

УДК 537.32

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

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

²Інститут термоелектрики НАН і МОН України,
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;
e-mail: anatych@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 1. Огляд публікацій по відцентровій
дистиляції в період 1990 – 2017 рр.

У статті описано основні результати розробок і випробувань системи багатоступінчастої відцентрової вакуумної дистиляції (СМЕД) з термоелектричним тепловим насосом (ТНР). У цих роботах наведено основні відомості щодо інтегральних характеристик роботи системи, а саме: продуктивності по дистиляту, питомої витрати енергії на одиницю маси одержуваного дистиляту і якості дистиляту при випарюванні (концентруванні) водного розчину NaCl, урини й сумішей – урини з конденсатом, урини з конденсатом і гігієнічною водою. Бібл. 29, табл. 5.

Ключові слова: термоелектрика, тепловий насос, дистилятор.

Вступ

Очищення стічних рідких відходів життєдіяльності людини досить актуальне для успіху тривалих польотів на Місяць і Марс і роботи команд астронавтів, як на цих космічних об'єктах, так і на Міжнародній космічній станції (МКС).

Команда інженерів і дослідників з «Термодистиляція» Со («TD» Со), КПІ ім. Ігоря Сікорського й Інституту термоелектрики НАН і МОН України (ІТЕ) протягом 2000 – 2009 рр. розробила систему очищення стічних вод методом багатоступінчастої відцентрової вакуумної дистиляції (БВВД) з використанням у якості джерела тепла термоелектричного теплового

насоса (ТТН). Його використання дозволяє значно знизити енергетичні витрати на роботу системи, що робить таку систему конкурентоздатною серед аналогічних систем очищення води космічного призначення.

Метою роботи є аналіз еволюції системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій.

Характеристики СМЕД з 3-ма ступенями й ТТН.

Перший прототип системи БВВД мав три ступені дистиляції й був розроблений і виготовлений ще у 80-х роках минулого століття на замовлення НДІХІММАШ (Росія, м. Москва). Коротку інформацію про цей апарат було наведено в [1]. Вона містила відомості про деякі його параметри за продуктивності до 3 л/год.

У публікаціях [2 – 6] також наведено короткі відомості про характеристики дистилятора з 3-ма ступенями. В [2] дано таблиці із наведенням продуктивності дистилятора по очищеній воді ($G_D = 0.5 - 3.0$ кг/год) і питомій витраті енергії (S_{PC}) без інформації про витрати потужності на ТТН (W_{THP}) і ступінь добування води з вихідної рідини.

В [3] наведено розрахункові величини продуктивності дистилятора по очищеній воді $G_D = f(W_{THP})$ без наведення методу розрахунків параметрів, ступеня добування води та швидкості обертання теплообмінних поверхонь n .

В [4] наведено таблицю з даними: $G_D = 2.5 - 3.0$ кг/год; $S_{PC} = 120$ Вт·год/кг (питома споживана потужність); $R_{ec} = 90$ % (ступінь добування води). Відомостей щодо W_{THP} , тривалості роботи дистилятора і якості отримуваного продукту не надано.

В [5] наведено графік залежності продуктивності 3-ступінчастого дистилятора від N_{THP} та величину питомої витрати енергії (155 – 165 Вт·год/кг), але без даних щодо швидкості обертання ротора та ступеня концентрування вихідної рідини.

В [6] наведено порівняння основних характеристик триступінчастого дистилятора в комплексі із ТТН, парокомпресійного дистилятора (VCD) і термоелектричного випарника (TEMES).

В [7] досліджено роботу системи в екстремальних умовах, при виході з ладу окремих підсистем.

Характеристики СМЕД з 5-ма щаблями й ТНР

В [8] вперше описано конструкцію й роботу 5-ступінчастого дистилятора в комплексі з термоелектричним тепловим насосом, а також стенд, створений на базі «TD» Со для проведення випробувань відцентрових дистиляторів разом із ТТН при різних режимах роботи.

В 2001 р. був розроблений і виготовлений перший зразок п'ятиступінчастого дистилятора для Honeywell International Inc. [8]. За пропозицією замовника він був названий каскадним дистилятором – CD, а систему багатоступінчастої відцентрової вакуумної дистиляції з термоелектричним тепловим насосом, виготовлену в Україні в «TD» Со, назвали системою каскадної дистиляції – CDS.

