

УДК 69.621.58:697.4

І. І. Пуховий, д-р. техн. наук, доц.; А. М. Постоленко, асп.**ДИСПЕРГАЦІЯ ПОТОКУ ВОДИ ЗА МАЛИХ ЇЇ ВИТРАТ
ТА ФОРМУВАННЯ БУРУЛЬОК НА НАСАДКАХ З ДРОТУ**

Досліджені процеси формування бурульок на насадках з дроту під час розпилення води мініатюрною форсункою та з використанням вторинних крапель від гравітаційного удару струменя води, що падає з деякої висоти на тверду поверхню. Виявлені фактори, що впливають на ефективність процесів формування бурульок.

Вступ. Стан проблеми та постановка задачі дослідження

Кристалізацію води з метою отримання льоду в так званих бурулькових льодоградирнях, які працюють при температурах від $-2...-3$ °С, забезпечують розпиленням води в форсунках, направлених вгору та з великою витратою води [1]. Часто використовують рециркуляцію води, що не замерзла, підмішуючи її до живильної води. Такі льодоградирні мають по 2–3 яруси горизонтальних, перехрещених під кутом 90° у сусідніх ярусах, насадок з дерев'яних рейок (жердин). Форсунки також використовують для заморожування сталактитів на вертикальних трубчатих насадках, що обігріваються електричним струмом для скидання сталактитів, які наростають до 1 м в діаметрі [2]. При цьому охолоджену під час розпилення в форсунці воду направляють на конус, що має радіальні відокремлені пластинками сектори з метою розподілу води по сталактитах.

Використання згаданих великогабаритних пристроїв не передбачає утилізації теплоти, що утворюється при кристалізації води. Розвиток відновлюваних джерел енергії вимагає використання теплоти фазового переходу води в лід та відповідної мінімізації обладнання для проведення різних процесів.

Відомі роботи [3, 4], в яких пропонується підігрівати повітря теплотою кристалізації води (335 кДж/кг) перед повітряними тепловими насосами та перед подачею в традиційні калорифери систем вентиляції. У розробці таких підігрівачів повітря потрібні кристалізатори, що відповідають характеристикам обладнання систем опалення та вентиляції зі збереженням принципу заморожування води в бурульках. Кристалізація води в бурульках вимагає обов'язкового охолодження її до температури $+3...0$ °С перед попаданням на насадки, до яких прикріплюються бурульки [5]. Переохолоджені після розпилення краплі не замерзають при русі у повітрі за температур вищих $-20...-25$ °С; Їх кристалізація відбувається лише у разі контакту з твердими основами [6].

Для зрошення насадок використовують різні форсунки, диски та конуси, що обертаються [7, 8, 10], витікання рідини струменем, коли розривають великі краплі на дрібніші шляхом удару об тверду поверхню [7] чи інший струмінь тощо. В [9] пропонується отримувати розпилені краплі води за рахунок просочування через тіло обертового конуса чи циліндра, виконаного з абразивного матеріалу, який пропускає воду.

Метою роботи є виявлення закономірностей розпилення в морозному повітрі малих витрат води та кристалізації в бурульках на горизонтальних дротяних насадках для підвищення ефективності охолодження і розподілу води перед кристалізацією та зменшення габаритів кристалізаторів — підігрівачів повітря, в тому числі без витрат додаткової енергії, використовуючи форсунки та ударний метод подрібнення струменя при гравітаційному падінні на тверду основу. Перший метод можливий за наявності водогону чи насосу, а другий — без них.

