

Риферт В.Г., док. техн. наук¹
Анатичук Л.І., акад. НАН України^{2,3}
Барабаш П.О., канд. техн. наук¹
Усенко В.І., док. техн. наук¹
Соломаха А.С., канд. техн. наук¹
Петренко В.Г., канд. техн. наук¹
Прибила А.В., канд. фіз.-мат. наук^{2,3}
Стрикун А.П.¹

¹НТУ «КПІ», вул. Політехнічна, 6, Київ, 03056, Україна;

²Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatysh@gmail.com

³Чернівецький національний університет
ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2,
Чернівці, 58000, Україна

ЕВОЛЮЦІЯ СИСТЕМИ ВІДЦЕНТРОВОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ ДЛЯ КОСМІЧНИХ МІСІЙ

Частина 2. Дослідження змінних характеристик системи багатоступінчастої
дистиляції (СМЕД) з термоелектричним тепловим насосом (ТТН)

У роботі наведено результати випробувань багатоступінчастого (5 ступенів) відцентрового дистильатора (СМЕД) з використанням для зниження енергоспоживання термоелектричного теплового насоса (ТТН). У досліджах вимірювали локальні (у режимі он-лайн) дані системи дистильації, такі як температура рідин (вихідної й дистильату) поточну продуктивність, загальний вміст солей, питому витрату енергії за різних швидкостей обертання ротора дистильатора, потужності ТТН, ступінь концентрування. Загальна тривалість випробувань склала понад 700 годин, кількість переробленої рідини (NaCl та урини) склала понад 2000 кг. Дослідження трьох дистильаторів і двох ТТН і порівняння їх результатів показало їхню ідентичність, що свідчить про високу якість виготовлення цих пристроїв. Отримані дані параметрів експлуатації (оберти n і потужність ТТН), можуть бути використані для оптимізації конструкції й режимів експлуатації роботи всієї системи СД + ТТН. Бібл. 28, рис. 8, табл. 1.

Ключові слова: термоелектрика, тепловий насос, дистильатор.

Вступ

В [1 – 7] наведено відомості про 3-х ступінчастий дистильатор з термоелектричним тепловим насосом. В [8 – 10] представлено результати розробки п'ятиступінчастого відцентрового дистильатора (СМЕД із ТТН) і його випробувань на стендах виготовлювача

дистилятора – «Термодистиляція Со», Україна, і Замовника – Honeywell, США. У наступні роки, а саме з 2002 по 2015 опубліковано декілька статей і доповідей [11–18] щодо випробувань CDS на стенді НАСА при концентруванні різних розчинів. Більш докладно ці результати, а також деякі методи поліпшення характеристик системи CDS наведено в статтях [19–26]. Більш докладний огляд робіт наведено у 1-й частині статті [27].

Опубліковані результати досить переконливо свідчать про унікальність системи для її використання в системі життєзабезпечення пілотованих кораблів у тривалих космічних польотах і на МКС (ISS). Однак у більшості публікацій наводились інтегральні характеристики роботи CDS – продуктивність системи G_d (по дистиляту), кг/год; питома витрата енергії SPC, Вт·год/кг; ступінь добування води з вихідної (що переробляється) рідини, %. Також наводились деякі показники якості одержуваної води.

Для створення теоретичної моделі CDS з метою подальшого її вдосконалення та оптимізації конструкції відцентрового дистилятора й системи в цілому наявних у опублікованій літературі даних недостатньо. Спроби моделювання CDS зроблені у праці [28]. Автори для розробки використовували без доведення їх придатності деякі залежності для розрахунків коефіцієнта тепловіддачі при конденсації та випаровуванні й не враховували температурну депресію, що виникає при випарюванні в дистиляторі вихідних розчинів. Крім того, при розрахунках теплопередачі не враховувався термічний опір стінки, що, як буде показано в 3 частині нашої статті, може становити до 30 % від загальної теплопередачі. Усе це призводить до спотворення таких важливих факторів в оцінці ефективності термоелектричного теплового насоса (ТТН), як різниця температур рідких потоків на вході в апарат $\Delta t_{\text{вх}}$ і середніх температур рідин в апараті $\Delta t_{\text{ср}}$.

З даних, наведених у нашій доповіді [8], випливає, що при однакових швидкостях обертання ротора дистилятора зі зменшенням потужності ТТН спостерігається зниження питомої витрати енергії на CDS, що зазначено також у наших працях [19, 20]. Більш докладно вплив цього фактора на ефективність ТТН і величину SPC системи не вивчено.

Важливим параметром ефективності системи СМЕД + ТТН є також ступінь добування. Чим більше його величина, тем менша кількість залишку. У працях щодо тестових випробувань, опублікованих у період з 1990 по 2017 рр. немає критичного аналізу можливості досягнення максимального ступеня добування.

Експериментальний стенд для дослідження інтегральних показників СМЕД із ТНР.

Як ми вже відзначали, компанією «Термодистиляція Со» у період 2000 – 2007 рр було розроблено й виготовлено три ідентичних п'ятиступінчастих відцентрових дистилятори: перший з них в 2000 р., другий – в 2002 р., третій – в 2006 р. Також Інститутом термоелектрики НАН і МОН України (ІТЕ) було розроблено і виготовлено два ідентичних термоелектричних теплових насоси, які було передано компанії Honeywell International Inc. Ці апарати згодом випробовувались в різних варіантах на декількох стендах у США, у тому числі й на стенді NASA.

Перед відправленням у США апарати було випробувано на стенді компанії «Термодистиляція Со». Представлені тут результати випробувань дистиляторів і ТТН раніше не публікувались.

На рис. 1 представлена принципова схема стенда, який використовувався компанією «Термодистиляція Со» для випробувань трьох дистиляторів і двох теплових насосів.

Основне й допоміжне устаткування стенда з'єднується системою трубопроводів, які

утворюють два циркуляційні контури. В одному з них, («гарячому») циркулює розчин, що випаровується, а в іншому («холодному») – дистилят.

