

Анатичук Л.І.¹, Барабаш П.А.², Ріферт В.Г.², Розвер Ю.Ю.¹,
Усенко В.І.², Черкез Р.Г.¹

¹Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна;

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ТЕПЛОВИЙ НАСОС, ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ПРИ КОСМІЧНИХ ПОЛЬОТАХ

У статті показано результати розробки та випробувань модернізованого високоефективного агрегату для забезпечення водою космонавтів під час тривалих польотів. Основні конструктивні вузли обладнання: відцентровий вакуумний дистилятор (CD) і термоелектричний тепловий насос (ТНП). Продуктивність до 5 л/год., питома витрата енергії менша, ніж 100 Вт. год./л, ступінь видобування води з вихідної рідини не менший ніж 92 %. Апарат створений зусиллями ТОВ «Термодистиляція» і ТОВ «Алтек-М». Наукові дослідження проводилися Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут» та Інститутом термоелектрики. Випробування апарата на стендах Honeywell International і NASA показали, що застосування термоелектричного теплового насоса в 1.6 рази знижує витрату енергії порівнянно з найближчим конкуруючим обладнанням, пароконпресійним дистилятором (VCD). При цьому система CD і ТНП працює стабільно за рівнем концентрування до 77%.

Ключові слова: космічні польоти, відцентровий дистилятор, термоелектричний тепловий насос, енергетична ефективність.

The paper presents the results of development and test of a modernized high-performance apparatus for water supply to cosmonauts during long-term missions. The basic structural units of the device include a centrifugal vacuum distiller (CD) and a thermoelectric heat pump (THP). The productivity is up to 5 l/hour, specific energy consumption is less than 100 W-hour/l, the degree of water recovery from the source liquid is at least 92%. The apparatus was created by the efforts of Thermodistillation Co. and Altec-M Ltd. The research was performed by the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" and Institute of Thermoelectricity. Testing of the apparatus on the test facilities of Honeywell International and NASA has shown that the use of thermoelectric heat pump reduces energy expenditure by a factor of 1.6 as compared to closest competing device, i.e. vapor compression distiller (VCD). In so doing, CD and THP system work stably with concentration level to 77%.

Key words: space flights, centrifugal distiller, thermoelectric heat pump, energy efficiency.

Вступ

Забезпечення екіпажу водою під час тривалих космічних польотів є серйозною та актуальною проблемою у зв'язку із неможливістю її доставки на борт під час польоту.

Розв'язком проблеми стала регенерація води з рідких відходів життєдіяльності космонавтів – урини, поту, господарських і побутових вод [1-3].

Нині є кілька технологій очищення рідких відходів. Залежно від ступеня забруднень у воді використовуються іонний обмін, електродіаліз, зворотний осмос і термічна дистиляція. Іонний обмін і електродіаліз використовуються за низьких рівнів концентрації солей 5.102 – 5.103 мг/л. Для реалізації зворотного осмосу за знесолення високомінералізованої води або урини необхідно використовувати насоси високого тиску (до 70 бар) і проводити попередню підготовку вихідної рідини. У цьому методі недоліком є обмежений ресурс роботи мембран. Технологія очищення води шляхом використання фазового переходу (дистиляції) є найбільш перспективною, оскільки не має перерахованих недоліків. Позитивною особливістю цього методу є незалежність якості очищення води від ступеня мінералізації та забруднення вихідної рідини.

Фахівці США розробляли три системи такого очищення води: система AES – випаровування рідини на гнотових модулях за допомогою гарячого повітря, система TIMES – випаровування рідини на пористих мембранах з використанням термоелектричного теплового насоса та система VCD – відцентровий пароконденсатний дистилятор [4].