Усього компанією «TD» 3 у період 2000 – 2007 рр. були розроблено й виготовлено три ідентичні п'ятиступінчастих відцентрових дистилятори: перший з них, як зазначено вище, в 2001 р., другий – в 2002 р., третій – в 2006 р. Усі три апарати, укомплектовані термоелектричними тепловими насосами ALTEC 7005, розробленими й виготовленими Інститутом термоелектрики НАН і МОН України (ІТЕ) [21 – 29], було передано компанії Honeywell International Inc. Ці апарати випробовувались в різних варіантах на декількох стендах

у США, у тому числі й на стенді NASA.

Перед відправленням у США кожен з апаратів було випробувано на стенді «TD» Со.

У таблиці 1 представлено перші результати випробувань 5-ступінчастого дистильатора в процесі переробки урини при різних значеннях обертів і потужності теплового насоса ТТН.

Усього на стенді «TD» Со протягом 2000 – 2007 р у процесі відпрацювання конструкції та здавальних випробувань п'ятиступінчастих дистильаторів (3 екземпляри) і теплових насосів (2 екземпляри) було проведено понад 300 тестів з наступним діапазоном вхідних параметрів: швидкість обертання ротора 100 – 1500 об/хв, потужності ТТН (40 – 520) Вт, вихідні рідини, що переробляються: вода, водяний розчин NaCl (2-4 %), урина. Отримані результати: продуктивність (макс.) – 6.7 кг/год; ступінь добування рідини (макс.) – 0.95, питома витрата енергії (мін.) – 76 Вт·год/кг.

У [8 – 16] описано етапи розробки й тестування CDS на стендах «TD» Со, Honeywell International Inc. і Центру Маршалла (NASA JSC), що підтверджує пріоритетне авторство «TD» Со та ІТЕ НАН та МОН України в розробці й виготовленні відповідних елементів CDS.

В [10 – 12] докладно описано CDS, передані корпорацією Honeywell International Inc в Johnson Space Center (NASA JSC) на випробування. Представлені результати тестів по концентруванню у відцентровому дистильаторі водного розчину NaCl у кількості 21 л та урини в кількості 111.8 кг, а також випарюванню 25.5 кг дистильату. Наведено дані щодо продуктивності дистильаторів (2.7 - 5.1) кг/год, питомого енергоспоживання (88.8 – 116) Вт·год/кг та ступеня добування води 0.88 – 0.95.

Таблиця 1

Результати випробування 5-східчастого дистильатора (урина)

Швидкість обертання, оберти/хв	Потужність CD-5, Вт	Потужність ТТН, Вт	Ефективність ТТН	Середня продуктивність л/год	Питома витрата енергії Вт·год/л	Ступінь добування рідини
1100	65	255	2,07	3.70	86.5	0.89
1100	65	382	1,88	4.72	94.7	0.91
1200	84	251	2,30	3.84	87.2	0.88
1200	85	380	2,02	4.90	94.9	0.91
1200	90	400	1,77	5.04	97.2	0.92
1250	96	406	1,90	4.95	101.4	0.95
1300	106	379	2,08	5.08	95.5	0.92
1300	106	411	1,89	5.38	96.1	0.90

В [12, 13] наведено результати випробувань по концентруванню в CD урини, конденсату атмосферної вологи й сангігієнічної води. Отримані дані близькі до результатів, що отримані у

працях [9, 10] щодо продуктивності (~ 5 кг/год), питомого енергоспоживання (~100 Вт·год/кг) та якості отриманого дистиляту. Дані щодо потужності, яку споживає тепловий насос, та швидкості обертання ротора дистилятора відсутні.

В [14] викладено результати тестування CDS при очищенні стічних вод в обсязі, еквівалентному їх імовірній кількості, яка може нагромадитися протягом 30 днів польоту екіпажа з 4-х людей. Усього було перероблено близько 1500 кг стічних вод у вигляді двох відмінних один від одного розчинів. Розчин 1 складався з урини й конденсату атмосферної вологи, розчин 2 складався з урини, конденсату атмосферної вологи й сангігієнічної води.

Інтегральні параметри тестування по кожному з розчинів наступні:

- розчин 1 – продуктивність 4.1 кг/год за потужності ТТН 300 Вт;
- розчин 2 – продуктивність 5.2 кг/год за потужності ТТН 400 Вт;
- ступінь добування води (recovery) з розчину 1 – $93.4 \pm 0.7 \%$, з розчину 2 – $90.3 \pm 5 \%$;
- питоме енергоспоживання в обох випадках було ~ 100 Вт· год/кг.

- якість дистиляту при випарюванні обох розчинів відповідала вимогам, які висуваються питної води, за винятком показника рН, який був менший за 5.

