

УДК 537.322.1

Анатычук Л.И.<sup>1</sup>, Барабаш П.А.<sup>2</sup>, Риферт В.Г.<sup>2</sup>,  
Розвер Ю.Ю.<sup>1</sup>, Усенко В.И.<sup>2</sup>, Черкез Р.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,  
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина;

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский  
политехнический институт», просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС, КАК СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОДЫ ПРИ КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТАХ

---

*В статье представлены результаты разработки и испытаний модернизированного высокоэффективного агрегата для обеспечения водой космонавтов при длительных полетах. Основные конструктивные узлы устройства: центробежный вакуумный дистиллятор (CD) и термоэлектрический тепловой насос (ТНП). Производительность до 5 л/час, удельный расход энергии менее 100 Вт·час/л, степень извлечения воды из исходной жидкости не менее 92 %. Аппарат создан усилиями ООО «Термодистилляция» и ООО «Алтек-М». Научные исследования проводились Национальным техническим университетом Украины «Киевский политехнический институт» и Институтом термоэлектричества. Испытания аппарата на стендах Honeywell International и NASA показали, что применение термоэлектрического теплового насоса в 1.6 раза снижает расход энергии по сравнению с ближайшим конкурирующим устройством, пароконденсационным дистиллятором (VCD). При этом система CD и ТНП работают стабильно при уровне концентрирования до 77 %.*

**Ключевые слова:** космические полеты, центробежный дистиллятор, термоэлектрический тепловой насос, энергетическая эффективность.

*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.

## **Введение**

Обеспечение экипажа водой при длительных космических полетах является серьезной и актуальной проблемой в связи с невозможностью ее доставки на борт во время полета. Решением проблемы стала регенерация воды из жидких отходов жизнедеятельности космонавтов – урины, пота, хозяйственных и бытовых вод [1-3].

В настоящее время есть несколько технологий очистки жидких отходов. В зависимости от степени загрязнений в воде используются ионный обмен, электродиализ, обратный осмос и термическая дистилляция. Ионный обмен и электродиализ применяются при низких уровнях концентрации солей  $5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3$  мг/л. Для реализации обратного осмоса при обессоливании высокоминерализованной воды или урины необходимо использовать насосы высокого давления (до 70 бар) и проводить предподготовку исходной жидкости. В этом методе недостатком является ограниченный ресурс работы мембран. Технология очистки воды путем использования фазового перехода (дистилляции) является наиболее перспективной, поскольку не имеет перечисленных недостатков. Положительным качеством этого метода является независимость качества очистки воды от степени минерализации и загрязненности исходной жидкости.

Специалисты США разрабатывали три системы такой очистки воды: система AES – испарение жидкости на фитильных модулях при помощи горячего воздуха, система TIMES – испарение жидкости на пористых мембранах с использованием термоэлектрического теплового насоса и система VCD – центробежный парокомпрессионный дистиллятор [4].

С 1974 г. Национальным техническим университетом Украины «Киевский политехнический институт» разрабатывались дистилляторы с вращающейся поверхностью, на которой испарение осуществляется в тонкой пленке.[5-7]. На протяжении 1999 – 2005 гг. компания «Термодистилляция», корпорация “Honeywell International Inc.” (США) и Институт термоэлектричества совместно изготовили новую модель пятиступенчатого центробежного дистиллятора CD-5 с тепловым насосом – термоэлектрической батареей (ТНР) [8-12]. Испытания эффективности агрегата проводились на стенде NASA в течение 2006 – 2009 гг. Результаты испытаний систем центробежной дистилляции, оснащенных термоэлектрическими тепловыми насосами приведены ниже.

