

УДК 69.621.58:697.4

DOI: 10.20535/1810-0546.2016.5.79521

І.І. Пуховий

НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна

ДИСПЕРГУВАННЯ ВОДИ УДАРОМ І ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ НИЗЬКОНАПІРНОГО ВИТІКАННЯ ВНИЗ ЧЕРЕЗ МАЛИЙ ОТВІР

Background. Low-head dispersion of water by impact with a hard surface is suitable for organization of water freezing on vertical surfaces and on horizontal attachments with icicles. When placing a set or sets of devices for water discharge, we have to consider radiuses of drops dispersion, and when irrigation of vertical surfaces, we have to consider the width of the moistened area and the height of drops flow-up above the striking face that depends on drops' motion trajectory.

Objective. The task of our work is the detailed study of the primary (after discharge from a hole (a nozzle)) and also of the secondary liquid atomization on drops. It is of the utmost importance to explore the heights of drops dispersion and also width and height of wetting of a vertical surface depending on distance to the center of percussion.

Methods. At irrigation of horizontal attachments, the nearby holes for water discharge are disposed at close range or in the distance, which is smaller than the peak radius of drops dispersion, taking into account reduction in irrigation density when radius increases. At irrigation of vertical attachments, the distance from the center of percussion is selected, depending on objectives to the liquid spray rate and to the initial irrigation point under the striking face, which constitutes from 60 to 150 mm for conditions of research in the higher point.

Results. As a result of pilot studies of characteristics of primary (after discharge from the small-diameter hole) and secondary (after impact with the horizontal surface) drops dispersion, we found that the maximum height of drops upsurge is increased with the altitude of their recession and is horizontal-bias away from the center of percussion. The width of the wetted vertical surface area is determined geometrically on the basis of maximum dispersion ranges in a percussion plane.

Conclusions. For the holes with the diameter of 1-2 mm in the reviewed pressure ranges (up to 350 mm w.c.), the correlation of discharge from pressure is straight-line, in contradistinction to level 0.5 for the correlation known for large-diameter holes. Dependencies to determine the range of primary drops dispersion after the discharge from a hole are obtained. Experimental data on the width of the wetted vertical surface area and on the maximum height of drops upsurge over the percussion plane are obtained.

Keywords: drops dispersion; irrigation; pressure; surface wetting.

Вступ

Диспергування рідин ударом є дуже простим, але недостатньо дослідженим за малих витрат рідини. В крапельних градирнях мають місце великі витрати води, що охолоджується. Тому існуючі закономірності для градирень не можуть бути використані для розрахунків розпилення ударом крапель за умов малої витрати води. Якщо виконання сопла форсунки дуже малого діаметра є технологічно складним, то в багатьох випадках, коли немає особливих вимог до однорідності крапель, може бути використаний гравітаційний чи штучний (тиском з водогону) метод диспергування за невеликого напору рідини, зокрема до 300–400 мм вод. ст. [1]. Диспергування води з малими витратами потрібне для кристалізації її в бурульках і на різних поверхнях. За таких тисків форсунки не працюють. Наприклад, при використанні теплоти кристалізації води для підігрівання повітря в системах вентиляції, опалення та в теплових насосах, коли її

замерзання відбувається в бурульках і плівках, подача води має бути невеликою [1, 2]. Також у багатьох випадках водогін чи джерело електропостачання для насоса відсутні. Тому зазначений напір можна отримати, використовуючи гравітацію при підтриманні постійного рівня в резервуарі, що дає змогу забезпечити автономність систем підігрівання повітря теплотою кристалізації води і виробництва льоду.

