти, тому сніг і морози мають місце навіть в Африці.

В усіх випадках, коли маємо воду в рідкій фазі і температуру зовнішнього повітря нижче 0 °С, відбувається процес утворення ожеледі, який є однаковий за своєю природою. Вода в рідкій фазі, найчастіше переохолоджена, потрапляє на поверхню де відбувається утворення та накопичення льоду. В процесі утворення льоду прихована теплота кристалізації передається до навколишнього повітря, що має температури нижче точки замерзання. А тонкий шар переохолодженої води присутній на межі розподілу лід-повітря перетворюється в лід [1].

Повністю льодофобні тіла не зустрічаються [2]. Більша частина досліджень, які ведуться, спрямовані на вивчення впливів та зменшення наслідків утворення льоду на інженерних конструкціях та спорудах. Вчені приділяють увагу вивченню впливу температури, швидкості вітру, кількості вологи, а також форми і матеріалів з яких виготовлені конструкції на процес та інтенсивність утворення льодових утворень. У зв'язку з активним розвитком обчислювальної техніки та систем моделювання процесів все більше робіт спрямовані на моделювання процесів утворення льоду на поверхнях різної форми та за різних умов [3-7].

Інший напрямок досліджень – акумулювання льоду і подальше його використання влітку для систем охолодження та кондиціонування. Розрахунки показали, що витрати енергії на виробництво і акумулювання з подальшим використанням льоду влітку зменшуються в порівнянні з його виробництвом холодильними машинами в 18...51 разів [8]. Використання бурульок для виробництва льоду має пріоритет в районах з теплими зимами або нестійкими морозами [2].

При льодоутворенні в бурульках можливо використовувати теплоту фазового переходу (вода-лід) 334 кДж/кг. В [9...11] показані можливості використання підігрітого повітря перед випарниками теплових насосів та калориферами вентиляційних систем у морози.

Теплоту кристалізації води пропонується застосовувати у винаході «Система опалення будівлі І.І. Пухового», що включає обігрів буферної зони пасивної системи сонячного опалення в нічний період і при відсутності прямого сонячного випромінювання [12...14]. Система дозволяє економити високопотенційну енергію на опалення житлової зони і 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.

Перша згадка про виробництво льоду в бурульках є в монографії [2]. Градирня-естакада з робочим об'ємом 150 м<sup>3</sup> являла собою споруду з дерева, яка складалась з трьох ярусів. До стійок висотою 6 м через кожні 2 м були приєднані обв'язувальні рами, на які вкленені з відстанню 0,3 м між вісями жердини діаметром 0,1...0,13 м. Жердини кожного ряду (ярусу) перехрещувались у просторі з жердинами нижче розміщеного ряду, завдяки чому струмінь води, що падав з верхнього ярусу, розбивається об нижній, так що поверхня струменів і крапель збільшувалась. Жодних досліджень не проведено. Лише відзначено, що в районі Одеси бурульки досягали нижнього ярусу за 2...3 доби, а лід видаляли впродовж 2-х днів, зупиняючи подачу води.

Дослідження зростання бурульок проведені на трубах різних діаметрів насадок із сталі, алюмінію і полімерів [11]. На трубах з полімерних матеріалів по обидва боки утворювалося 2 ряди бурульок.

Отримана математична залежність визначення швидкості росту бурульки в довжину для  $d_{тр}=6...45$  мм в діапазоні температур зовнішнього повітря  $t_n=-4...-15$  °С та постійній поверхневій густині зрошення  $G=0,014$  кг/(с·м<sup>2</sup>):

$$\vartheta_l = -0,17 \cdot t_n - 0,4, \quad (1)$$

де:  $\vartheta_l$  – швидкість росту бурулькового конгломерату в довжину, мм/хв.;  $t_n$  – температура зовнішнього повітря, °С.

