

УДК 69.621.58:697.4

І.І.Пуховий, докт.техн.наук (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Експериментальні дослідження диспергації та охолодження малих витрат води при утворенні бурульок і нагріванні повітря теплотою кристалізації

Вивчено гідродинамічні та температурні характеристики розпилювання і охолодження води холодним повітрям з метою отримання бурульок на твердих насадках. Гравітаційне розпилення з напором води до 350 мм забезпечує потрібне для формування бурульок охолодження води до 0-3°С. Досліджено 2 типи гравітаційних розпилювачів з витратою води до 1 г/с і форсунки – від 3,5 до 68 г/с.

Изучены гидродинамические и температурные характеристики распыления и охлаждения воды с целью получения сосулек на твердых насадках. Гравитационное распыление с напором воды до 350 мм обеспечивает необходимое для формирования сосулек охлаждение воды до 0-3°С. Исследованы 2 типа гравитационных распылителей с расходом воды до 1 г/с и форсунки – от 3,5 до 68 г/с.

Процеси охолодження води в холодному повітрі проходять у різних пристроях енергетики та промисловості, що викидають теплоту в довкілля (наприклад, у баштових чи розбризувальних градирнях). В останніх охолоджуються великі потоки води, і ця сфера використання пристроїв для диспергації води достатньо досліджена.

Тенденції розвитку так званої "малої" енергетики та відновлюваних джерел енергії вимагають мінімізації обладнання для проведення різних процесів. У деяких випадках стає неможливим проведення технологічного процесу без використання невеликих витрат диспергованої води.

Стан проблеми та постановка задачі дослідження. Відомі роботи [1, 2], в яких пропонується підігрівати повітря теплотою кристалізації води перед повітряними тепловими насосами та перед подачею в традиційні калорифери систем вентиляції. Для роботи таких підігрівачів повітря може бути використана теплота кристалізації води (335 кДж/кг). При розробці таких підігрівачів повітря вигідно використовувати заморожування води в бурульках, які утворюються уже при температурах мінус 2-3°С. Кристалізація води в бурульках вимагає обов'язкового охолодження її до 3-0°С перед попаданням на насадки, до яких прикріплюються бурульки [3]. Переохолоджені після розпилення краплі не замерзають у повітрі при температурах, вищих за мінус 20-25°С, а їх кристалізація

проходить при контакті з твердими основами [4].

При заготівлі льоду бурульковим способом використовують великі льодоградирні зі значними витратами води, що розбризується форсунками на горизонтальні лінійні насадки, а теплоту кристалізації викидають в атмосферу [5]. У випадку використання теплоти кристалізації для підігрівання повітря з метою теплопостачання, розміри апаратів будуть значно меншими. Не завжди є бажаним охолодження води при течії у плівках на вертикальних та інших поверхнях. При довготривалій роботі це може призвести до звуження каналів для проходу повітря та вимагає періодичного видалення намерзлого у плівках льоду. Виходячи із вищезгаданого, найкраще охолоджувати воду шляхом її диспергації (розпилення), що дозволяє також зрошувати значну площу насадок. Для таких цілей використовують різні форсунки, диски та конуси, що обертаються [6, 8], витікання рідини струменем, коли великі краплі розриваються на дрібніші шляхом удару об тверду поверхню [7] чи інший струмінь, та ін. На жаль, інформація про розпилення невеликих витрат рідини обмежена лише паливними форсунками.

Метою нашої роботи є вивчення можливостей деяких методів розпилення малих витрат води для її охолодження морозним повітрям із наступною кристалізацією води і підігріванням останнього. В роботі досліджено лише основні гідро-

динамічні характеристики і температурні параметри охолодження води.

Використання паливних форсунок. Гідродинамічні характеристики. Для дослідження були використані форсунки з газотурбінної камери згоряння. Витрата води у форсунці №1 була $m_g = (2,66...0,383) \cdot 10^{-3}$ кг/с в залежності від тиску. Розпилювання при $p < 4$ бар не дає крапель менше 250 мікрон. При тиску 5 бар кількість крапель діаметром 150 мк становила біля 55%, менше 100 мк – 35%, біля 250 мк – 10%. Діаметр знаходився напилюванням крапель на суміш масла і гліцерину, а також на папір. Кут факелу розпилювання – біля 60°.

