

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

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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТЕРМІЧНОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ З ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ ДЛЯ ТРИВАЛИХ КОСМІЧНИХ ПОЛЬОТІВ

У роботі проведено порівняння відомих технологій вилучення води з продуктів життєдіяльності космонавтів в умовах тривалих космічних місій. Показана перевага використання відцентрової термічної дистиляції. Показані можливі відмови і недоліки компресійного вакуумного відцентрового дистилятора в порівнянні з відцентровим багатоступінчастим дистилятором з термоелектричним тепловим насосом. Бібл. 40, рис. 3, табл. 2.

Ключові слова: термоелектрика, тепловий насос, дистилятор.

Вступ

Термічна дистиляція стічних вод системи життєзабезпечення для тривалих космічних польотів розроблялася з початком розвитку космонавтики. У [1] описані декілька методів дистиляції: легко-випарна система (AES), вакуумна статична система випару і відцентровий вакуумний випарник - аналог випарника Хікмана, описаного в [2].

У 1962 р. був виготовлений перший вакуумний компресійний відцентровий дистилятор (VCD) – прототип дистилятора, працюючого з 2008 р. на Міжнародній космічній станції (МКС) [3].

У [4] описаний термоелектричний мембранний випарник, в якому стічні води випаровуються при вакуумі на поруватих мембранах з одного боку термоелектричного модуля, а пара конденсується на пористій пластині з іншого боку модуля.

У Київському політехнічному інституті в 1961 р. розпочаті дослідження процесів гідродинаміки і теплообміну при конденсації і випару в плівці рідини на поверхні, що обертається.

У [5] приведені результати дослідження течії рідини на поверхні, що обертається. У [6] представлені результати дослідження і обґрунтовано метод розрахунку мінімальної щільності зрошування, яка забезпечує повне покриття плівкою рідини поверхні, що обертається. У [7] приведені залежності для розрахунку тепловіддачі при конденсації, а в [8] дані залежності для розрахунку тепловіддачі при випарі ламінарної і турбулентної плівки рідини на дискових і конічних теплообмінних поверхнях, що обертаються, а також при випарі в кільці рідини, що обертається [9].

З 1974 по 1993 рік за завданням космічної фірми з Росії науковці та інженери КПІ розробляли і тестували виготовлені в Україні прототипи відцентрових дистиляторів, призначених для функціонування в космосі.

Було розроблено декілька типів відцентрових дистиляторів з різними тепловими насосами [10, 11]:

- термоелектричний відцентровий дистилятор, в якому теплообмінна поверхня, що обертається, була також термоелектричним тепловим насосом;
- відцентровий пароежекторний дистилятор, в якому паровий струминний компресор вбудований у вал, що обертається;
- відцентровий триступінчатий дистилятор.

До 1990 року публікації в СРСР, де містилися дані по конструкції апаратів для космосу, не дозволялися.

У [12 – 14] приведена коротка інформація про 3-і ступінчастому дистиляторі (продуктивність, загальна витрата енергії) без відомостей про міру концентрації, кількості годин роботи дистилятора, числа оборотів ротора, якості дистиляту.

З 1999 року компанія «Термодистиляція» (створена співробітниками КПІ) разом з Інститутом термоелектрики (Чернівці) за завданням Honeywell Co (США) приступила до розробки, виготовлення і тестування нового п'ятиступінчастого дистилятора з поліпшеним термоелектричним тепловим насосом (ТТН). В період 2000-2007 років були виготовлені 3 відцентрові дистилятори і два ТТН.

З 2000 по 2017 рік системи відцентрової дистиляції (дистилятор + ТТН) пройшли випробування по вилученню води з різних стічних вод систем життєзабезпечення для пілотованих космічних апаратів на стендах КПІ, Honeywell Co, в Центрі Маршалла (НАСА).

Результати випробувань були опубліковані в численних статтях і доповідях на конференціях з життєзабезпечення (ICES) і Міжнародних астрономічних конгресах (IAC) [15 – 29]. Детально процеси у відцентровому апараті з термоелектричним тепловим насосом розглянуто також в серії статей [30 – 32].

У цих дослідженнях детально показано вплив швидкості обертання, міри вилучення води, витрати рідини в контурах системи дистиляції, добротності термоелектричної батареї та типу розчину на ефективність відцентрової дистиляції з ТТН.

Практично одночасно з розробкою VCD у США було виготовлено систему термоелектричної мембранної дистиляції, так звану TIMES [33 – 35]. У цьому дистиляторі випаровування і конденсація відбуваються на нерухомій поверхні термоелектричних модулів.

У цій статті дано порівняння технічних і експлуатаційних характеристик трьох систем термічної дистиляції :

- статичний термоелектричний мембранний дистилятор (TIMES);
- вакуумний парокомпресійний відцентровий дистилятор (VCD);

- відцентровий багатоступінчастий дистиллятор з термоелектричним тепловим насосом (CMED +TНР).

