

УДК 69.621.58:697.4

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.2.96573

І.І. Пуховий\*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**ДИСПЕРГУВАННЯ ВОДИ УДАРОМ ОБ РЕБРИСТІ Й ОКРУГЛІ ПОВЕРХНІ ПРИ МАЛОНАПІРНОМУ ВИТІКАННІ ВНИЗ ЧЕРЕЗ МАЛИЙ ОТВІР**

**Background.** Low-pressure water spray by impact on a hard surface is convenient for crystallization of water on vertical surfaces and horizontal nozzles with icicles. In the previous works of the author, it was noticed the effect of an impact surface roughness on spray flow hydrodynamics, therefore, in this paper we investigate the effect of surface topography on the dispersion impact characteristics. The direction of drops movement along and across significantly affects the scattering drops parameters on the ribbed surfaces. This fact can be used in the irrigation of surfaces.

**Objective.** The work aims to investigate the effect of an impact surface topography and shape on the spray droplets flow hydrodynamics after the impact.

**Methods.** The experiments were conducted at a constant geometric height in the vessel 250–260 w.c. with the distance change from the impact surface to the hole from which water jet discharged at a cost in the range of 0.46–0.275 g/s. The height and the maximum radius of the droplets dispersion after impact were measured according to the evidence of the drops on a paper.

**Results.** We carried out the experimental studies of the drops dispersion characteristics: of the primary drops (after the discharge from small diameter holes) and of the secondary ones – after hitting the ribbed surfaces (flat, round, a roof), the convex and concave segment surfaces of sphere and cylinder. The drops scatter in 1.5–3 times further in the direction along the rib than in the perpendicular direction. We see farthest flying drops when using the ribbed roof. Impact on the surface with small ribs at low water flow rates and low heights of the jet fall does not give the desired results. The maximal height of the drops rising upward across the ribs is at a smaller distance from the impact center. The linear dependence of water flow on the pressure for the hole of 1.6 mm diameter in the investigated range of water pressures was confirmed.

**Conclusions.** Under nozzles irrigation, there is a possibility of atomized flow distribution in the directions that allows ensuring the devices design requirements, for example, with pipes irrigation the ribs are placed along the edges of the pipes. Adjacent holes for the water flow are placed at a distance less than the maximum radius of the secondary droplets dispersion, given the lower irrigation density with increasing radius. If the vertical surfaces are irrigated, the distance from the impact center to the surface is selected depending on the irrigation density requirements and on the irrigation elementary point over the impact surface.

**Keywords:** spray impact; radius and height of spray drops; ribbed and rounded impact surfaces; nozzles irrigation for the icicles formation; heat and mass transfer devices.

**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, у багатьох випадках, коли немає особливих вимог до однорідності крапель, може бути використаний гравітаційний чи штучний (тиском із водогону) метод диспергації при невеликому напорі рідини, зокрема до 300–400 мм в.ст. [1]. Диспергування води з малими витратами потрібне для кристалізації її в бурульках і на різних поверх-

нях. За таких тисків форсунки не працюють. Наприклад, при використанні теплоти кристалізації води для підігріву повітря в системах вентиляції, опалення та в теплових насосах, коли її замерзання відбувається в бурульках і плівках, подача води повинна бути невеликою [1, 2]. Також у багатьох випадках водогін чи джерело електропостачання для насоса відсутні. Тому зазначений напір можна отримати використанням гравітації при підтриманні постійного рівня в резервуарі, що дає змогу забезпечити автономність систем підігріву повітря теплою кристалізації води і виробництва льоду. Рівень води в напірному резервуарі можна підтримувати автоматично через його живлення з використанням у декілька разів більшої, ніж резервуар, ємності, яка герметична відносно атмосферного повітря. Таке розпилювання води може бути використа-

\*corresponding author: ivan@puh.com.ua

не для зрошення невеликих ділянок городу і як літній душ для локального зниження температури повітря.