Для форсунки №2 при тисках 1-5 бар витрата змінювалась у діапазоні $(5,83...6,66) \cdot 10^{-3}$ кг/с. Кут факелу розпилювання складав біля 120°. При тиску 4 бар біля 30% крапель мали діаметр менше 150 мк, 5% – менше 350 мк, а 15% – менше 850 мк.

Для форсунки №3 характеристики розпилювання (діаметр крапель) були схожими з №2. Ця форсунка при тиску 1; 2,5 та 4 бар давала продуктивність відповідно 125, 144 та 162 кг/год, або $35 \cdot 10^{-3}$, $40 \cdot 10^{-3}$ та $45 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Охолодження води. Для дослідження було вибрано ті ж самі форсунки (№1 та №3 (кільцева)), що згадані вище, з урахуванням витрати при різних тисках та ефективності розпилювання. Також була використана форсунка №4 з малою витратою води, що конструктивно виконана в комплексі з кільцевою. Задачею дослідження було

знаходження температури води на виході з форсунок і на деякій відстані l від сопла до вертикальної пластини висотою h . Пластина допомагала зібрати охолоджену воду для вимірювання її температури. Вісь сопла при зрошенні вертикальної пластини була горизонтальною, тобто перпендикулярною до пластини. У випадку зрошення горизонтальної поверхні вісь сопла була вертикальною. Результати дослідження охолодження води форсунками (табл. 1) показують, що навіть при великих витратах ($m_B = 68$ г/с) при температурі довкілля $t_A = -12^\circ\text{C}$ вода з $11...13^\circ\text{C}$ охолоджувалась до $3...4^\circ\text{C}$ в залежності від відстані l від сопла форсунки до пластини на висоті h від низу пластини, біля якої вимірювалась температура охолодженої води.

Дослідження за температури довкілля мінус 10°C показали, що заморожувати краплі неможливо навіть при відстані від форсунки до 3 м. Негативний результат досліджень пояснюється переохолодженням крапель [4]. Іншого разу вода з водогону подавалась з температурою $t = 20...1^\circ\text{C}$, і в залежності від витрати води температура вимірювалась після форсунки на відстані l і біля пластини, на яку був направлений факел розпилювання. Результати досліджень охолодження води наведені в табл. 1, де t_a – температура атмосфери; t_{ex} – температура води перед форсункою; $t_{вих}$ – температура води на відстані l від сопла форсунки; $t_{вих}^{nl}$ – температура води нижче пластини висотою h . Зміною відстані l від пластини при незначній її висоті ми перевірили ефективність

Таблиця 1. Дослідження охолодження води у форсунках (вісь сопла: г – горизонтальна, в – вертикальна)

Форсунка, витрата	Дата	Вісь сопла	t_a	t_{ex}^{ϕ}	$t_{вих}^{\phi}$	$t_{вих}^{nl}$	Δt води загальна	l	h
№1 3,58 г/с	21.02.94	г	-5	18	–	0	18	0,6	1,5
		г	-5	19,2	–	0	19,2		
№3 68 г/с	7.03.94	в	-1,2	13,8	3,9	–	9,9	1,0	–
		г	-1,2	12,3	–	1,5	10,8	1,0	1,5
		г	-1,2	12,0	–	2,2	9,8	0,25	1,5
		г	-1,2	11,8	–	3,4	8,4	0,25	1,0
№4 (центральна) 33 г/с	7.03.94	г	-1,2	11,2	–	1,6	9,6	1,0	1,0
		в	-1,2	10,0	1,5	1,5	8,5	1,5	–
		в	-1,2	10,0	3,8	–	6,2	0,15	–
		г	-1,2	10,0	1,1	–	8,9	0,5	1,5
		г	-1,2	9,9	1,4	–	8,5	0,5	0,6
		г	-1,2	10,1	2,8	–	7,3	0,15	0,6

оохолодження при використанні більш зручної і точної системи вимірювання температури води після пластини, ніж у краплях перед нею.

Як видно з наведених результатів, для форсунок №3 температура води після пластини мало (на 2-3°C) відрізнялася при зміні l у 4 рази (від 0,25 до 1 м). Охолодження води було найбільш інтенсивним у першій фазі потоку в краплях, де більша різниця температур. У дослідах із найменшою по продуктивності форсункою №1 (табл. 1) видно, що температура води на виході з пластини складала 0°C при температурі атмосфери $t_A = -5^\circ\text{C}$.