**Дослідження формування бурульок на горизонтальних дротяних
насадках з використанням форсунки****Установка та результати експериментів**

На чотирьох стійках розміщені три яруси на відстані 430 мм один від одного. На кожному з

ярусів (або на окремому, в залежності від задачі, що розв'язується) розміщується насадка — рамка, що має розмір насадки 360×330 мм і площу $F = 0,118$ м². Передбачені кріплення для дроту діаметром 0,5 мм по довжині рамки — 12 шт. з кроком 30 мм з кожної сторони; по ширині рамки — 10 шт. з кроком 30 мм з кожної сторони. Для диспергації води використовувались форсунки тонкого розпилу з постійною витратою води біля 2,3 г/с або 8,4 кг/год. Використовувались форсунки з побутового ручного зрошувача.

Під час експлуатації форсунки виявлені такі недоліки:

- за наявності навіть незначної швидкості вітру дрібні краплі води частково уносяться за межі установки, оскільки установка не мала бокових стін ні в районі форсунки, ні біля насадок;
- центральна частина насадок отримувала дещо більшу масу води, що було видно по довжині отриманих бурульок.

Дріт з ніхрому в насадці виконує подвійну функцію. По-перше, він виступає у якості основи та напрямного елемента для захоплення та утримання крапель води. У подальшій роботі установки навколо дроту утворюється льодовий нарост, який бере на себе всі механічні навантаження, що пов'язані з утриманням зростаючої маси льоду на рамці. По-друге, функцією дроту є використання його в якості нагрівача.

Досліди проводились за температури довкілля $-2,7 \dots -7$ °С. Через 15 хвилин роботи поверхня теплообміну складала $F_1 = 1,5$ м² для всієї триярусної насадки. При цьому крок між бурульками складав 7...8 мм, а діаметр бурульок 3...4 мм. При формуванні бурульок з диспергованих крапель на горизонтальному дроті відстань між бурульками, що починають формуватися, і їх початковий діаметр є меншими, ніж у разі формування бурульок з плівки на вертикальній чи нахилений площині (відстань біля 25 мм) [5, 11].

В процесі намерзання великої кількості бурульок спостерігається сповільнення швидкості росту бурульок у довжину і збільшення швидкості росту в поперечному перерізі (діаметру) бурульок. Це пов'язано зі збільшенням поверхні бурульок, їх можливим недостатнім зрошенням при фіксованій витраті води в форсунці.

Основу бурульок складає лід, наморозжений навколо дроту. Діаметр цього наросту після 7 годин роботи складає біля 15...20 мм. У верхній частині бурульки зрослись між собою на довжині 100...120 мм від дроту.

Час роботи нагрівника для скидання льоду залежить від кількості намороженого льоду. У дослідній установці цей час не перевищував 8 хв.

Обробка та аналіз отриманих експериментальних даних

Дослідження з використанням насадок із дроту проводились таким чином. Установка після введення її в роботу працювала визначений проміжок часу, після чого подача води до форсунки припинялась і включався електронагрівник. Вироблений лід кожного разу збирався у ємність і розтоплювався з вимірюванням маси води. Потім установка знову працювала довгий проміжок часу.

Для аналізу процесів виробництва льоду введені такі величини:

- відносна маса льоду на 1 градус та 1 м² площі рамок насадки, кг/(К м²)

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t F} = \frac{m}{(t_0 - t_n) F};$$

- відносна маса льоду на 1 градус та 1 м насадки, кг/(К·м)

$$\bar{m} = \frac{m}{\Delta t L} = \frac{m}{(t_0 - t_n) L},$$

де m — маса виробленого в установці льоду за певний проміжок часу, кг; Δt — різниця температур t_0 і t_n , °С; t_0 — температура плавлення (твердіння) льоду, яка дорівнює 0 °С; L — довжина насадок дослідної установки льодогенератора (довжина дроту), м; t_n — середня температура навколишнього середовища на певному етапі роботи експериментальної установки в процесі заморожування льоду, °С; F — площа робочої поверхні насадок, що розрахована за розмірами рамок, м².

Для розрахунків використані такі величини: сумарна площа робочої поверхні дослідної установки льодогенератора з насадками у три яруси $F = 0,327 \text{ м}^2$; довжина насадок дослідної установки $L = 11,88 \text{ м}$.