### Постановка задачі

Метою роботи є дослідження впливу рельєфу і форми поверхні удару на гідродинаміку розпиленого потоку крапель після удару.

### Попередні роботи

Відомі дослідження, в яких вивчалась динаміка зіткнення поодиноких крапель води з гідрофобними поверхнями, температура яких менша і більша  $0^{\circ}\text{C}$ , та з кутами нахилу від  $0^{\circ}$  до  $30^{\circ}$  [3]. Ці дослідження проводились з метою розробки поверхонь, які б не були схильні до заледеніння. Вивчалось зіткнення крапель води із 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 підкладку, температура якої була від  $+20$  до  $-35^{\circ}\text{C}$ . Температура крапель також змінювалась у межах від  $-5^{\circ}\text{C}$  (переохолоджена крапля) до  $+60^{\circ}\text{C}$ . Результати згаданих досліджень не можуть бути використані при розробці ударних зрошувачів на негідрофобних поверхнях. У [1, 5] виконані дослідження максимального радіуса розлітання крапель при витіканні води з малого отвору за умов, подібних до нашої роботи. Вивчалися також максимальна висота піднімання крапель вгору і ширина змоченої ділянки вертикальної поверхні при зміні відстані від центра удару. Досліди проведено при падінні крапель водяного струменя на гладкі поверхні різної шорсткості.

В [6] експериментально досліджено диспергацію води при зміні її витрати  $m_{\text{вх}}$  від 0,83 до 7,00 г/с при подачі з водогону для кожної поверхні удару. Сопло діаметром 1 мм розміщувалось на відстані 570 мм від поверхні. Частина масової витрати води  $b$  (у відсотках) розпилюється, а решта стікає краплями з поверхні удару. Для вказаного діапазону витрати води (в г/с) розпилюється від 10 до 45 % води:

$$b = 0,279m_{\text{вх}}^2 + 1,7314m_{\text{вх}} + 8,95$$

(це рівняння наводимо через малий наклад [6]).

Для металевої гладкої фарбованої поверхні значення  $b$  менші, ніж для більш шорстких

дерева та пінопласту (вплив шорсткості на  $b$  до 5–10 %). Можливим поясненням цього є підвищення тиску повітря, яке виходить з-під краплі за мить до удару – шорсткість викликає підвищений гідравлічний опір.

У наведених нижче наших дослідженнях, на відміну від [5], вивчається удар об ребристі й округлі поверхні відповідно до гіпотези автора про вплив рельєфу поверхні на гідродинаміку розпиленого ударом потоку. Результати роботи потрібні для визначення густини зрошення вертикальних і горизонтальних поверхонь у напрямках уздовж і поперек ребер, а також при ударі об округлі поверхні, які можна використовувати в спеціальних випадках, коли потрібне розпилення крапель із різними вимогами до напрямку руху крапель.

### 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 потрібного напору. Використовували ємності висотою до 360 мм, що вміщали до 6 кг води. Внизу в дні ємності по центру голкою утворювався отвір (сопло). Товщина дна посудини була 1,5–2 мм. Для технічного застосування в кристалізаторах води потрібна її витрата близько  $(0,5-3) \cdot 10^{-3}$  кг/с. У дослідах витрата води становила  $0,46 \cdot 10^{-3}$  кг/с (отвір діаметром 0,6 мм) та  $2,75 \cdot 10^{-3}$  кг/с (отвір 1,6 мм) при геометричному напорі в ємності 250–260 мм в.ст. Зміна витрати води від напору для отвору 1,6 мм має лінійну залежність, як отримано в [5], та описується рівнянням

$$G = 0,0088P + 0,77,$$

де  $G$  у грамах за секунду, а  $P$  у міліметрах водяного стовпа.

Краплі після удару падали на білий папір, де можна було зафіксувати лінійкою максимальний радіус розлітання. Температура води становила  $7^{\circ}\text{C}$ , а температура повітря – близько  $12^{\circ}\text{C}$ .

