

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.2.128966

УДК 621.039:69.621.58

І.І. Пуховий\*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

## ГІДРОДИНАМІКА І ТЕПЛОВА ВЗАЄМОДІЯ З ПОВІТРЯМ ПРИ УДАРІ СТРУМЕНЯ ВОДИ ОБ ЇЇ ПОВЕРХНЮ В ОБМЕЖЕНОМУ ОБ'ЄМІ З РОЗЛІТАННЯМ ОТРИМАНИХ КРАПЕЛЬ

**Проблематика.** Підігрівання повітря взимку за температур повітря нижче  $-5^{\circ}\text{C}$  можливе теплотою фазового переходу води в лід. Підігріте повітря зменшує витрату енергії в системах вентиляції і в теплових насосах типу повітря–вода і повітря–повітря в період пікових навантажень на системи тепlopостачання, що дає змогу зменшити встановлену потужність теплогенеруючого обладнання. Для охолодження води і зрошення насадок воду слід подрібнювати на краплі, а при контакті зі швидким потоком повітря краплі не повинні виноситися потоком, що досягається збільшенням діаметра крапель.

**Мета дослідження.** Визначення параметрів течії та подрібнення на краплі струменя, максимального радіуса розлітання крапель залежно від геометричних характеристик посудин (діаметра і глибини) та витрати води через сопло, із якого витікає струмінь. Також передбачено дослідження можливостей нагрівання і охолодження води повітрям, що засмоктане струменем.

**Методика реалізації.** Повітря з температурою нижче  $-5^{\circ}\text{C}$  нагрівають теплотою кристалізації води в умовах вимушеної течії без виносу крапель потоком через значний їх діаметр. Чим нижча температура довкілля, тим більший економічний і енергетичний ефект.

**Результати дослідження.** Експериментально досліджено процеси руйнування струменя води на первинні краплі з визначенням початку руйнування струменя та діаметрів первинних крапель. Виконано експериментальні дослідження радіусів розлітання вторинних крапель від руйнування повітряних бульбашок, що утворюються при ударі струменя об поверхню води, насичену повітрям, залежно від діаметрів і висоти посудин із водою.

**Висновки.** Встановлено, що зменшення діаметра посудин, шару рідини і збільшення витрати води через сопло сприяють розлітання крапель на більші радіуси. З фізичної точки зору, такий вплив слід пояснювати меншою втратою енергії струменя при збільшенні горизонтальних і вертикальних розмірів посудини та підвищенням тиску повітря в бульбашках.

**Ключові слова:** гідродинаміка; тепла взаємодія; радіус розлітання; параметри течії; енергія струменя.

### Вступ

Ежекція повітря струменем рідини, що витікає із сопла, супроводжується нагнітанням повітря під вільну поверхню рідини, яка сприймає удар. Цей процес використовують для аерації природних і стічних вод та в технологічних процесах, що відбуваються у тепломасообмінних колонах і колонах для флотації мінеральної сировини [1]. Воду попередньо слід охолоджувати при кристалізації води, яка може використовуватись для підігрівання повітря перед тепловими насосами і в системах вентиляції [2], що бажано робити в краплях, які контактують із повітрям. Надійною і простою є система розпилення води ударом її об тверду поверхню [3, 4]. Серед крапель є такі, що, через невеликий їх діаметр, виносяться повітрям. Це спонукало до дослідження утворення крапель при ударі струменя води об поверхню води в обмеженому просторі. Дослідники відзначають,

що бульбашки повітря або пари при проходженні через поверхню рідини впливають на її поверхню і руйнуються з утворенням крапель, які викидаються в газове середовище.

Викидання крапель рідини при руйнуванні газових бульбашок цікавить насамперед спеціалістів з охорони праці і довкілля. Багато праць, опублікованих в “Инженерном вестнике Дона”, присвячені виносу крапель із гальванічних ванн при утворенні газів на електродах, наприклад [5], але процес барботажу газу від струменя, розірваного на краплі, з високою швидкістю руху і отриманням повітряних бульбашок має іншу фізичну природу.