Статичний термоелектричний мембранний дистиллятор TIMES

Цей дистиллятор був розроблений компанією Hamilton Seastrand Space Systems International в 1970 роках.

У системі використовується полімерна мембрана, з поверхні якої відбувається випаровування чистої води із забруднених стічних вод. У ідеальному випадку розчинені речовини і тверді включення не проходять через мембрану. Отримана пара конденсується на охолодженій мембрані. Отриманий конденсат відсмоктується через охолоджувану мембрану і на виході системи отримують якісний дистилат. Важлива особливість TIMES - загальна рециркуляція потоку початкової сировини, який стає все більш і більш концентрованим. Споживання енергії мінімізується за рахунок використання статичних теплових насосів (термоелектричних пристроїв).

Випар стічних вод в цій системі відбувається при вакуумі. Для земного застосування і невеликих продуктивностей (менше 5 літрів в годину) система TIMES досить проста і ефективна, особливо у тому випадку, якщо має місце невелика різниця температур випаровуваної рідини і конденсації пари в термоелектричному модулі. При концентрації урини до вмісту солей на рівні 40 % лише з-за фізико-хімічної температурної депресії, перепад температур в термоелектричному модулі збільшиться на 4.5 °С, що істотно знижує ефективність системи. Крім того, величина цього перепаду залежатиме від продуктивності насоса в контурі циркуляції початкової рідини.

Гранична концентрація рідини в системі TIMES обмежена з-за відкладень солей у порах мембранного випарника. Аналогічні процеси спостерігаються в мембранах зворотного осмосу при знесолюванні солоних вод з концентрацією близькою до урини і рівнем вилучення води до 60 % [33]. Дані публікацій [3, 4, 34] щодо системи TIMES свідчать, що максимальна ефективність цього дистиллятора з урахуванням витрат його циркуляційних насосів не перевищує $\eta = 2.5 - 3\%$ (при цьому $\eta_{\text{ТНР}} = 3.3 - 5\%$). Це близько до теоретичних можливостей такого теплового насоса при перепаді температур рідини з боку нагріву в модулі і пари з боку охолодження менше 4.5° С.

Відцентровий парокомпресійний дистиллятор (VCD)

Парокомпресійний відцентровий дистиллятор (ПВД) був створений і виготовлений в 1962 році за замовленням NASA [34]. На даний момент останній варіант ПВД встановлений на МКС. З його допомогою було отримано на МКС з 2008 року більше 13 тон дистилляту.

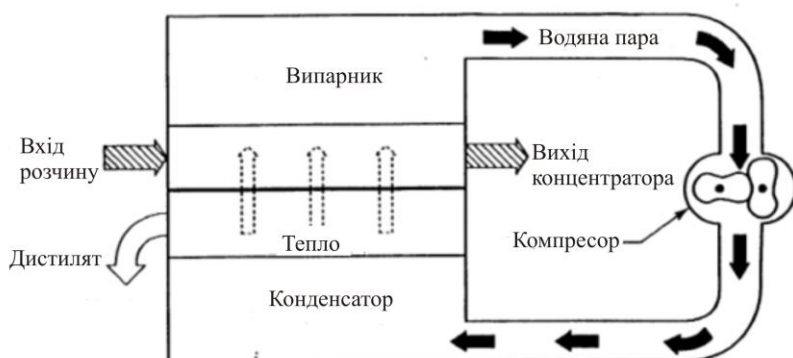


Рис. 1. Принципова схема ПВД

Парокомпресійний дистиллятор утилізував приховану теплоту конденсації шляхом стиснення отриманої водяної пари з метою підвищення її тиску і температури з подальшою конденсацією на поверхні, що знаходиться в тепловому контакті з випарником.

Результуючий тепловий потік від конденсатора до випарника, визначуваний різницею температур між насиченою парою і рідиною, достатній для випару рівної маси води з водовмісних відходів. Потреба в додатковій енергії визначається необхідністю стиснення водяної пари і компенсації механічних та теплових втрат.

Для постачання на станцію було виготовлено більше 10 прототипів з детальною публікацією майже в кожному році результатів випробувань цих дистилляторів. За результатами експлуатації на МКС подаються відомості як про механічні пошкодження їх у процесі роботи, так щодо проблем з якістю дистилляту. Щороку в доповідях на конференції з життєзабезпечення ICES повідомляється інформація про стан системи.

На рис.1 наведено графік сумарного вироблення дистилляту парокомпресорним дистиллятором в період з 21.11.2008 по 21.11.2018 [35], з якого випливає, що середня продуктивність VCD була 45 л/добу (не перевищувала 1.8 л/год), ступінь вилучення води складав 75% і лише після 2016 року виріс до 85 %.

