

УДК 69.621.58

І.І. Пуховий, М.О. Кривошеєв

**ТЕЧІЯ ТА ЗАМЕРЗАННЯ ВОДИ НА ВЕРТИКАЛЬНИХ ПОВЕРХНЯХ
ПРИ ЗРОШЕННІ ЇХ КРАПЛЯМИ ВІД РОЗПИЛЕННЯ УДАРНОМ**

The paper under scrutiny studies the hydrodynamic parameters in the flow and wetting of solid metal plates and vertical grids of different materials under isothermal water flow and at its freezing on these surfaces. We conduct the experiments on water ice generation of the vertical galvanized metal and polymer plates with wetting density less than at the known minimum density of water wetting on dry and wet vertical surfaces. Ice formation and water cooling are conducted by water contact with frosty air. Water dispersion is provided by a blow on the horizontal surface of narrow vertical jets of successive water drops flowing from several pipes 1 mm in diameter. The pattern of wetting, water flow and ice formation observed on the vertical plates of different materials and structures have the same character as continuous films in the impact area of droplets to form streams (rivulets). If a grid square is assigned to both sides or to the side area of a continuous plate, the heat transfer coefficient is about 30 W/(m² K).

Вступ

При роботі холодильних машин, які базуються на охолодженні повітря чи рідини у випарнику, часто виникає потреба в акумуляторі холоду, який дає змогу зменшити потужність холодильної установки при пікових холодильних навантаженнях і економити кошти за рахунок використання електроенергії за зниженими тарифами (наприклад, вночі). При цьому найкраще запасати холод шляхом акумулювання льоду. Виробництво льоду пов'язане з передаванням теплоти від повітря з негративними температурами до води або іншої речовини, що замерзає, через стінку ємності. Ємностями можуть бути поліетиленові капсули [1] чи мішки. Такі капсули, наповнені водою чи іншими речовинами, французької фірми СІАТ мають діаметр 91 та 77 мм. При використанні холоду з акумулятора тепле повітря (чи рідина) обтікає такі ємності й охолоджується. Нами запропоновано використання замість ємностей спеціально сформованих штучних бурульок чи інших льодяних утворень на вертикальних насадках при безпосередній передачі теплоти і холоду, виключаючи стінку, яка розділяє повітря і воду (лід), що підвищує теплопередачу від повітря до замерзаючої води і від льоду, який тає, до повітря, що охолоджується.

Утворення бурульок на горизонтальних насадках із рейок і дроту досліджувалось у [2, 3]. У [2] лід добували в промислових масштабах, поливаючи з форсунки рейки з дерева і видаляючи бурульки механічно вручну. В [3] за рахунок використання дроту лід видалявся пропусканням електричного струму через цей дріт.

Для акумулювання льоду без його видалення з насадки спосіб із бурульками не є продуктивним на початкових стадіях утворення

бурульок, коли їх поверхня теплообміну з повітрям є малою через невелику довжину. Площу теплообміну можна збільшити через використання плівкового потоку по вертикальних насадках. При цьому наявна значна початкова поверхня плівки, з якої лід не потрібно знімати у випадку використання його для акумулювання холоду – він періодично розтає. Звичайно, на нижньому краю насадки також будуть утворюватись бурульки, які додатково збільшать площу теплообміну з повітрям. Використання такого акумулятора в системах кондиціонування може додатково забезпечити осушування повітря або його зволоження.

Фазовий перехід води в лід вимагає подачі води з малою витратою відповідно до інтенсивності теплообміну з повітрям, тому виникає проблема диспергації невеликих мас води і її розподілення поверхнею вертикальних насадок. У цій роботі із міркувань конструктивності та надійності значну увагу приділено вибраному нами ударному методу диспергації води паралельними струменями, що виходять з труби, розміщеними в одній вертикальній площині, та подальшому розподілу вторинних крапель води по пластинах й інших дослідних поверхнях. У доступній літературі нам не траплялися подібні дослідження диспергації рідин.