## **Аппарат многоступенчатой дистилляции с термоэлектрическим тепловым насосом**

Метод улучшения экономичности устройств дистилляции путем использования многоступенчатого процесса выпаривания в настоящее время весьма распространен. Его сущность заключается в том, что вторичный пар одной ступени испарения используется в качестве греющего пара в последующей. Давление в каждой последующей ступени поддерживается более низким, чем в предыдущей;  $n$ -ступенчатый дистиллятор дает практически  $n$ -кратное снижение затрат энергии по сравнению с одноступенчатым.

Схематически каскадная система представлена на рис. 1 [13]. Жидкость, требующая очистки, подается в многоступенчатый вакуумный роторный каскадный дистиллятор (CD), в котором происходит ее испарение и конденсация. Необходимая энергия передается от теплового насоса. В нем дистиллированная вода охлаждается, а очищаемая жидкость нагревается. Оба потока направляются прокачкой с помощью CD в каналы циркуляции теплового насоса и возвращаются в CD. Температуры составляют от 35° до 45 °С.

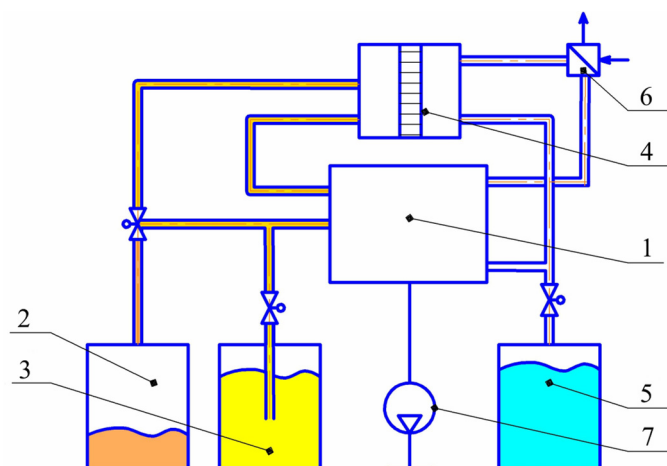


Рис. 1. Схема центробежной дистилляции с термоэлектрическим тепловым насосом. 1 – каскадный дистиллятор CD, 2 – емкость концентрата, 3 – емкость исходной жидкости, 4 – термоэлектрический тепловой насос, 5 – емкость очищенной воды, 6 – охладитель, 7 – вакуум-насос.

Периодический цикл обрабатывает 10 литров исходной жидкости. В результате очистки получается 9 литров очищенной воды и один литр рассола.

### Термоэлектрический тепловой насос

Тепловым насосом служит термоэлектрическая батарея «Алтек-7001» [10], использующая эффекты Пельтье и Джоуля. Она обеспечивает отвод тепла от одного объекта и передачу этого тепла вместе с теплом Джоуля другому. Внешний вид батареи «Алтек-7001» представлен на рис. 2. В нее входят специальные жидкостные теплообменники, термоэлектрические модули и жидкостные коллекторы, формирующие движение жидкостей по теплообменникам. Теплообменники удовлетворяют высоким требованиям: они должны обладать низким термическим сопротивлением и, с другой стороны, должны быть изготовлены из материалов, стойких к воздействию агрессивных жидкостей. Такие материалы обычно обладают повышенным термическим сопротивлением.

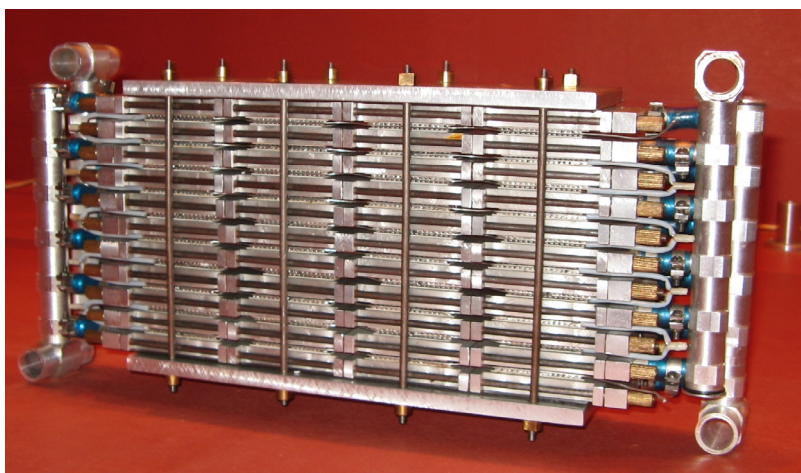


Рис. 2. Внешний вид термобатареи «Алтек-7001».