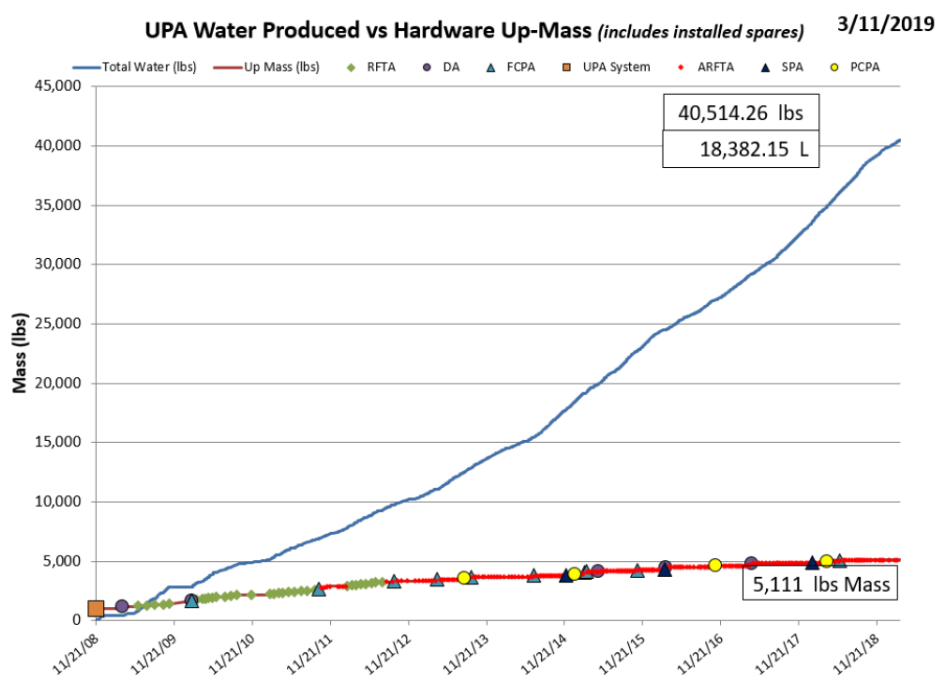


Рис. 2 Сумарна і річна кількість дистилляту, виробленого на МКС за допомогою ПВД [34, графік 7]

Ще у 1989 році у праці [3] зроблено порівняння трьох технологій з фазовим переходом: TIMES, VCD і AES (система повітряного випару на поруватій поверхні). Основні характеристики трьох систем наведено у табл. 12 праці [3]. VCD має значні переваги в порівнянні з AES і TIMES. Вже на 1990 рік VCD мав значно більший час проведених випробувань при концентрації різних стічних вод в порівнянні з іншими системами. Тому, надалі VCD був встановлений на МКС.

Багатоступінчастий відцентровий дистиллятор з тепловим насосом

У системі багатоступінчастої дистиляції з термоелектричним тепловим насосом, як вказано у [10-14], використовується два принципи зниження витрати енергії для концентрації

стічних вод в умовах невагомості: багатоступінчасте випаровування та термоелектричний тепловий насос (БВВД + ТТН). На малюнку 3 представлена схема відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом.

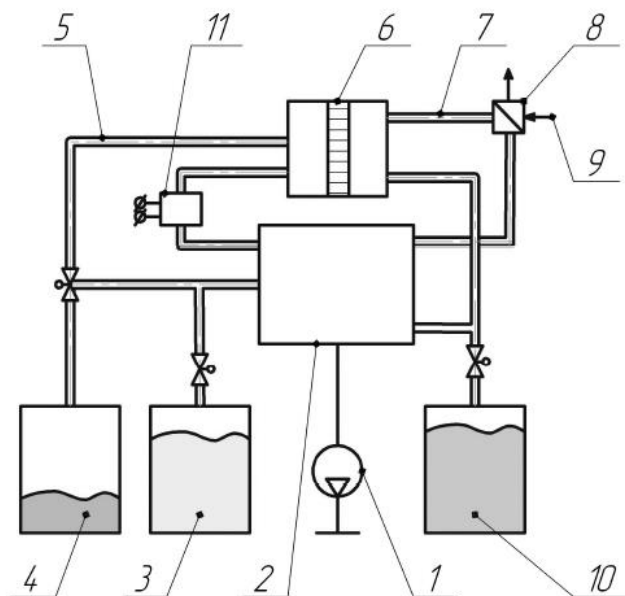


Рис. 3. Схема системи регенерації води з відцентровим дистильатором та термоелектричним тепловим насосом 1 – вакуум-насос; 2 - дистильатор; 3 - ємність початкової рідини; 4 - ємність концентрату; 5 - «гарячий» контур; 6 - термоелектричний трансформатор тепла; 7 - «холодний» контур; 8 - балансує охолоджувач; 9 - подання охолоджувальної рідини; 10 - збірник дистиляту-продукту; 11 - резервний підігрівач