Відомі дослідження, в яких вивчалась динаміка зіткнення поодиноких крапель води з гідрофобними поверхнями, температура яких менша і більша 0 °С та з кутами нахилу від 0 до 30 °С [3, 4]. Ці дослідження проводились з метою розроблення поверхонь, які не були б схильні до заледеніння. Вивчалось зіткнення крапель води із гідрофільними, гідрофобними та надгідрофобними поверхнями з від'ємною температурою. Надгідрофобні поверхні створю-

вались за допомогою нанесення спеціальних наноструктур на поверхні, що досліджувались. Спостерігалось падіння крапель радіусом кілька міліметрів з висоти 0,1 м на кремнієву підкладку, температура якої варіювалася від +20 до -35 °С. Температура крапель також не була константою і змінювалася в межах від -5 (переохолоджена крапля) до +60 °С.

Вивчались процеси механічного руйнування крапель води при зіткненні цієї краплі з твердою поверхнею або плівкою рідини при відносно низьких швидкостях [5] та температурах вище 0 °С.

У наведених нижче дослідженнях, на відміну від [4, 5], удар відбувався не поодинокими краплями, а струменем, який розривався на серії послідовних крапель з одночасним утворенням плівки на поверхні удару. Фактично струмінь з первинними краплями падав на поверхню тонкої плівки.

Постановка задачі

Метою дослідження є вивчення гідродинамічних параметрів при течії та змочуванні суцільних металевих вертикальних пластин і сіток з різних матеріалів в умовах ізотермічної течії води та при її замерзанні на згаданих поверхнях, а також теплових питомих характеристик при виділенні теплоти фазового переходу води в лід і передачі її в повітря, що підігривається. Дослідження проводяться з метою створення акумуляторів холоду та підігрівачів повітря теплотою кристалізації води.

Експериментальні установки та результати досліджень

Для дослідження льодоутворення на вертикальних пластинах, які змочуються краплями води, було створено дві експериментальні установки. Схему установки 1 показано на рис. 1. На рис. 2 продемонстровано конструкцію зрошувального пристрою з соплами. Змочування вертикальних пластин відбувалося за рахунок диспергування води ударом об тверду поверхню (рис. 1, 3). Для отримання крапель води її потік подавався до горизонтально розміщеної трубки (див. рис. 1) довжиною 560 мм та діаметром 15 мм. У нижню частину трубки були врізані чотири сопла внутрішнім діаметром 1 мм, відстань між якими 75 мм. Витрату води через сопла змінювали вручну відкриванням вентиля від міського водогону. Для підвищення точнос-

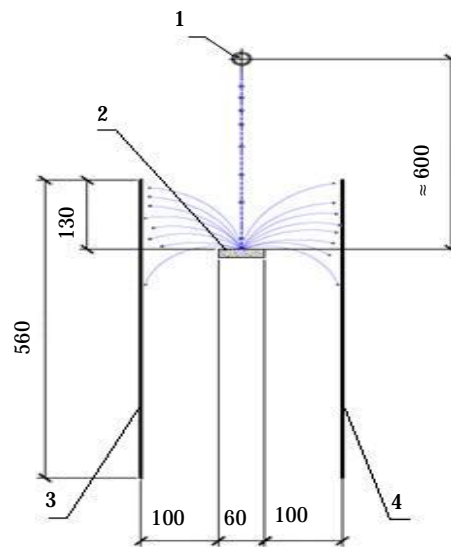


Рис. 1. Установка 1: 1 – труба подачі води з соплами (4 шт); 2 – ударна розбризкувальна поверхня; 3 – вертикальна металева сітчаста пластина; 4 – вертикальна полімерна сітчаста пластина

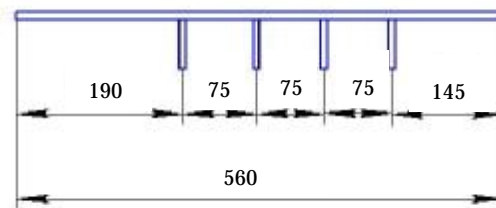


Рис. 2. Конструкція зрошувальних пристроїв 1 і 2

ті робили серію замірів витрати води через кожне сопло зрошувального пристрою на початку та при завершенні досліду за допомогою мірних циліндрів ємністю 100 мл та ціною поділки 1 мл. Вимірювання часу здійснювалось за допомогою секундоміра. Така точність вимірювання є задовільною при малих витратах води, які були в дослідах.