Відомі дослідження, в яких вивчалась динаміка зіткнення поодиноких крапель води з гідрофобними поверхнями. температура яких менше і більше 0 °С та з кутами нахилу від 0° до 30° [3]. Ці дослідження проводились з метою розробки поверхонь, які б не були схильні до заледеніння. Вивчалось зіткнення крапель води з гідрофільними, гідрофобними та надгідрофобними поверхнями з від'ємною температурою. Надгідрофобні поверхні створювались за допомогою нанесення спеціальних наноструктур на досліджувані поверхні. Спостерігалось падіння крапель радіусом кілька міліметрів з висоти 0,1 м на кремнієву під-

кладку, температура якої була від +20 до -35 °С. Температура крапель також змінювалася в межах від -5 °С (переохолоджена крапля) до +60 °С. Результати цих досліджень не можуть бути використані при розробці ударних зрошувачів на негідрофобних поверхнях. У описаних нижче наших дослідженнях удар, на відміну від [3, 4], відбувався не поодинокими краплями, а струменем, який розривався на серії послідовних крапель з одночасним утворенням плівки на поверхні удару. Фактично струмінь із первинними краплями падав на поверхню тонкої плівки, що знаходиться на поверхні удару. В [1] наведені деякі дані з дослідження гравітаційного розпилювача води ударом. Дослідні результати включають вимірювання максимального радіуса розлітання вторинних крапель залежно від відстані між поверхнею удару до розміщення нижче площин, що визначається траєкторією падіння крапель. Радіус розлітання крапель швидко зростає за витрати $0,58 \cdot 10^{-3}$ кг/с від значення $R = 240$ мм при вимірюванні на одному рівні з поверхнею удару ($\Delta h = 0$ мм) до $R = 360$ мм при $\Delta h = 500$ мм. При подальшому віддаленні від поверхні удару крапля вже практично падає у вертикальному напрямку. Ці дослідження недостатні для розрахунку зрошення краплями вертикальних поверхонь і зрошувачів з декількома соплами.

Відомі класичні співвідношення для визначення витрати води залежно від напору [5]. Витрата залежить від тиску в степені 0,5. Також на витрату впливає товщина стінки. Як виявилось у перших дослідах, за малих діаметрів отворів вказані залежності не можуть бути використані, тому потрібно провести детальне експериментальне дослідження. Для технічного застосування в кристалізаторах води потрібна її витрата близько $(0,5-2) \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Постановка задачі

Метою роботи є детальне вивчення первинного (після витікання з отвору (сопла)), а також вторинного подрібнення рідини на краплі і, особливо, висоти розлітання крапель та ширини і висоти змочування вертикальної поверхні залежно від відстані до центра удару. Результати роботи потрібні для визначення розмірів поверхні удару, щільності зрошення вертикальних і горизонтальних поверхонь, розміщених на рівні поверхні удару, та для визначення відстані між сусідніми отворами чи соплами з метою повного і рівномірного зрошення горизонтальних насадок, вертикальних пластин або вертикальних рядів труб.

Дослідна установка і методика проведення вимірювань

Установка забезпечувала розміщення ємностей з водою на певній висоті над поверхнею удару та підтримання постійного рівня води для забезпечення статичного тиску. Використовували ємності висотою до 350 мм, що вміщали до 6 кг води. Внизу в пластмасовій кришці або в дні ємності по центру голкою утворювався отвір (сопло). Товщина дна посудини становила 1,5–2 мм. Отвори були різних діаметрів, що забезпечувало різну витрату води. Витрата також змінювалася зменшенням висоти рівня води в ємності.

Поверхня удару, на якій виконувалося розпилення потоку води зі зрошувального пристрою, являє собою дерев'яні пластини шириною 44 та 70 мм і товщиною 15 мм. Пластини розміщувалися горизонтально.

Проведення експериментальних досліджень гравітаційного диспергування потоку рідини з використанням описаної вище установки виконувалося таким чином. Для забезпечення незмінності витрати води під час виконання дослідів виконувалося періодичне її додавання в робочу ємність, що давало можливість підтримувати максимальний рівень 270–310 мм з точністю до 10 мм. Рівень зменшувався до 75–125 мм залежно від діаметра отвору. Таким чином, зміна напору в кожному досліді становила не більше 10–15 %.