Працює стенд у такий спосіб. Включається двигун дистилятора 1, який забезпечує задані оберти ротора дистилятора й вакуум-насосом 7 в апараті встановлюється необхідний тиск, який відповідає необхідній температурі кипіння розчину. З ємності 13 дистилятом заповнюється холодний контур, у якому забезпечується циркуляція дистиляту через конденсатор дистилятора 1, солемір 9, ротаметр 14, холодну сторону ТТН 2, теплообмінник-охолоджувач 3 і знову конденсатор дистилятора. «Гарячий» контур заповнюється з ємності 4 до рівня, що задається клапаном-регулятором 6. У гарячому контурі розчин циркулює з випарника дистилятора 1 через ротаметр 14, гарячу сторону ТТН 2 і знову у випарник дистилятора 1. При підведенні електроенергії до ТТН 2 відбувається охолодження конденсату в «холодному» контурі й нагрівання розчину в «гарячому» контурі. Розчин, перегрітий у ТТН 2 відносно температури насичення у випарнику ЦД 1, частково випаровується, а отримана пара, використовується в якості нагрівника у наступному ступені випару дистилятора, пара, отримана в останньому ступені дистилятора, конденсується в контактному конденсаторі ЦД 1. Надлишок дистиляту з холодного контуру автоматично відводиться в збірник дистиляту 5. Клапан 6 компенсує свіжим розчином випарену частину розчину, що циркулює в гарячому контурі. При цьому в ньому відбувається зростання концентрації розчинених речовин. У зв'язку з тим, що у ТТН 2 $Q_h = m_h \cdot c_{lh} (t_2 - t_1) > Q_c = m_c \cdot c_{lh} (t_4 - t_3)$, для забезпечення стаціонарності процесу надлишок тепла відводиться теплообмінником-охолоджувачем 3 в навколишнє середовище.

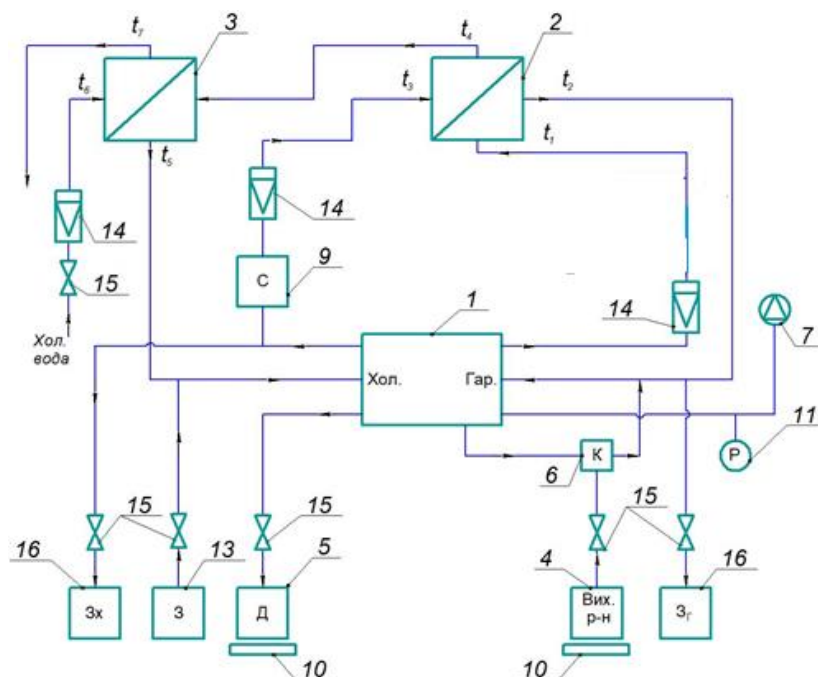


Рис. 1. Схема експериментального стенда

- 1 - відцентровий вакуумний дистилятор; 2 - термоелектричний тепловий насос;
 3 - теплообмінник-охолоджувач; 4 - вихідний розчин; 5 - збірник дистиляту;
 6 - клапан - регулятор живлення системи; 7 - вакуум-насос; 9 - солемір; 10 - електронні терези;
 11 - вакуумметр; 13 - ємність із дистилятом для заправки; 14 - ротаметри; 15 - запірний клапан;
 16 - ємності для спорожнення контурів.

Після закінчення експерименту відключається електроживлення ТТН 2, а холодний і гарячий контури спорожнюються у відповідні ємності 16.

Температура вимірялася на вході й виході з термобатарей по гарячій (t_1, t_2) і холодній сторонах (t_3, t_4), після теплообмінника-охолоджувача в холодному контурі (t_5) і на вході й виході з теплообмінника-охолоджувача зі сторони охолодження (t_6, t_7). Температури в гарячому й холодному контурах вимірялися хромель-копелевими термопарами, точність виміру становила $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Тиск в апараті вимірявся вакуумметром 11 зі шкалою виміру $-1 \dots 0$ бар (клас точності 1.0) у комплекті з барометром.

Маса отриманого дистиляту (продукту) і вихідного розчину вимірялася електронними вагами, точність виміру ± 2 г, діапазон виміру ± 10 кг.

Солевміст у холодному контурі вимірявся солеміром Hanna ($0 \dots 999$ ppm).

Потужність приводу двигуна й теплового насоса вимірялася на основі показань вольтметрів і амперметрів, клас точності 0,5. Оберти вимірялися тахометром з точністю ± 1 об/хв.

Розрахункові величини

Продуктивність у кілограмах у годину:

$$G_d = \Sigma G_d / \Delta \tau, \quad (1)$$

де ΣG_d – загальна маса отриманого дистиляту в ємності 13, обмірювана по вагах; $\Delta \tau$ – інтервал часу виміру.

Споживана потужність у ватах для основних компонентів тестового виробу CDS:

$$W = W_{\text{ТНР}} + W_{\text{CD}}, \quad (2)$$

де $W_{\text{ТНР}}$ і W_{CD} – це відповідно середня потужність, споживана ТТН та CD за період часу від запуску дистилятора до зупинки дистилятора. Споживана енергія вакуумного насоса на цьому етапі не враховувалася

Питоме споживання енергії (SPC), ват-години на кілограм зробленої води:

$$\text{SPC} = W/G, \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{кг}. \quad (3)$$

Ступінь добування або recovery:

$$R = G_d / G_{in}, \quad (4)$$

де $G_{in} = \Sigma G_{in} / \Delta \tau$ – маса споживаного розчину за час проведення експерименту, розрахована по терезах у ємності 16.

Ефективність теплового насоса:

$$\text{COP} = Q_h / W_{\text{ТНР}}, \quad (5)$$

де $Q_h = G_h \cdot C_p (t_2 - t_1)$, Вт, G_h – витрата рідини (розчину) в гарячому контурі; C_p – середня ізобарна теплоємність розчину, кДж/(кг·К).

Результати випробувань.

У таблиці представлений типовий перелік вимірюваних основних показників при концентруванні урини.