Відоме дослідження, що проведене в Саудівській Аравії (швидкісне фотографування та комп'ютерне моделювання), падіння крапель на поверхню води за незначних швидкостей краплі (дощ) [6]. Краплі при ударі об поверхню води викидають кільцевий факел краплинок малого діаметра. Навіть за таких малих швид-

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

костей у повітря підіймаються крапельки діаметром від 0,3 мкрн. Вони можуть випаровуватися, й, у випадку морської поверхні, отримується сіль як аерозоль, що може впливати на формування хмар.

Результати досліджень відносно ежекції повітря струменем води показують, що кількість захопленого струменем повітря пропорційна його швидкості, діаметру і формі сопла (плоске сопло і струмінь підсмоктують повітря майже в 3 рази більше), його довжині та куту нахилу до вертикалі, а також турбулентності потоку в соплі [1]. В [1] відзначається, що по осі потоку утворюється кратер, а газонасиченість центральної частини рідини не перевищує 40 %. За швидкості 10–30 м/с коефіцієнт інжекції струменем повітря не перевищує 1-2.

Жодних досліджень із визначення геометричних характеристик розлітання вторинних крапель, утворених при ударі серії первинних крапель об поверхню рідини, в доступній літературі та в інтернеті нами не знайдено.

Нами запропоновано використати вторинні краплі, що утворюються після удару струменя об поверхню рідини в обмеженому об'ємі, для охолодження рідин у повітрі з метою подальшої її кристалізації на вертикальних і горизонтальних поверхнях. Ідея такого використання – утворення крапель більшого діаметра, ніж при ударі струменя об тверду поверхню. Наш експеримент показав, що діаметр крапель лежить у межах 0,5–1,5 мм. Краплі більшого діаметра мають більшу швидкість витання, що запобігає їх винесенню за межі контактного охолоджувача з подачею повітря вентилятором. Крім того, барботаж ежектованого струменем, що витікає із сопла, холодного повітря в рідині повинен сприяти деякому охолодженню води для всього потоку. Для утворення поверхні удару доцільно використовувати невеликі за розмірами резервуари, що заповнюються водою.

### Постановка задачі

Метою дослідження є визначення параметрів течії та подрібнення на краплі струменя, максимального радіуса розлітання крапель залежно від геометричних характеристик посудин (діаметра і глибини) та витрати води через сопло, із якого витікає струмінь. Також передбачено дослідження можливостей нагрівання і охолодження води повітрям, що засмоктане струменем.

### Експериментальна установка

Експериментальна установка являє собою каркас із розміщеним у верхній частині зрошувачем з вмонтованими соплами різного діаметра. Установка встановлена на кориті для збирання води. При вимірюванні радіуса розлітання крапель з відкритої бокової частини каркаса на рівні дна посудини розміщувались листи паперу, на яких фіксувались краплі та замірявся міліметровою лінійкою максимальний середній радіус розлітання за останніми 5 краплями. Витрата водопровідної води через сопло замірялась ротаметром, що був попередньо проградунованим. Дослідження проводились на соплах з діаметром  $D = 1$  і  $2$  мм і довжиною  $L = 50$  мм. Для сопла в  $1$  мм досягалась гідродинамічна стабілізація, що, як відомо, настає при  $L > 50D$ . Потік води подавався до колектора довжиною  $560$  мм і діаметром  $15$  мм.

### Експериментальні дослідження

#### *Руйнування первинного струменя на краплі.*

Визначені довжина суцільної частини струменя та відстань між утвореними нижче краплями. Результати досліджень порівняно з результатами відомих робіт і виявлено хороший їх збіг. Вимірювання діаметра крапель води при розпиленні з вертикального сопла проводилось фотографуванням на фоні лінійки.

Діаметр крапель має значення від  $1$  до  $1,5$  мм на соплі  $1$  мм. При використанні сопла  $2$  мм краплі мали розмір  $3$ – $4$  мм. Тобто при таких розмірах крапель без винесення швидкість повітря може досягати значень  $4$ – $9$  м/с. На фото було помітно, що струмінь води біля сопла не гладкий, а наче складається з окремих з'єднаних між собою крапель. Починаючи з деякої відстані, струмінь руйнується, утворюючи краплі. В [7] також досліджувався процес руйнування струменя. Авторами була запропонована формула для визначення довжини тієї частини струменя, який ще не розпадається на краплі:

$$L = 320 \cdot V_{\text{стр}} \cdot D_c^{1,5}, \quad (1)$$

де  $V_{\text{стр}}$  – швидкість струменя води, м/с;  $D_c$  – діаметр сопла, м.