Початкова рідина надходить з ємності 3 в обертовий ротор вакуумованого за допомогою вакуум-насоса 1 відцентрового дистильатора 2, заповнює до необхідного рівня ступені випару дистильатора, контур 5 та нагріває порожнину термоелектричної батареї 6. Холодна порожнина термоелектричної батареї з'єднується з конденсатором дистильатора за допомогою контуру 7 («холодний» контур). Відведення надмірного тепла з системи здійснюється за допомогою охолоджувача 8. Дистилят-продукт, як результат випарно-конденсаційного процесу, відкачується в ємність 10, а концентрат - в ємність 4.

При виході з ладу термоелектричного теплового насоса 6 система може працювати зі зниженою ефективністю при підігріванні рідини в гарячому контурі за допомогою підігрівача 11.

Дистилятор виготовлено багатоступінчастим, і він містить 3 або 5 ступенів з обертовими поверхнями теплопередачі, які розділяють розсіл і конденсат. Ряд вбудованих насосів (на основі трубок Піто) забезпечує зрощування теплообмінних поверхонь в кожному ступені дистильатора. Стічні води послідовно проходять через кожен ступінь випару. Останній ступінь випару є ступенем миттєвого закипання перегрітого розчину, який перегрівається на гарячій стороні термоелектричного теплового насоса. Отримана в цьому ступені пара використовується для нагріву у попередньому ступені дистильатора.

Дистилят з кожного ступеня і пара ступеня випару з найнижчим тиском надходять у кінцевий конденсатор, охолоджуваний дистильатором, який циркулює по контуру: кінцевий кон-

денсатор – холодна сторона термоелектричного теплового насоса – кінцевий конденсатор.

У [21 – 32, 36] було виконано значну кількість різноманітних досліджень характеристик БВВД при концентрації різних типів стічних вод [24], моделювання дистиллятора, питання надійності системи [25 – 26].

У [30 – 32] аналізуються локальні характеристики дистиллятора і теплового насоса і зроблено уточнення аналітичної моделі відцентрової дистиляції.

Порівняльний характеристик парокомпресійного дистиллятора та багатоступінчастого дистиллятора з термоелектричним тепловим насосом

Технічні характеристики

Головні технічні характеристики: продуктивність, витрата енергії, міра концентрації, якість дистилляту, вага, об'єм і масштабованість. Ці дані показані в табл. 1 [23].

Таблиця 1

Порівняння відцентрових технологій

Технологія	ПВД	БВВД + ТТН
Маса, кг	216	202
Об'єм, м ³	0.5	0,5
Продуктивність, кг/добу	1.63	2 – 7.5
Ступінь вилучення води %	До 85	До 95
Якість дистилляту	Відповідає нормам питної води	Відповідає нормам питної води
Питомі витрати енергії, Вт година/кг	< 180	< 110

З табл. 1 видно, що в БВВД залежно від потужності теплового насоса можна змінювати продуктивність в широких межах, що відповідає вимогам системи за критерієм масштабованості.

У ПВД неможливо істотно збільшити продуктивність дистиллятора з-за непропорційного збільшення витрат енергії при збільшенні оборотів компресора. При збільшенні продуктивності більше 1.8 л/годину [34] збільшення міри концентрації урини призводить практично до прямо пропорційного зростання питомого споживання енергії.

У БВВД з ТТН вплив концентрації на продуктивність і витрату енергії істотно нижчий [30, 32].

Надійність системи

Експлуатація системи парокомпресійної дистиляції рідких стічних вод (урини, конденсату атмосферної вологи) на МКС протягом 11 років – істотне досягнення американських науковців та інженерів у вирішенні проблеми регенерації води в умовах космічних польотів.

Жодна з багатьох інших технологій концентрації рідинних стоків (зворотний осмос, електродіаліз, статичний термоелектричний випарник) не має і не може мати таких результатів саме при роботі в космосі.

В той же час, вдосконалення термічної дистиляції із застосуванням відцентрових сил має велике значення. Це пов'язано з притаманними ПВД обмеженнями за продуктивністю, можливістю збільшення ступеня концентрації, а також за деякими факторами, що визначають з надійність системи.

Протягом 11 років експлуатації ПВД мала місце значна кількість відмов у роботі, випадків погіршення якості очищеної води і інших недоліків (табл. 2).

Таблиця 2

Перелік відмов в роботі вузла обробки сечі (ВОС) сегменту США на МКС порівняно з прототипом БВВД Centrifugal Multieffect Distiller (CMED) станом на 2019 р.