Середня різниця температур між повітрям і водою в дослідах була від 5,5 до 14°C і при збільшенні витрати води та відстані від пластини зменшувалася. Мінімальна різниця температур між водою і повітрям складала 3-5°C.

Низьконапірний гравітаційний щільовий розпилювач (НГЩР). При невеликих витратах води (біля 0,5-1 г/с) використання форсунок є проблематичним через занадто малий переріз сопла. Автор розробив розпилювач води на краплі при використанні щільового каналу плоскої форми (рис. 1). Вода витікає через такий канал під дією сил гравітації (висота стовпчика води перед соплом (напір) складав 180-300 мм). Щілина каналу мала ширину біля 0,1-0,2 мм і довжину 2-3 мм (канал утворювався сплюсненням тонкої мідної трубки різних діаметрів). Спочатку вода закручувалась на відстані 50-100 мм від сопла, потім розривалась відцентровими силами на 6-12 тонких суцільних цівок, які мають довжину 150-200 мм і далі розпадаються на краплі. При русі в повітрі краплі охолоджуються або нагріваються в залежності від температури повітря. Діаметр факела розпилювання при відстані від сопла по вертикалі в 1-1,3 м складав біля 100-150 мм. При температурі довкілля $t_A = -3...-6^\circ\text{C}$ (досліди проводилися 28.02 та 4.03.1996 року) і початковій температурі води 3...7°C забезпечувалось охолодження води до 0...1°C при висоті сопла над точкою вимірювання 1-1,1 м.

Вода, що падає з висоти $l = 1$ м у вигляді крапель, набуває кінетичної енергії, яку можна

використати для додаткового подрібнення цих крапель при ударі їх об тверду плоску поверхню відповідної площі (при $l = 1$ м поверхня повинна мати радіус біля 120-150 мм, при $l > 1$ м потрібно брати більший розмір). Після удару краплі, що падає з такої висоти, дрібні вторинні краплинки розлітаються на відстані до 200-250 мм у сторону від центра твердої поверхні.

Щоб не допустити засмічення сопла 1 (рис. 1), використовувався фільтр 2 тонкої очистки води, взятий зі стандартного побутового очищувача води. Щоб сопло не замерзло, потрібно підтримувати температуру води вище 5...7°C і використовувати розташовану на ємності 3 теплоізоляцію 4.

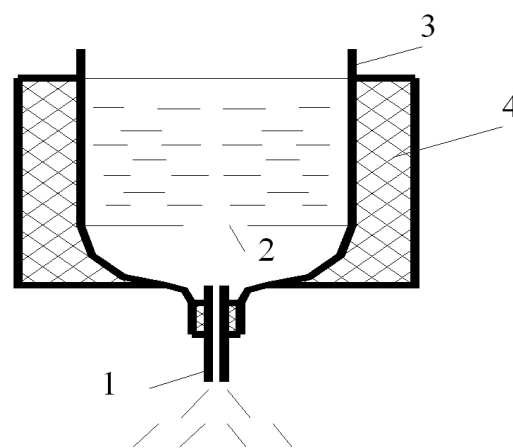


Рис. 1. Розпилювач НГЩР: 1 – капілярна розплющена трубка; 2 – вода; 3 – резервуар; 4 – теплоізоляція.

Вода у ємність 3 може добавлятися періодично для підтримання мінімального рівня 200-250 мм. У такий низьконапірний щільовий розпилювач воду можна добавляти 1-2 рази за 2 години шляхом подачі з більшого резервуара вручну або часовим механізмом. Також можна використовувати велику ємність зі значною площею дзеркала води для невеликої зміни напору протягом багатьох годин. Розроблений розпилювач не дає шуму і також може бути використаний для зволоження повітря у приміщеннях взимку і для охолодження влітку при подачі холодної води з колодязя або льодосховища. Вода, диспергована в НГЩР, охолоджується на 3-8°C в залежності від температури довкілля (табл. 2). Середня різниця температур між теплоносієм і повітрям складала 8-13°C.