Характерна таблиця вимірюваних значень (уріна, $n = 1200$ об/хв)

Таблиця

Час	Привод			ТНР			Маса		TDS	Потік		Продуктивність	SPC	Температура			
	U	I	W	U	I	W	Вхідна	Вихідна		гар.	хол.			Гар. вх. ТНР	Гар. вих. ТНР	Хол. вх. ТНР	Хол. вих. ТНР
хв	B	A	Вт	B	A	Вт	г	г	мг/л	л/год	л/год	кг/год	Вт год/кг	°C			
0	24.2	3.1	75.0	20.5	10.08	206.6	0	0	12	60	82	0.00	0.0	23.2	23.1	22.9	22.9
6	24.2	3.1	75.0	22.5	10.9	245.3	288	184	22	60	82	1.84	174.1	31.8	43.7	23.4	22.7
12	24.2	3.1	75.0	28.5	14.3	407.6	634	602	38	60	82	4.18	174.1	37.5	48.3	24.5	22.4
18	24.2	3.1	75.0	29.2	14	408.8	1122	1070	51	60	82	4.68	103.4	38.7	49.4	25.1	22.3
24	24.2	3.1	75.0	32	14.4	460.8	1584	1528	61	60	82	4.58	117.0	38.8	50.8	25.1	22.0
30	24.2	3.1	75.0	31.8	15.2	483.4	2078	2006	67	60	82	4.78	116.8	39.4	51.5	25.2	22.1
36	24.2	3.1	75.0	32.3	14.22	459.3	2592	2502	73	60	82	4.96	107.7	40.0	52.2	25.4	22.1
42	24.2	3.1	75.0	32.1	15.24	489.2	3110	3004	76	60	82	5.02	112.4	40.0	52.2	25.4	22.3
48	24.2	3.1	75.0	31.9	15.2	484.9	3628	3500	79	61	82	4.96	112.9	40.1	52.1	24.9	22.0
54	24.2	3.1	75.0	32.4	15.36	497.7	4136	3990	82	61	83	4.90	116.9	40.3	52.2	25.1	22.1
60	24.2	3.1	75.0	33	15.6	514.8	4656	4492	84	62	83	5.02	117.5	40.7	53.5	24.9	22.0
66	24.2	3.1	75.0	33.2	15.64	519.2	5182	5006	87	62	83	5.14	115.6	40.9	53.2	24.9	22.1
72	24.2	3.1	75.0	33.1	15.56	515.0	5702	5508	90	63	83	5.02	117.5	40.9	53.1	24.9	22.0
78	24.2	3.1	75.0	33	15.58	514.1	6220	6010	92	64	83	5.02	117.4	40.9	53.2	24.9	22.0
84	24.2	3.1	75.0	33.2	15.72	521.9	6740	6510	94	65	83	5.00	119.4	41.0	53.5	24.8	22.0
90	24.2	3.1	75.0	33.2	15.46	513.3	7250	7010	96	67	83	5.00	117.7	41.0	53.5	24.8	22.0
96	24.2	3.1	75.0	32.8	15.34	503.2	7755	7500	97	68	83	4.90	118.0	41.0	53.1	24.6	22.0
102	24.2	3.1	75.0	32.9	15.4	506.7	8175	8000	98	71	83	5.00	116.3	41.0	53.1	24.8	22.0
108	24.2	3.1	75.0	0	0	0.0	8280	8205	96	71	83						
Середнє	24.2	3	75.0			492.8	8280	8205	75			4.93	115.1				
Загальне																	

Параметр «продуктивність» стосується дистилятора, TDS – загальна кількість розчинених твердих речовин.

Ідентичність показників трьох моделей СМЕД із двома ТТН

На рис. 2 і 3 показано результати концентрування урини для трьох моделей дистиляторів за потужності теплового насоса $N = 400$ Вт і швидкості обертання 1200 об/хв протягом 60 хв. З рисунків видно, що продуктивність G_d і питоме споживання енергії SPC усіх трьох зразків відцентрових дистиляторів має близькі значення. Розбіжність даних за цими показниками при однаковому часі τ не перевищує 5 %.

Цей результат дозволяє нам надалі при аналізі результатів різних випробувань не вказувати номер дистилятора.

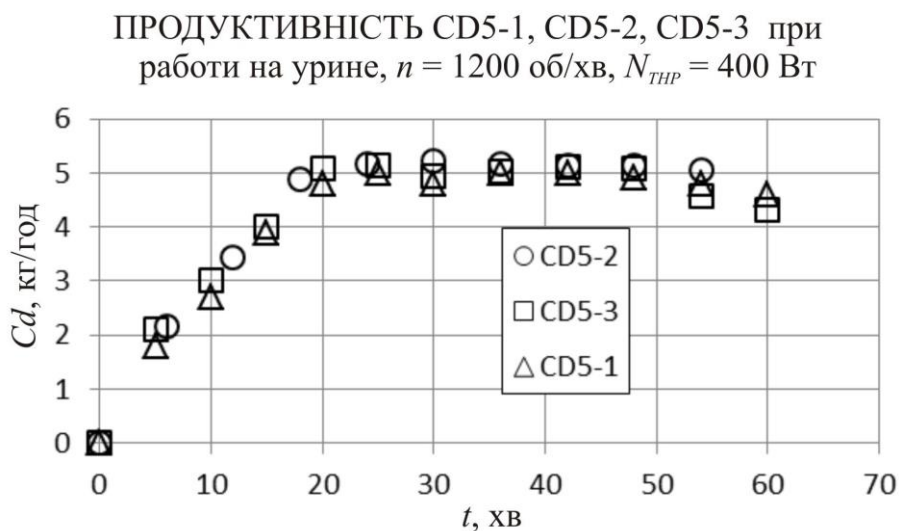


Рис. 2 Залежність продуктивності від часу для різних дистиляторів

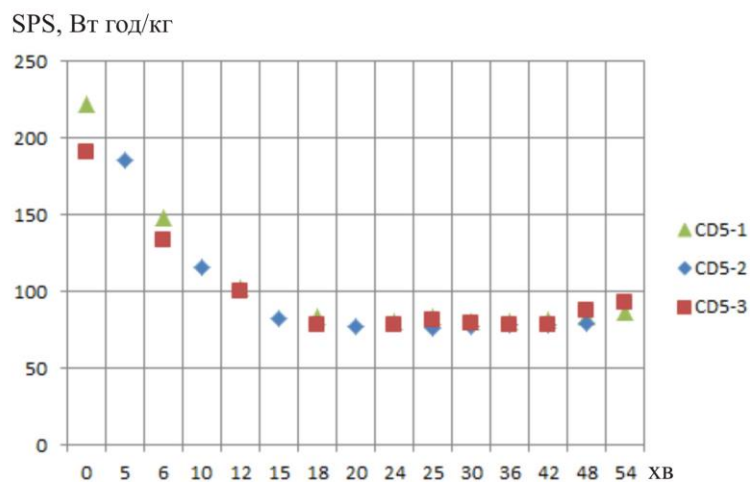


Рис. 3 Залежність питомого споживання енергії від часу для різних дистиляторів урина, $W = 400$ Вт (без врахування двигуна)

Ідентичність ТТН показана на рис.4, з якого випливає, що при роботі на одному зразку дистилятора CD5-3 з різними тепловими насосами ТТН-1 і ТТН-2 продуктивність при однаковій потужності теплових насосів ідентична.