Для кристалізаторів-підігрівачів повітря [11] з лінійними насадками важливо знати допустиму відстань  $\delta$ , м (рис. 1), яка забезпечує прохід повітря без зрошення сусідніх рядів при заданому часі безперервної роботи та відстань між ярусами лінійних насадок, що залежить від довжини бурульок в критичний момент часу, коли потрібно знімати бурульки з насадок через небезпеку блокування проходу повітря.

Таким чином, відстані між насадками в підігрівачах повинні бути більшим для забезпечення проходу повітря, а відстань між ярусами є залежною від відстані між насадками.

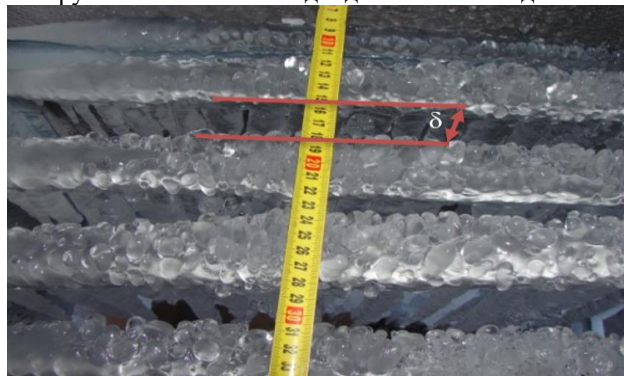


Рисунок 1 – Лід, що утворився на циліндричних насадках, які розміщені паралельно:  $\delta$ , м – відстань між горизонтальними насадками в підігрівачі повітря

**Постановка задачі.** Мета роботи – дослідити швидкість зростання бурульок до моменту їх видалення на насадках з дроту при різних відстанях між ними, та максимально можливу їх довжину. Визначити розрахунками відстані між лінійними насадками та ярусами в залежності від температур повітря при фіксованому часі роботи кристалізатора роботи установки до моменту видалення бурульок при застосуванні технології генерації льоду і підігрівання повітря. Визначити середню теплову потужності підігрівача повітря з горизонтальними насадками з дроту, що використовує теплоту кристалізації води.

**Результати досліджень.** Дослідження зростання бурульок проведені нами на дротах діаметром 3 мм, розташованих на відстані 13 мм в поперечному напрямі та на дротах діаметром 0,5 мм, розташованих на відстані 30 мм в поперечному напрямі.

Виконання дослідів на дротах діаметром 3 мм, що розташовані паралельно (гратка) проводилось при розпиленні води методом удару об тверду поверхню. Дослід був завершений через 4 години після початку зрошування горизонтальних насадок за допомогою гравітаційного методу розпилення струменя води. Середня температура навколишнього повітря становила мінус 5,5 °С.

В кінці дослідження насадки дослідної конструкції з утвореною на них льодяною масою у формі бурульок, у центральній частині ґратки зрослися між собою, що призвело до блокування вільного перерізу для руху води і повітря. Наслідком цього стало більш повільне збільшення бурульок у розмірах у цій частині ґратки.

Центральна частина ґратки зрошувалась з більшою витратою води, яка стікала з поверхні удару струменя, що витікав з отворів на висоті 760 мм над поверхнею удару. Під час падіння струменю вода встигала переохолоджуватись і, навіть на поверхні удару, утворювались короткі бурульки, з яких вода падала на розміщену нижче на 300 мм ґратку.

Краплі води затримувалися на суцільній поверхні льоду, утвореного на насадках у верхній їх частині. Тому протягом останніх 10...15 хв. проведення дослідження мало місце збільшення льодяної маси на верхній частині ґратки шляхом перетікання води на периферію, де бурульки ще не зрослися через нестачу води. Розміри бурульок за цей проміжок часу змінилися несуттєво. Слід вважати, що до моменту зростання льодових наростів, які утворились вздовж дротів (циліндричних насадок), пройшло 3,5 години.

