

УДК 66.048.5: 629.7.048

Повышение эффективности системы регенерации воды на пилотируемых космических аппаратах

В. Г. Риферт, В.И. Усенко, П. А. Барабаш

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

Выполнен анализ наиболее перспективных систем регенерации воды для пилотируемых космических аппаратов. Показаны преимущества разработанной авторами многоступенчатой центробежной системы дистилляции, оснащенной термоэлектрическим тепловым насосом, по сравнению с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: Регенерация воды, центробежный дистиллятор, термоэлектрический тепловой насос.

Введение

Обеспечение экипажа космического аппарата водой представляет серьезную проблему, решение которой может быть обеспечено регенерацией воды из жидких отходов жизнедеятельности экипажа – урины, пота, хозяйственных вод. Существенное различие состава растворенных примесей и их концентрации делает наиболее перспективным методом получения чистой воды дистилляцию. Однако специфические условия космического полета исключают применение хорошо отработанных процессов дистилляции в земных условиях.

В США разрабатывались три системы очистки: система AES – испарение жидкости на фитильных модулях с помощью горячего воздуха, система TIMES – испарение жидкости на пористых мембранах с использованием термоэлектрического теплового насоса и система VCD – центробежный парокompрессионный дистиллятор [1].

В Киевском политехническом институте (КПИ) с 1974 г начали разрабатывать дистилляторы с вращающейся теплообменной поверхностью, на которой жидкость испаряется в тонкой пленке. Совместно с НИИХИММАШ (г. Москва, Россия) в период с 1974 по 1991 гг. были изготовлены и испытаны на стендах несколько типов центробежных дистилляторов с разными методами регенерации энергии [2-3]. Компанией «Термодистилляция», в которую вошли основные специалисты из КПИ, в 1999 - 2005 гг. совместно с корпорацией «Honeywell International Inc.» (США) изготовлены новые модели - пятиступенчатые центробежные дистилляторы CD-5 с тепловым насосом - термоэлектрической батареей (ТНР) [4 - 6], которые были испытаны на стенде NASA в 2006 – 2009 гг.

В настоящем докладе приведены основные результаты испытаний систем центробежной дистилляции с тепловыми насосами и показаны преимущества использования в них ТНР.

Парокompрессионный дистиллятор VCD

В США в течение более 40 лет [7] разработано и испытано, включая испытания на борту МКС, несколько моделей парокompрессионных центробежных дистилляторов VCD. Система дистилляции с паровым компрессором

включает вращающийся ротор в виде конуса, внутри которого испаряется жидкость. Полученный пар поступает в механический компрессор, сжимается и охлаждается на внешней поверхности вращающегося ротора. В VCD используется низкая скорость вращения ротора, ~ 150 об/мин. В связи с этим для перемещения жидкостей используют специальные перистальтические насосы (peristaltic pump). Необходимо также отметить, что компрессор является наименее надежным элементом этой системы дистилляции.

При концентрировании жидкостей с высоким содержанием солей (урина), из-за увеличения температурной депрессии в VCD снижается эффективность.

В табл. 1 приведены основные характеристики дистиллятора VCD и, для сравнения, характеристики системы TIMES и AES [7]. По производительности, мощности и удельному потреблению энергии пароконпресссионный дистиллятор имеет лучшие параметры, чем система TIMES и AES.

Табл. 1. Сравнение систем дистилляции для регенерации воды из урины

Характеристики	V	T	AES
	CD	IMES	
Количество конденсата, кг/час	2, 1	1 ,6	0,32 – 0,45
Энергопотребление, Вт	4 29	3 68	472 - 516
То же на 1 кг конденсата, Вт·ч/кг	1 55	3 15	1450 - 1475
Степень регенерации, %	8 7	9 0	96
Вес, кг	1 56	1 16	
Объем, м ³	0, 379	0 ,292	

Многоступенчатая дистилляция с термоэлектрическим тепловым насосом

К преимуществам многоступенчатой центробежной дистилляции следует отнести также следующее:

- возможность высокого концентрирования жидкости (до 92...95 %) без ухудшения качества получаемого продукта и снижения ресурса дистиллятора;
- меньшие затраты на подготовку обрабатываемой жидкости и доочистку продукта до нужных параметров;
- за счет высокой скорости вращения ротора (900 – 1300 об/мин) возможность использования центробежной силы для циркуляции и откачивания жидких потоков.