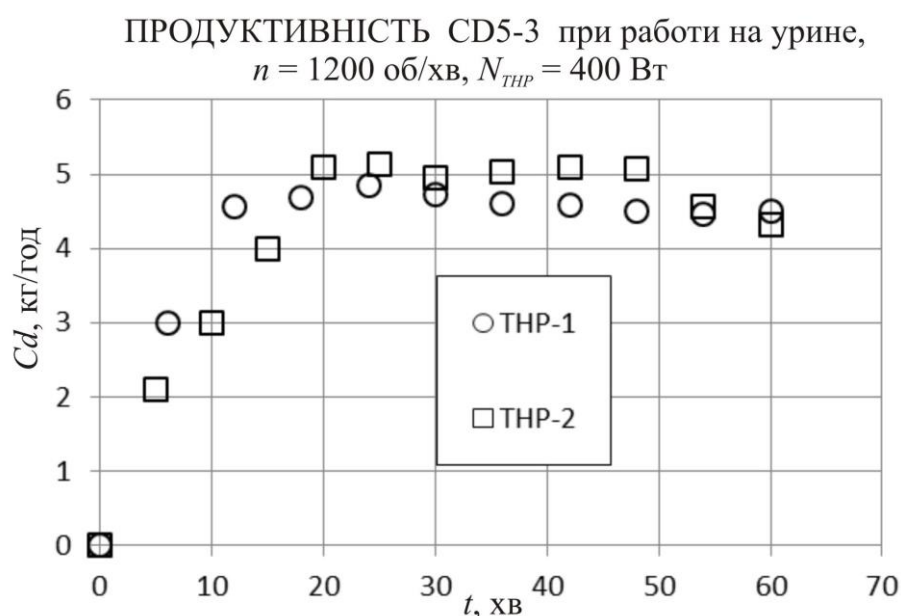


Рис.4. Залежність продуктивності системи від часу для двох зразків термоелектричних теплових насосів

Температури

На рис.5 показано зміну температур в он-лайн режимі при переробці урини з початковою концентрацією $C_0 = 5\%$, за швидкості обертання ротора $n = 1100$ об/хв та потужності теплового насоса $N_{ТНР} = 400$ Вт.

Після ввімкнення дистилятора через 10 хвилин температури рідин у гарячому й холодному контурах виходять на робоче значення.

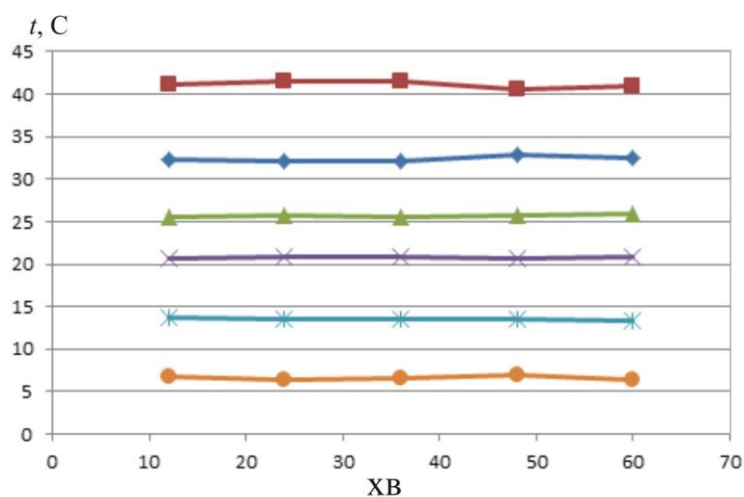


Рис. 5а Залежність температур від часу проведення експерименту (Вода)

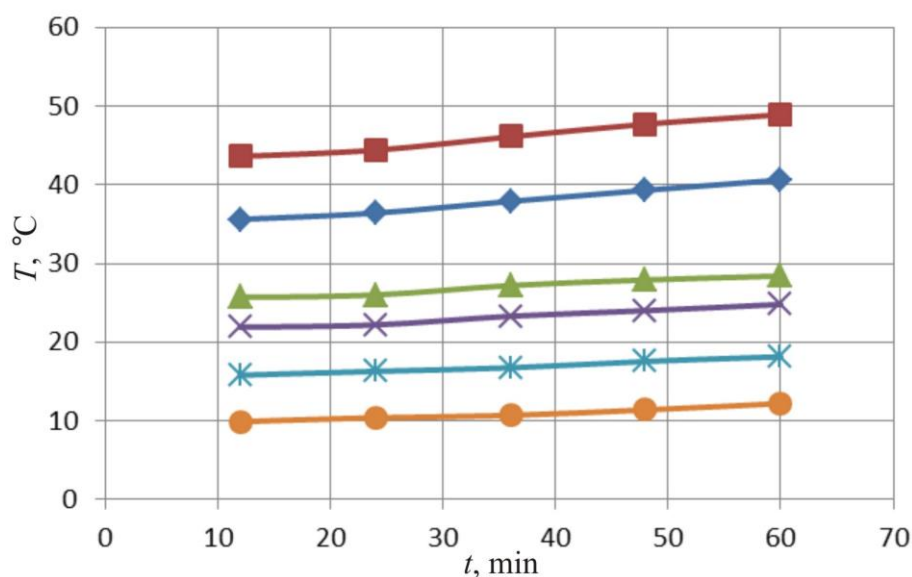


Рис. 5б Залежність температур від часу проведення експерименту (Урина)