Було виконано вимірювання значень довжини та діаметру бурульок після закінчення дослідження. Максимальна довжина бурульок складала 270 мм, середня довжина – 140 мм. При цьому найбільший діаметр бурульок становив 13 мм при його середньому значенні 9 мм. Середня відстань між осями сусідніх по насадці бурульок складала 20 мм.

Розрахунки отриманої теплової потужності за період часу 40...50 хвилин показують, що вона змінюється зі зростанням маси льоду і становить 5...104 Вт.

*Дослідження формування бурульок на горизонтальних дротяних насадках з використанням форсунки.* На 4-х стійках були розміщені три яруси на відстані 430 мм один від одного. На кожному з ярусів розміщувалась насадка – рамка, яка має розмір 360×330 мм і площу  $F=0,118 \text{ м}^2$ . Передбачені кріплення для дроту діаметром 0,5 мм: по довжині рамки – 12 шт. з кроком 30 мм з кожної сторони і відповідно по ширині рамки – 10 шт. з кроком 30 мм з кожної сторони. Для диспергації води використовувались форсунки тонкого розпилу. Постійна поверхнева густина зрошення водою становила  $G=0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ .

Дріт з ніхрому в насадці виконує подвійну функцію: виступає у якості основи та направляючого елемента для захоплення та утримання крапель води (при подальшій роботі установки навколо дроту утворюється льодовий нарост, який бере на себе всі механічні навантаження, які пов'язані з утриманням зростаючої маси льоду на рамці); використовується в якості нагрівача для видалення намороженого льоду.

Досліди проводились за температури довкілля  $-3...-7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Через 15 хвилин роботи крок між бурульками складав 7...8 мм, а діаметр бурульок 3...4 мм.

Після 1 год. 30 хв. з моменту включення при температурі навколишнього середовища мінус  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ , бурульки мали довжину  $l_6 = 50...70 \text{ мм}$  і діаметр  $d_6 = 5...7 \text{ мм}$ . Крок між бурульками зріс до 15...20 мм шляхом поглинання сусідніх бурульок. На дроті діаметром 3 мм середній крок між бурульками складав 20 мм через 3 години з моменту початку подачі води. Поверхня теплообміну складала  $6,8 \text{ м}^2$ .

Діаметр льоду, намороженого навколо дроту, після 7 годин роботи становив біля 15...20 мм – середнє значення 17,5 мм. У верхній частині бурульки зрослися між собою на довжину 100...120 мм.

Час роботи нагрівача для скидання льоду залежить від кількості намороженого льоду. В даній дослідній установці цей час не перевищував 8 хв.

Для аналізу процесу утворення льоду на насадках з дроту та отримання математичних залежностей, якими можна користуватись для розрахунку аналогічних систем наморожування льоду, введена величина відносна маса льоду на один метр довжини насадки та один градус різниці температури кристалізації та температури довкілля  $\bar{m}$ ,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$ :

Маса льоду віднесена до тривалості процесу його наморожування для дроту діаметром 0,5 мм при густині зрошення форсункою  $G=0,014 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$  та температурі зовнішнього повітря  $t_{\text{н}} = -3...-7 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\bar{m} = 4,7 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^{1,37}, \quad (2)$$

де  $\tau$  – час роботи установки, хв.

Для розрахунків використана сумарна довжина насадок дослідної установки, яка становить  $L = 12 \text{ м}$ .

При оптимізації необхідної витрати води коефіцієнти та показник степеня в отриманому рівнянні можуть збільшуватись.

Середню теплову потужність підігрівача повітря, що використовує теплоту кристалізації води, визначили для кожних 30 хв. роботи (рис. 2). При цьому середню кількість теплоти в кДж за період, взяту з графіка, слід поділити на 1800 с. Наприклад, з 1-ї години до 1 год. 30 хв. середня кількість теплоти складає 170 кДж для всієї установки з довжиною дротяної насадки 12 м при середній температурі навколишнього повітря мінус  $5,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Відповідно середня теплова потужність складає  $P=170/1800=94 \text{ Вт}$ .