Оптимизация конструкции теплообменников производилась компьютерным моделированием. В результате получены конструкции теплообменников, состоящие из титановых трубок и охватывающих их алюминиевых концентраторов тепла. Для обеспечения

турбулентного режима движения жидкости в титановые трубки вмонтированы спиральные титановые вставки. К термоэлектрическим модулям предъявляются повышенные требования, особенно по надежности. С целью повышения ресурса теплового насоса элементы модулей включены в параллельно-последовательные цепи, повышающие MTBF в сотни раз.

В таблице 1 приведены основные технические характеристики ТНР.

Таблица 1

*Основные технические характеристики термоэлектрической батареи «Алтек-7001»*

Параметр	Значение
Габаритные размеры (длина / ширина / высота), мм	410/125/160
Масса, кг	6.1
Электрическое напряжение постоянного тока, В	12 – 30
Максимальная электрическая мощность, Вт	500
Коэффициент эффективности (макс)	2.5
Гидравлическое сопротивление в контурах циркуляции, бар в контуре охлаждения в контуре нагрева	< 0.20 < 0.15
Режим работы	продолжительный
Перерабатываемые жидкости	урина, сточные воды

Длительные испытания центробежного дистиллятора CD-5 с термоэлектрической батареей «Алтек-7001» проводились на стенде NASA в течение 2006 – 2009 гг. Испытания проведены на двух растворах (таблица 2). Всего было переработано 1500 кг сбросной воды.

Таблица 2

*Результаты испытания центробежного дистиллятора CD-5  
с термоэлектрической батареей «Алтек-7001»*

Параметр	Испытания на растворе № 1	Испытания на растворе № 2
Состав раствора	56.6 % конденсата влаги 43.3 % урины	18.3 % конденсата влаги, 14.0 % урины 67.7 % воды для гигиенических нужд
Количество переработанной жидкости, кг	381	1198
Производительность, кг/час	4.1 ± 0.1	5.2 ± 0.1
Степень регенерации, %	93.4 ± 0.7	90.3 ± 0.5
Удельное энергопотребление, Вт·ч/кг	99 ± 6	106 ± 2

Для оценки качества дистилляции были проведены сравнительные испытания в двух центрах NASA: в Marshall Space Flight Center (MSFC) систем Wiped-Film Rotating Disk (WFRD) (также центробежный дистиллятор с паровым компрессором) и Vapor Compression Distillation (VCD); в Johnson Space Center (JSC) был испытан Cascade Distillation Subsystem (CD-5).

В таблице 3 сопоставляются основные характеристики центробежных систем дистилляции CD-5, VCD и WFRD. Дистиллятор CD-5 имеет меньший удельный расход энергии по сравнению с VCD при большей, до трех раз, производительности и большей степени регенерации (90 – 94 и 89 %, соответственно).

*Таблица 3*

*Технические показатели испытанных дистилляторов при регенерации раствора № 1*

	CD-5	VCD	WFRD
Производительность, кг/час	3.7	1.63	16.1
Удельное энергопотребление, Вт·ч/кг	109	188	85
Средняя мощность, Вт	375	297	1252

Дистиллят, полученный при помощи CD-5 без какой либо постобработки [15], подтвердил отличное качество и полное соответствие стандартам. Качество дистиллята, полученного от VCD и WERD, по многим показателям в 2 – 8 раз хуже, чем от CD-5 [14].