З 1974 р. Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут» розроблялися дистилятори з обертовою поверхнею, на якій випаровування здійснюється в тонкій плівці [5-7]. Упродовж 1999-2005 р.р. компанія «Термодистиляція», корпорація «Honeywell International Inc.» (США) та Інститут термоелектрики спільно виготовили нову модель п'ятиступеневого відцентрового дистилятора CD-5 з тепловим насосом - термоелектричною батареєю (ТНР) [8-12]. Випробування ефективності агрегату проводилися на стенді NASA упродовж 2006-2009 р.р. Результати випробувань систем відцентрової дистиляції, оснащених термоелектричними тепловими насосами, наведено нижче.

Апарат багатоступеневої дистиляції з термоелектричним тепловим насосом

Метод поліпшення економічності пристроїв дистиляції шляхом використання багатоступеневого процесу випаровування в наш час досить розповсюджений. Його сутність полягає в тому, що вторинна пара одного ступеня випаровування використовується нагрівальною парою у наступному. Тиск у кожному наступному ступені підтримується більш низьким, ніж в попередньому. *N*-східчастий дистилятор дає практично *n*-кратне зниження витрат енергії порівнянно з одноступінчастим.

Схематично каскадну систему показано на рис. 1 [13]. Рідина, що підлягає очищенню, подається в багатоступеневий вакуумний роторний дистилятор (CD), у якому відбуваються її випаровування і конденсація. Необхідна енергія передається від теплового насоса. У ньому дистильована вода охолоджується, а рідина, що очищається, – нагрівається. Обидва потоки спрямовуються прокачуванням за допомогою CD у канали циркуляції теплового насоса та повертаються в CD. Температури становлять від 35° до 45°С.

Періодичний цикл обробляє 10 літрів вихідної рідини. У результаті очищення виходить 9 літрів очищеної води та один літр розсолу.

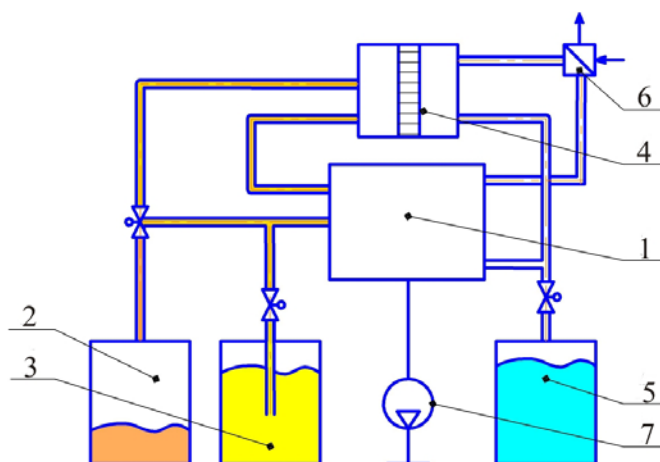


Рис. 1. Схема відцентрової дистиляції з термоелектричним тепловим насосом.
1- каскадний дистилятор CD, 2- ємність концентрату, 3- ємність вихідної рідини,
4- термоелектричний тепловий насос, 5- ємність очищеної води, 6- охолоджувач, 7- вакуум-насос.

Термоелектричний тепловий насос

Тепловим насосом служить термоелектрична батарея «Алтек-7001» [10], що використовує ефекти Пельтьє та Джоуля. Вона забезпечує відвід тепла від одного об'єкта і передачу цього тепла разом з теплом Джоуля іншому. Зовнішній вигляд батареї «Алтек-7001» показано на рис. 2. У неї входять спеціальні рідинні теплообмінники, термоелектричні модулі та рідинні колектори, що формують рух рідин по теплообмінниках. Теплообмінники задовольняють високим вимогам: вони повинні мати низький термічний опір і, з іншого боку, повинні бути виготовлені з матеріалів, стійких до впливу агресивних рідин. Такі матеріали зазвичай мають підвищений термічний опір.

Оптимізація конструкції теплообмінників здійснювались комп'ютерним моделюванням. У результаті отримано конструкції теплообмінників, що складаються з титанових трубок та алюмінієвих концентраторів тепла, що їх охоплюють. Для забезпечення турбулентного режиму руху рідини в титанові трубки вмонтовані спіральні титанові вставки. До термоелектричних модулів виставляються підвищені вимоги, особливо щодо надійності. З метою підвищення ресурсу теплового насоса елементи модулів включені в паралельно-послідовні ланцюги, що підвищують МТВФ у сотні разів.