Сумарна площа робочої поверхні дослідної установки підігрівача з горизонтальними насадками з дроту діаметром 0,5 мм становить  $F_n=0,327 \text{ м}^2$ . Таким чином, в перерахунку на  $1 \text{ м}^2$ , середня теплова потужність з 1-ї години до 1 год. 30 хв. становить  $287 \text{ Вт/м}^2$ .

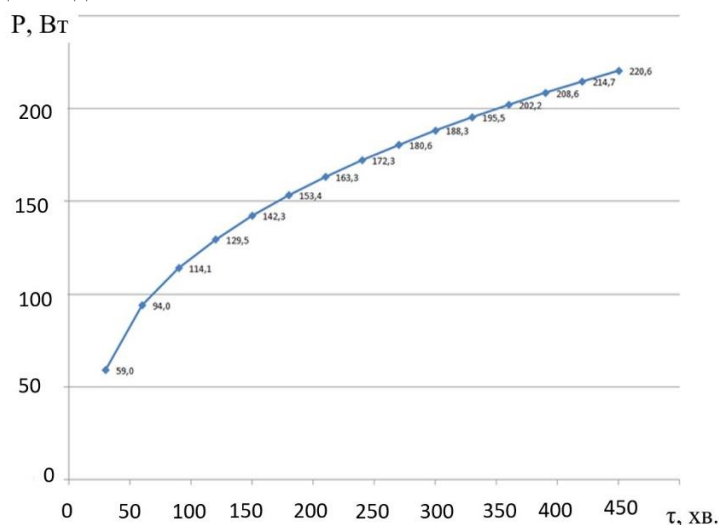


Рисунок 2 – Залежність середньої теплової потужності підігрівача з горизонтальними насадками з дроту діаметром 0,5 мм довжиною 12 м (поверхнева густина зрошення форсункою постійна і складає  $G=0,014 \text{ кг/(с·м}^2)$ , температура зовнішнього повітря  $t_n=-3...-7 \text{ °C}$ ).

#### Аналіз результатів досліджень

Обидва дослідження проведені приблизно в однаковому діапазоні температур. Вважаємо, що середня температура становить мінус  $5 \text{ °C}$ . Відстань між боковими поверхнями насадок – 10 і 29 мм відповідно.

За 3,5 години на дроті діаметром 3 мм намерзло в горизонтальному напрямку 5 мм льоду або 1,42 мм на годину. На 1 градус швидкість зростання складе біля  $0,3 \text{ мм/(год·°C)}$ .

На дроті діаметром 0,5 мм радіус збільшився майже на 9 мм за 7 годин або 1,29 мм за годину, що є близьким до попереднього значення. Можна прийняти, що при мінус  $5 \text{ °C}$  швидкість наростання основи бурульки 1,5 мм за годину. У цьому випадку, при використанні даних для труб, лід насадки повинен досягти половини відстані між насадками за 10,8 години (648 хв.). При цьому максимальна довжина бурульок розрахована спираючись на залежність (1) [11] для  $-5 \text{ °C}$  –  $0,45 \text{ мм/хв}$ . Максимальна довжина складе 0,29 м. Але фактично вона є більшою, а саме 420 мм за 7 год., що вказує на неможливість використання для дроту залежностей, отриманих на трубах.

На дроті діаметром 3 мм максимальна довжина склала 162 мм за 3,5 години (210 хв.). Середня швидкість зростання в довжину  $0,77 \text{ мм/хв}$ . Для середньої довжини 91 мм швидкість складе  $0,44 \text{ мм}$ , що корелюється з розрахованим за рівнянням, отриманим для труб. Але периферійні бурульки мали неоптимальні умови зрошення, хоч вони враховані при визначенні середньої довжини.