В результаті обробки результатів дослідів отримані такі залежності показників від часу τ :
 – маса льоду, віднесена до площі насадки та температурного напору

$$\dot{m} = 1,7 \cdot 10^{-3} \tau^{1,37}, \text{ кг}/(\text{К м}^2);$$

– маса льоду, віднесена до довжини насадки та температурного напору, $\text{кг}/(\text{К}\cdot\text{м})$

$$\bar{m} = 0,47 \cdot 10^{-3} \cdot \tau^{1,37}.$$

За оптимізації конструкції триярусної установки коефіцієнти та показник степеня в отриманих рівняннях можуть збільшуватись. Розглядаючи виробництво льоду між 90 та 780 хвилинами (1,5...8 годин), встановлено, що виробляється, відповідно, 0,3...2,5 $\text{кг}/\text{К}$, (100,5...837 $\text{кДж}/\text{К}$) або за різниці температур 5°C – 502...4188 кДж .

З часом теплова потужність зростає: за період між 400...480-ю хвилинами середня потужність при $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ була біля 350 Вт. На 1 м^2 площі насадок можна отримати від 1 до 4 кВт при $\Delta t = 5-10^\circ\text{C}$.

Дослідження кристалізації в бурульках з використанням низьконапірного гравітаційного струменево-ударного розпилювача

Дослідження проведені спільно з магістром Новік М. Л.

Досліджене низьконапірне (натиск до 0,35 м вод. ст.) розпилення потоку рідини, що витікає з тонкого дна посудини через отвір малого діаметра (0,2...0,6 мм) під дією сил гравітації методом удару струменя об тверду поверхню. У градирнях з великими витратами води такий метод широко використовується. Зрошувальний пристрій складається з чотирьох посудин, при цьому всі вони мають у нижній частині по одному отвору різного діаметра, виконаному голкою в кришці пластмасової пробки для забезпечення різних витрат води. Виконувалося періодичне додавання води в робочу посудину з підтриманням напору води 270...300 мм. Зміна напору становила не більше 10 % і мало впливала на витрату води. Потік рідини падав на поверхню удару і розбивався об дерев'яну пластину шириною 44 мм на краплі. При підтриманні напору води в ємності на рівні 270...300 мм витрати рідини в чотирьох посудинах становили відповідно 0,39, 0,52, 0,58 та 0,87 $\text{г}/\text{с}$.

Для дослідження радіуса розлітання крапель первинного струменя на пластині розміщувався аркуш паперу і відкривався отвір для подачі води. Струмінь падав на аркуш паперу, залишаючи «сліди», при витраті 0,58 $\text{г}/\text{с}$ зміна висоти у діапазоні 230...1270 мм забезпечувала радіус розбрикування 5...37 мм.

Максимальний радіус розбрикування вторинних крапель води

Лінійна апроксимація результатів дослідження максимального радіуса розлітання вторинних крапель води в залежності від висоти падіння струменя при вимірюванні на одному рівні з поверхнею удару в діапазоні висот $h = 430...1270 \text{ мм}$ та з витратою 0,58 $\text{г}/\text{с}$ має такий вигляд:

$$R = 0,1241 \cdot h + 142,33.$$

Зі збільшенням витрати води G , $\text{г}/\text{с}$ (отвори більшого діаметра) радіус розлітання вторинних крапель R , мм, збільшується. Ця залежність для висоти 760 мм узагальнена рівнянням

$$R = 222 \cdot G + 101,5.$$

Максимальний радіус розлітання вторинних крапель залежить також від відстані між поверхнею удару до нижчерозташованих площин, що визначається траєкторією падіння крапель. Радіус розлітання крапель швидко зростає від значення $R = 240 \text{ мм}$ при вимірюванні на одному рівні з поверхнею удару ($\Delta h = 0 \text{ мм}$) до $R = 360 \text{ мм}$ при $\Delta h = 500 \text{ мм}$. З подальшим віддаленням від поверхні удару крапля вже практично падає у вертикальному напрямку. На