Условия выпаривания таких жидкостей, как моча, требуют ограничений по максимальной температуре (55 – 60°C). Поэтому, по условиям отвода тепла, количество ступеней ограничено располагаемым перепадом температур. Для дополнительного снижения затрат энергии на работу системы с многоступенчатым дистиллятором нами еще в 1980 – 1990 гг. совместно с НИИХИММАШ был использован термоэлектрический тепловой насос. Этот же принцип сниже-

ния удельного расхода энергии использован в дальнейших разработках в 1999 – 2006 гг. по заданию “Honeywell International Inc.” каскадного (пятиступенчатого) дистиллятора CD-5.

Каскадная система дистилляции представлена на рис. 1 [8]. Система состоит из двух основных компонентов: многоступенчатого вакуумного роторного дистиллятора и термоэлектрического теплового насоса. Поступающая в нее жидкость, такая как законсервированная урина, подается в многоступенчатый вакуумный роторный дистиллятор (каскадный дистиллятор CD), в котором происходят испарение и конденсация. Все ступени работают параллельно, чтобы обеспечить высокую производительность подготовки воды. Необходимая для рабочего процесса энергия поступает от теплового насоса, в котором дистиллированная вода охлаждается, а рабочая жидкость нагревается. Оба потока прокачиваются с помощью CD в циркуляционные петли теплового насоса и возвращаются в CD. Температуры этого процесса составляют от 35° до 45°С в горячей петле и от 20° до 25°С в холодной петле.

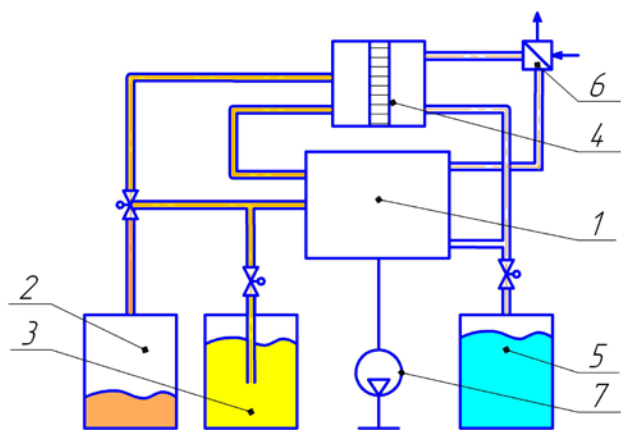


Рис. 1. Функциональная схема каскадной подсистемы дистилляции:

1- каскадный дистиллятор CD, 2- емкость для концентрата, 3- емкость исходной жидкости, 4- термоэлектрическая батарея, 5- емкость очищенной воды, 6- охладитель, 7- вакуум-насос.

Другие компоненты системы используются для хранения и управления потоками жидкостей, используемых в технологическом процессе. Подача и отвод жидкостей регулируются клапанами, управляемыми давлением среды, и не требуют применения цифровых регуляторов. Подаваемая жидкость содержится в накопительном резервуаре и подается в горячую петлю через клапан, управляемый давлением среды. Система работает в вакууме и, когда объем среды в горячей петле в результате дистилляции уменьшается, давление, создаваемое насосом, падает и больше рабочей жидкости feed проникает в CD. Продукт или конденсат через клапан, управляемый давлением среды и работающий в обратном направлении, поступает в резервуар-сборник. В этом случае в нем также поддерживается вакуум системы. Когда объем среды в холодной петле благодаря дистилляции растет, создаваемое в ней давление повышается и клапан открывается для подачи продукта.

