

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ВОДНОГО ЛЬОДУ В ШТУЧНИХ БУРУЛЬКАХ

Вступ

Людство за весь попередній період свого існування не витратило такої кількості природних паливно-енергетичних ресурсів, яка була витрачена в ХХ столітті. За цей незначний в історичному плані проміжок часу європейська цивілізація витратила більшу частину їх розвіданих запасів. Запаси паливно-енергетичних ресурсів (в основному традиційних – нафти, газу, вугілля) на Землі майже скінчилися. До того ж вони мають досить високу ціну.

Таким чином, необхідно ширше використовувати інші, більш перспективні види енергії, до яких, безсумнівно, відносяться відновлювані джерела енергії (ВДЕ). До них належать енергія вітру, Сонця, геотермальна енергія та інші джерела, частка яких в порівнянні з вищезгаданими не дуже значна, але має свою вагу. Розглянемо одне з таких джерел.

В зимовий час Земля охолоджується через низьку інтенсивність сонячної радіації за рахунок холоду, проникаючого з Космосу. З однієї сторони, холод примушує опалювати приміщення і нести великі затрати на підігрів води, а з іншої – холод в зимовий час дозволяє

зберігати продукти без затрат енергії в холодильних установках, а також збільшує холодильний коефіцієнт в холодильних установках або зменшує витрату електричної та теплової енергії в них за рахунок зниження температури конденсації холодильного агента. Нажаль, в сучасних виданнях літератури по ВДЕ ніде про холод, як відновлюване джерело енергії, не згадується [1].

Прямим доказом того, що холод є відновлюваним джерелом енергії, є використання літом льоду, заготовленого взимку і акумульованого в спеціальних пристроях для зберігання льоду. Лід дає холод, який повинні були б виробляти в літній період холодильні установки, котрі використовують переважно електроенергію. Лід, заготовлений взимку з використанням природного холоду, є відновлюваним джерелом енергії, завдяки економії енергії для виробництва льоду або холоду.

Відзначимо, що теплоту кристалізації (замерзання) води використовують в системах опалення і вентиляції при негативних температурах довкілля [2].

Постановка задачі. Лід з води може бути отриманий різними способами. Серед них можна виділити [3]:

- ♦ заморожування на водоймах;
- ♦ пошарове наморожування на поверхні льоду;
- ♦ одержання гранульованого льоду шляхом розпилення рідини;
- ♦ одержання льоду при заморожуванні в ємностях;
- ♦ комбіновані методи (розпилення рідини з пошаровим наморожуванням).

При не дуже низьких температурах довкілля (-2...-10°C) слід віддати перевагу бурульковій технології генерації льоду [4]. Виробництво льоду в бурульках підвищує продуктивність льодогенераторів за рахунок безперервного збільшення поверхні теплообміну при збільшенні довжини і діаметра бурульок і дозволяє одержувати лід в дрібних кусках, що зменшує витрати енергії на його подрібнення. Виготовлення льоду на місці його споживання здешевлює виробництво. В порівнянні з добуванням льоду на водоймах, зменшуються витрати на заготівлю та транспортування льоду, в тому числі ліквідується важка ручна праця. Технологія виробництва льоду формуванням бурульок (на трубах, жердинах, нижніх краях вертикальних труб тощо) є відомою [3, 4]. Бурульки можна одержати при температурах нижче -3...-4°C, в той час як метод одержання льоду розпилом води на краплі вимагає температур нижче -15...-25°C.

Задачею дослідження є отримання якісних та кількісних характеристик щодо параметрів формування бурульок.

Експериментальна установка. Для проведення досліджень була використана експериментальна установка, описана в [4]. Основним її елементом є вертикальна алюмінієва труба з внутрішнім діаметром 214 мм з розташованим всередині у верхній частині труби рухомих диском для подачі води на стінки труби охолоджувача-кристалізатора (далі ОК).

В протилежність дослідом [4], де вивчалися гідродинаміка та інтегральні характеристики льодогенератора, в даній роботі вивчалися умови формування вибраної кількості пронумерованих бурульок з періодичним вимірюванням витрати води, що покидає окрему бурульку. Досліди проводились при постійній та періодичній подачі води на стінки охолоджувача-кристалізатора, а потім порівнювались отримані результати.