### Розпилення ударом об ребристі поверхні

Поверхня № 1 являє собою покриту чорним хромом алюмінієву поверхню сонячного колектора із селективним покриттям розробки інституту КиївЗДнІЕП з ребрами в одному напрямку. Поверхня (рис. 1) у вигляді пластини

має розміри 60×90 мм з округлими ребрами, розміщеними уздовж коротшої сторони. Висота ребер – 1 мм, крок ребер – 1,4 мм.

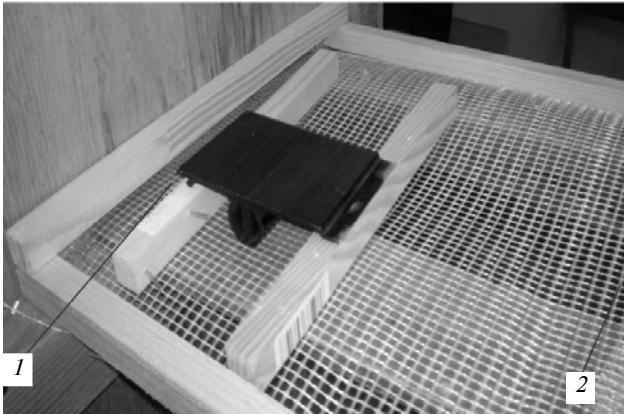


Рис. 1. Поверхня № 1: 1 – поверхня удару, 2 – підтримувальна сітка

**Дослідження впливу висоти падіння струменя і витрати води на максимальний радіус розлітання крапель на поверхні № 1.** Досліди за  $G = 0,46 \cdot 10^{-3}$  і  $2,75 \cdot 10^{-3}$  кг/с показали, що різниця між радіусом розлітання крапель уздовж і поперек ребер збільшується зі зростанням витрати води. Радіус розлітання крапель зростає з висотою падіння струменя уздовж ребер прямолінійно, а поперек них – криволінійно таким чином, що різниця між напрямками збільшується зі зростанням висоти удару. На рис. 2 показані результати для  $G = 2,75 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Для  $G = 0,46 \cdot 10^{-3}$  кг/с радіуси розлітання крапель занесені в табл. 1.

У табл. 1 також наведені значення радіусів поверхні, до яких досягає найбільше крапель, з метою визначення відстані між струменями води, що витікають із отворів. Як видно, основна маса крапель випадає до відстані від центра близько половини величини максимального радіуса розлітання крапель.

За висоти падіння струменя з  $G = 0,46 \cdot 10^{-3}$  кг/с до 490 мм спостерігається утво-

рення краплі, яка утримувалась постійно на поверхні капілярними силами. Крапля гасить енергію струменя та заважає розбризкуванню води. За висоти падіння 490 мм радіус первинного розлітання води в струмені при ударі становить 25 мм, а за висоти падіння 850 мм – 40 мм. Краплі на папері мають витягнуту вздовж радіуса форму – до 3 мм у довжину та до 0,5–1 мм у ширину. Чим далі від центра, тим менше крапель і тим менші їх розміри. Зі збільшенням висоти падіння товщина плівки на поверхні удару зменшується.

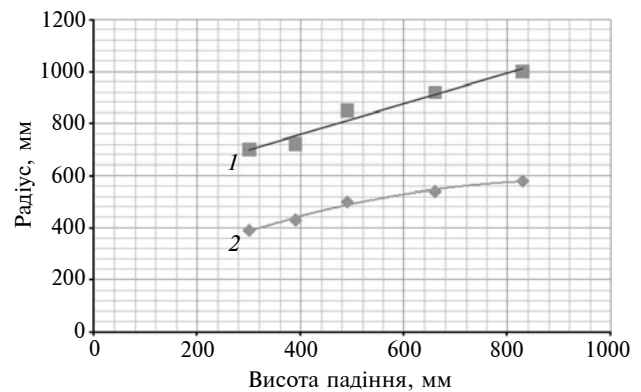


Рис. 2. Максимальні радіуси розлітання вторинних крапель уздовж (1) і поперек (2) ребер за  $G = 2,75 \cdot 10^{-3}$  кг/с