В [15] проведено порівняння характеристик трьох технологій відцентрової дистиляції: вакуумного компресійного дистилятора (VCD), що розроблявся в США з 1962 по 2008 рр (у цей час працює в системі ISS), відцентрового випарника зі скребковим пристроєм для стоншення плівки вихідної рідини Wiped-Film Rotating Disk (WFRD) і системи каскадної дистиляції (CDS).

Вихідними (, що випарюються) рідинами служили такі ж два розчини, як в [11], і в такі ж кількостях (як для 30- денної місії).

Сумарні характеристики за результатами випробувань наведено в таблицях 2 і 3.

Також у роботі представлено дані щодо якості отриманого в процесі експерименту продукту. Кращі дані виявилися в CDS на всіх режимах випробування за їх відповідності вимогам стандартів для питної води.

Оцінка експертів результатів випробувань: система VCD буде успішною з імовірністю 84 %-90 % і ризиком 3 %; система CDS буде успішною з імовірністю 84 %-87 % і ризиком 5 %; система WARD буде успішною з імовірністю 52 %-61 % і ризиком 7 %.

Таблиця 2

Результати випробувань (1 розчин)

	CDS	VCD	WFRD
Продуктивність (кг/год)	3.7	1.63	16.1
Питоме споживання енергії (Вт· год/кг)	109	188	85
Середня потужність (Вт)	375	279	1252

Таблиця 3

Результати випробувань (2 розчин)

	CDS	VCD	WFRD
Продуктивність (кг/год)	4.88	1.87	16.8
Питоме споживання енергії (Вт год/кг)	110	163	86
Середня потужність (Вт)	485	296	1293

В[16] стверджується, що CDS є однією із двох технологій дистиляції, які нині

розробляються для підтримки регенерації води в замкненому контурі зі змішаних потоків відходів, очікуваних для тривалих місій.

У цій же доповіді наведено результати експериментів на стенді Honeywell International, Inc., у ході яких вивчався вплив швидкості обертання ротора дистильатора на якість одержуваного продукту. Встановлено, що найкращої якості води за допомогою CDS можна досягти при швидкості обертання ротора дистильатора 1300...1400 об/хв.

У висновку доповіді зазначено наступне. «На поточному етапі тестування розробки CDS система працювала, як очікувалося, і із прийнятною продуктивністю при обробці еталонних тестових розчинів (вода, водний розчин NaCl (2-4 %), урина). Попереднє порівняння еталонних даних з попередніми випробуваннями показує, що модернізація системи, виконана до появи поточного прототипу CDS, не справила істотного впливу на продуктивність системи. Так само, поточний цикл тестування показав, що CDS здатен обробляти аналогічні потоки відходів МКС, і значення продуктивності наближаються до тих, які спостерігаються для менш складних базових тестових рішень. Цей останній результат є важливим кроком на шляху до демонстрації технології CDS як частини корисного навантаження МКС. Тестування CDS продовжить оцінку оновлених проектів для ТТН, системи керування й нових методів стабілізації стічних вод. Крім того, прототип CDS також буде, як і раніше, використовуватися в якості випробувального стенда для отримання інформації про розробку та експлуатацію розроблюваної у даний час системи CDS покоління 2.0».

У доповідях [17, 18] представлені основні параметри CDS, отримані при переробці шести розчинів (див. Табл. 4 [18]) з метою визначитися з можливістю використання CDS для регенерації всіх видів стічних вод в умовах роботи міжнародної космічної станції. В експериментах переробили від 8 до 9,8 кг кожного розчину. Якість отриманого дистильату, рівень температур і масова витрата задовольняють необхідним вимогам (Expected distillate delivery specification) (див. табл. 5). У результаті зроблений вивід про можливість використання CDS на МКС і необхідності проведення додаткових випробувань із метою вдосконалення роботи теплового насоса й системи контролю в тривалих космічних місіях (Generation 2.0 CDS).

Таблиця 4

Параметри CDS

Тип розчину	Партія, кг	Регенерація, %	Продуктивність, кг/год	Питоме споживання енергії, Вт·год/кг
Деіонізована вода	9.01 ±1.39	84.6 ±4.7	4.56 ±0.11	74.8 ± 7.9
2% NaCl (1)	9.78 ± 0.02	85.3 ±1.2	4.27 ±0.03	86.5 ±0.9
Oxoneptu	9.81 ±0.01	83.1 ±2.7	4.40 ±0.04	97.2 ± 0.3
ISSPTAU	5.79 ±0.03	78.4 ±1.6	3.89 ±0.00	95.9 ±6.3
Jssait-ptau	9.77 ±0.03	84.4 ± 0.8	3.98 ±0.04	105.0 ±2.7
2% NaCl (2)	9.76 ±0.02	83.0 ±0.6	4.32 ±0.09	84.6 ±1.5