Рис.2 Зовнішній вигляд термобатареї «Алтек-7001».

У табл. 1 наведені основні технічні характеристики ТНР.

Таблиця 1

Основні технічні характеристики термоелектричної батареї «Алтек-7001».

| Параметр | Значення |
|--|-----------------------|
| Габаритні розміри (довжина / ширина / висота), | 410/125/160 |
| Маса, кг | 6.1 |
| Електрична напруга постійного струму, В | 12 - 30 |
| Максимальна електрична потужність, Вт | 500 |
| Коефіцієнт ефективності (макс) | 2.5 |
| Гідрравлічний опір у контурах циркуляції, бар | |
| у контурі охолодження | < 0.20 |
| у контурі нагрівання | < 0.15 |
| Режим роботи | тривалий |
| Рідини, що переробляються | урина, стічні води |

Тривалі випробування відцентрового дистилятора CD-5 з термоелектричною батареєю «Алтек-7001» здійснювалися на стенді NASA упродовж 2006 - 2009 р.р. Випробування здійснено на двох розчинах (табл. 2). Усього було перероблено 1500 кг скидної води.

Таблиця 2

*Результати випробування відцентрового дистилятора CD-5
з термоелектричною батареєю «Алтек-7001».*

| Параметр | Випробування на розчині № 1 | Випробування на розчині № 2 |
|--|---|--|
| Склад розчину | 56.6% конденсату вологи 43.3% урини | 18,3% конденсату вологи, 14,0% урини 67.7% води для гігієнічних потреб |
| Кількість переробленої рідини, кг | 381 | 1198 |
| Продуктивність, кг/год. | 4.1 ± 0,1 | 5.2 ± 0.1 |
| Ступінь регенерації, % | 93.4 ± 0,7 | 90.3 ± 0.5 |
| Питоме енергоспоживання, Вт·год./кг | 99 ± 6 | 106 ± 2 |

Для оцінки якості дистиляції були проведені порівняльні випробування у двох центрах NASA: в Marshall Space Flight Center (MSFC) систем Wiped-Film Rotating Disk (WFRD) (також відцентровий дистилятор з паровим компресором) і Vapor Compression Distillation (VCD); в Johnson Space Center (JSC) був випробуваний Cascade Distillation Subsystem (CD-5).

У табл. 3 зіставляються основні характеристики відцентрових систем дистиляції CD-5, VCD і WFRD. Дистилятор CD-5 має меншу питому витрату енергії порівнянно з VCD при

більшій, (до трьох разів), продуктивності та більшому ступені регенерації (90-94 і 89 % відповідно).

Таблиця 3

Технічні показники випробуваних дистильаторів при регенерації розчину № 1

| | CD-5 | VCD | WFRD |
|------------------------------------|------|------|------|
| Продуктивність, кг/год. | 3.7 | 1.63 | 16.1 |
| Питоме енергоспоживання, Вт-год/кг | 109 | 188 | 85 |
| Середня потужність, Вт | 375 | 297 | 1252 |

Дистиллят, отриманий за допомогою CD-5 без будь-якої постобробки [15], підтвердив відмінну якість і повну відповідність стандартам. Якість дистилляту, отриманого від VCD і WFRD, за багатьма показниками в 2 – 8 разів гірша, ніж отриманого від CD-5 [14].

Упродовж усіх випробувань на стендах NASA, Honeywell і «Термодистилляції» (>1000 годин) термоелектричний тепловий насос функціонував безвідмовно, без відхилень від необхідних параметрів і характеристик.