Експериментальні дослідження процесів формування бурульок і їх результати. Досліди були проведені при формуванні бурульок на нижньому зрізі труби та з використанням запатентованої насадки [5], що кріпилась на зовнішній нижній край труби по периметру. Насадка, що представляє собою виготовлену з бляхи зубчасту смугу, дозволяє відвести до центра і від центра труби окремі зубці для того, щоб бурульки могли вирости товстішими без зростання між собою.

Якщо відстань між бурульками без насадки складала близько 25 мм і вони не могли перевищувати в напрямку периметру цю товщину, то при відігнутих зубцях довжиною 82 мм, шириною 15 мм і відстанню між зубцями 10 мм (при тій же самій кількості бурульок – 27, або 37 бурульок на 1 метр довжини) товщина бурульок доходила в середньому до 35-45 мм, а деяких бурульок – до 50 мм.

Після зростання бурульок зовнішня і внутрішня поверхні представляли собою у випадку використання відігнутих зубців циліндр з хвилястою ребристою поверхнею, яка набагато більша, ніж поверхня циліндра, сформованого на нижньому рівному зрізі труби (без насадки). Це підвищує виробництво льоду, якщо споживача задовольняє трубчаста форма штучного льоду. Такий лід теж легко подрібнюється на шматки розміром до 100 мм. Найдовша бурулька, наморожена за 7 годин 5 хвилин (температура навколишнього повітря $t = -3...-6^{\circ}\text{C}$), мала довжину 103 см і діаметр посередині довжини бурульки близько 50 мм. Середня температура складала мінус 5°C.

Довжини бурульок, одержаних за 2 години 45 хвилин при $t = -3...-6^{\circ}\text{C}$, розподілялись таким чином (таблиця 1).

Таблиця 1
Статистичний розподіл довжини бурульок в експериментальному кристалізаторі

	Довжина бурульок, мм				Всього
	500...520	400...450	250...300	Найдовша 620	
Кількість	6	13	7	1	26
Відсоток	23	50	23,5	3,5	100

При цьому подача води на вході в трубу складала $(1,0...1,15) \times 10^{-3}$ кг/с (близько 3,6 кг/год). Середня витрата води на вході в апарат складала $0,04 \times 10^{-3}$ кг/с на бурульку.

Визначити витрату води на вході на кожну з бурульок не представлялось можливим, а на виході з бурульки це робилося методом

використання мірної посудини та секундоміра. Для полегшення експериментів було знайдено середню масу краплі води при 0°C. Вона складає близько 0,105...0,11 г. В розрахунках ми приймали вагу 1 краплі 0,108 г.

Через невелику витрату води щільність зрошення корпусу апарата (труби)

$$\Gamma = \frac{m_s}{\pi \cdot d}$$

була близько $1,71 \times 10^{-3}$ кг/мс, що нижче одержаних в [4] мінімальних значень.

$\Gamma_{\min 2} = (5...6,7) \times 10^{-3}$ кг/с – мінімальна щільність зрошення при зміні витрати рідини в сторону зниження. Цей фактор спричиняв неповне змочування внутрішньої поверхні труби і деяку нерівномірність зрошення різних бурюлок. Витрата води, що покидала бурюлки, на 3...4 бурюлках була близькою до нуля і вони росли найшвидше по довжині. Це означало, що вода, яка надходила, майже замерзала. Решта бурюлок мали витрату води на виході від 0,01 до 0,0825 г/с. Зауважимо, що навіть при подачі води двома соплами є нерівномірне зрошення (20...90% від середнього [4]). Бурюлки з малою витратою води росли по довжині швидше. Ті ж бурюлки, у яких витрата води була на виході більшою, мали більшу товщину. Це можна пояснити тим, що бурюлки з малою витратою води змочувались не по всьому периметру (мало води), а потік йшов, в основному, зі зворотної до центру корпусу води (труби) сторони. Бурюлька змочувалась краще по периметру лише внизу, де діаметр менший і щільність зрошення більша.