Установка 1 була змонтована за межами лабораторії на відкритому повітрі та працювала при температурі нижче 0 °С. Після охолодження її компонентів протягом приблизно однієї години в трубопровод та зрошувальний пристрій подавалась вода, яка через чотири сопла надходила на ударну поверхню.

Краплі, що утворювались після зіткнення з поверхнею, розлітались і осідали на вертикальних пластинах чи сітках до 40 % від загальної витрати. Проведено спеціальне дослідження з вимірюванням витрати води, що залишається на поверхні удару, та витрати води на виході з сопел. Різниця між другою і першою величиною показувала кількість диспергованої води



Рис. 3. Розбризування крапель води з поверхні удару

ударом. Нерозпилена вода стікала з ударної поверхні й також використовувалась для кристалізації. Вода, яка потрапляла на пластини, поступово стікала вниз. Оскільки температура зовнішнього повітря була від'ємна, то вода поступово охолоджувалась в атмосферних умовах, а на вертикальних поверхнях (насадках) утворювався лід. Установа працювала протягом кількох годин, потім насадки знімалися та вивчалась картина, що утворилася на їх поверхнях.

Схему дослідної установки 2 наведено на рис. 4 і 5. Експериментальний вертикальний канал перерізом 130×330 мм, де відбувалися процеси розбризування, змочування вертикальних пластин та льодоутворення установки 2, являє собою дерев'яну конструкцію (рис. 6, вертикальний переріз). Відстань між стійками 130 мм. Із двох боків установка має скляні прозорі стінки з подвійним склом висотою 1120 мм та шириною 480 мм (з боку прозорої стінки відстань між стійками становить 330 мм).

Зовнішнє повітря з від'ємною температурою забиралось вентилятором 6 з витратою близько 100 м³/год і за допомогою повітропроводу 7 надходило до впускної камери 3 експериментального каналу, де, підіймаючись, контактувало з водою, що подавалась насосом 5 або з водогону, та розбризувалась об ударну поверхню і текла назустріч потоку повітря. Вода розпилювалась так само, як описано вище для установки 1. За рахунок контакту з водою та льодоутворення повітря підігрівалось.

Установа перебувала у приміщенні, що опалювалось, тому для мінімізації теплонадходжень повітропроводи і поверхня експериментального каналу були теплоізовані. Для встановлення стаціонарного режиму включався вентилятор і холодне повітря подавалось до тих

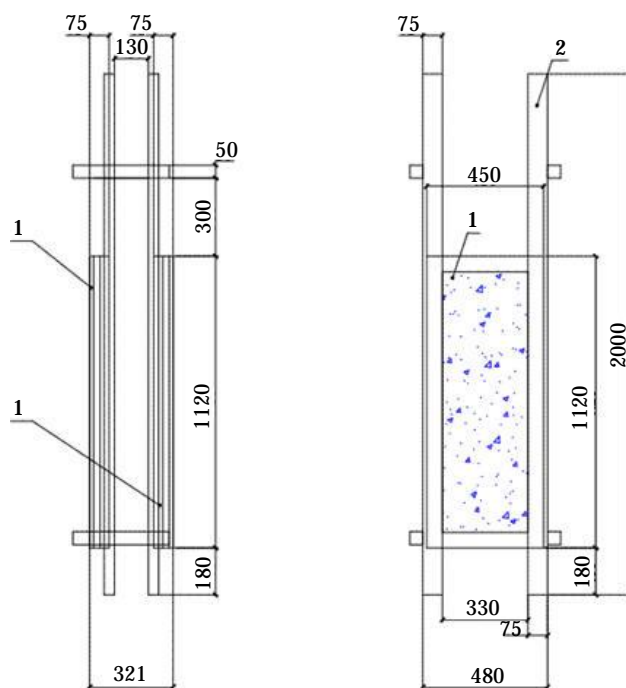


Рис. 4. Конструкція експериментального каналу дослідної установки 2: 1 – прозора стінка установки; 2 – вертикальні стійки