При проведенні нами експериментальних досліджень диспергації води із сопла діаметром  $1$  мм за допомогою фотографування на фоні лінійки для різних швидкостей струменя було

заміряно довжину струменя, який не розпадається на краплі. Ми розрахували довжину струменя, який не розпадається на краплі, за формулою (1). Експериментальні дані відрізняються на 3–5 мм і змінюються від 24 до 62 мм при зміні швидкості води в соплі діаметром 1 мм від 2,27 до 5,66 м/с. Похибка становить 1,9–5,5 %.

У [8] побудована теорія наближеного опису розпаданню на краплі тонкого струменя рідини. Оцінено відносну величину середнього діаметра крапель, що утворюються, та відстаней між ними. Автором запропоновані формули:

- для відстані між отриманими зі струменя краплями:

$$L = 4,48 \cdot 2a,$$

де  $a$  – радіус струменя;

- для радіуса крапель:

$$2R \leq 2 \cdot 2a,$$

де  $R$  – радіус краплі.

Підставивши у формули значення, отримуємо результати для сопла діаметром 1 мм (радіус струменя 0,5 мм) –  $L = 4,48$  мм,  $R \leq 2$  мм.

При проведенні нашого експерименту диспергації води із сопла діаметром 1 мм відстань між краплями змінювалась від 3,5 до 5 мм, а діаметр крапель становив 1,5–2 мм, що близько до розрахованих значень. Розраховане число Рейнольдса в соплі діаметром 1 мм змінюється від 1738 до 4556, що включає ламінарну і перехідну течії.

**Процеси розлітання вторинних крапель, що покидають поверхню удару.** Досліди виконувались на соплі діаметром 2 мм при ударі краплинного струменя об поверхню води в посудинах різних розмірів. Перший експеримент проводився з використанням трьох посудин однакової висоти і різного діаметра; в другому експерименті посудини були однакового діаметра і різної глибини:

- посудина № 1:  $h_1 = 50$  мм;  $d_1 = 180$  мм;
- посудина № 2:  $h_2 = 50$  мм;  $d_2 = 140$  мм;
- посудина № 3:  $h_3 = 50$  мм;  $d_3 = 120$  мм;
- посудина № 4:  $h_4 = 20$  мм;  $d_4 = 100$  мм;
- посудина № 5:  $h_5 = 90$  мм;  $d_5 = 100$  мм;
- посудина № 6:  $h_6 = 180$  мм;  $d_6 = 100$  мм.

**Таблиця.** Максимальний радіус розлітання крапель залежно від діаметра посудини за витрати води 30 г/с

Радіус	Посудини		
	№ 1 ( $d_1 = 180$ мм)	№ 2 ( $d_2 = 140$ мм)	№ 3 ( $d_3 = 120$ мм)
Від центра посудини, мм	550	570	650
Від краю посудини, мм	460	500	590

Посудини розміщувались на відстані 690 мм від сопла. Витрата води була сталою і становила 30 г/с. Режим течії води в соплі був перехідним і турбулентним (швидкість води в соплі близько 10 м/с). При проведенні досліджень було видно, що на поверхні рідини утворюються бульбашки з діаметром, що досягав 20–25 мм (рис. 1). Утворення бульбашок пов'язане з тим, що в місці контакту падаючого струменя з поверхнею рідини відбувається захоплення повітря. Струмінь води, що витікає із сопла, під дією сил поверхневого натягу та за рахунок перепаду тисків, проходячи деяку відстань, починає розпадатися на краплі, далі контактує з газорідною сумішшю в посудині та поширюється по об'єму посудини вертикально і горизонтально.



Рис. 1. Бульбашки на поверхні рідини (діаметр посудини 200 мм, висота 60 мм, витрата води 30 г/с, сопло  $D = 2$  мм)

Інтенсивність утворення крапель, що розлітаються, від руйнування бульбашок із повітрям найпростіше характеризувати *максимальним радіусом розлітання крапель*.