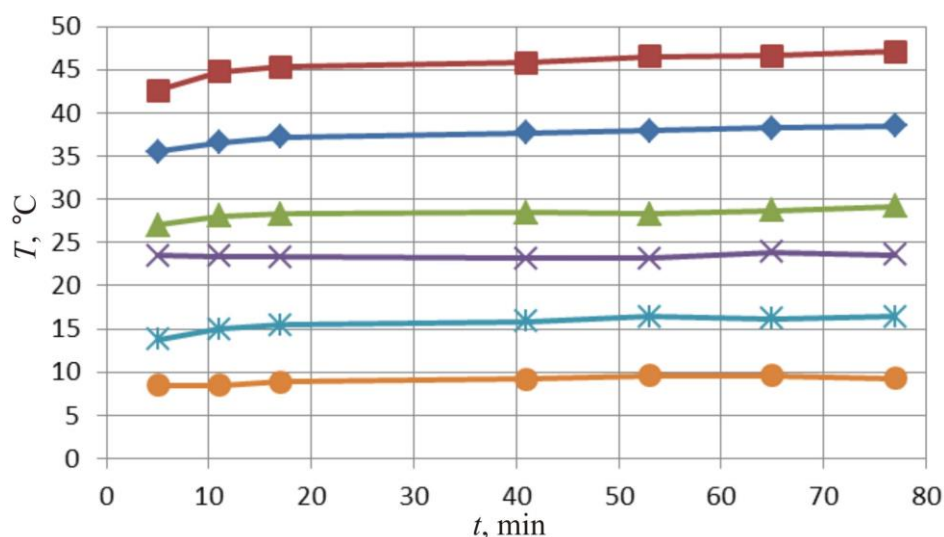


Рис. 5в Залежність температур від часу проведення експерименту (NaCl)

- ♦— hot-in температура розчину на вході в тепловий насос в «гарячому» контурі (t_1), °C;
- hot-out температура розчину на виході з теплового насоса в «гарячому» контурі (t_2), °C;
- ▲— cold-in температура дистиляту на вході в тепловий насос в «холодному» контурі (t_3), °C;
- ×— cold-out температура дистиляту на виході з теплового насоса в «холодному» контурі (t_4), °C;
- *— Δt^* середній температурний напір на тепловому насосі, $\Delta t_{av} = 0,5(t_1 + t_2) - 0,5(t_3 + t_4)$, °C;
- Δt_{in} середній температурний напір на вході в тепловий насос, $\Delta t_{in} = t_1 - t_3$, °C;

При концентруванні розчину NaCl і урини температури в гарячому контурі ростуть протягом усього експерименту через збільшення в процесі випарювання фізико-хімічної температурної депресії. У свою чергу, це збільшує загальний середній температурний напір на

тепловому насосі (Δt_{av}) і середній температурний напір на вході в тепловий насос (Δt_{in}), що погіршує ефективність роботи теплового насоса.

Продуктивність

З рис.6 видно, що при концентруванні $NaCl$ і урини продуктивність менше, у порівнянні з отриманою при роботі на дистиляті й падає в процесі проведення експерименту через зростання температурної депресії.

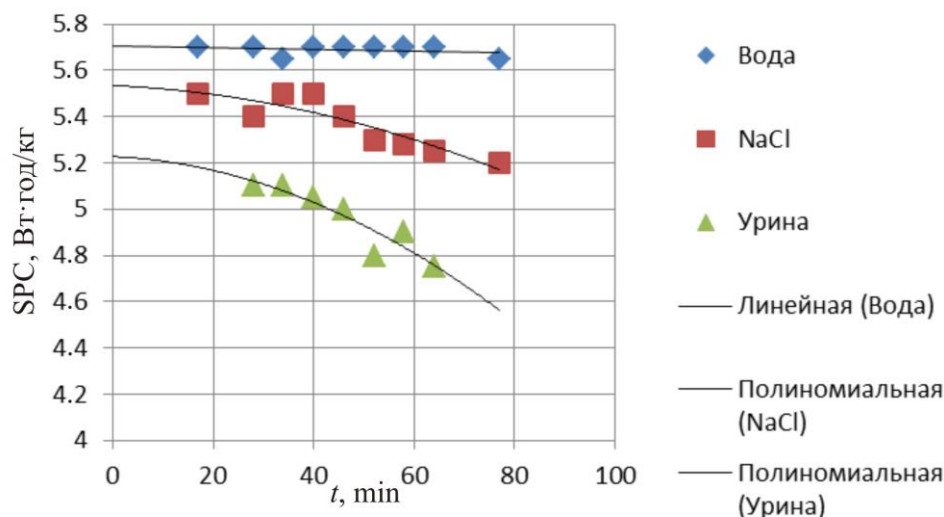


Рис.6 Продуктивність дистилятора залежно від виду розчину, який переробляється
($n = 1100$ про/хв; $N = 400$ Вт).

На рис. 7 показаний вплив потужності теплового насоса на продуктивність дистилятора. Досліди було виконано на урині при однаковій швидкості обертання ротора дистилятора ($n = 1000$ об/хв). Кількість отриманого дистиляту у всіх експериментах становила 5 кілограмів, що відповідало $\text{recovery} \approx 0.9$. Чим більше потужність теплового насоса, тем вище продуктивність системи. При цьому для кожної потужності в початкові 15 хв. іде зростання продуктивності (апарат виходить на робочий режим), після чого у зв'язку з ростом концентрації розчину в гарячому контурі росте температурна депресія й продуктивність падає. При цьому, чим вище потужність, тим більш сильний вплив на продуктивність справляє температурна депресія.

У той же час, як видно з малюнка 8, чим вище потужність, яка підводиться до теплового насоса, тем вище питома витрата енергії на одержання одного кілограма дистиляту. Таким чином, з енергетичної точки зору, ефективніше працювати при невеликих потужностях теплового насоса.

У всіх проведених випробуваннях якість отриманого дистиляту задовольняла всім вимогам, які висуваються до питної води. При переробці $NaCl$ TDS в «холодному» контурі не перевищував 10 ppm. При переробці урини TDS < 100 ppm; ХПК (хімічне споживання кисню) < 15 мг/л; зміст аміаку $NH_3 + NH_4$ < 5 мг/л.