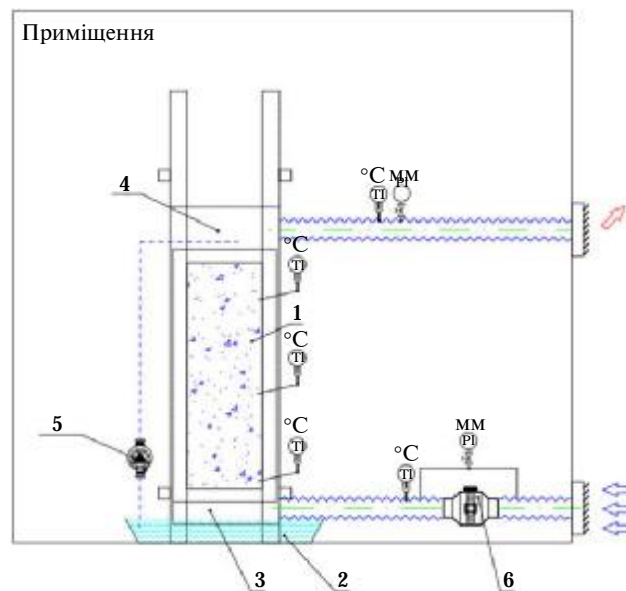


Рис. 5. Схема установки 2: 1 – прозора стінка установки; 2 – піддон з водою; 3 – впускна камера; 4 – повітряна випускна камера; 5 – рециркуляційний насос; 6 – каналний вентилятор; 7 – повітропровід; P1 і T1 показують місця установки датчиків тиску та температури

пір, доки температура на виході установки не переставала змінюватися. Зазвичай це потребувало від 40 до 80 хв.



Рис. 6. Краплі в струмені

Під час проведення дослідів вимірювались такі величини:

- витрата по кожному соплу, на початку та після завершення дослідів;
- температура у приміщенні, де була розташована установка 2;
- температура зовнішнього повітря;
- час роботи установки;
- маса льоду, що утворювалась;
- витрата вентилятора;
- температури повітря після вентилятора, в нижній частині установки, на рівні ударної пластини та на виході з установки.

Характер течії води та утворення льоду на вертикальних поверхнях з різних матеріалів

Зрошення сталевих оцинкованих пластин.

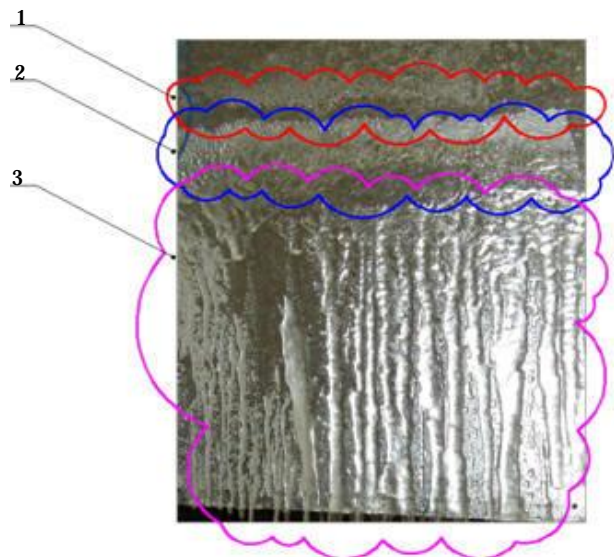
При проведенні дослідів на поверхні вертикальних пластин утворювалась типова картина, яку наведено на рис. 7, а, б. На пластинах можна виділити три характерні зони:

- 1 – зона суцільного змочування висотою від 100 до 150 мм від крапель з ударної поверхні (на рис. 7, а позначена як 1). Тут формується суцільна плівка води, а при подачі холодного повітря – суцільний шар льоду. У цій зоні відбувалася коалесценція окремих крапель, що викликало стікання таких об'єднаних крапель з одночасним поглинанням розташованих нижче крапель на вертикальній пластині;

- 2 – перехідна зона, у ній спостерігалось формування окремих струмків, перехід до струменів;

- 3 – у цій зоні можна чітко виділити окремі струмені (в літературі трапляються назви “цівки” та “ривулетти”). Ця картина є характерною, вона спостерігалась при різних витратах і температурах води та повітря. Окремі струмені чітко оформлені в зоні 3.