Описані вище факти характерні для безперервного зрошення бурюлок водою. Ми спробували прискорити ріст довжини бурюлок шляхом використання переривистої подачі води в апарат. Вода подавалась при щільностях зрошення труби $\Gamma > \Gamma_{\min}$. При цьому Γ перевищувала Γ_{\min} в декілька разів. Вода подавалась протягом 5...15 с, а потім 45...90 с не подавалась зовсім. Час вибирався з розрахунку часу повного стікання попередньої дози води з запасом плюс 5...15 с. Більше, ніж 90 секунд, перерву роботи не можна було, бо вода, що залишалась в соплах, які направлені до центра розширювального диска при температурах повітря мінус 7...13°C, встигала замерзнути і це призводило до зупинки охолоджувача-кристалізатора. Крім того, при цих температурах довкілля повітря вгорі на виході з

охолоджувальної труби мало від'ємну температуру, і на кришці труби з отворами для виходу нагрітого теплою кристалізації повітря також формувалися бурюлки довжиною 2...2,5 см, які починали доторкуватися до верхньої поверхні диска і попереджували про це зміною характеру звуку при обертанні. Вказані фактори були виявлені після зупинки та огляду ОК. За 5 годин 30 хвилин бурюлки вирости до 650...800 мм, що складає 118...145 мм/годину. На 1 градус температурного перепаду (середня температура дослідів 8,5°C) ріст бурюлок складає при періодичній подачі води 14...31 мм/(год-град) і 18...132 мм/(год-град) при постійній подачі води на стінки труби (таблиця 2).

За першу годину дослідів швидкість росту бурюлок була вищою. За перші 24 хвилини бурюлки вирости на 85...97 мм, що складало 212...242 мм/год або 21...24 мм/(годград). Решта даних наведена в таблиці 2.

При періодичній подачі води переваг по швидкості росту довжини не виявлено. Її можна рекомендувати на початку формування бурюлок при $t_{\text{г}} > (-3...-4)^{\circ}\text{C}$. Порівнювати за абсолютними значеннями періодичну подачу з постійною важко, тому що у цих випадках були різні витрати води та швидкість вітру. Але ясно видна тенденція зменшення швидкості зростання бурюлок із збільшенням їх довжини і часу дослідів, що може бути пов'язане зі зменшенням щільності зрошення і зменшенням при цьому швидкості рідини, що рухається по бурюлці при постійній подачі, і неповним охолодженням товстішої бурюлки в період зупинок (при періодичній подачі води). Цікаво, що при періодичній подачі до 1,5 години дослідів в межах похибок швидкість росту бурюлок була майже незмінною.

Розглянемо тепер зміну діаметра бурюлок. Бурюлки, що вирости на вертикальних невідігнутих зубцях, мали переважно форму, близьку до осесиметричного конуса. Ті, що росли на відігнутих назовні від центра зубцях, мали виражену овальну форму на довжині біля 100...150 мм від зубця. Ці бурюлки в верхній частині росли вбік до центру, бо звідти йде вода. Далі бурюлки приймали форму, близьку до осесиметричного конуса. Це пояснюється, на наш погляд, тим, що вода змочує бурюлку по периферії завдяки капілярним силам, які спричиняються періодичними (через 9...10 мм) впадіннями глибиною 0,5...3 мм.

Бурюлька з вертикального зубця довжиною 650 мм мала у верхній частині овальну форму з перерізом 32x38 мм, а така ж, вирощена на

відхиленому назовні зубці – 25x34 мм (після 5,5 годин дослідів).

В таблиці 3 показана зміна більшого діаметра і меншого діаметра овала бурульок, сформованих (по виступах на бурульках) на відхилених назовні зубцях.

Не враховуючи льоду, що утворився в нижній частині корпусу апарата, бурульки мали масу 160...515 г. (визначалась після танення бурульки з використанням мірної посудини). При температурах доквілля мінус 3...5 °С і середній масі бурульок 400 г. за 5,5 годин проведення досліджень, в цілому, було отримано 10,8 кг льоду з 27 бурульок. При проведенні простих

розрахунків видно, що за 1 годину було наморожено 1,96 кг льоду, а за 1 секунду – $5,45 \times 10^{-4}$ кг. На 1 метр периметру можна отримати $8,13 \times 10^{-4}$ кг/мс штучного льоду. В таблиці 4 показані переріз (біля основи), довжина та маса деяких бурульок.