*Вплив діаметра* посудин на максимальний радіус розлітання крапель при ударі об шар рідини, що знаходилась у посудинах однакової висоти, видно з таблиці, яка подана з метою показати відстань розлітання крапель від центра і від краю посудин.

На поданих нижче графіках показані відстані від центра посудин, куди падає краплеподібний струмінь. Густина падіння вторинних крапель, що утворюються від удару об шар рідини, на горизонтальну площину видна на рис. 2. Найбільша кількість крапель розлітається на відстань близько 200 мм. Далі за цю відстань густина розбризкування крапель помітно зменшується.



Рис. 2. Розлітання вторинних крапель по радіусу (діаметр посудини 140 мм, сопло  $D = 2$  мм, витрата води 30 г/с)

При досліді з посудиною меншого діаметра, який становить 120 мм, утворювались більші бульбашки, ніж у попередніх експериментах. Ці великі бульбашки є майже по всій по-

верхні рідини, а при найбільшому діаметрі посудини їх видно лише 3–10 штук.

Дослідження максимального радіуса розлітання крапель  $R_{\max}$  при ударі об шар рідини, що знаходилась у посудинах однакового діаметра і різної висоти, наведені на фото (рис. 3). Зі збільшенням висоти посудини зменшуються висота бульбашок у центрі й діаметр бульбашок на поверхні. Кінетична енергія струменя при збільшенні висоти посудини витрачається більше на перемішування товстого шару рідини.

Отримані при проведенні експериментальних досліджень дані подані у вигляді графіків, і за допомогою програмних засобів Microsoft Excel були отримані рівняння, які описують ці залежності.

На рис. 4–6 наведені результати щодо  $R_{\max}$ , виміряного від центра посудин.

На рис. 4 зображено графік залежності максимального радіуса розлітання крапель від діаметра посудини. На графік нанесено експериментальні точки і проведено лінію тренду, яка узагальнює одержані результати.

Залежність максимального радіуса розлітання крапель води від діаметра посудини описується таким степеневим рівнянням (у формулах  $R_{\max}$  вимірюється в міліметрах):

$$R_{\max} = 4009,5 d_{\Pi}^{-0,386}.$$

Також графік на рис. 4 можна описати простішим, більш зручним для використання при виконанні розрахунків, лінійним рівнянням:

$$R_{\max} = -1,5 d_{\Pi} + 810.$$

Як видно з рис. 4, максимальний радіус розлітання крапель зменшується зі збільшенням

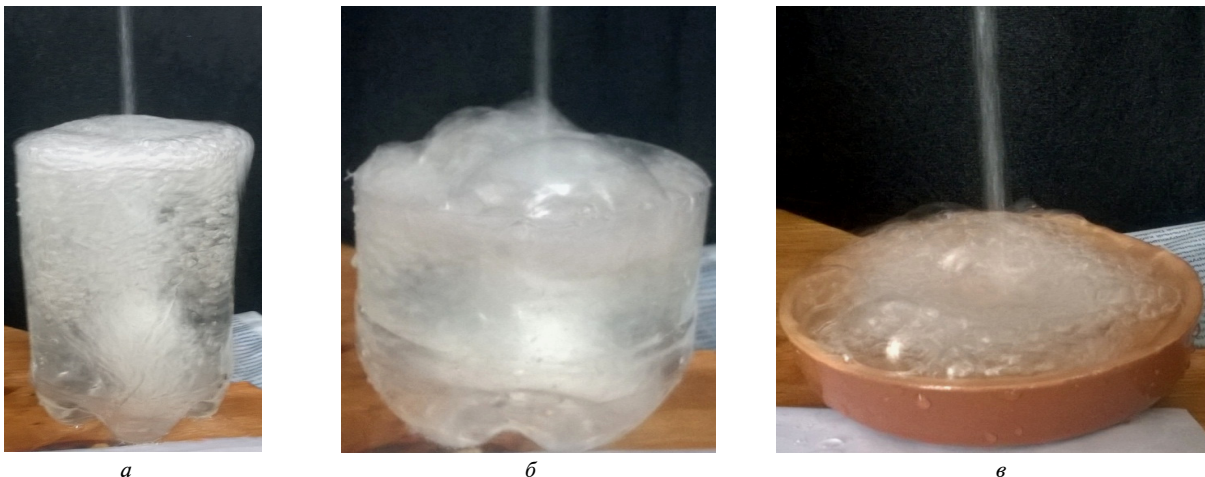


Рис. 3. Утворення бульбашок у посудинах різної висоти: а – 180 мм; б – 90 мм; в – 20 мм (сопло  $D = 2$  мм, витрата води 30 г/с)