відстані, більшій 450...500 мм, при зрошуванні поверхонь, розташованих нижче від поверхні удару немає сенсу розміщувати насадки для зрошення. Зі значеннями $\Delta h = 0...500$ мм залежність описується рівнянням (витрата 0,58 г/с, висота падіння струменя 760 мм)

$$R = -0,0006 \cdot (\Delta h)^2 + 0,5268 \cdot \Delta h + 240.$$

Якщо відстані від поверхні удару до нижчерозташованих площин, більші 500 мм, то можна вважати, що максимальний радіус розбризкування є 350...400 мм.

Дослідження утворення бурульок при зрошенні паралельних дротяних насадок ударним розпилювачем

Насадки з дроту діаметром 3 мм і відстанню між паралельними дротинами 13 мм розміщувалися нижче поверхні удару на 240 мм. Витрата рідини змінювалась від 0,58 до 1,1 г/с (збільшення витрати досягалось роботою двох зрошувачів). На поверхні удару біля бокових граней було 6–8 центрів формування крапель, які падали на насадки і формували найдовші бурульки у центрі (рис.). Переважна кількість рідини, що замерзала в бурульках, була в зоні радіусом меншим 170 мм, що видно по довжині бурульок.

Льодяні нарости, утворені навколо сусідніх насадок у центральній частині насадок, через 4 години зрослися між собою, що призвело до блокування вільного перерізу для протікання води і відповідно повільнішого збільшення бурульок у розмірах у цій частині насадок. Краплі води затримувалися на суцільній поверхні льоду, утвореного на насадках у верхній їх частині.



Вигляд насадок та бурульок після завершення експериментів

За допомогою лінійки вимірювалися значення довжини та діаметра бурульок по закінченню дослідження. Максимальна довжина бурульок склала 270 мм, середня довжина – 140 мм. При цьому, найбільший діаметр бурульок становив 13 мм, а його середнє значення – 9 мм. Середня відстань між осями сусідніх бурульок уздовж насадок дорівнювала 20 мм.

Також замірявся радіус площі, утвореної бурульками на насадках, який дорівнює радіусу розбризкування води після падіння на поверхню удару. У разі вимірювання на рівні насадок радіус розлітання вторинних крапель становив приблизно 340 мм (відстань від точки падіння струменя до найвіддаленіших бурульок, утворених на насадках). При цьому було з'ясовано, що основна маса бурульок із розмірами, близькими до середніх, була зосереджена в радіусі, який становив приблизно 170 мм. Можемо зробити висновок, що при гравітаційному методі диспергування води з метою утворення бурульок на горизонтальних насадках для ефективного використання внутрішнього об'єму кристалізатора необхідно розміщувати сусідні зрошувачі на відстані приблизно 320...350 мм один від одної. З таким розміщенням зрошувальних пристроїв радіуси розлітання вторинних крапель перекриватимуть один одного і утво-

рюватиметься льодяна маса із бурульок, приблизно однакових за довжиною та діаметром.

Під час проведення експерименту був практично відсутній вітер, тому можна вважати умови близькими до вільної конвекції. Температура повітря поступово зменшувалася від -3 до -6 °С.

У вторинних краплях є біля 50...70 % початкової води. Розпилювання рідини забезпечувало охолодження рідини від 8...10 °С до 0...2 °С. Маса льоду розраховувалась за геометричними характеристиками бурульок та наросту на дротяних насадках. З другої години був включений в роботу сусідній розпилювач, що забезпечило кращі умови кристалізації у відповідності до площі бурульок і температури довкілля.

Теплова потужність, яка йшла на нагрівання повітря біля дев'яностаї хвилини складала 12 Вт, а біля 240 хвилини 104 Вт.