Дослідження траєкторії (висоти розлітання крапель) крапель при вимірюванні слідів крапель на вертикальній площині зі зміною відстані від площини до центра удару проводилось за фіксованих висот падіння струменя і витрат води. Траєкторія руху крапель із більшою витратою води  $G$  є більш крутою, ніж за меншого значення  $G$ . Максимальна висота підняття крапель угору є ближчою до центра удару в поперечному напрямку. При цьому на вертикальній площині, паралельній ребрам, є змочена ділянка сідлоподібної форми з мінімумом висоти навпроти поверхні удару через розширення факела крапель, які сходять уздовж ребер і

Таблиця 1. Вимірювання радіуса розбризкування крапель на поверхні № 1 (напір 250–260 мм в.ст., отвір 0,6 мм,  $G = 0,46 \cdot 10^{-3}$  кг/с)

Висота падіння, мм	Максимальний радіус уздовж ребер, мм	Радіус основної маси крапель, мм	Максимальний радіус поперек ребер, мм	Радіус основної маси крапель, мм
285	180	–	120	–
390	240	–	180	–
490	380–400	180	230–270	120
670	410	–	290	–
850	520	330	330	160

піднімаються вище, ніж поперек ребер. Пляма на вертикальній площині за відстані від центра удару 100 мм має висоту: по центру 140 мм, а по краях 180 мм з шириною між максимальними точками змоченої ділянки 450 мм. Траєкторії руху крапель за висоти падіння 300 мм і  $G = 2,75 \cdot 10^{-3}$  кг/с показано на рис. 3. В одному досліді з подачею води з водогону при  $G = 7 \cdot 10^{-3}$  кг/с максимальна висота піднімання крапель угору була упоперек на відстані від центра удару в 4 рази меншою, ніж уздовж ребер.

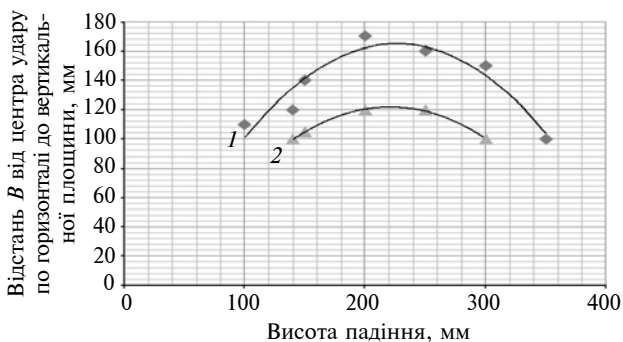


Рис. 3. Траєкторія руху крапель при  $G = 2,75 \cdot 10^{-3}$  кг/с уздовж (1) і поперек (2) ребер на поверхні № 1

#### Удар об ребристу циліндричну поверхню № 2.

Поверхня є алюмінієвим круглим циліндром діаметром 95 мм, шириною 45 мм, з кроком ребер округлої форми товщиною 10 мм і висотою 7 мм. Результати вимірювань зведені в табл. 2. У поздовжньому напрямку краплі летять у 1,5–2 рази далі. На відміну від поверхні № 1, вода відразу стікає, не затримуючись на поверхні. Як і на плоскій ребристій поверхні, залежність радіуса від висоти падіння струменя для напрямку поперек ребер є криволінійною зі збільшенням абсолютної різниці між напрямками.