При від'ємній температурі навколишнього повітря краплі охолоджувалися до температури кристалізації і відбувалося їх замерзання на вертикальній пластині.



a

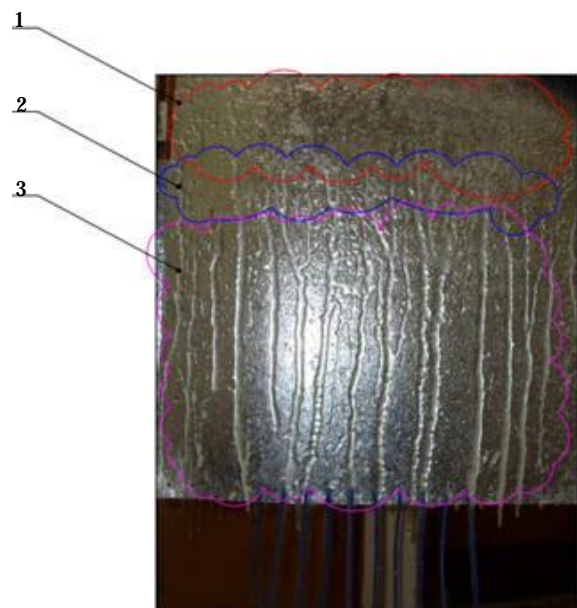


Рис. 7. Густина зрошення, г/(м·с): 1,2 (а) і 1,8 (б)

Вплив руху повітря, що подавалося вентилятором, на формування описаної картини був незначним, бо значення швидкості повітря коливалося в межах 0,1–0,15 м/с.

У серії дослідів, коли установка 1 була змонтована в атмосферному середовищі, швидкість повітря коливалась у широкому діапазоні від 0,5 до 5–6 м/с, також хаотично змінювався і напрямок вітру. Вітер був непостійний, поривами. Вплив швидкості та напряму повітря в цьому випадку на формування льоду зафіксувати було складно.

Зрошення сіток. З метою оцінки впливу матеріалу, на якому формуються струмені, проведено дослід, коли вертикальні пластини з гладкого металевго листа були замінені на металеву (дворядна сітка з вічками 1 мм (рис. 8)) та полімерну сітчасті поверхні.

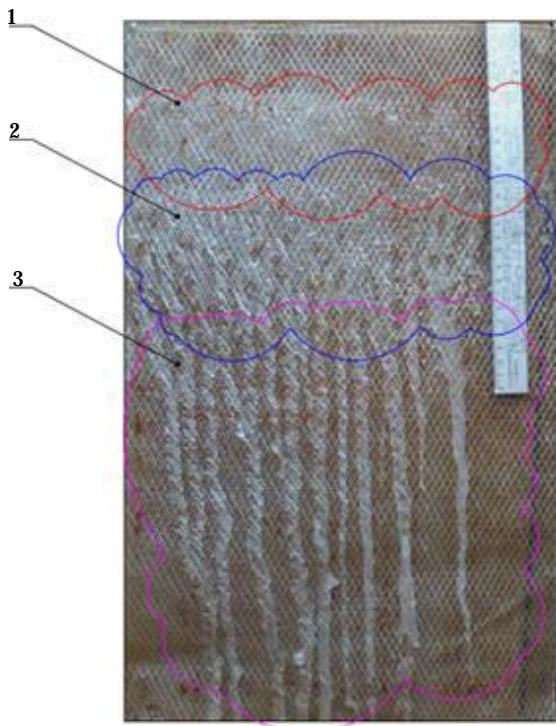


Рис. 8. Замерзання води на сітці; густина зрошення 1,8 г/м·с

Видно, що характер течії схожий на описаний вище при використанні суцільних пластин.