Таблиця 5

Якість отриманого дистилату CDS

Параметр	Specification	Oxone	ISS Baseline	ISS Alt
Рівень температур	61-99 °F	~ 72.0	~ 72.0	~ 72.0
Швидкість потоку	0-5 lb/hr	10.0	8.6	8.8
Провідність	< 400 $\mu\text{mho/cm}$	46	100	67
pH	3-8	4.1	3.8	3.9
Амоній	$\leq 3 \text{ ppm}$	< 0.6	< 0.6	< 0.6
Усього органічного вуглецю	$\leq 150 \text{ ppm}$	8.27	18.7	26.6

У наших працях, зокрема в [20, 21], наведено результати дослідження впливу первинних параметрів - швидкості обертання ротора дистиллятора (n_{CD}) та потужності термоелектричного теплового насоса N_{THP} на продуктивність CDS (GCDS) і питоме енергоспоживання системи (SPC). Встановлено, що зі зменшенням W_{THP} знижується величина SPC. Наприклад, за $W_{THP} = 200 \text{ Вт}$ і швидкості обертання 1000 об/хв при однаковому значенні $SPC = 82 - 87 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{кг}$, а за $W_{THP} = 400 \text{ Вт}$, $SPC = 100-110 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{кг}$.

Висновки

Виконано огляд праць з 1990 по 2017 рр., у яких описано результати розробки, виготовлення й тестування на стендах «TD» Co, Honeywell Co і NASA відцентрових дистилляторів CD з 3-ма та 5-ма ступенями й термоелектричним тепловим насосом ТТН. У випробуваннях за допомогою CD концентрувалися (випарювалися) водний розчин NaCl , суміш урини й конденсату поту й суміш урини, конденсату атмосферної вологи й сангігієнічної води. Показано стабільність роботи дистилляторів за високої якості одержуваного продукту – води. Тільки в Центрі JSC було перероблено 1575 кг стічних вод за 352 години, що відповідало середній продуктивності системи близько 5 л/год. Ступінь добування води (recovery) у цих випробуваннях досягала 93 %. В 2015 г у планах NASA (дорожній карті) було записано, що для перспективних космічних польотів обрана система CDS. З незрозумілих причин у даний момент роботи з CDS припинено.

Необхідно відзначити, що в більшості публікацій, присвячених дослідженню функціонування різних відцентрових дистилляторів, наведені їхні інтегральні, середні за повний цикл роботи, характеристики (продуктивність, SPC, якість продукту) і практично відсутня інформація про вплив на роботу дистиллятора таких важливих показників, як потужність теплового насоса N_{THP} та швидкість обертання ротора дистиллятора.

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. 34st 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. Miriam Sargusingh, Michael Callahan “Development of an exploration-class cascade distillation subsystem: performance testing of the generation 1.0 prototype” 45th International Conference on Environmental Systems, 13-17 July 2015. ICES-2015-150.
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. Rifert, V.G., Anatyshuk, L.I., Barabash, P.A., Usenko, V.I., Strikun, A.P., Prybyla, A.V. Improvement of the distillation methods by using centrifugal forces for water recovery in space flight applications (2017) Journal of Thermoelectricity, (1), pp. 71-83.
22. Риферт В.Г., Усенко В.И., Анатычук Л.И., Розвер Ю.Ю. Разработка и испытание системы регенерации воды из жидких отходов жизнедеятельности на борту пилотируемых космических аппаратов с использованием термоэлектрических тепловых насосов // Термоэлектричество. – № 2. – 2011. – с. 14-25.
23. Анатичук Л.І., Барабаш П.А., Ріферт В.Г., Розвер Ю.Ю., Усенко В.І., Черкез Р.Г. Термоелектричний тепловий насос, як засіб підвищення ефективності системи очищення води для біологічних потреб при космічних польотах // Термоелектрика. – № 6.– 2013.– С. 78-83.
24. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Оптимізація теплової комутації в термоелектричних теплових насосах рідина-рідина для приладів очищення води космічного призначення // Термоелектрика. – 2015. №4. – С 45 – 51.
25. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Оптимізація системи живлення термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2015. №6. – С 53 – 58.
26. Анатичук Л.І., Розвер Ю.Ю., Прибила А.В. Експериментальне дослідження термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. №3. – С. 33 – 39.
27. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про граничні можливості термоелектричного теплового насоса рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. №4. – С. 33 – 39.
28. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про вплив якості теплообмінників на властивості термоелектричних теплових насосів рідина-рідина // Термоелектрика. – 2017. №5. – С. 33 – 39.
29. Анатичук Л.І., Прибила А.В. Про холодильний коефіцієнт термоелектричних теплових насосів рідина-рідина з врахуванням енергії на переміщення теплоносія // Термоелектрика. – 2017. №6. – С. 33 – 39.