На дроті діаметром 0,5 мм робота була закінчена через 7 годин (420 хв.), коли бурульки мали довжину, яка дорівнювала висоті ярусу. При цьому швидкість зростання у довжину складе  $1 \text{ мм/хв}$ . Таким чином, для дротів швидкість зростання бурульок в довжину в оптимальних умовах зрошення складає біля  $0,8...1 \text{ мм/хв}$ . при температурі близькій до  $-5 \text{ °C}$ . В [11] відзначається, що на трубах кількість льоду навколо насадки є більшою, ніж в бурульках, і це співвідношення збільшується з зростанням діаметра труби. Це робить логічним збільшення швидкості подовження бурульок на дротах.

Час роботи установки може бути різним. Його збільшення сприяє підвищенню продуктивності через зростання довжини бурульок та збільшенням поверхні теплообміну.

З часом середня теплова потужність підігрівача з горизонтальними насадками з дроту зростає, що пов'язано зі збільшенням поверхні теплообміну і збільшенням частки льоду, що утворюється з води, яка потрапила на поверхню насадки. Так, для перших 30 хв. роботи усереднене значення частки льоду, що утворився становить 8%, а через 7 год. роботи до 28% води, що потрапляє на насадки, перетворюється в лід.

На  $1 \text{ м}^2$  площі насадок можна отримати від 1 до 4 кВт середньої теплової потужності при температурах повітря  $-5 \dots -10 \text{ °C}$ .

Але збільшення максимально допустимої довжини бурульки призводить до зменшення кількості насадок при заданій площі перерізу установки і, відповідно, до зменшення продуктивності. Тому

збільшувати відстані між насадками слід в межах умов зростання рядів та мінімального перерізу отвору для проходу повітря.

Ми розраховали на основі отриманих даних відстані між насадками і ярусами для 8, 12 і 16 годин роботи при температурах оточуючого повітря  $-5$  і  $-10$  °С. Прийнята питома швидкість нарощування льоду в горизонтальній площині  $0,3$  мм/(год·°С).

Для температури  $-5$  °С ( $1,5$  – мм/°С) маємо половину мінімальної відстані між насадками за 8 годин –  $12$  мм, за 12 годин –  $18$  мм і за 16 год –  $24$  мм, що відповідає відстані між боковими поверхнями насадок  $24$ ,  $36$  і  $48$  мм.

Для температури  $-10$  °С ( $3$  мм/°С) відстані між боковими поверхнями для 8 год –  $48$  мм, для 12 год –  $72$  мм і для 16 год –  $96$  мм.

При збільшенні часу в 2 рази кількість насадок зменшується вдвічі. Зростання часу сприяє продуктивності і степені  $1,37$  або приблизно в степені  $4/3$ . Продуктивність зростає в  $2,58$  рази. Таким чином збільшений час роботи дещо вигідніший збільшенню кількості насадок. Але це ще потрібно перевірити практично, змінюючи число насадок.

Відстань між ярусами для згаданих температур і розрахованого часу знайдена при швидкості зростання  $1$  мм/хв. При температурі  $-5$  °С відстань складе: для 8 год ( $480$  хв) –  $480$  мм. Для 12 год ( $720$  хв) –  $720$  мм і для 16 год –  $960$  мм. Відстань між насадками для підігрівачів повітря повинна бути більшою на  $20...30$  мм, але на відстань між ярусами це не вплине.

При лімітованій висоті установки слід її ділити на 3 яруси з врахуванням габаритів системи зрошення. Наприклад, для температури оточуючого повітря  $-5$  °С та висоті  $3$  м відстань між ярусами повинна бути  $0,6...0,8$  м з відстанню між насадками  $36$  мм. Підігрівати повітря при його початковій температурі  $-5$  °С немає сенсу, тому можлива лише генерація льоду.

У випадку температури оточуючого повітря  $-10$  °С при швидкості зростання довжини бурульок  $2$  мм/хв. і висоті між ярусами  $800$  мм, лід потрібно видаляти через  $400$  хвилин, або біля  $7$  годин. В той час як при температурі  $-5$  °С для цього потрібно  $14$  годин. При підігріванні повітря не слід забувати про додаткову відстань між насадками для проходу повітря.