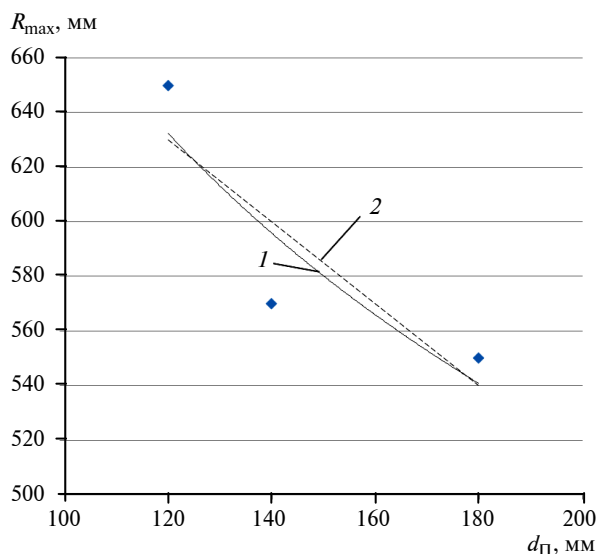


Рис. 4. Графік залежності максимального радіуса розлітання крапель від діаметра посудини (сопло  $D = 2$  мм, витрата води 30 г/с, висота посудин 50 мм): 1 – степенева залежність, 2 – лінійна залежність

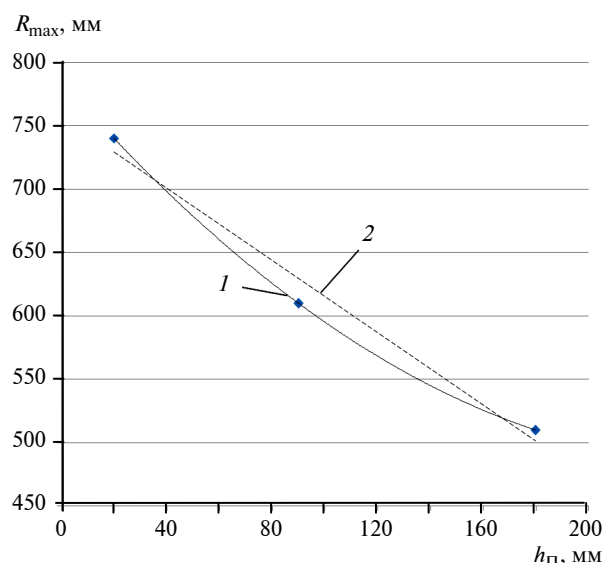


Рис. 5. Графік залежності максимального радіуса розлітання крапель від висоти посудини (сопло  $D = 2$  мм, витрата води 30 г/с, діаметр посудин 100 мм): 1 – степенева залежність, 2 – лінійна залежність

діаметра посудини. На рис. 5 зображена графічна залежність максимального радіуса розлітання крапель від висоти посудини.

З рис. 5 видно, що максимальний радіус розлітання крапель зменшується зі збільшенням висоти посудини, в яку падає струмінь води. Квадратичне рівняння залежності максимального радіуса розлітання крапель води від висоти посудини має такий вигляд:

$$R_{\max} = 0,0047 h_{\text{П}}^2 - 2,37 h_{\text{П}} + 785,54.$$

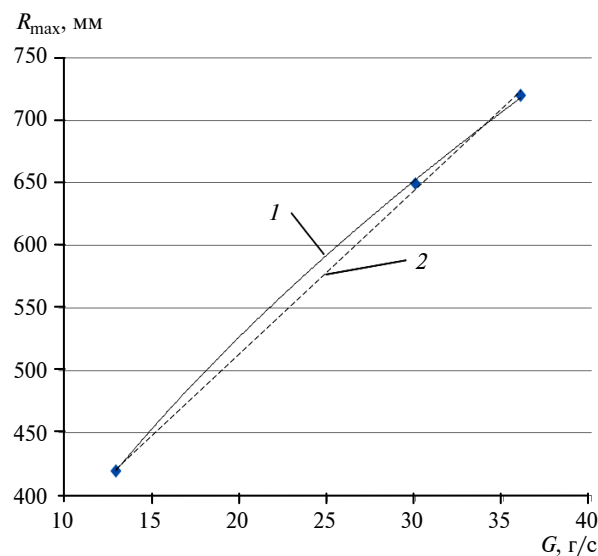


Рис. 6. Графік залежності максимального радіуса розлітання крапель від витрати води (сопло  $D = 2$  мм, висота посудини 50 мм,  $d_3 = 120$  мм): 1 – квадратична залежність, 2 – лінійна залежність

Йому відповідає таке лінійне рівняння:

$$R_{\max} = -1,4223 h_{\text{П}} + 757,49.$$

Максимальний радіус розлітання крапель залежно від витрати води досліджувався на посудині № 3 ( $h = 50$  мм,  $d_3 = 120$  мм). Вимірювання радіуса виконувалося на одному рівні з поверхнею, де розміщена посудина. Зі зміною витрати води в 5 разів радіус збільшується майже в 2 рази. Результати дослідження наведені на рис. 6.

Ця залежність описується квадратичним лінійним рівняннями:

$$R_{\max} = -0,081 G^2 + 17,012 G + 212,53,$$

або ж:

$$R_{\max} = 13,15 G + 250,39.$$

З рис. 6 видно, що зі збільшенням витрати води максимальний радіус розлітання крапель збільшується унаслідок збільшення кінетичної енергії, що йде на збільшення розмірів бульбашок і, можливо, тиску в них.

**Експерименти з нагрівання води повітрям** були проведені в серпні, коли температура повітря в кімнаті, де встановлений стенд, сягала  $30^\circ\text{C}$ . Дослідження проводилось за витрати води 30 г/с через сопло 2 мм при ударі об поверхню води в посудині діаметром 180 мм. Отримано, що температура води піднімається лише на  $0,8\text{--}1^\circ\text{C}$  (з  $20$  до  $21^\circ\text{C}$ ). Щоб з'ясувати при-

чину такого незначного підвищення температури, був проведений розрахунок кількості ежектованого повітря і можливої теплової потужності в процесі теплообміну за різниці температур 10 °С.

У [8] запропонована формула для розрахунку об'єму повітря, що захоплюється струменем води (в кубічних метрах за секунду):

$$\Phi_{\Pi} = 0,85 \cdot 10^{-5} + 8,25 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot D_{\text{стр}}^2 \cdot V_{\text{стр}}^3, \quad (10)$$

де  $\rho_{\text{в}}$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;  $D_{\text{стр}}$  – діаметр струменя, м;  $V_{\text{стр}}$  – швидкість струменя, м/с.

При діаметрі сопла і струменя 2 мм та швидкості 9,5 м/с кількість повітря, що захоплюється струменем води, становить 0,00057 м<sup>3</sup>/с, а масова витрата – 0,000737 кг/с.

Теплова потужність від повітря при його теплоємності 1 кДж/(кг·К) за різниці температур між повітрям і водою 10 °С сягає 7,37 Вт. Якщо покласти за діаметр струменя діаметр первинних крапель, то за діаметра крапель 3 мм витрата повітря і потужність збільшаться в 3,375 разу, а за діаметра краплі 4 мм – у 8 разів до витрати повітря 0,0059 кг/с (21 кг/год, або 16,4 м<sup>3</sup>/год) і потужності приблизно 60 Вт. За такої потужності вода з витратою 30 г/с може нагрітись у результаті барботажу за розрахунком не більше ніж на 0,5 °С. Враховуючи більшу ежектууючу здатність плоского струменя, можна очікувати нагрівання чи охолодження рідини на 2-3 °С на кожні 10 градусів перепаду температур. В експерименті вона ще нагрівалась додатково при падінні води від сопла до поверхні води. Таким чином, на істотне нагрівання (охолодження) рідини від процесу барботажу повітря не слід очікувати.