№	Найменування проблеми ПВД	Джерело інформації	БВВД + ТТН
1	Прослизання приводного ремня центрифуги ПВД	[37]	Подібний привід відсутній
2	Протікання урини в дистилат через підшипник валу центрифуги ПВД	[37]	У конструкції БВВД підшипники не контактують з уриною
3	Збої в роботі давача рівня рідини	[37]	Давач відсутній
4	Витікання водяної пари з конденсатора в нерухомий корпус.	[37]	У конструкції БВВД витікання пари виключається
5	Конденсація води в нерухомому корпусі	[37]	Накопичення конденсату в корпусі БВВД виключається
6	Випар конденсату, що накопичився, в корпусі нагрівачами зменшує ефективність роботи дистилятора	[37]	Подібна проблема відсутня, оскільки конденсат в корпусі БВВД не накопичується
7	Зношення і поломки підшипника центрифуги і компресора	[37]	Керамічні підшипники БВВД виключають проблему
8	Недостатній термін служби перистальтичного насоса	[38]	Перистальтичні насоси відсутні
9	Знос шестерень приводу компресора	[38]	Компресор відсутній
10	Відмови в роботі трансмісії насосного вузла	[38]	У БВВД перекачування рідини виконується трубою Піто
11	Відмови клапанів управління потоком в насосному вузлі	[38]	Немає насосного вузла

У правій колонці цієї таблиці наведено коментарі щодо можливості подібної проблеми в системі БВВД. До цієї таблиці слід додати ще один особливо важливий випадок ушкодження саме теплового насоса і наслідок такого випадку. У ПВД в разі пошкодження компресора система перестає функціонувати. У БВВД в разі відключення через повне або часткове пошкодження теплового насоса система перемикається на звичайний теплообмінник-нагрівач, в якому циркулюватиме розчин першого ступеня (див. поз.11, рис. 3). Така аварія приведе до зростання питомого споживання енергії приблизно у 1.5 – 2 рази, проте не позначиться на працездатності усієї системи.

Висновки

Порівняння різних технологій регенерації води з фазовим переходом показало, що ПВД на момент установки на МКС мав значні переваги в порівнянні з AES і TIMES. В процесі експлуатації вдалося регенерувати і отримати більше 13 тон дистиляту, що дуже істотно скоротило витрати на доставку свіжої води на станцію. В той же час, в процесі експлуатації було виявлено ряд істотних конструктивних недоліків системи, що практично повністю унеможливило використання ПВД у далеких космічних місіях на Місяць і Марс. В зв'язку з цим існує необхідність в розробці надійної і ефективної системи регенерації води для далеких космічних місій. Найближчим до заявлених вимог за своїми характеристиками є БВВД з термоелектричним тепловим насосом.

Література

1. Космічна біологія, Наука, 1972.
2. K. C. D. Hickman, Industrial and Engineering Chemistry, 5, 786(1957).
3. Max B. Gorensek, David Baer - Peckham. Space station water recovery trade study - Phase change technology. SAE paper 881015
4. Roebelen, G., Dehner, G., and Winkler, H., "Thermoelectric Integrated Membrane Evaporation Water Recovery Technology," SAE Technical Paper 820849, 1982.
5. Muzhilko, A.A., Rifert, V.G., Barabash, P.A. Flow of liquid film over the surface of a rotating disk // Heat transfer. Soviet research, 1985.
6. Butuzov A.I., Pukhovoy I.I. and Rifert V.G. Experimental Determination of the Minimum Irrigation Density in a Thin - Film Rotating Disk Apparatus. Fluid Mechanics - Soviet Research. 1976. Vol. 5. No. 1. January - February.
7. Butuzov, A.I., Rifert, V.G. "An Experimental Study of Heat Transfer during Condensation of Steam at a Rotating Disk", Heat Transfer - Soviet Research, Vol.4, No. 6, November - December 1972.
8. Butuzov, A.I. and Rifert, V.G. "Heat Transfer in Evaporation of Liquid from a Film on a Rotating Disk," Heat Transfer - Soviet Research, Vol. 5, No. 1, January - February 1973.
9. Usenko, V.I., Fainzilberg, S.N. Effect of acceleration on the critical heat load with the boiling of freons on elements having small transverse dimensions. High Temperature, 1974.
10. V.Rifert, P. Barabash, N.Goliad, "Methods and processes of thermal distillation of water solutions for closed water supply systems", The 20th Intersociety Conference on Environmental Systems, Williamsburg, July 1990. SAE Paper 901249.
11. N.Samsonov, L.Bobe, V.Novikov, V.Rifert and others "Systems for water reclamation from humidity condensate and urine for space station", The 24th International society Conference on Environmental Systems, June, 1994. SAE Paper 941536.
12. 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, the 25th International Conference on Environmental Systems, San Diego, July 1995. SAE Paper 951605
13. 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.
14. 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.