Висновок

Проаналізовано найбільш перспективні системи регенерації та очищення води для пілотованих тривалий час космічних апаратів. Проведено зіставлення розробленої та виготовленої багатоступеневої відцентрової системи дистилляції, оснащеної термоелектричним тепловим насосом, з найближчими аналогами. За найважливішими показниками, – питомій витраті енергії, габаритами, вазі і якості одержуваного дистилляту – система CD-5 + ТНР перевершує всі відомі системи дистилляції та очищення космічного призначення.

Література

1. Анатичук Л.И. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества / Л.И. Анатичук // Термоэлектричество. – 2001. – № 1. – С.3-14.
2. Анатичук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатичук // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С.7-20.
3. Разработка и спетание системы регинерации воды из жидких отходов жизнедеятельности на борту пилотируемых космических аппаратов с использованием термоэлектрического теплового насоса / В.Г. Риферт, В.И. Усенко, П.А. Барабаш [и др.] // Термоэлектричество. – 2001. – № 2. – С.63-74.
4. Gorenssek, M.B., Baer-Peckham, D. «Space Station Water Recovery Trade Study-Phase Change Technology», 18th International Conference on Environmental Systems, San Francisco, July 1988.
5. Rifert, V.G., Barabash, P.A. and Goliyad, N.N. "Methods and Processes of Thermal Distillation of Water Solution for Closet Water Supply Systems," SAE Paper 901294, 20th International Conference on Enviromental Systems, Williamsburg, July 1990.
6. Samsonov, N.M., Bobe, L.S., Novikov, V.M., Farafonov, N.S., Pinsky B. Ja., Rakov, V.V, Rifert V.G., Grigoriev Ju.I, Komolov V.V. and Protasov N.N., "Development and Testing of a Vacuum Distillation Subsystem for Water Reclamation from Urine", SAE Paper 1999-01-1993, 29th International Conference on Environmental Systems. Denver, July 1999.
7. Rifert, V., Usenko, V., Zolotukhin, I., MacKnight, A., Lubman, A. "Comparison of Secondary Water Processors Using Distillation For Space Applications", SAE Paper 1999-01-1991, 29th

- International Conference on Environmental Systems. Denver, July 1999.
8. Lubman, A., MacKnight, A., Reddig, V., Bobe, L.S., Pinsky, B.Y., Rakov, V.V. and Edeen, M. "Performance Evaluation of a Three-Stage Vacuum Rotary Distillation Processor" SAE Paper 2000-01-2386, 30th International Conference on Environmental Systems and 7th European Symposium on Space Environmental Control Systems. Toulouse, France, July 2000.
 9. Rifert, V., Usenko, V., Zolotukhin, I., MacKnight, A., and Lubman, A. "Design Optimization 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.
 10. Rifert, V.G., Usenko, V.I., Zolotukhin, I.V., Anatyshuk, L.I., MacKnight, A., and Lubman, A. "Development and Test Cascade Centrifugal Distiller for Regeneration of Water from Urine", Industrial Heat Engineering. International Scientific and Applied Journal. National Academy of Sciences of Ukraine. Vol. 23, No. 4-5, 2001.
 11. Rifert, V.G., Usenko, V.I., Zolotukhin, I.V., MacKnight, A., and Lubman, A. "Cascaded Distillation Technology for Water Processing in Space", SAE Paper 2003-01-2625. 34th International Conference on Environmental Systems. Orlando, July 2003.
 12. Noble, L. D. Jr., Schubert, F.H., Graves, R.E., Miernik, J.H. An Assessment of the Readiness of Vapor Compression Distillation for Spacecraft Wastewater Processing. SAE Paper 911454. 21st International Conference on Environmental Systems, San Francisco, California, July 15-18, 1991.
 13. Lubman, A., MacKnight A., Rifert, V., and Barabash, P. Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing. SAE Paper 2007-01-3177, 37th International Conference on Environmental Systems. Chicago, Illinois, July 9-12, 2007.
 14. Mc Quillan, J., 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" AIAA 2010-6125, 40th International Conference on Environmental Systems. 2010.
 15. 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.

Надійшла до редакції 20.12.2013