Таблиця 2. Вимірювання радіуса розбризування крапель на поверхні № 2 (напір 250–260 мм в.ст., отвір 0,6 мм,  $G = 0,46 \cdot 10^{-3}$  кг/с)

Висота падіння, мм	Максимальний радіус уздовж ребер, мм	Максимальний радіус поперек ребер, мм
180	130	70
280	220	140
370	310	210
550	390	280
730	470	350

Значення радіуса розлітання крапель уздовж ребер практично збігаються з даними для поверхні № 1.

**Удар об металевий ребристий дашок (поверхня № 3).** Поверхня (рис. 4) виготовлена пайкою жерсті у вигляді трикутного дашка з основою 120 мм, шириною 40 мм, висотою 40 мм, з розміщеними уздовж основи ребрами висотою 10 мм, кроком 10 мм (при нахилі до горизонту близько 30°). Вода не затримується на поверхні після удару струменя. Удар струменя відбувався по центру з'єднання ребристих площин. Картина впливу напрямку руху крапель схожа на попередні результати, але з більш вираженим впливом напрямків (рис. 5).

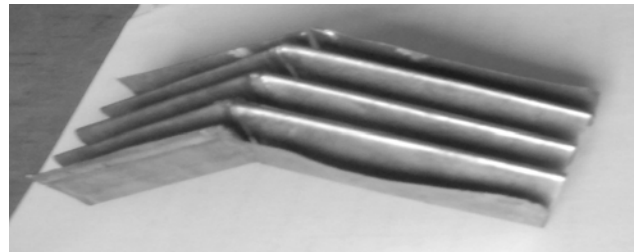


Рис. 4. Поверхня № 3: дашок

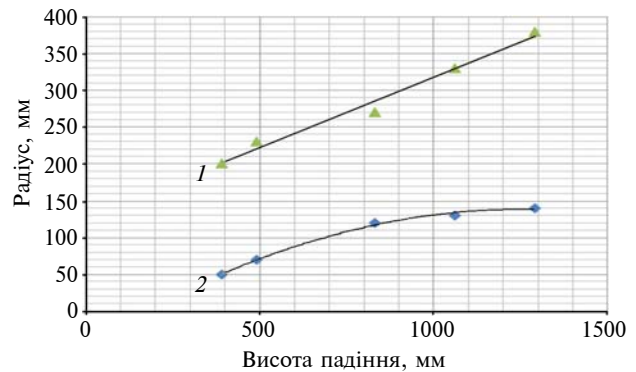


Рис. 5. Залежність радіуса розбризування крапель уздовж (1) і поперек (2) ребер від висоти удару на поверхні № 3 (напір 250–260 мм в.ст.,  $G = 0,46 \cdot 10^{-3}$  кг/с)

При висоті падіння струменя більше 1 м радіус розлітання для напрямку уздовж ребер у 2–3 рази більший, ніж упоперек, що можна пояснити значною висотою ребер. Порівняно з поверхнею № 1, що має дрібніші ребра (див. табл. 1), краплі летять приблизно в 2 рази ближче до центра, уздовж ребер краплі летять дещо далі. Можливою причиною криволінійної залежності радіуса розлітання крапель від висоти поперек ребер може бути збільшення радіуса плями від удару об поверхню.

### Розпилення ударом об округлі предмети

**Удар об гладкий опуклий сегмент сталюї сфери (поверхня № 4).** Сегмент кулі радіусом 70 мм і висотою 20 мм зроблений зі сталі. Пляма від удару струменя при висоті падіння до 1,3 м має менший діаметр, ніж діаметр сегмента. В табл. 3 наведені дослідні результати зіткнення крапель струменя зі сферичним сегментом.