Процесс организован как периодический для достижения максимальной регенерации воды из подаваемой жидкости. Дистиллятор CD дистиллирует полученную из горячей петли воду, сокращая в ней объем рабочей среды. Поступающая жидкость добавляется в горячую петлю для поддержания в ней постоянного объема. Этот процесс продолжается до тех пор, пока в горячей петле

жидкость не превращается в рассол заданной концентрации. Обычно это происходит, когда более 90% очищенной воды, содержащейся в исходной жидкости собирается в резервуаре-сборнике. Рассол затем выкачивается из системы и CD выключается. В типичном периодическом цикле обрабатываются 10 литров исходной жидкости с получением 9 литров очищенной воды и одного литра рассола. Производительность аппарата составляет 5л/час, скорость вращения 1000...1500об./мин., потребляемая мощность до 200Вт, масса аппарата – 19,6кг.

В качестве теплового насоса для работы в комплексе с дистиллятором CD-5 была использована термоэлектрическая батарея «Алтек-7001», разработанная и изготовленная фирмой «Алтек» Лтд. (Украина) [5]. Конструктивно ТНР состоит из теплообменных элементов, соединенных в секции по потоку теплоносителей последовательно. Секции контуров нагрева и охлаждения идентичны и соединены по потоку теплоносителей параллельно. Между теплообменными элементами расположены термоэлектрические модули. Максимальная мощность на горячих спаях 500Вт; коэффициент эффективности до 2,5; масса – 6,1Кг.

На стенде NASA в течение с мая 2006 по август 2009 гг. были проведены испытания центробежного дистиллятора CD-5 с термоэлектрической батареей «Алтек-7001». Испытания проведены на двух растворах (табл.2). Всего было переработано 1500 кг сбросной воды.

Табл. 2. Итоговые термодинамические характеристики

Параметр	Раствор № 1	Раствор № 2
Состав раствора	56,6% конденсата влаги, 43,3% урины	18,3% конденсата влаги, 14,0% урины, 67,7% воды для гигиенических нужд
Переработано 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

Сравнительные испытания были проведены в двух центрах NASA: в Marshall Space Flight Center (MSFC) были испытаны Wiped-Film Rotating Disk (WFRD) (также центробежный дистиллятор с паровым компрессором) и Vapor Compression Distillation (VCD), а в Johnson Space Center (JSC) был испытан Cascade Distillation Subsystem (CD-5). Испытания по каждой из этих технологий проводились на протяжении времени, эквивалентного 30-дневному космическому полету. Целью этих испытаний был сбор данных по техническим характеристикам для адекватной оценки всех трех технологий.

В табл. 3 показано, что 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) по сравнению с аналогами.

Табл. 3. 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
----------------------	-----	-----	-------------

Сопоставление качества дистиллята, показало [9], что по всем показателям, дистиллят, полученный на CD-5 (без какой либо постобработки) имеет качество, соответствующее стандартам. Качество дистиллята, полученного на VCD и WERD, по многим показателям в 2 – 8 раз хуже, чем после CD-5.

В течение всех испытаний, как на стенде NASA (> 400 часов работы), так и на стендах Honeywell и КПИ (> 600 часов), термоэлектрический тепловой насос ни разу не давал никаких отклонений в технических показателях и надежности в работе.

Заключение

Выполнен анализ характеристик наиболее перспективных систем регенерации и очистки воды для пилотируемых космических аппаратов. Дано сравнение разработанной авторами многоступенчатой центробежной системы дистилляции, оснащенной термоэлектрическим тепловым насосом, с центробежной компрессионной системой дистилляции. По всем основным показателям: удельному расходу энергии, габаритам, весу и качеству получаемого дистиллята система CD-5 + ТНР имеет лучшие показатели по сравнению с аналогами.

Литература

1. 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.
2. 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 Environmental Systems, Williamsburg, July 1990.
3. 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.
4. 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.
5. Rifert, V.G., Usenko, V.I., Zolotukhin, I.V., Anatychuk, 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.