Потік рідини, що витікав через отвір малого діаметра у нижній частині ємності, падав після первинного розпилення на краплі на поверхню удару та під дією сил гравітації розбивався на вторинні краплі. Частина води не розпилювалась і зависала в краплях, що відривались періодично від поверхні удару.

Вимірювання витрати води на виході з ємностей зрошувального пристрою проводилось за допомогою двох мірних циліндрів ємністю 100 і 1000 мл з ціною поділки 1–10 мл. Вимірювання часу виконувалося секундоміром. У дослідах тривалість вимірювання витікання води становила 3–5 хв. Вимірювання проводилися тричі для кожної ємності, як остаточне покладалось середнє значення витрати рідини. При підтриманні напору води в ємностях на рівні 270–300 мм витрати рідини становили $(0,39-2) \cdot 10^{-3}$ кг/с залежно від діаметра отвору.

Для визначення радіуса первинного розлітання крапель при русі вниз до поверхні удару на певній висоті під зрошувальним пристроєм розміщувався аркуш паперу, після чого в робочій ємності приблизно на 1 с відкривався отвір для

подачі води. Струмінь, розлітаючись на первинні краплі, падав на аркуш паперу, залишаючи "сліди", що займали на аркуші певну площу. Після цього лінійкою виконувалося вимірювання радіуса цієї площі.

При визначенні радіуса розлітання вторинних крапель, тобто тих, що утворилися після розпилення на поверхні удару, також були використані аркуші паперу та лінійка. На додатковій поверхні розміщувалися аркуші паперу, на які після розпилення на поверхні падали краплі води. Через 3–5 с на аркушах чітко проявлялися "сліди" від падіння крапель (рисунок), після чого виконувалося вимірювання відстані від центра падіння струменя рідини на поверхню удару до найбільш віддалених, чітко видимих "слідів". На рисунку відстань між краями аркушів паперу дорівнює ширині поверхні удару і становить 44 мм.



"Сліди", що залишаються на аркушах паперу після падіння на них крапель

Поодинокі "випадкові" відбитки від падіння крапель поза цією відстанню не враховувалися. Аналізуючи вигляд крапель, слід звернути увагу, що вони видовжені в сторону від точки удару і краплі більшого діаметра спостерігаються ближче до центра площини удару.

У випадку визначення форми факела розпилювання, що падає на вертикальну поверхню, на деяких відстанях від центра удару розміщувалася вертикальна картонна поверхня з прикріпленим аркушем паперу. При цьому вимірювалися максимальна висота піднімання крапель і найбільша ширина площини, в яку попадають краплі для подальшого руху вниз води в півці.

Дослідження первинного диспергування води

Для визначення розмірів поверхні удару необхідно знати діаметр краплеподібного струменя в площині удару. Потік води при витіканні з

отвору в нижній частині ємності зрошувального пристрою до розпилення на твердій поверхні подрібнюється на первинні краплі, які утворюють конус. Таке дослідження проводилося з використанням ємності зрошувального пристрою, що забезпечувала витрату води $0,5810^{-3}$ кг/с при відстані від 200 до 1270 мм (табл. 1). Діаметр розлітання первинних крапель становить 19–74 мм і змінюється за лінійним законом залежно від висоти. Збільшення витрати води до $0,75 \cdot 10^{-3}$ кг/с викликало збільшення діаметра первинного розпилювання крапель до 27 мм при висоті падіння 430 мм, тобто у 1,5 разу більше, ніж за витрати $0,58 \cdot 10^{-3}$ кг/с. При цьому витрата також збільшилась приблизно в 1,5 разу, тому можна вважати залежність від витрати пропорційною.

Таблиця 1. Результати вимірювання радіуса розлітання первинних крапель у струмені води залежно від висоти

Висота, мм	Радіус розлітання первинних крапель, мм
230	5
430	9
730	17
1000	25
1270	37

Максимальний радіус розлітання вторинних крапель

Залежність максимального радіуса розлітання вторинних крапель води в площині удару від висоти падіння струменя за витрати води $0,58 \cdot 10^{-3}$ кг/с описується лінійним рівнянням

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

Підвищення витрати води збільшує кінетичну енергію первинних крапель і впливає на радіус розлітання вторинних крапель.