**Таблиця 3.** Вимірювання радіуса розбризкування крапель на поверхні № 4 (напір 250–260 мм в.ст., отвір 0,6 мм,  $G = 0,46$  г/с)

Висота падіння, мм	Максимальний радіус розбризкування, мм	Діаметр плями на поверхні удару, мм
390	200	20
490	210	25
830	270–250	35
1060	300	45
1290	350	60

Для порівняння удару об опуклу і плоску поверхні наведемо результати дослідження удару струменя об плоску гладку поверхню за близької до попереднього досліду витрати води – 0,58 г/с (табл. 4). Видно, що на сферичній поверхні радіуси розлітання крапель дещо більші, що можна пояснити зміною кута відбивання крапель.

**Таблиця 4.** Результати дослідження максимального радіуса розлітання крапель при ударі об гладку плоску поверхню при  $G = 0,58$  г/с

Висота $h$ , мм	Радіус розлітання вторинних крапель $R$ , мм
430	190
730	240
1000	270
1270	295

**Таблиця 5.** Висота піднімання крапель угору за слідами на вертикальній площині для поверхні № 4 при  $G = 0,46$  г/с залежно від відстані  $B$  від точки удару по горизонталі до площини

Висота падіння 390 мм		Висота падіння 1290 мм	
Відстань від центра удару до площини $B$ , мм	Висота розбризкування на площину $H$ , мм	Відстань від центра удару до площини $B$ , мм	Висота розбризкування на площину $H$ , мм
35	25	70	70
50	30	100	90
60	30	120	95
75	25	150	90
90	20	200	75

Результати дослідження траєкторії крапель на поверхні № 4 показані в табл. 5. Порівняння даних табл. 5 з дослідами [5] показує, що при зіткненні струменя з опуклою поверхнею висота піднімання крапель менша.

**Удар об гладкий увігнутий сегмент сталюї сфери (поверхня № 5).** Поверхня має вигляд сегмента кулі з діаметром сегмента 70 мм, глибиною 20 мм, з отвором по центру сегмента радіусом 4 мм для відводу води.

Дослідження радіуса розлітання крапель при напорі 250–260 мм в.ст. і  $G = 0,46 \cdot 10^{-3}$  кг/с проведено лише для двох висот падіння струменя з урахуванням малого радіуса розлітання крапель. Результати вимірювань показують, що за висоти падіння 390 мм максимальний радіус розбризкування становить 75 мм, а за 1290 мм – 340 мм. На опуклій поверхні за тих же умов – відповідно 200 і 350 мм, тобто за великої висоти удару струменя, – радіуси розлітання збігаються. Також було виміряно траєкторію розбризкування, яка має максимум висоти 90 мм при відстані від центра удару 100 мм. На відстані 200 мм краплі піднімаються на 65 мм.

**Удар об гладкий скляний циліндр (поверхня № 6).** Скляний циліндр має довжину 150 мм і діаметр 70 мм. Такого ж діаметра були дві попередні поверхні.

За висоти удару 260 мм максимальний радіус розбризкування уздовж циліндра становив 400 мм, поперек – 460 мм за  $G = 2,75 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Більші висоти падіння струменя не досліджувались. Порівняння результатів з ударом об ребрену поверхню № 1 показує, що уздовж ребер радіус досягав 800 мм, а поперек – 400 мм за саме такої витрати, тобто у напрямку вздовж ребер був більшим, ніж поперек циліндра. Висота піднімання крапель була максимальною за відстані від центра 200 мм і становила 100 мм.

## Висновки

Досліджено максимальні радіуси розлітання крапель води методом удару об дрібноребристу плоску поверхню, ребристу бокову поверхню циліндра, ребристий дашок, опуклий сегмент кулі, увігнутий сегмент кулі та бокову поверхню скляного циліндра.

Найdaleше краплі розлітаються у напрямку вздовж ребер після удару об ребристий дашок.

Максимальний радіус розлітання уздовж дрібних ребер у 1,5–2 рази, а у крупних – до 3 разів більший, ніж упоперек.

У дрібних ребер за невеликої висоти падіння струменя на поверхні в точці удару утри-

мується капілярними силами крапля значного розміру, яка гасить кінетичну енергію струменя.