На протяжении всех испытаний на стендах NASA, Honeywell и «Термодистилляции» (> 1000 часов), термоэлектрический тепловой насос функционировал безотказно, без отклонений от требуемых параметров и характеристик.

## **Заключение**

Проанализированы наиболее перспективные системы регенерации и очистки воды для пилотируемых длительного время космических аппаратов. Проведено сопоставление разработанной и изготовленной многоступенчатой центробежной системы дистилляции, оснащенной термоэлектрическим тепловым насосом, с ближайшими аналогами. По важнейшим показателям: удельному расходу энергии, габаритам, весу и качеству получаемого дистиллята система CD-5 + ТНП превосходит все известные системы дистилляции и очистки космического назначения.

## **Литература**

1. Анатычук Л.И. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2001. – № 1. – С. 3 – 14.
2. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 7 – 20.
3. Разработка и испытание системы регенерации 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. – 2011. – № 2. – С. 63 – 74.
4. M.B. Gorenssek, D. Baer-Peckham, Space Station Water Recovery Trade Study-Phase Change Technology, 18<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, San Francisco, July 1988.

5. V.G. Rifert, P.A. Barabash, and N.N. Goliyad, Methods and Processes of Thermal Distillation of Water Solution for Closet Water Supply Systems, SAE Paper 901294, 20<sup>th</sup> International Conference on Enviromental Systems, Williamsburg, July 1990.
6. N.M. Samsonov, L.S. Bobe, V.M. Novikov, N.S. Farafonov, B.Ja. Pinsky, V.V. Rakov, V.G. Rifert, Ju.I. Grigoriev, V.V. Komolov, and N.N. Protasov, Development and Testing of a Vacuum Distillation Subsystem for Water Reclamation from Urine, SAE Paper 1999-01-1993, 29<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, Denver, July 1999.
7. V. Rifert, V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight, and A. Lubman, Comparison of Secondary Water Processors Using Distillation For Space Applications, SAE Paper 1999-01-1991, 29<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, Denver, July 1999.
8. A. Lubman, A. MacKnight, V. Reddig, L.S. Bobe, B.Y. Pinsky, V.V. Rakov, and M. Edeen, Performance Evaluation of a Three-Stage Vacuum Rotary Distillation Processor, SAE Paper 2000-01-2386, 30<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems and 7<sup>th</sup> European Symposium on Space Environmental Control Systems, Toulouse, France, July 2000.
9. V. Rifert, V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight, and A. Lubman, Design Optimization of Cascade Rotary Distiller with the Heat Pump for Water Reclamation from Urine, SAE Paper 2001-01-2248, 31<sup>st</sup> International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2001.
10. V.G. Rifert, V.I. Usenko, I.V. Zolotukhin, L.I. Anatyshuk, A. MacKnight, and A. Lubman, 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* 23 (4-5) (2001).
11. V.G. Rifert, V.I. Usenko, I.V. Zolotukhin, A. MacKnight, and A. Lubman, Cascaded Distillation Technology for Water Processing in Space, SAE Paper 2003-01-2625, 34<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2003.
12. L.D. Noble, Jr., F.H. Schubert, R.E. Graves, and J.H. Miernik, An Assessment of the Readiness of Vapor Compression Distillation for Spacecraft Wastewater Processing, SAE Paper 911454, 21<sup>st</sup> International Conference on Environmental Systems, San Francisco, California, July 15-18, 1991.
13. A. Lubman, A. MacKnight, V. Rifert, and P. Barabash, Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing, SAE Paper 2007-01-3177, 37<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, Chicago, Illinois, July 9-12, 2007.
14. J. Mc Quillan, 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, 40<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, 2010.
15. M.R. Callahan, V. Patel, and K.D. Pickering, Cascade Distillation Subsystem Development: Early Results from the Exploration Life Support Distillation Technology Comparison Test, AIAA 2010-6149, 40<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, 2010.

Поступила в редакцию 20.12.2013.