Обробка результатів показала, що маса льоду зростала з часом в степені 1,8 в порівнянні з 1,37, отриманому авторами при фіксованій витраті води форсункою, що можна пояснити кращим зрошенням насадок.

Висновки

1. Диспергація води форсункою та гравітаційним ударом сприяють зменшенню габаритів кристалізатора, підвищенню ефективності охолодження та розподілу води по насадкам. Гравітаційне розбризкування зменшує винесення крапель у повітря та не потребує енергії на диспергацію крапель, але у разі розподілу води форсункою висота кристалізатора зменшується.

2. В ударному розпилювачі слід установлювати зрошувачі чи виконувати сопла (отвори) на відстані між ними 300...400 мм, для вирівнювання витрати по площі, а насадки — нижче поверхні удару до 300...350 мм.

3. Виробництво льоду і тепла потужність установок із дослідженими методами зрошення насадок для підігрівання повітря теплотою кристалізації зростає з часом у степені 1,37...1,8, і за оптимізації конструкції та технологічних режимів може досягти квадратичної залежності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бобков В. А. Производство и применение водного льда. / Бобков В. А. — М. : Госторгиздат. — 1961. — 167 с.
2. Касаткин Ф. С. Градирия системы Клейменова для изготовления льда / Касаткин Ф. С. // Холодильная промышленность. — 1937. — № 1. — С. 27—28.
3. Економія природного газу при заміні котлів тепловими насосами та використання теплоти кристалізації води, як альтернативи теплоті ґрунту / І. І. Пуховий, М. К. Безродний, Н. М. Мхітарян, С. О. Кудря // Відновлювана енергетика. — 2006. — № 1. — С. 15—19.
4. Пуховой И. И. Тепловые насосы, потребляющие электроэнергию по цене ночного тарифа и использующие тепло сточных вод и кристаллизации воды. В кн. Малая энергетика в системе обеспечения эконом. безопасности государства / под ред. Вороновского Г. К., Недина И. В. — К. : Знання України. — 2006. — С. 152—156.
5. Пуховий І. І. Експериментальні дослідження процесів формування водного льоду в штучних бурульках / І. І. Пуховий, Л. М. Ляхович // Енергетика: Економіка, технології, екологія. — 2004. — № 1. — С. 41—44.
6. Сморгин Г. И. Теория и методы получения искусственного льда / Г. И. Сморгин. — Новосибирск : Наука. Сиб. Отд. — 1988. — 282 с.
7. Посохин В. Н. Перспективные конструкции увлажнителей воздуха на основе пористых вращающихся распылителей / В. Н. Посохин, Р. Г. Софиуллин // Журнал АВОК. — 2005. — № 3. — С. 21—23.
8. Пуховий І. І. Розробка та гідродинамічні дослідження бурульового льдогенератора, що використовує природний холод / І. І. Пуховий, В. В. Живиця // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — Серія теплоенергетики. — 1997. — № 1. — С. 26—28.
9. Пуховий І. І. Диспергація води в тепломасообмінних апаратах ударом гравітаційного струменя об тверду поверхню / І. І. Пуховий, М. Л. Новік // Відновлювана енергетика XXI століття : матеріали XI міжнар. наук. конференції, Крим, Миколаївка, 13—17 вересня 2010 р. — К. : ТОВ Видавництво «Вікторія» 2010. — С. 126—127.
10. Пажи Д. Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. — М. : Химия. — 1984. — 256 с.
11. Пуховий І. І. Нестійкість Тейлора при формуванні крапель і бурульок з плівки води на краю вертикальної труби та нахиленої пластини / І. І. Пуховий, Л. М. Ляхович // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2003. — С. 48—51.

Рекомендована кафедрою теплоренергетики

Стаття надійшла до редакції 21.02.12
Рекомендована до друку 17.03.12

Пуховий Іван Іванович — доцент, **Постоленко Андрій Михайлович** — аспірант.

Кафедра теоретичної та промислової теплотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