Висота підйому крапель у напрямку перпендикулярно ребрам має максимум ближче до центра удару.

Отримано лінійну залежність для витрати води від напору через отвір малого перерізу.

Результати дослідження можуть бути використанні для зрошення лінійних горизонтальних і вертикальних насадок.

У подальшому потрібно провести досліди на поверхнях з різною геометрією дрібних ребер у розширеному діапазоні витрат води, 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. Пуховий І.І. Диспергація води ударом та особливості малонапірного витікання вниз через малий отвір // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2016. – № 5. – С. 62–67.
6. Пуховий І.І., Кривошеєв М.О. Доля струменя, що диспергується при ударі об поверхню, для охолодження води повітрям в льодогенераторі-акумуляторі холоду // Відновлювана енергетика XXI ст.: Матер. XIV Міжнар. наук. конф. – К.: Вікторія, 2013. – С. 121.

## References

- [1] I.I. Pukhoviy and A.M. Postolenko, “Dispergation of water stream at its small charges and forming of icicles on wire attachments”, *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, no. 4, pp. 119–123, 2012 (in Ukrainian).
- [2] I.I. Pukhoviy 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. doi: 10.1016/0169-5983(93)90106-K
- [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. doi: 10.1021/nn102557p
- [5] I.I. Pukhoviy, “Water dispersion and distinction of its low-head efflux down through the small hole”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 5, pp. 62–67, 2016 (in Ukrainian). doi: 10.20535/1810-0546.2016.5.79521
- [6] I.I. Pukhoviy and M.O. Krivosheev, “The proportion of the jet which is dispersed upon impact on a surface, for cooling water by air in ice-cold accumulator”, in *Proc. XIV Int. Sci. Conf. Renewable Energy of XXI Century*, Kyiv, Ukraine, 2013, p. 121 (in Ukrainian).

І.І. Пуховий

ДИСПЕРГУВАННЯ ВОДИ УДАРОМ ОБ РЕБРИСТІ Й ОКРУГЛІ ПОВЕРХНІ ПРИ МАЛОНАПІРНОМУ ВИТІКАННІ ВНИЗ ЧЕРЕЗ МАЛИЙ ОТВІР

**Проблематика.** Низьконапірне розпилення води ударом об тверду поверхню є зручним для кристалізації води на вертикальних поверхнях і горизонтальних насадках із бурульками. В попередніх роботах автора помічено вплив на гідродинаміку розпиленого потоку шорсткості поверхні удару, тому в цій роботі досліджено вплив рельєфу поверхні на характеристики диспергації ударом. На ребристих поверхнях напрямку руху крапель уздовж і поперек значно впливає на параметри розлітання крапель. Цей факт може бути використаний при зрошенні поверхонь.

**Мета дослідження.** В роботі поставлена мета дослідити вплив рельєфу і форми поверхні удару на гідродинаміку розпиленого потоку крапель після удару.

**Методика реалізації.** Експерименти проводились при постійному геометричному напорі в ємності 250–260 мм в.ст. зі зміною відстані від поверхні удару до отвору, з якого витікав струмінь води із витратою води в межах 0,46–2,75 г/с. Висота і максимальний радіус розлітання крапель після удару вимірювались за слідами крапель на папері.

**Результати дослідження.** Проведено експериментальні дослідження характеристик розлітання крапель: первинних (після витікання з отвору малого діаметра) і вторинних – після удару об ребристі поверхні (плоску, округлу, дашок) та випуклу і ввігнуту поверхні сегмента сфери і циліндра. Краплі розлітаються в 1,5–3 рази далі в напрямку вздовж ребер, ніж перпендикулярно їм. Найдалше летять краплі при використанні ребристого дашка. Удар об поверхню з дрібними ребрами за малих витрат води і малих висот падіння струменя не дає потрібних характеристик розпилення. Максимальна висота піднімання крапель угору поперек ребер знаходиться на меншій відстані від центра удару. Підтверджено прямолінійну залежність витрати від напору для отвору діаметром 1,6 мм у вивченому діапазоні напорів води.