## Висновки

1. Підтверджені теоретичні залежності, що отримані іншими авторами, про подрібнення на первинні краплі швидкісного потоку, який витікає із сопла.

## References

- [1] N.F. Meshherjakov *et al.*, "Pilot plant testing of flotation columns with jet aerator", *Cvetnaja Metalurgija*, no. 516, pp. 15–17, 1997.
- [2] I. Pukhovi *et al.*, "Natural gas savings when replacing boilers with heat pumps and utilization of water crystallization heat as an alternative to the soil warmth", *Vidnovliuvana Energetyka*, no. 1, pp. 15–19, 2006.
- [3] I. Pukhovi, "Water dispersion and distinction of its low-head efflux down through the small hole", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 5, pp. 62–67, 2016. doi: 10.20535/1810-0546.2016.5.79521

2. Уперше проведені дослідження утворення повітряних бульбашок на поверхні посудин малого об'єму та диспергації рідини при руйнуванні згаданих бульбашок. Встановлено, що зменшення діаметра посудин, шару рідини і збільшення витрати води через сопло сприяють розлітання крапель на більші радіуси. З фізичної точки зору такий вплив слід пояснювати меншою втратою енергії струменя при збільшенні горизонтальних і вертикальних розмірів посудини і підвищенням тиску повітря в бульбашках.

3. Швидкісний потік води при ударі об її поверхню відрізняється від удару крапель дощу через те, що удар струменя потрапляє на поверхню газорідної суміші, і відрізняється від барботажу газу, що подається із середини рідини, тим, що в останньому випадку відсутня подача кінетичної енергії первинних крапель струменя під поверхню рідини.

4. На основі експериментальних даних отримані емпіричні залежності для розрахунку максимального радіуса розлітання крапель.

5. Краплі, що отримані при руйнуванні первинного струменя, який витікає із сопла діаметром 1 і 2 мм, мають розміри, що дають змогу працювати при охолодженні води в краплях зі швидкістю повітря 4–7 м/с без винесення крапель.

6. Струмінь води з круглого сопла у вигляді крапель захоплює повітря, що незначно (до одного градуса на 10 градусів різниці температур) може охолоджувати чи нагрівати воду при падінні в обмежений об'єм води. При плоскому струмені можливе нагрівання на 2-3 градуси через кращу інжектууючу здатність.

7. Отримані краплі води, що розлітаються при ударі, можна використати для процесів кристалізації води за умови рециркуляції води, що зливається з посудин, з її подачею в сопла насосом. При цьому відбувається додаткове охолодження води перед кристалізацією.

8. У подальшому слід вивчити детальніше причини впливу геометричних параметрів посудин і витрати води на утворення та розлітання крапель, а також розподіл кількості та діаметра утворених крапель по радіусу розлітання.

- [4] I. Pukhovi, "Water dispersion by hitting the ribbed and rounded surfaces at the low-head outflow through a small hole", *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 2, pp. 74–80, 2017. doi: 10.20535/1810-0546.2017.2.96573
- [5] V.I. Garshin, "Specification of a definition technique of a drop ablation charge in a working zone at electrolyte barbotage", *Inzhenernyj Vestnik Dona*, vol. 1, no. 4, 2012.
- [6] M.J. Thoraval, "Unexpected turbulence in a splash", *Physics*, vol. 5, p. 72, 2012. Available: physics.aps.org/articles/v5/72
- [7] E. Van de Sande and J.M. Smith, "Jet break-up and air entrainment by low velocity turbulent water jets", *Chem. Eng. Sci.*, vol. 31, no. 3, pp. 219–224, 1976. doi: 10.1016/0009-2509(76)85060-9
- [8] S.K. Aslanov, "Solution of Rayleigh problem on the instability of thin jets for the stage of their decay", *Fizika Ajerodispersnyh System*, no. 38, pp. 220–227, 2001.