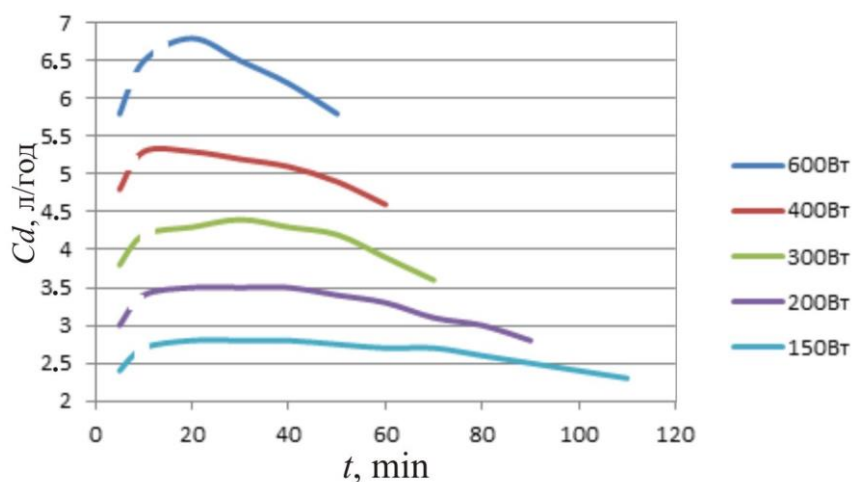


Рис. 7 Вплив потужності теплового насоса на продуктивність дистилятора ($n = 1000$ про/хв)

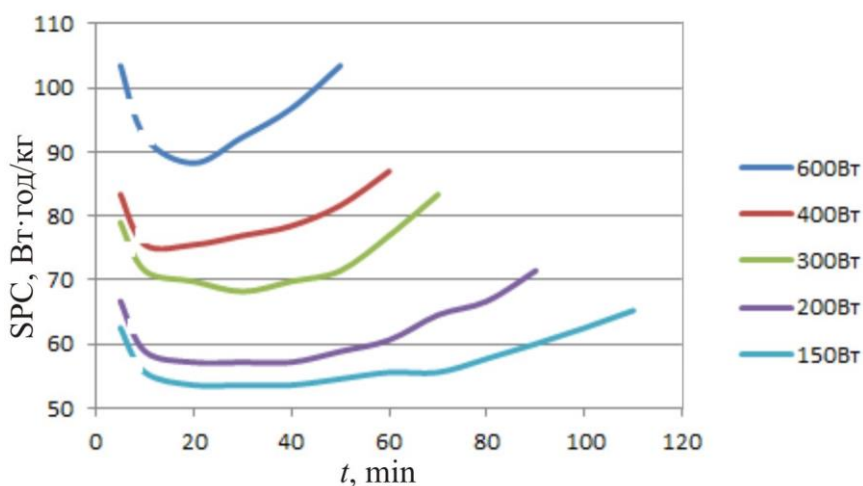


Рис. 8 Вплив потужності теплового насоса на питоме споживання енергії дистилятора без обліку потужності двигуна ($n = 1000$ про/хв)

Висновки

1. У даній роботі представлено результати вимірювання локальних (температура в контурах по «гарячій» і «холодній» сторонах, продуктивність, питоме споживання енергії, TDS) у режимі он-лайн при зміні часу тестування від 30 до 200 хв, швидкості обертання $n = 800 \dots 1200$ об/хв, $N_{\text{ТНР}} = 150 \dots 600$ Вт.
2. Показано ідентичність трьох виготовлених термодистиляторів СМЕД з 5 ступенями й 2 термоелектричних теплових насосів.
3. Відзначено зниження SPC при зменшенні $N_{\text{ТНР}}$ як локальних, тобто при певному значенні часу t , так і в середньому для концентрування урини й розчину NaCl при однакових значеннях швидкості обертання ротора і сумарній кількості отриманого дистиляту.
4. Виміряні у всіх тестах основні показники якості дистиляту, TDS, NH_4 , TOC відповідають вимогам до питної води.

Література

1. V.Rifert, P. Barabash, N.Goliad, "Methods and processes of thermal distillation of water solutions for closed water supply systems", SAE Paper 901249, 20th Intersociety Conference on Environmental Systems, Williamsburg, July 1990.
2. N.Samsonov, L.Bobe, V.Novikov, V.Rifert and others "Systems for water reclamation from humidity condensate and urine for space station", SAE Paper 941536, 24th International society Conference on Environmental Systems, June, 1994.
3. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert, V.G., Barabash, P.A et al., "Development of Urine Processor Distillation Hardware for Space Stations," SAE Paper 951605, the 25th International Conference on Environmental Systems, San Diego, July 1995.
4. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert, V.G., et al., "Updated systems for water recovery from humidity condensate and urine for the International space station" SAE Paper 972559, the 27th International Conference on Environmental Systems, Nevada, July 1997.
5. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert, V.G., et al., "Development and testing of a vacuum distillation subsystem for water reclamation from urine" SAE Paper 1999-01-1993, the 29th International Conference on Environmental Systems, 1999.
6. Rifert, V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight, A. Lubman. Comparison Of Secondary Water Processors Using Distillation For Space Applications. - SAE Paper 99-70466, 29th International Conference on Environmental Systems, Denver, July 1999.
7. Rifert V, Stricun, A., Usenko, V. Study of dynamic and extreme performances of multistage centrifugal distiller with the thermoelectric heat pump. SAE Technical Papers 2000. 30th International Conference on Environmental Systems; Toulouse; France; 10-13 July 2000.
8. Rifert, V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight and A. Lubman, "Design Optimisation of Cascade Rotary Distiller with the Heat Pump for Water Reclamation from Urine", SAE Paper 2001-01-2248, the 31st International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2001.
9. Rifert, V. G., V. I. Usenko, I. V. Zolotukhin, , A. MacKnight and A. Lubman, "Cascaded Distillation Technology for Water Processing in Space", SAE Paper 2003-01-2625. 34th International Conference on Environmental Systems. Orlando, July 2003.
10. Lubman A, MacKnight A, Rifert V, Zolotukhin I and Pickering K., "Wastewater Processing Cascade Distillation Subsystem. Design and Evaluation". SAE International, 2006-01-2273. July 2006.
11. A. Lubman, A. MacKnight, V.Rifert, and P. Barabash, "Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing". SAE International, 2007-01-3177, July 2007.
12. M. Callahan, A. Lubman, A. MacKnight, H. Thomas, and K. Pickering, "Cascade Distillation Subsystem Development Testing". SAE International, 2008-01-2195, July 2008.
13. M. Callahan, A. Lubman, and K. Pickering, "Cascade Distillation Subsystem Development: Progress toward a Distillation Comparison Test". SAE International, 2009-01 -2401, July 2009.
14. M. Callahan, V. Patel, and K. Pickering, "Cascade Distillation Subsystem Development: Early Results from the Exploration Life Support Distillation Technology Comparison Test". American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010-6149, July 2010.
15. Jeff McQuillan, Karen D. Pickering, Molly Anderson, Layne Carter, Michael Flynn, Michael Callahan, Leticia Vega, Rama Allada and Jannivine Yeh, "Distillation Technology Down-selection for the Exploration Life Support (ELS) Water Recovery Systems Element", the 40th International Conference on Environmental Systems, AIAA 2010-6125.