Для збільшення кількості насадок без зростання сусідніх рядів запропоновано в патенті [15] насадки розміщувати в шаховому порядку. Враховуючи те, що бурульки мають конічну форму.

#### **Висновки**

1. Експериментально досліджено і проведено аналіз зростання бурульок на дротяних насадках.
2. Найменша відстань між паралельними насадками у кристалізаторах-підігрівачах повітря повинна враховувати можливість проникнення повітря.
3. На дротяних насадках за температури оточуючого повітря  $-5$  °С і  $-10$  °С слід приймати збільшення радіуса бурульок в горизонтальній площині біля насадок з дроту  $1,5$  мм і  $3$  мм на годину відповідно. При пошаровому методі виробництва льоду при температурі оточуючого повітря  $-5$  °С товщина льоду зростає на  $1$  мм за годину.
4. Відстань між насадками визначає максимально можливу довжину бурульок, яка впливає на відстань між ярусами.
5. Середня теплова потужність підігрівача повітря зростає з часом. Тривалість роботи установки залежить від відстані між насадками. Проходження повітря блокується змерзанням верхніх частин бурульок сусідніх конгломератів.
6. Підігрівача повітря з горизонтальними насадками з ніхромового дроту не потребує значних капіталовкладень, споживає мінімальну кількість електроенергії, не потребує людської праці для видалення готового продукту, може бути механізована та автоматизована. На  $1$  м<sup>2</sup> площі насадок підігрівача можна отримати від  $1$  до  $4$  кВт середньої теплової потужності при температурах повітря  $-5...-10$  °С.
7. Дротяні насадки забезпечують простий спосіб знімання льоду з насадок пропусканням електричного струму через дріт протягом  $5...10$  хвилин.

#### **Список використаної літератури**

1. M. Farzaneh (ed.). Atmospheric Icing of Power Networks. – Springer, 2008. – P.350
2. Бобков В. А. Производство и применение льда / В. А. Бобков – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 223 с
3. Fikke S., Ronsten G., Heimo A., Kunz S., Ostrozlik M., Persson P.-E., Sabata J., Wareing B., Wichura B., Chum J., Laakso T., Sääntti K., Makkonen L. Atmospheric Icing on Structures COST 727: 2006, Measurements and data collection on icing // State of the Art Publication of MeteoSwiss. – 2007. – Vol.75, P. 110.
4. Ueno K., Farzaneh M. Morphological instability of the solid-liquid interface in crystal growth under supercooled liquid film flow and natural convection air flow. Phys. Fluids, 22(017102), 2010.
5. Ueno K., Farzaneh M., Yamaguchi S., Tsuji H. Numerical and experimental verification of a theoretical model of ripple formation in ice growth under supercooled water film flow. Fluid Dyn. Res., 42(025508), 2010