15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. A. Lubman, A. MacKnight, V. Rifert, and P. Barabash, "Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing". SAE International, 2007-01-3177, July 2007.
21. Callahan, M., Lubman, A., MacKnight, A. at al. Cascade Distillation Subsystem Development Testing. ICES - 2008. SAE International, 2008-01-2195.
22. Callahan, M., Lubman, A., Pickering, K. Cascade Distillation Subsystem Development : Progress toward a Distillation Comparison. 39th International Conference on Environmental Systems, ICES - 2009. SAE International, 2009-01-2401.
23. McQuillan, J., Pickering, K., Anderson, M., Carter, L., Flynn, M., Callahan, M., Yeh, J. (2010). Distillation Technology Down - selection for the Exploration Life Support(ELS) Water Recovery Systems Element. 40th International Conference on Environmental Systems.
24. Callahan, M.R., Patel, V., and Pickering, K.D. Cascade Distillation Subsystem Development : Early Results from the Exploration Life Support Distillation Technology Comparison Test. AIAA 2010-6149, 40th International Conference on Environmental Systems, 2010.
25. David Loeffelholz, Ben Baginski, Vipul Patel, Allen MacKnight, Sarah Schull, Miriam Sargusingh, and Michael Callahan. Unit Operation Performance Testing of Cascade Distillation Subsystem. 44th International Conference on Environmental Systems. 13-17 July 2014, Tucson, Arizona. ICES - 2014-14.
26. 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.
27. Rifert, V.G., Anatychuk, L.I., Barabash, PA, 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.
28. Vladimir G. Rifert, Petr A. Barabash, Vladimir Usenko, Andrii S. Solomakha, Lukyan I. Anatychuk, 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.
29. Vladimir G. Rifert, Lukyan I. Anatychuk, Andrii S. Solomakha, Petr A. Barabash, Vladimir Usenko, A.V. Prybyla, Milena Naymark, Valerii Petrenko. Upgrade the centrifugal multiple -

- effect distiller for deep space missions. 70th International Astronautical Congress(IAC), Washington D.C., United States, 21-25 October 2019. IAC - 19 - A1, IP, 11, x54316.
30. Риферт В.Г., Анатичук Л.І., Барабаш П.О., Усенко В.І., Стрикун А.П., Соломаха А. З., Петренко В.Г., Прибила А.В. Еволюція системи відцентрової дистиляції
 31. з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій. Частина 1. Огляд публікацій по відцентровій дистиляції в період 1990 - 2017 рр. // Термоелектрика. - 2019. - №1. - С. 57 - 67.
 32. Риферт В.Г., Анатичук Л.І., Барабаш П.О., Усенко В.І., Стрикун А.П., Соломаха А.З., Петренко В.Г., Прибила А.В. Еволюція системи відцентрової дистиляції
 33. з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій. Частина 2. Дослідження змінних характеристик системи багаторівневої дистиляції(СМЕД) з термоелектричним тепловим насосом(ТНР) // Термоелектрика. - 2019. - №2. - С. 62 - 77.
 34. Риферт В.Г., Анатичук Л.І., Барабаш П.О., Усенко В.І., Стрикун А.П., Соломаха А.З., Петренко В.Г., Прибила А.В. Еволюція системи відцентрової дистиляції
 35. з термоелектричним тепловим насосом для космічних місій. Частина 3. Аналіз локальних і інтегральних характеристик системи відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом // Термоелектрика. - 2019. - №3. - С. 73 - 88.
 36. Thibaud - Erkey, C., Fort, J., and Edeen, M., "A New Membrane for the Thermoelectric Integrated Membrane Evaporative Subsystem(TIMES), 2000. SAE Technical Paper 2000-01-2385
 37. Larry D. Noble, Franz H. Schubert, Rick J. Pudoka, Janie H. Miernik. Phase Change Water Recovery for the Space Station Freedom and Future Exploration Missions. 20th Intersociety Conference on Environmental Systems. Williamsburg, Virginia, July 9-12, 1990. SAE Technical Paper 901294.
 38. Layne Carter, Jill Williamson, Christopher A. Brown, Jesse Bazley, Daniel Gazda, Ryan Schaezler, Frank Thomas, Sunday Molina. Status of ISS Water Management and Recovery. 49th International Conference on Environmental Systems, 7-11 July 2019, Boston, Massachusetts. ICES 2019-36.
 39. V.G. Rifert, P.A. Barabash, A.S. Solomakha, V. Usenko, V.V. Sereda, V.G. Petrenko. Hydrodynamics and heat transfer in centrifugal film evaporator // Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue K. - 2018. - pp.49-57.
 40. V.G. Rifert, V.V. Sereda, A.S. Solomakha. Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of theoretical research // Heat and Mass Transfer - 2019. - Volume 55, №11. - pp.3041-3051.
 41. V.G. Rifert, V.V. Sereda, V. Gorin, P. Barabash, A.S. Solomakha. Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of experimental research // Heat and Mass Transfer (in press)
 42. Jill P. Williamson, Layne Carter, Jimmy Hill, Davey Jones, Danielle Morris, Rex Graves. Upgrades to the International Space Station Urine Processor Assembly. 49th International Conference on Environmental Systems. 7-11 July 2019, Boston, Massachusetts. ICES - 2019-43.
 43. Jennifer M. Pruitt, Layne Carter, Robert M. Bagdikian, Matthew J. Kayatin. Upgrades to the ISS Water Recovery System. 45th International Conference on Environmental Systems 12-16 July 2015, Bellevue, Washington. ICES - 2015-133.