При проведенні досліду для визначення впливу витрати води G висота падіння струменя води з ємності залишалася незмінною і становила 730 мм. Вимірювання радіуса виконувалося на одному рівні з поверхнею удару. Відзначимо, що основна маса води в краплях обмежується товщиною умовного колового диска приблизно до половини R . Ця залежність описується таким квадратичним рівнянням:

$$R = -265,88G^2 + 564,86G,$$

де G вимірюється в грамах за секунду.

Ширина змочуваної ударом ділянки вертикальних поверхонь і висота піднімання вторинних крапель

Вторинні краплі можуть використовуватись і для зрошення вертикальних поверхонь, тому необхідно знати форму сліду від крапель на цих поверхнях. Дослідження виконувалось за висот падіння 460 і 980 мм на одному рівні з поверхнею удару. Найбільші ширина і висота плями на вертикальній поверхні знаходились експериментально, а ширина також і через розрахунок довжини хорди за відомих значень R та відстані B вертикальної площини від точки удару в площині удару. Половина хорди X може бути знайдена за теоремою Піфагора з використанням величин B і R (гіпотенузи). Розрахункові і дослідні результати різняться не більше ніж на 10 %. У табл. 2 наведені значення висоти L піднімання крапель у центрі навпроти точки удару і розрахункові значення довжини хорд X за різних відстаней сопла від поверхні удару. Зі збільшенням висоти падіння крапель h зростає R , і за невеликих B довжина хорди X наближається до $2R$. Висота L піднімання вторинних крапель над поверхнею удару має максимум (табл. 3). Видно, що зі зростанням висоти падіння максимум піднімання крапель вгору зміщується в сторону більших відстаней B від центра удару і зростає.

Таблиця 2. Максимальна висота піднімання крапель L над поверхнею удару та довжина змоченої вертикальної поверхні X за висоти падіння 980 мм і витрати води $0,75 \cdot 10^{-3}$ кг/с

B , мм	L , мм	X , мм
35	60	285
65	95	580
130	65	560
235	10	35

Таблиця 3. Відстані B від вертикальної площини до центра удару, за яких має місце максимальна висота L піднімання крапель вище поверхні удару залежно від висоти падіння h струменя за витрати води $0,75 \cdot 10^{-3}$ кг/с (напір $H = 300$ мм)

h , мм	B , мм	L , мм
310	25	65
980	65	95
1360	130	140

У випадку визначення ширини змоченої краплями ділянки на горизонтальних площинах, розміщених нижче площини удару, слід

використати результати [1], де наведені відповідні залежності для радіуса розлітання, які необхідні для розрахунку хорди.

Дослідження витрати води при витіканні через отвір у дні посудини

Як відзначалося вище, витрату води G через малий отвір неможливо знайти розрахунком залежно від напору H . Тому було виконано дослідження G залежно від напору води, що визначався рівнем води в дослідній ємності. Через ймовірний вплив сил поверхневого натягу в досліджених діапазонах діаметрів і тиску залежність G від H є прямолінійною. При витіканні води з отвору діаметром 0,8 мм за напорів менше 125 мм в.ст. з отвору діаметром 1,1 мм розпочинається повільне крапання рідини окремими видимими краплями, тому нижчий діапазон напорів не досліджувався. Отримані емпіричні рівняння залежності G від H . Збільшення H сильніше впливає на G при зростанні діаметра отвору.

Для отвору діаметром 0,8 мм (напір у міліметрах водяного стовпчика, а витрата – в грамах за секунду):

$$G = 2,94 H + 0,07.$$

Для отвору діаметром 1,1 мм:

$$G = 5,34 H + 0,2.$$

При зміні напору від 125 до 300 мм в.ст. у першому випадку (отвір у кришці) витрата змінювалась від 0,4 до $0,95 \cdot 10^{-3}$ кг/с. У другому (отвір у дні посудини) – при зміні H від 75 до 300 мм в.ст. витрата становила $(0,55-1,8) \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Висновки

Низьконапірне розпилення води ударом об тверду поверхню є зручним для кристалізації води на вертикальних поверхнях і в бурульках.