Надійшла до редакції 19.02.2019

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
Стрикун А.П.¹
Соломаха А.С., канд. техн. наук¹
Петренко В.Г., канд. техн. наук¹
Прибыла А.В., канд. физ.-мат. наук^{2,3}

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

²Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatych@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 1. Обзор публикаций по центробежной
дистиляции в период 1990 – 2017 гг.

В статье описаны основные результаты разработок и испытаний системы многоступенчатой центробежной вакуумной дистилляции (СМЕД) с термоэлектрическим тепловым насосом (ТНР). В этих работах даны в основном сведения по интегральным характеристикам работы системы, а именно: производительности по дистилляту, удельному расходу энергии на единицу массы получаемого дистиллята и качеству дистиллята при выпаривании (концентрировании) водного раствора NaCl, урины и смесей – урины с конденсатом, урины с конденсатом и гигиенической водой. Библ. 29, табл. 5.

Ключевые слова: термоэлектричество, тепловой насос, дистиллятор.

Rifert V.G., doct. techn. Sciences¹
Anatychuk L.I., acad. National Academy
of Sciences of Ukraine^{2,3}
Barabash P.O., cand. techn. Sciences¹,
Usenko V.I., doct. techn. Sciences¹
Strikun A.P.¹,
Solomakha A.S. cand. techn. Sciences^{1,2},
Petrenko V.G. cand. techn. Sciences¹,
Prybyla A.V., cand. Phys. - math. Sciences^{2,3}

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

²Institute of Thermoelectricity, 1 Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine
e-mail: anatyach@gmail.com;

³Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynsky str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

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

The article describes the main results of the development and testing of a multistage centrifugal vacuum distillation (MCVD) system with a thermoelectric heat pump (THP). For the most part, these works present information on the integral characteristics of the system, namely: distillate capacity, specific energy consumption per unit mass of the obtained distillate and distillate quality during evaporation (concentration) of an aqueous solution of NaCl, urine and mixtures of urine with condensate and urine with condensate and hygienic water. Bibl. 29, Tabl. 5.

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. (1999). *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., Usenko V., Zolotukhin I., MacKnight A. and Lubman A. (2001). Design optimisation of

- cascade rotary distiller with the heat pump for water reclamation from urine. *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 (2006). *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.. 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. *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 Karen D., Anderson Moly, 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 (2010). *40th International Conference on Environmental Systems, AIAA 2010-6125*.
 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. *ICES-2014-0014, 44th International Conference on Environmental Systems, (Tucson, Arizona, 13-17 July 2014)*.
 18. Callahan Michael R., Sargusingh Mirian J. Honeywell cascade distiller system performance testing interim results. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
 19. Sargusingh Miriam, Callahan Michael (2015). Development of an exploration-class cascade distillation subsystem: performance testing of the generation 1.0 prototype. *ICES-2015-150, 45th International Conference on Environmental Systems, 13-17 July 2015*.
 20. Rifert Vladimir G, Barabash Petr A., Usenko Vladimir, Solomakha Andrii S., Anatychuk Lukyan I., Prybyla A.V. (2017). *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. 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.
 22. Rifert V.G., Usenko V.I., Anatychuk L.I., Rozver Yu.Yu. (2011). Development and test of water regeneration from liquid waste on board of manned space crafts with the use of thermoelectric heat pumps. *J.Thermoelectricity*, 2, 14-25.
 23. Anatychuk L.I., Brabash P.A., Rifert V.G., Rozver Yu.Yu., Usenko V.I., Cherkez R.G. (2013). Thermoelectric heat pump as a means of improving efficiency of water purification systems for

- biological needs for space missions. *J.Thermoelectricity*, 6, 78-83.
24. Aa natychuk 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.
25. Anatychuk L.I. Prybyla A.V. (2015). Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J.Thermoelectricity*, 6, 53 – 58.
26. Anatychuk L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V. (2017). Experimental study of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J.Thermoelectricity*, 3, C. 33 – 39.
27. Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2017). Limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pump. *J.Thermoelectricity*, 4, 33 – 39.
28. 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.
29. 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.

Submitted 19.02.2019