**Висновки.** При зрошенні насадок існує можливість розподілу розпиленого потоку за напрямками, що дає змогу забезпечити конструктивні вимоги щодо тепломасообмінних апаратів – наприклад, при зрошенні труб ребра розміщують уздовж них. Отвори для витікання води розміщують на відстані, меншій максимального радіуса розлітання вторинних крапель, враховуючи меншу густину зрошення зі збільшенням радіуса. У випадку зрошення вертикальних поверхонь відстань від центра удару до поверхні вибирають залежно від вимог до густини зрошення і початкової точки зрошення над поверхнею удару.

**Ключові слова:** розпилення ударом; радіус і висота розлітання крапель; ребристі й округлі поверхні удару; зрошення насадок для утворення бурюлок; тепломасообмінні апарати.

И.И. Пуховой

#### ДИСПЕРГАЦИЯ ВОДЫ УДАРОМ О РЕБРИСТЫЕ И ОКРУГЛЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МАЛОНАПОРНОМ ИСТЕЧЕНИИ ВНИЗ ЧЕРЕЗ МАЛОЕ ОТВЕРСТИЕ

**Проблематика.** Низконапорное распыление воды ударом о твердую поверхность является удобным для кристаллизации воды на вертикальных поверхностях и горизонтальных насадках с сосульками. В предыдущих работах автора замечено влияние на гидродинамику распыленного потока шероховатости поверхности удара, поэтому в данной работе исследовано влияние рельефа поверхности на характеристики диспергации ударом. На ребристых поверхностях направление движения капель вдоль и поперек значительно влияет на параметры разлета капель. Этот факт может быть использован при орошении поверхностей.

**Цель исследования.** В работе поставлена цель исследовать влияние рельефа и формы поверхности удара на гидродинамику распыленного потока капель после удара.

**Методика реализации.** Эксперименты проводились при постоянном геометрическом напоре в сосуде 250–260 мм в.ст. с изменением расстояния от поверхности удара до отверстия, из которого истекла струя воды при расходах в пределах 0,46–2,75 г/с. Высота и максимальный радиус разлета капель после удара измерялись по следам капель на бумаге.

**Результаты исследования.** Проведены экспериментальные исследования характеристик разлета капель: первичных (после истекания из отверстия малого диаметра) и вторичных – после удара о ребристые поверхности (плоскую, круглую, крышу), выпуклую и вогнутую поверхности сегмента сферы и цилиндра. Капли разлетаются в 1,5–3 раза дальше в направлении вдоль ребер, чем в направлении, перпендикулярном им. Дальше всего летят капли при использовании ребристой крыши. Удар о поверхность с мелкими ребрами при малых расходах воды и малых высотах падения струи не дает нужных результатов. Максимальная высота поднятия капель вверх поперек ребер находится на меньшем расстоянии от центра удара. Подтверждена прямолинейная зависимость расхода воды от напора для отверстия диаметром 1,6 мм в изученном диапазоне напоров воды.

**Выводы.** При орошении насадок существует возможность распределения распыленного потока по направлениям, что позволяет обеспечить конструктивные требования аппаратов, например, при орошении труб ребра размещают вдоль них. Соседние отверстия для вытекания воды размещают на расстоянии, меньшем максимального радиуса разлета вторичных капель, учитывая меньшую плотность орошения с увеличением радиуса. В случае орошения вертикальных поверхностей расстояние от центра удара до поверхности выбирают в зависимости от требований к плотности орошения и начальной точки орошения над поверхностью удара.

**Ключевые слова:** распыление ударом; радиус и высота разбрызгивания капель; ребристые и округлые поверхности удара; орошение насадок для образования сосулек; тепломассообменные аппараты.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
19 січня 2017 року