16. V.Patel, H.Au, S.Shull, M.Sargusingh, M.Callahan. Cascade distillation system – a water recovery system for deep space missions. ICES-2014-12, 44 International Conference on Environmental Systems, Tucson, Arizona, July 2014.
17. David Loeftelholz, Ben Baginski, Vipul Patel, Allen MacKnight, Sarah Schull, Miriam Sargusingh, Michael Callahan, “Unit Operation Performance Testing of Cascade Distillation Subsystem” 44th International Conference on Environmental Systems, 13-17 July 2014, Tucson. Arizona. ICES-2014-0014.
18. Michael R. Callahan, Miriam J. Sargusingh. Honeywell Cascade Distiller System Performance Testing Interim Results. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
19. Риферт В.Г., Анатичук Л.И., Барабаш П.А., Усенко В.И., Стрикун А.П., Прибыла А.В. Улучшение методов дистиляции при использовании центробежных сил для регенерации воды во время космических полетов. // Термоэлектричество. – 2017. – №1. – С. 88 – 104.
20. Vladimir G. Rifert, Petr A. Barabash, Vladimir Usenko, Andrii S. Solomakha, Lukyan I. Anatyshuk, A.V. Prybyla. Improvement the cascade distillation system for long-term space flights. 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25-29 September 2017. IAC-17-A1.IP.25.
21. Анатичук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация тепловой коммутации в термоэлектрических тепловых насосах жидкость-жидкость для приборов очистки воды космического назначения // Термоэлектричество. – 2015. – №4. – С 41 – 47.
22. Анатичук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация системы питания термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2015. – №6. – С 59 – 64.
23. Анатичук Л.И., Розвер Ю.Ю., Прибыла А.В. Экспериментальное исследование термоэлектрического теплового насоса жидкость – жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №3. – С. 46 – 52.
24. Анатичук Л.И., Прибыла А.В. О предельных возможностях термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №4. – С. 50 – 55.
25. Анатичук Л.И., Прибыла А.В. О влиянии качества теплообменников на свойства термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – №5. – С. 39 – 44.
26. Анатичук Л.И., Прибыла А.В. О холодильном коэффициенте термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость с учетом энергии на перемещение теплоносителя // Термоэлектричество. – 2017. – №6. – С. 34 – 40.
27. Риферт В.Г., Анатичук Л.И., Барабаш П.О., Усенко В.И., Стрикун А.П., Соломаха А. С., Петренко В. Г., Прибыла А. В. Эволюция системы центробежной дистиляции с термоэлектрическим тепловым насосом для космических миссий. Часть 1. Обзор публикаций по центробежной дистиляции в период 1990 – 2017 гг.
28. Bruce A. Perry, Molly S. Anderson. Improved dynamic modeling of the cascade distillation subsystem and analysis of factors affecting its performance. 45th International Conference on Environmental Systems 12-16 July 2015, Bellevue, Washington. ICES-2015-216.

Надійшла до редакції 30.04.2019

Риферт В.Г., док. техн. наук¹
Анатичук Л.И., акад. НАН України^{2,3}
Барабаш П.О., канд. техн. наук¹
Усенко В.И., док. техн. наук¹
Соломаха А. С. канд. техн. наук¹,
Петренко В. Г канд. техн. наук¹
Прибыла А. В., канд. физ.-мат. наук^{2,3}
Стрикун А.П.¹

¹НТУ «КПИ», вул. Политехническая, 6,
Киев, 03056, Украина;

²Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatyck@gmail.com;

³Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТЕПЛОВЫМ НАСОСОМ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

**Часть 2. Исследование переменных характеристик системы многоступенчатой
дистиляции (СМЕД) с термоэлектрическим тепловым насосом (ТНР)**

В работе приведены результаты испытаний многоступенчатого (5 ступеней) центробежного дистиллятора (СМЕД) с использованием для снижения энергопотребления термоэлектрического теплового насоса (ТНР). В опытах измеряли локальные (в режиме он-лайн) данные системы дистилляции, такие как температура жидкостей (исходной и дистиллята), текущую производительность, общее солесодержание, удельный расход энергии при разных скоростях вращения ротора дистиллятора, мощности ТНР, степень концентрирования. Общая продолжительность испытаний составила более 700 часов, количество переработанной жидкости (NaCl и урины) составило более 2000 кг. Исследование трех дистилляторов и двух ТНР и сравнение их результатов показало их идентичность, что характеризует высокое качество изготовления этих устройств. Полученные данные параметров эксплуатации (обороты n и мощность ТНР) могут быть использованы для оптимизации конструкции и режимов эксплуатации работы всей системы СД + ТНР. Библ. 28, рис. 8, табл. 1.

Ключевые слова: термоэлектричество, тепловой насос, дистиллятор.

Rifert V.G., *doct. techn. sciences*¹
Anatychuk L.I., *acad. National Academy
of Sciences of Ukraine*^{2,3}
Barabash P.O., *cand. techn. sciences*¹,
Usenko V.I., *doct. of techn. sciences*¹
Solomakha A.S. , *cand. of techn. sciences*¹
Petrenko V.G. *cand. of techn. sciences*¹
Prybyla A.V., *cand. phys. - math. sciences*^{2,3}
Strikun A.P.¹

¹NTU KPI, 6, Politekhnicheskaya str, Kyiv, 03056, Ukraine;

²Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine,
e-mail: anatych@gmail.com;

³Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine

EVOLUTION OF CENTRIFUGAL DISTILLATION SYSTEM WITH A THERMOELECTRIC HEAT PUMP FOR SPACE MISSIONS

Part 2. Study of the variable characteristics of a multi-stage distillation
system with a thermoelectric heat pump

The work presents the results of testing a multi-stage (5 stages) centrifugal distiller (CD) with the use of a thermoelectric heat pump (THP) to reduce power consumption. In the experiments, measurements were made of the local (online) data of distillation system, such as the temperature of the liquids (initial and distillate), current production, total salt content, specific power consumption at different speeds of distiller rotor, THP power, and the degree of concentration. The total duration of the tests was more than 700 hours, the amount of processed liquid (NaCl and urine) was more than 2000 kg. The study of three distillers and two THPs and a comparison of their results showed their identity, which characterizes high quality workmanship of these devices. The obtained operating parameters (revolutions n and THP power) can be used to optimize the design and operating modes of the entire CD + THP system. Bibl. 28, Fig. 8, Tabl. 1.