Такий охолоджувач-кристалізатор також можна використовувати в системах опалення (за рахунок теплоти кристалізації) і кондиціонування повітря [6]. В останньому випадку в ОК потрібно подавати воду, яку ми можемо охолоджувати за рахунок плавлення льоду, заготовленого взимку і акумульованого на літо.

Таблиця 2

Вплив подачі води в кристалізатор на інтенсивність росту бурульок

		Постійна подача води $\Gamma < \Gamma_{\min}$				Періодична подача води $\Gamma > \Gamma_{\min}$				
		0,5	2,1	6,3	7,1	0,4	0,66	1,2	2,0	5,5
Тривалість дослідів, годин										
Довжина, мм	Min	250	320	600	660	85	140	240	335	650
	Max	330	520	-	1030	97	190	320	525	800
Швидкість зростання довжини, мм/год	Min	500	152	95	92	212	212	200	167	118
	Max	660	247	-	145	242	270	266	262	145
Швидкість зростання на 1 °С, мм/год·К	Min	100	30	19	18	21	17	24	19	14
	Max	132	49	-	29	24	27	31	30	17

Таблиця 3

Залежність діаметру перерізу бурульок від довжини

Подача	$l_{\text{бур}}$	Відстань від основи бурульки, мм	0	100	200	300	400	500	600
періодична	650	Більший діаметр	34	30	25	24	20	18	10
		Менший діаметр	25	23	22	21	19	18	10
постійна	450	Більший діаметр	35	22	20	16	13	-	-
		Менший діаметр	23	20	15	13	11	-	-

Таблиця 4

Співвідношення перерізу, довжини та маси бурульок

Номер бурульки	Довжина, мм	Переріз біля основи, мм×мм	Маса бурульки, г
1	750	25×50	475
3	640	20×35	390
9	800	25×45	515
10	460	15×25	280
11	250	10×25	160
12	700	35	385
16	730	20×50	442
17	770	28×38	490

Висновки

1. Проведені дослідження процесів формування бурульок при постійному і періодичному зрошенні охолоджувача-кристалізатора не виявили збільшення швидкості росту бурульок при періодичній подачі.
2. Довжина бурульок в першу чергу залежить від витрати води. Чим вона менша, тим інтенсивніше наростають бурульки по довжині.
3. Збільшення витрати води на попередньо сформованих бурульках впливає на покращення змочування бурульок і підвищення інтенсивності теплообміну води з повітрям, що в свою чергу призводить до інтенсивного збільшення їх товщини.
4. Одностороннє зрошення внутрішньої поверхні труби, на якій формуються бурульки, призводить до утворення бурульок овальних у перерізі.
5. Використання насадки з зубцями дало можливість збільшити максимально можливий діаметр бурульок.

Література

1. Мхитарян Н.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы.- Киев: Наукова думка, 1999.- 315 с.
2. Пуховой И.И. Энергетические исследования охладителей-кристаллизаторов для системы отопления с использованием теплоты кристаллизации воды.// Промышленная теплотехника. 2002.- т.24, №1.- С.45-48.
3. Бобков В.А. Производство и применение водного льда.- М.: Госиздат, 1961.- 167с.
4. Пуховий І.І., Живиця В.В. Розробка та гідродинамічні дослідження бурулькового льодогенератора, що використовує природний холод.// Наукові вісті НТУУ "КПІ". 1997. Серія теплоенергетики.- С. 26-28.
5. Пуховий І.І., Ляхович Л.М. Деклараційний патент України на винахід №55006А. F25C1/00, F24D15/00. Охолоджувач-кристалізатор. Бюл. №3, 2003р.
6. Пуховой И.И. Пассивные солнечные системы отопления, использующие теплоту кристаллизации воды.// Промышленная теплотехника. 1998.- т.20, №5.- С.47-51.