Для імітації поверхні з сітки з невеликими вічками була використана марля. Проведені на обох установках дослід з марлею засвідчили, що при існуючих витратах води вся поверхня також змочується з утворенням рівчаків (струменів). При цьому густини зрошення в 20–30

разів були меншими від відомої мінімальної при подачі на суху поверхню вертикальних труб і пластин ($\Gamma = 0,03\text{--}0,05$ кг/(м·с)). Зона 1, де є суцільна турбулізована ударами крапель плівка дуже малої товщини, може бути використана в спеціальних теплообмінниках або для інтенсивного охолодження елементів машин чи апаратури.

Теплові характеристики при підігріванні повітря теплою кристалізацією і акумулюванні льоду

Щоб оцінити потужність установок з передачі теплоти і потужності акумуляції холоду, були проведені дослідження одночасного утворення льоду на двох пластинах: з оцинкованої сталі та на марлі. Утворені льодяні вертикальні циліндри на сітці розділені по їх центру площиною сіток, між якими також є проміжки, тому сітка забезпечує до моменту зростання циліндрів між собою (за тривалого часу роботи) більшу поверхню теплообміну і, відповідно, потужність на одну насадку.

Зрошення суцільних оцинкованих пластин в атмосфері. Дослідами при середній витраті води 3,325 г/с було визначено, як зазначалося вище, що на пластини потрапляє до 40 % диспергованої ударом води від загальної витрати G . Цю частину ми врахували коефіцієнтом розпилення k_p . Для умов проведення дослід k_p становив 0,35. Проведено розрахунки різних величин.

Середня витрата розпиленої води на одну пластину при загальній подачі з сопел G становить

$$m_B = k_p G = \frac{0,35 \cdot 3,325}{2} = 0,582 \text{ г/с.} \quad (1)$$

Середня густина зрошення:

$$\Gamma = \frac{m_B}{\Pi} = \frac{0,582}{0,33} = 1,76 \text{ г/(м} \cdot \text{с)}, \quad (2)$$

де Π – змочуваний периметр: ширина пластин і сіток.

При зменшенні витрати води на раніше змочену пластину Γ_{\min} становить за літературними даними приблизно 9 г/(с·м). У наших дослідах Γ була приблизно в п'ять разів менша. В зоні розбризкування вся поверхня була змочена.

Розпилення відбувалося ударом об дерев'яну рейку шириною 60 мм. Відстань по горизонталі від центра рейки до кожної пластини становила 130 або 100 мм від кожного краю. Температура довкілля була 0–2 °С. Невеликі від'ємні температури при обробці даних дають похибки, але опрацьовані результати виявили, що при віднесенні до площі пластини середня інтенсивність теплообміну становила близько 30 Вт/(м²·К). Більш точно проведено дослід в експериментальному каналі на марлі, який нижче детально оброблено.

Марлева насадка в експериментальному каналі. Ширина марлевої насадки становила 0,37 м, а довжина – 0,84 м. Досліди проводили при подачі холодного повітря за допомогою вентилятора. Середня витрата води з сопел дорівнювала 6,13 г/с.

Середня витрата води на одну сторону визначається так:

$$m_v = k_p G = \frac{0,37 \cdot 6,13}{2} = 1,135 \text{ г/с.}$$

Середня густина зрошення на одну насадку з марлі при ширині П становить

$$\Gamma = \frac{m_v}{P} = \frac{1,135}{0,37} = 3,07 \text{ г/(м} \cdot \text{с).}$$

Температура на вході в установку дорівнювала близько –5,5 °С, на рівні зрошувача – –0,4 °С (середня – –3,5 °С). Відстань від центру удару до пластин була 80 мм.

Маса намороженого льоду за дві години – 1,36 кг, або 8,75 кг на годину на квадратний метр насадки. Для отримання за годину 1 т льоду потрібно 114 м² насадки, а середня потужність апарата для акумулювання льоду буде близько 9 кВт при різниці температур 3,5 °С. У досліді за рахунок теплоти кристалізації води λ за дві години виділилась теплова енергія:

$$Q = \lambda \cdot m = 334 \cdot 1,36 = 454,24 \text{ кДж.}$$

Середня потужність становить

$$q_{\text{ср}} = \frac{454,24}{2 \cdot 3600} = 63 \text{ Вт.}$$

Площа марлі дорівнює

$$F = 0,37 \cdot 0,84 = 0,3108 \text{ м}^2.$$

Інтенсивність теплообміну на одну насадку (дві сторони) становить

$$q = \frac{q_{\text{ср}}}{F \cdot \Delta t} = \frac{63}{0,3108 \cdot 3,50} = 57,91 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К).}$$

Враховуючи утворення льоду з двох сторін марлевої насадки, середня інтенсивність теплообміну при віднесенні до повної площі насадки становить близько 29 Вт/(м²·К).