Таблиця 2. Результати експериментальних досліджень охолодження води в низьконапірному щільовому розпилювачі (НГЩР)

Дата	t_A повітря, °C	Висота над поверхнею L , м	Витрата води $m_B \cdot 10^3$, кг/с	t_{ex} , вода, °C	$t_{вих}$ (на L) вода, °C	Натиск води на сопло h , м
28.02.1996 р.	-5	1	1-1,1	6	2	0,2-0,25
9.03.1996 р.	-6	1	0,33-0,41	4	1	0,2-0,3
13.03.1996 р.	-7	1,3	0,33-0,41	9	1...2	0,2-0,25

Таблиця 3. Результати вимірювання радіуса розлітання первинних крапель у струмені води в залежності від висоти падіння (витрата води $G = 0,58$ г/с)

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

Низьконапірний гравітаційний струменевий ударний розпилювач (НГСУР). Запропоновано організувати низьконапірне (напір до 0,35 м вод.ст.) розпилення потоку рідини, що витікає з тонкого дна посудини через отвір малого діаметра (0,2-0,6 мм) під дією сил гравітації методом удару струменя об тверду поверхню. У градирнях при великих витратах води такий метод широко використовується.

Зрошувальний пристрій складається з чотирьох ємностей, при цьому всі вони у нижній частині мають по одному отвору різного діаметра для забезпечення різних витрат води. Для забезпечення незмінності витрати води під час виконання дослідів виконувалося періодичне додавання води в робочу ємність, що давало можливість підтримувати напір води в ній на рівні 270-300 мм. Таким чином, зміна напору становила не більше 10% і мало впливала на витрату води. Потік рідини, витікаючи через отвір малого діаметра у нижній частині ємності, падав на поверхню удару, під дією сил гравітації розбивався об дерев'яну пластину шириною 44 мм на краплі. Було з'ясовано, що при підтриманні напору води в ємності на рівні 270-300 мм витрати рідини чотирма посудинами становили відповідно 0,39; 0,52; 0,58 та 0,87 г/с. На певній висоті під зрошувальним пристроєм розміщувався аркуш паперу і відкривався отвір для подачі води. Струмінь, розлітаючись на первинні краплі, падав на аркуш паперу, залишаючи "сліди", що займали на аркуші певну площу.

Результати вимірювань показані в табл. 3.

Максимальний радіус розбрикування води в залежності від висоти падіння струменя та витрати води. Квадратична і лінійна апроксимація результатів дослідження максимального радіуса розлітання вторинних крапель води в залежності від висоти падіння струменя при вимірюванні на одному рівні з поверхнею ударів у діапазоні висот 430-1270 мм та при витраті 0,58 г/с мають наступний вигляд (h та R в мм):

$$R = -7 \cdot 10^{-5} h^2 + 0,2392h + 100,11; \quad (1)$$

$$R = 0,1241 h + 142,33. \quad (2)$$

Зі збільшенням витрати води (отвір більшого діаметра) радіус розлітання вторинних крапель збільшується. Дана залежність описується такими рівняннями (R в мм, G – витрата води, г/с):

$$R = -273,66G^2 + 575,14G - 3,13; \quad (3)$$

$$R = 222G + 101,5. \quad (4)$$

Залежність максимального радіуса розлітання вторинних крапель від відстані від поверхні удару до нижче розташованих площин. Фактично графік на рис. 2 є відображенням траєкторії польоту краплі води, що падає донизу після розпилення струменя рідини об поверхню удару.

Радіус розлітання крапель швидко зростає 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 падає вже практично у вертикальному напрямку. На висоті більше ніж 450-500 мм при зрошуванні поверхонь, розташованих нижче від поверхні удару, немає сенсу розміщувати насадки для зрошення. При значеннях $\Delta h=0-500$ мм розглянута вище залежність описується рівнянням:

$$R = -0,0006(\Delta h)^2 + 0,5268\Delta h + 240. \quad (5)$$

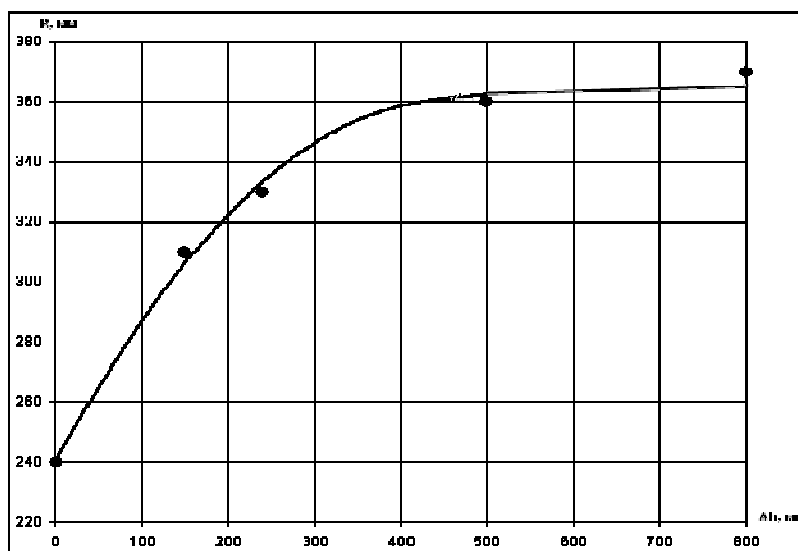


Рис. 2. Залежність максимального радіуса розлітання вторинних крапель від відстані між поверхнею удару та розташованою нижче площиною ($G = 0,58$ г/с; $h = 730$ мм).

При відстанях від поверхні удару до нижче розташованих площин більше 500 мм можна вважати, що максимальний радіус становить біля 350-400 мм.

Дослідження зрошення паралельних дрітчастих насадок з утворенням на них бурульок. Насадки розміщувалися нижче від поверхні удару на висоті 240 мм. Витрата рідини змінювалась від 0,58 до 1,1 г/с. На поверхні удару біля бокових граней було 6-8 центрів формування крапель, які падали на насадки і формували найдовші бурульки у центрі. Переважна кількість рідини, що замерзала в бурульках, була в зоні радіусом менше 170 мм, що видно по довжині бурульок. У вторинних краплях є біля 50-70% поступаючої води. Розпилювання рідини за допомогою НГСУР забезпечувало охолодження рідини від 8-10°C до 0-2°C при температурі довкілля мінус 3-6°C.

Висновки: 1. У паливних форсунках проблематично добитися витрат, менших за 1 г/с.

2. Для малих витрат води при відсутності традиційної енергії на розпилювання води з метою отримання бурульок перспективним є використання сили гравітації при напорах до 300 мм вод.ст.

3. Використання плоского щільового отвору в гравітаційних розпилювачах більш ефективно, ніж циліндричного, через розривання струменя на 6-12 цівок.

4. При температурах довкілля, нижчих за мінус 3°C, забезпечується охолодження води до 0-1°C у гравітаційних розпилювачах та форсунках малої

продуктивності з утворенням бурульок на нижче розташованих насадках.

5. В ударному розпилювачі слід встановлювати зрошувачі або виконувати сопла (отвори) на відстані між ними 300-400 мм (для вирівнювання витрати по площі) і нижче від поверхні удару на 300-350 мм.

1. Пуховий І.І., Безродний М.К., Мхітарян Н.М., Кудря С.О. Економія природного газу при заміні котлів тепловими насосами та використання теплоти кристалізації води, як альтернативи теплоті ґрунту // Відновлювана енергетика. – 2006. – №1. – С. 15–19.

2. Пуховий І.І. Тепловые насосы, потребляющие электроэнергию по цене ночного тарифа и использующие теплоту сточных вод и кристаллизации воды. В кн. Малая энергетика в системе обеспечения эконом. безопасности государства. / Под ред. Вороновского Г.К., Недина И.В. – Киев: Знання України, 2006. – С. 152–156.

3. Пуховий І.І., Ляхович Л.М. Експериментальні дослідження процесів формування водного льоду в штучних бурульках // Енергетика: Економіка, технології, екологія. – 2004. – № 1. – С. 41–44.

4. Сморгин Г.И. Теория и методы получения искусственного льда. – Новосибирск: Наука. Сиб. Отд., 1988. – 282 с.

5. Бобков В.А. Производство и применение водного льда. – М.: Госторгиздат, 1961. – 167 с.

6. Пуховий І.І., Живиця В.В. Розробка та гідродинамічні дослідження бурулькового льодогенератора, що використовує природний холод // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – Серія теплоенергетики. – 1997. – № 1 – С. 26–28.

7. Пуховий І.І., Новік М.Л. Диспергація води в тепломасообмінних апаратах ударом гравітаційного струменя об тверду поверхню. "Відновлювана енергетика ХХІ століття". Матеріали ХІ міжн. наук. конференції, Крим, Миколаївка, 13–17 вересня 2010 р. – Київ: ТОВ Видавництво "Вікторія", 2010. – С. 126–127.

8. Пажи Д.Г., Галустанов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. – М.: Химия, 1984. – 256 с.