Key words: thermoelectricity, heat pump, distiller

References

1. Rifert V., Barabash P., Goliad N. (1990). Methods and processes of thermal distillation of water solutions for closed water supply systems. *SAE Paper 901249, 20th Intersociety Conference on Environmental Systems (Williamsburg, July 1990).*
2. Samsonov N., Bobe L., Novikov V., Rifert V., et al. (1994). Systems for water reclamation from humidity condensate and urine for space station. *SAE Paper 941536, 24th International society*

Conference on Environmental Systems (June, 1994).

3. Samsonov N.M., Bobe L.S, Novikov V., Rifert V.G., Barabash P.A, et al (1995). Development of urine processor distillation hardware for space stations. *SAE Paper 951605, 25th International Conference on Environmental Systems (San Diego, July 1995).*
4. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert, V.G., et al. (1997). Updated systems for water recovery from humidity condensate and urine for the international space station. *SAE Paper 972559, 27th International Conference on Environmental Systems (Nevada, July 1997).*
5. Samsonov N.M., Bobe L.S, Novikov V., Rifert V.G., et al. (1999). Development and testing of a vacuum distillation subsystem for water reclamation from urine. *SAE Paper 1999-01-1993, 29th International Conference on Environmental Systems, 1999.*
6. Rifert V., Usenko V., Zolotukhin I., MacKnight A., Lubman A. (1999). Comparison of secondary water processors using distillation for space applications. *SAE Paper 99-70466, 29th International Conference on Environmental Systems (Denver, July 1999).*
7. Rifert V, Stricun, A., Usenko, V. (2000). Study of dynamic and extreme performances of multistage centrifugal distiller with the thermoelectric heat pump. *SAE Technical Papers 2000. 30th International Conference on Environmental Systems (Toulouse; France, 10-13 July 2000).*
8. Rifert, V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight and A. Lubman (2001). Design optimisation of cascade rotary distiller with the heat pump for water reclamation from urine. (2001). *SAE Paper 2001-01-2248, 31st International Conference on Environmental Systems (Orlando, July 2001).*
9. Rifert, V. G., Usenko V.I., Zolotukhin I.V., MacKnight A. and Lubman A. (2003). Cascaded distillation technology for water processing in space. *SAE Paper 2003-01-2625. 34th International Conference on Environmental Systems (Orlando, July 2003).*
10. Lubman A, MacKnight A, Rifert V, Zolotukhin I. and Pickering K. (2006). Wastewater processing cascade distillation subsystem. design and evaluation. *SAE International, 2006-01-2273. July 2006.*
11. Lubman A., MacKnight A., Rifert V. and Barabash, P. (2007). Cascade distillation subsystem hardware development for verification testing. *SAE International, 2007-01-3177, July 2007.*
12. Callahan M., Lubman A., MacKnight A., Thomas H. and Pickering K. (2008). Cascade distillation subsystem development testing. (2008). *SAE International, 2008-01-2195, July 2008.*
13. Callahan M., Lubman A. and Pickering K. (2009). Cascade distillation subsystem development: progress toward a distillation comparison test. (2009). *SAE International, 2009-01 -2401, July 2009.*
14. Callahan M., Patel V. and Pickering K. (2010). Cascade distillation subsystem development: early results from the exploration life support distillation technology comparison test. *American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010-6149, July 2010.*
15. McQuillan Jeff, Pickering Karn D., Anderson Molly, Carter Layne, Flynn Michael, Callahan Michael, Vega Leticia, Allada Rama and Yeh Jannivine. Distillation technology down-selection for the exploration life support (ELS) water recovery systems element. *40th International Conference on Environmental Systems, AIAA 2010-6125 (Barcelona, Spain. July 2010).* .
16. Patel V., Au H., Shull S., Sargusingh M., Callahan M.. (2014). Cascade distillation system – a water recovery system for deep space missions. *ICES-2014-12, 44 International Conference on Environmental Systems (Tucson, Arizona, July 2014).*
17. Loeftelholz David, Baginski Ben, Patel Vipul, MacKnight Allen, Schull Sarah, Sargusingh

- Miriam, Callahan Michael. (2014). Unit operation performance testing of cascade distillation subsystem. *44th International Conference on Environmental Systems, 13-17 July 2014 (Tucson, Arizona). ICES-2014-0014.*
18. Callahan Michael R., Sargusingh Miriam J. (2014). Honeywell cascade distiller system performance testing interim results. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
 19. Rifert V.G., Anatychuk L.I., Barabash P.A, Usenko V.I., Strikun A.P., Prybyla A.V. (2017). Improvement of the distillation methods by using centrifugal forces for water recovery in space flight applications. *J.Thermoelectricity*, 1, 71-83.
 20. Rifert Vladimir G., Barabash Petr A., Usenko Vladimir, Solomakha Andrii S., Anatychuk Lukyan I., Prybyla A.V. (2017). Improvement of the cascade distillation system for long-term space flights. 68th International Astronautical Congress (IAC) (Adelaide, Australia, 25-29 September 2017). IAC-17-A1.IP.25.
 21. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimization of thermal connections in thermoelectric liquid-liquid heat pumps for water purification systems of space application. *J.Thermoelectricity*, 4, 45 – 51.
 22. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J.Thermoelectricity*, 6, 53 – 58.
 23. Anatychuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V. (2017). Experimental study of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J.Thermoelectricity*, 3, C. 33 – 39.
 24. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2017). Limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J.Thermoelectricity*, 4, 33 – 39.
 25. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2017). The influence of quality of heat exchangers on the properties of thermoelectric liquid-liquid heat pumps. *J.Thermoelectricity*, 5, 33 – 39.
 26. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2017). On the coefficient of performance of thermoelectric liquid-liquid heat pumps with regard to energy loss for heat carrier transfer. *J.Thermoelectricity*, 6, 33 – 39.
 27. Rifert V.G., Anatychuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Strikun A.P, Solomakha A.S., Petrenko V.G., Prybyla A.V. (2019). Evolution of centrifugal distillation system with a thermoelectric heat pump for space missions. Part 1. Review of publications on centrifugal distillation in the period of 1990 – 2017. *J.Thermoelectricity*, 1.
 28. Perry Bruce A., Anderson Molly S. (2015). Improved dynamic modeling of the cascade distillation subsystem and analysis of factors affecting its performance. *45th International Conference on Environmental Systems 12-16 July 2015 (Bellevue, Washington). ICES-2015-216.*

Submitted 30.04.2019