Надійшла до редакції 01.08.2019

Риферт В.Г. док. техн. наук¹
Анатичук Л.И., акад. НАН України²
Барабаш П.О. канд. техн. наук¹
Усенко В.И. док. техн. наук¹
Соломаха А. С., канд. техн. наук¹
Петренко В. Г., канд. техн. наук¹
Прибила А. В. канд. физ.-мат. наук¹
Середа В.В. канд. техн. наук¹

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

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ С ТЕПЛОВЫМИ НАСОСАМИ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ

В работе проведено сравнение известных технологий для извлечения воды из продуктов жизнедеятельности космонавтов в условиях длительных космических миссий. Показано преимущество использования центробежной термической дистилляции. Показаны возможные отказы и недостатки компрессионного вакуумного центробежного дистиллятора по сравнению с центробежным многоступенчатым дистиллятором с термоэлектрическим тепловым насосом. Библ. 38, рис. 3, табл. 2.

Ключевые слова: термоэлектричество, тепловой насос, дистиллятор.

Rifert V.G., doct. techn. Sciences¹
Anatychuk L.I., acad. National Academy of Sciences of Ukraine²
Barabash P.O., cand. techn. Sciences¹,
Usenko V.I., doct. techn. Sciences¹
Solomakha A.S., cand. of techn. Sciences^{1,2}
Petrenko V.G., cand. of techn. Sciences¹
Prybyla A.V., cand. phys. - math. Sciences²
Sereda V.V. cand. of techn. Sciences¹

¹NTUU "Igor Sikorsky KPI", 6, Politekhnikeskaya str,
Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: vgrifert@ukr.net;

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

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL DISTILLATION METHODS WITH HEAT PUMPS FOR LONG SPACE FLIGHTS

The work compares technologies currently in use for water recovery from the vital products of astronauts in the conditions of long space missions. The advantage of using centrifugal thermal distillation is demonstrated. Possible failures and disadvantages of a compression vacuum centrifugal distiller compared with a centrifugal multistage distiller with a thermoelectric heat pump are shown. Bibl. 38, Fig. 3, Tabl. 2.

Key words: thermoelectricity, heat pump, distiller.

References

1. *Space biology* (1972). Nauka [in Russian].
2. Hickman K. C. D. (1957). *Industrial and Engineering Chemistry*, 786.
3. Gorenssek Max B., Baer-Peckham David. Space station water recovery trade study – Phase change technology. *SAE paper 881015*.
4. Roebelen G., Dehner G., and Winkler H. (1982). Thermoelectric integrated membrane evaporation water recovery technology. *SAE Technical Paper 820849*.
5. Muzhilko A.A., Rifert V.G., Barabash P.A. (1985). Flow of liquid film over the surface of a rotating disk. *Heat transfer. Soviet research*.
6. Butuzov A.I., Pukhovoy I.I. and Rifert V.G. (1976). Experimental determination of the minimum irrigation density in a thin-film rotating disk apparatus. *Fluid Mechanics-Soviet Research*, 5(1).
7. Butuzov A.I., Rifert V.G. (1972). An experimental study of heat transfer during condensation of steam at a rotating disk. *Heat Transfer-Soviet Research*, 4(6).
8. Butuzov A.I. and Rifert V.G. (1973). Heat transfer in evaporation of liquid from a film on a rotating disk. *Heat Transfer-Soviet Research*, 5(1).
9. Usenko V.I., Fainzilberg S.N. (1974). Effect of acceleration on the critical heat load with the boiling of freons on elements having small transverse dimensions. *High Temperature*.
10. Rifert V., Barabash P., Goliad N. (1990). Methods and processes of thermal distillation of water solutions for closed water supply systems. *The 20th Intersociety Conference on Environmental Systems. (Williamsburg, July 1990)*. *SAE Paper 901249*.
11. Samsonov N., Bobe L., Novikov V., Rifert V. et al. (1994). Systems for water reclamation from humidity condensate and urine for space station. *The 24th International society Conference on Environmental Systems (June, 1994)*. *SAE Paper 941536*.
12. 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. *The 25th International Conference on Environmental Systems (San Diego, July 1995)*. *SAE Paper 951605*.
13. 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. The 27th International Conference on Environmental Systems (Nevada, July 1997)*.
14. 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. The*

29th International Conference on Environmental Systems.