Радіус розлітання крапель зростає одночасно зі збільшенням витрати і висоти падіння струменя.

Висота піднімання крапель над площиною удару має максимум, який зміщується в сторону більших відстаней від центра удару струменя зі збільшенням висоти його падіння.

Ширину змоченої ділянки на вертикальній поверхні можна знайти на основі вимірюваних радіусів розлітання крапель у горизонтальних площинах.

Витрата води через малі отвори зростає зі збільшенням напору прямолінійно, а у відомих

дослідженнях для значно більших діаметрів отворів – у степені 0,5.

Для зрошування насадок (горизонтальних і вертикальних) відстань між струменями повинна бути близько або менше максимального радіуса розлітання крапель, а ширина чи діаметр поверхні удару – не менше діаметра первинного розлітання крапель.

Є підстави вважати, що отримані результати можна використовувати при витіканні води із отворів, розміщених внизу горизонтальних труб, що сполучені з джерелом тиску.

У подальшому потрібно провести досліди в розширеному діапазоні діаметрів отворів, достатньому для узагальнення і використання в інших прикладних задачах.

Список літератури

1. Пуховий І.І., Постоленко А.М. Диспергація потоку води при малих її витратах та формування бурульок на насадках з дроту // Вісник Вінницького політехн. ін-ту. – 2012. – № 4. – С. 119–123.
2. Пуховий І.І., Кривошеєв М.О. Течія та замерзання води на вертикальних поверхнях при зрошенні їх краплями від розпилення ударом // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2012. – № 6. – С. 29–35.
3. Rein M. Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces // Fluid Dynamics Res. – 1993. – 12, № 2. – P. 61–93.
4. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets / L. Mishchenko, B. Hatton, V. Bahadur et al. // Nanoletters. – 2010. – 4, № 12. – P. 7699–7707.
5. Истечение жидкости из отверстий и насадок [Электронный ресурс]. – URL: <http://gidrav1.narod.ru/istechenie.html>

References

1. I.I. Pukhovyi and A.M. Postolenko, "Dispergation of water stream at its small charges and forming of icicles on wire attachments", *Visnyk Vinnyts'koho Politekhnichnoho Instytutu*, no. 4, pp.119–123, 2012 (in Ukrainian).
2. I.I. Pukhovyi and M.O. Krivosheev, "Flow and water freezing on vertical surfaces by drops irrigation obtained by blow spraying", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 6, pp. 29–35, 2012 (in Ukrainian).
3. M. Rein, "Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces", *Fluid Dynamics Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 61–93, 1993.
4. L. Mishchenko *et al.*, "Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets", *Nanoletters*, vol. 4, no. 12, pp. 7699–7707, 2010.
5. Fluid discharge from holes and fillings [Online]. Available: <http://gidrav1.narod.ru/istechenie.html>

І.І. Пуховий

ДИСПЕРГУВАННЯ ВОДИ УДАРОМ І ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ НИЗЬКОНАПІРНОГО ВИТІКАННЯ ВНИЗ ЧЕРЕЗ МАЛИЙ ОТВІР

Проблематика. Низьконапірне розпилення води ударом об тверду поверхню є зручним для кристалізації води на вертикальних поверхнях і горизонтальних насадках з бурульками. При розміщенні ряду чи рядів пристроїв для витікання води потрібно враховувати радіуси розлітання крапель, а при зрошенні вертикальних поверхонь – ширину змоченої ділянки і висоту піднімання крапель над площиною удару, що залежить від траєкторії руху крапель.

Мета дослідження. Задачею роботи є детальне вивчення первинного (після витікання з отвору (сопла)), а також вторинного подрібнення рідини на краплі і, особливо, висоти розлітання крапель та ширини і висоти змочування вертикальної поверхні залежно від відстані до центра удару.