6. Larszlor E. Kollarr , Farzaneh M. Modeling the evolution of droplet size distribution in two-phase flows // International Journal of Multiphase Flow. – 2007. – Vol.33 – P. 1255-1270.
7. Szilder K. Simulation of ice accretion on a cylinder due to freezing rain // Journal of Glaciology. – 1994. – Vol.40, № 136. – P. 586-594.
8. Пуховой И. И. Энергетические и экологические показатели производства и аккумуляции льда, заготовленного зимой в Украине / И. И. Пуховой, Л. Н. Ляхович // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т.26, № 5. – С. 67-71.
9. Пуховой И. И. Экономия природного газа при замене котлов тепловыми насосами и использовании теплоты кристаллизации воды как альтернативы теплоты грунта зимой / И. И. Пуховой, М. К. Безродный, С. А. Мхитарян // Возобновляемая энергетика. – 2006. – №1. – С. 15-19.
10. Пуховий І. І. Зміна геометричних параметрів зростання конгломератів бурульок на горизонтальних насадках при розпиленні води форсункою / І. І. Пуховий, А. М. Постоленко // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2018. – №4. – С. 63- 68.
11. Пуховой И. И. Образование льда в сосульках и использование теплоты кристаллизации для подогрева воздуха / И. И. Пуховой, А. М. Постоленко // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т.91, № 3. – С. 800 – 806.
12. Авторское свидетельство № 1388665 СССР, МКИ F 24 D 15/00. Система отопления здания / И. И. Пуховой, заявл. 19.03.1986, опубл. 15.04.1988. Бюл. № 14.
13. Пуховой И. И. Система отопления зданий без теплового насоса с использованием природной холодной воды./ И. И. Пуховой // Промышленная теплотехника. – 1992. – Т.14, №1. – С. 57-61.
14. Пуховой И. И. Сравнение систем отопления с непосредственным и теплонасосным использованием воды с потенциалом до 30°C / И. И. Пуховой // Проблемы машиностроения. – 2005. – №2. – С. 23-27.
15. Патент на корисну модель № 93148, Україна, МПК F24C 1/00 F24D 15/00. Охолоджувач-кристалізатор води для підігрівання повітря і генерації льоду в бурульках / І.І. Пуховий, М.Л. Новік, А.М. Постоленко, заявник і патентоутримувач Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, заявл. 25.02.2014, опубл. 25.09.2014. Бюл. № 18.

**I. Pukhovoy**, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0003-4915-9699

**A. Postolenko**, Ph.D., ORCID 0000-0003-0502-8910

**A. Petrechuk**, Ph.D. Student, ORCID 0000-0003-4422-7365

**National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

#### **ABOUT CONSTRUCTIVE FEATURES OF DEVICES FOR PRODUCING ICE IN ICICLES AND THEIR INFLUENCE ON PRODUCTIVITY**

The paper describes the results of research of icicles formation and growth on wire nozzles when water is sprinkling with a striking on a hard surface and (or) use a nozzle for spraying water at ambient temperatures of outside air -3 ... -7 °C. The studies were carried out on wires with a diameter of 3 mm and 0.5 mm with a distance between the nozzles of 10 mm and 29 mm, respectively. Dependences of the ice mass calculating, assigned to one meter of the nozzle and the temperature difference in 1 °C on time, were obtained. The icicles growth process on horizontal nozzles in time has been studied. Values of the growth rate were obtained: in the direction of the radius was 0.3 mm per 1 °C and the elongation rate was about 1 mm per hour at an ambient temperature of -5 °C. The maximum length of icicles depends on the distance between the nozzles. The free section for air flowing is blocked by ice after a while, and the water supply to the icicles is blocked. The required distances between the parallel nozzles are calculated for different air temperatures. Distances between the parallel nozzles have to be extended for increasing section for air flowing if water crystallization heat is used for ventilation systems or heat pumps.

The average thermal power of the installation with wire horizontal nozzles, which can be used to heat the air by the heat of water crystallization, has been determined. The average thermal power increases over time, which is associated with increasing heat exchange surface and part of the formed ice from the water that has fallen on the surface of the packing. For the first 30 min. of work, the average value of the share of formed ice is 8%. After 7 hours. work, up to 28% of the water falling on the nozzles turns into ice. From 1 to 4 kW of average thermal power can be got at air temperatures of -5...-10 °C of the area from 1 m<sup>2</sup> of the nozzles. The specified air heater does not require significant investment, consumes a minimum amount of electricity, does not require human labor to remove the finished product, and can be mechanized and automated. To increase the number of nozzles without the growth of adjacent rows, it is proposed to place the nozzles in a checkerboard pattern.

**Key words:** renewable energy sources, ice, icicle, heat air for ventilation, heat of crystallization, icicles formation, freezing ice rate.

Надійшла 13.11.2021

Received 13.11.2021