15. 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).*
16. 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).*
17. Rifert V., Usenko V., Zolotukhin I., MacKnight A. and Lubman A. (2001). Design optimization 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).*
18. Rifert, V. G., Usenko V.I., Zolotukhin I.V., MacKnight A. and Lubman A. (2003). Cascade distillation technology for water processing in space. *SAE Paper 2003-01-2625. 34st International Conference on Environmental Systems (Orlando, July 2003).*
19. 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.*
20. 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.*
21. Callahan M., Lubman A., MacKnight A. et al. *Cascade distillation subsystem development testing. ICES-2008. SAE International, 2008-01-2195.*
22. Callahan M., Lubman A., Pickering K. (2009). Cascade distillation subsystem development: progress toward a distillation comparison. *39th International Conference on Environmental Systems, ICES-2009. SAE International, 2009-01-2401.*
23. McQuillan J., Pickering K., Anderson M., Carter L., Flynn M., Callahan M., Yeh J. (2010). Distillation technology down-selection for the exploration life support (ELS) water recovery systems element. *40th International Conference on Environmental Systems.*
24. Callahan M.R., Patel V., and Pickering K.D. (2010). Cascade distillation subsystem development: early results from the exploration life support distillation technology comparison test. *AIAA 2010-6149, 40th International Conference on Environmental Systems.*
25. Loeffelholz David, Baginski Ban, Patel Vipul, MacKnight Allen, Schull Sarah, Sargusingh Miriam, and Callahan Michael (2014). Unit operation performance testing of cascade distillation subsystem. *44th International Conference on Environmental Systems (13-17 July 2014, Tucson, Arizona). ICES-2014-14.*
26. Bruce A. Perry, Molly S. Anderson (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.*
27. 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.
28. Rifert Vladimir G., Barabash Petr A., Usenko Vladimir, Solomakha Andrii S., Anatychuk Lukyan I., Prybyla Andrii V. (2017). Improvement of the cascade distillation system for long-term space flights. *68th International Astronautical Congress (IAC) (Adelaide, Australia, 25-29 September 2017).*
29. Rifert Vladimir G., Anatychuk Lukyan I., Solomakha Andrii S., Barabash Petr A., Usenko Vladimir, Prybyla A.V., Naymark Milena, Petrenko Valerii (2019). Upgrade the centrifugal

- multiple-effect distiller for deep space missions. *70th International Astronautical Congress (IAC) (Washington D.C., United States, 21-25 October 2019)*. IAC-19-A1, IP, 11x54316.
30. 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, 57 – 67.
 31. 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 2. Study of the variable characteristics of a multi-stage distillation system with a thermoelectric heat pump (THP). *J.Thermoelectricity*, 2, 62 – 77.
 32. 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 3. Analysis of local and integral characteristics of centrifugal distillation system with thermoelectric heat pump. *J.Thermoelectricity*, 3, 73 – 88.
 33. Thibaud-Erkey C., Fort J., and Edeen M. (2000). A new membrane for the thermoelectric integrated membrane evaporative subsystem (TIMES). *SAE Technical Paper 2000-01-2385*.
 34. Noble Larry D., Schubert Franz H., Pudoka Rick J., Miernik Janie H. (1990). Phase change water recovery for the space station freedom and future exploration missions. *20th Intersociety Conference on Environmental Systems (Williamsburg, Virginia, July 9-12, 1990)*. *SAE Technical Paper 901294*.
 35. Carter Layne, Williamson Jill, Brown Christopher A., Bazley Jesse, Gazda Daniel, Schaezler Ryan, Frank Thomas, Sunday Molina (2019). Status of ISS water management and recovery. *49th International Conference on Environmental Systems (7-11 July 2019, Boston, Massachusetts)*. *ICES 2019-36*.
 36. Rifert V.G., Barabash P.A., Solomakha A.S., Usenko V., Sereda V.V., Petrenko V.G. (2018). Hydrodynamics and heat transfer in centrifugal film evaporator. *Bulgarian Chemical Communications*, 50, Special Issue K, 49-57.
 37. Williamson Jill P., Carter Layne, Hill Jimmy, Jones Davey, Morris Danielle, Graves Rex (2019). Upgrades to the international space station urine processor assembly. *49th International Conference on Environmental Systems (7-11 July 2019, Boston, Massachusetts)*. *ICES-2019-43*.
 38. Pruitt Jennifer M., Carter Layne, Bagdigian Robert M., Kayatin Matthew J. (2015). Upgrades to the ISS water recovery system. *45th International Conference on Environmental Systems (12-16 July 2015, Bellevue, Washington)*. *ICES-2015-133*.

Submitted 01.08.2019