Методика реалізації. При зрошенні горизонтальних насадок сусідні отвори для витікання води розміщують на відстані, близькій чи меншій за максимальний радіус розлітання вторинних крапель, враховуючи меншу щільність зрошення зі збільшенням радіуса. У випадку зрошення вертикальних поверхонь відстань від центра удару до поверхні вибирають залежно від вимог до щільності зрошення і початкової точки зрошення над поверхнею удару, що становить від 60 до 150 мм для умов дослідження у найвищій точці.

Результати дослідження. У результаті проведених експериментальних досліджень характеристик розлітання первинних (після витікання з отвору малого діаметра) і вторинних (після удару об горизонтальну поверхню) крапель води встановлено, що максимальна висота піднімання крапель вгору збільшується з висотою їх падіння і зміщується по горизонталі в сторону від центра удару. Ширина змоченої ділянки вертикальної поверхні знаходиться геометрично на основі максимальних радіусів розлітання в площині удару.

Висновки. Залежність витрати від напору для отворів діаметром близько 1-2 мм у вивченому діапазоні напорів води (до 350 мм в.ст.) є прямолінійною, на відміну від степені 0,5 залежності, відомої для отворів більших діаметрів. Отримано залежності для визначення радіуса розлітання первинних крапель після витікання з отвору та експериментальні дані щодо ширини змоченої ділянки вертикальної поверхні та найбільшої висоти піднімання крапель над площиною удару.

Ключові слова: розліт крапель; зрошування; напір; змочування поверхні.

И.И. Пуховой

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ ВОДЫ УДАРОМ И ОСОБЕННОСТИ ЕЕ НИЗКОНАПОРНОГО ИСТЕЧЕНИЯ ВНИЗ ЧЕРЕЗ МАЛОЕ ОТВЕРСТИЕ

Проблематика. Низконапорное распыление воды ударом о твердую поверхность является подходящим для организации замораживания воды на вертикальных поверхностях и на горизонтальных насадках с сопельками. При размещении ряда или рядов устройств для истечения воды нужно учитывать радиусы разлета капель, а при орошении вертикальных поверхностей – ширину смоченного участка и высоту подъема капель над поверхностью удара, что зависит от траектории движения капель.

Цель исследования. Задачей работы является детальное изучение первичного (после истекания из отверстия (сопла)), а также вторичного измельчения жидкости на капли и, особенно, высоты разлета капель и ширины и высоты смачивания вертикальной поверхности в зависимости от расстояния к центру удара.

Методика реализации. При орошении горизонтальных насадок соседние отверстия для истечения воды располагают на расстоянии, близком или меньшем величины максимального радиуса разлета капель, учитывая снижающуюся плотность орошения с увеличением радиуса. В случае орошения вертикальных поверхностей расстояние от центра удара до поверхности выбирают зависимо от требований к плотности орошения и исходной точке орошения над поверхностью удара, которая составляет от 60 до 150 мм для условий исследования в наивысшей точке.

Результаты исследования. В результате проведенных экспериментальных исследований характеристик разлета первичных (после истечения из отверстия малого диаметра) и вторичных (после удара о горизонтальную поверхность) капель воды было установлено, что максимальная высота подъема капель вверх возрастает с высотой их падения и смещается по горизонтали в сторону от центра удара. Ширина смоченного участка вертикальной поверхности определяется геометрическим путем на основе максимальных радиусов разлета в плоскости удара.

Выводы. Зависимость расхода от напора для отверстий диаметром около 1-2 мм в изученном диапазоне напоров (до 350 мм вод. ст.) является прямолинейной, в отличии от степени 0,5 зависимости, известной для отверстий больших диаметров. Получены зависимости для определения радиуса разлета первичных капель после истекания из отверстия и экспериментальные данные относительно ширины смоченного участка вертикальной поверхности и наибольшей высоты подъема капель над плоскостью удара.

Ключевые слова: разлет капель; орошение; напор; смачивание поверхности.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ “КПІ ім. І. Сікорського”

Надійшла до редакції
11 квітня 2016 року