И.И. Пуховой

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВОЗДУХОМ ПРИ УДАРЕ СТРУИ ВОДЫ ОБ ЕЕ ПОВЕРХНОСТЬ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ С РАЗЛЕТЕНИЕМ ПОЛУЧЕННЫХ КАПЕЛЬ

**Проблематика.** Подогрев воздуха зимой в диапазоне температур окружающей среды ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  возможен теплотой фазового перехода воды в лед. Подогретый воздух уменьшает расход энергии в системах вентиляции и в тепловых насосах типа воздух–вода и воздух–воздух в период пиковых нагрузок на систему отопления, что позволяет снизить установленную мощность теплогенерирующего оборудования. Для охлаждения воды и орошения насадов воду следует диспергировать на капли, а при контакте с быстрым потоком воздуха капли не должны уноситься потоком, что достигается увеличением диаметра капель.

**Цель исследования.** Определение параметров течения и дробления на капли струи, максимального радиуса разлета капель в зависимости от геометрических характеристик сосудов (диаметра и глубины) и расхода воды через сопло, из которого вытекает струя. Также предусмотрено исследование возможностей нагрева и охлаждения воды воздухом, засосанным струей.

**Методика реализации.** Воздух с температурой ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  нагревают в условиях вынужденного течения без уноса капель потоком. Чем ниже температура атмосферного воздуха, тем больший экономический и энергетический эффект.

**Результаты исследования.** Экспериментально исследованы процессы разрушения струи воды на первичные капли с определением начала разрушения струи и диаметров первичных капель. Выполнены экспериментальные исследования максимальных радиусов разлета вторичных капель от разрушения воздушных пузырьков, образующихся при ударе струи воды о поверхность воды, насыщенной воздухом, в зависимости от диаметров и высоты сосудов с водой.

**Выводы.** Установлено, что уменьшение диаметра сосудов, слоя жидкости и увеличение расхода воды через сопло способствуют разлету капель на большие радиусы. С физической точки зрения, такое влияние следует объяснять меньшей потерей энергии струи при увеличении горизонтальных и вертикальных размеров сосуда и повышением давления воздуха в пузырьках.

**Ключевые слова:** гидродинамика; тепловое взаимодействие; радиус разлета; параметры течения; энергия струи.

I.I. Pukhovi

HYDRODYNAMICS AND THERMAL INTERACTION WITH AIR AT WATER JET BLOW AGAINST ITS SURFACE IN THE LIMITED VOLUME WITH SCATTERING OF THE RECEIVED DROPS

**Background.** Air heating in winter in the range of ambient temperatures below  $-5^{\circ}\text{C}$  is possible with heat of the phase transition of water into ice. Heated air reduces the energy consumption in ventilation systems and air–water and air–air heat pumps during peak loads on the heating system reducing the installed capacity of the heat generating equipment. For water cooling and nozzle irrigation the water should be dispersed into droplets, and through contact with fast airflow drops shouldn't be carried away by the flow, that is achieved by increasing the diameter of drops.

**Objective.** The aim of the paper is determination of parameters of jet flowing and crushing on drops and evaluation of the maximum radius of droplet flight depending on the geometric characteristics of the vessels (diameter and depth) and the water flow through the nozzle from which the jet emerges. It is also planned to study the possibility of heating and cooling water with air sucked by the jet.

**Methods.** The air temperature below  $-5^{\circ}\text{C}$  is heated in the conditions of forced flow with no entrainment of droplets by a jet. The lower the air temperature, the greater the economic and energy effect.

**Results.** We experimentally investigated the destruction processes of the water jet on the primary drop with the definition of the jet destruction beginning and the diameter of primary drops. Moreover, we have carried out experimental studies on the dependence of the maximum radii of the secondary droplets from the destruction of air bubbles formed by the water jet impact on the water surface saturated with air, depending on the diameters and heights of the water vessels.

**Conclusions.** It was found that the decrease in the diameter of the vessels and the liquid layer, as well as the increase in the water flow through the nozzle, contribute to the drop spread to large radii. From a physical point of view, this effect should be explained by a smaller loss of jet energy with an increase of the horizontal and vertical dimensions of the vessel and an increase of air pressure in the bubbles.

**Keywords:** hydrodynamics; thermal interaction; flight radius; flow parameters; jet energy.

Рекомендована Радою  
теплоенергетичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
26 грудня 2017 року

Прийнята до публікації  
29 березня 2018 року