Отже, теплота передається не тільки конвекцією, а й випромінюванням та випаровуванням, що видно при порівнянні отриманих нами результатів з розрахунками конвективного теплообміну при вільній конвекції і вимушеній конвекції при зафіксованій в досліді швидкості повітря в експериментальному каналі. Відзначимо, що в зоні входу повітря в канал товщина отриманого льоду була найбільшою через високу швидкість повітря в повітропроводі, що йде від вентилятора.

Надалі потрібні дослідження протягом часу, достатнього для зростання льодяних утворень між собою.

Висновки

У зоні акумуляції подрібнених ударом крапель на вертикальних плоских насадках по висоті 100–150 мм забезпечується повне змочування пластин і сіток при густинах зрошення в 25–30 разів менших, від знайдених у літературі, при подачі на суху вертикальну поверхню і приблизно в п'ять разів – на попередньо змочених поверхнях за використання інших методів формування плівки.

Зафіксований ефект зменшення мінімальної щільності зрошення при ударі крапель може бути використаний у теплообмінниках та при охолодженні обладнання, враховуючи малу товщину плівки та її турбулізацію краплями, що летять з великою швидкістю від поверхні удару.

Потік формується в окремі вертикальні струмки нижче зони впливу падаючих на поверхню крапель незалежно від матеріалу поверхні і його структури (суцільна поверхня, сітка з малими та великими вічками, сітка з металу, синтетичної чи бавовняної нитки).

При льодоутворенні на сітках і марлі матеріал сіток розташовується посередині льодяних циліндрів навіть при зрошенні однієї сторони сіток, тому вони мають перева-

гу як насадки завдяки збільшенню поверхні теплообміну.

При віднесенні теплообміну до площі насадки середня його інтенсивність становить близько 30 Вт/(м²·К) на одну сторону вертикальної насадки. Для забезпечення теплового насосу низькопотенційним джерелом теплоти потужністю 6 кВт у вигляді підігрітого повітря до температури близько 0 °С при температурі атмосферного повітря –10–15 °С потрібна площа сітки контактного апарата становитиме 10–12 м². Із врахуванням буру-

льок у нижній частині насадки її площа може бути зменшена на 20–30 %, що потребує подальшого дослідження.

При середній температурі холодного повітря –10 °С для отримання за годину однієї тони льоду потрібно близько 40 м² насадки з сітки.

У подальшому варто провести дослідження протягом доби або кількох діб, щоб отримати залежність характеристик апарата від часу, особливо важливо знайти час до зростання льодяних циліндрів на пластинах і сітках між собою.

1. *Бондарь Е.С.* Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха с аккумуляцией холода. – 10.02.2006. – Режим доступа: www.sun-ice.com.ua/news/
2. *Бобков В.А.* Производство и применение водного льда. – И.: Госторгиздат, 1961. – 168 с.
3. *Пуховий І.І., Безродний М.К., Постоленко А.М.* Процес виробництва льоду по бурульковій технології в льодогенераторах з горизонтальними насадками // Відновлювана енергетика XXI століття. – ТЗОВ “Ін-
- фодрук”, Крим: Мат. VII міжнар. наук. конф. – Крим, Миколаївка, 11–15 вересня 2006 р. – 2006. – С. 66–68.
4. *M. Rein*, “Phenomena of Liquid Drop Impact on Solid and Liquid Surfaces”, *Fluid Dynamics Research*, vol. 12, no. 2, pp. 61–93, 1993.
5. *L. Mishchenko et al.*, “Design of Ice-Free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets”, *Nanoletters*, vol. 4 (12), pp. 7699–7707, 2010.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
1 жовтня 2012 року