

П. А. БАРАБАШ, А. С. СОЛОМАХА, В. И. УСЕНКО, В. Г. ПЕТРЕНКО

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Украина

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ДИСТИЛЛЯТОРЫ В СИСТЕМАХ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ПИЛОТИРУЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Предметом изучения в статье являются системы регенерации воды в условиях космического полета. *Целью* является выбор наиболее приемлемого способа обеспечения космонавтов питьевой водой, особенно в условиях дальних космических миссий. *Задачи:* анализ известных технологий очистки сточных вод и жидких продуктов жизнедеятельности космонавтов, сравнение основных параметров систем: производительности, удельного энергопотребления и т.д. Основным *методом* исследования является экспериментальный, в результате чего были получены реальные показатели работы центробежного вакуумного дистиллятора в комплекте с термоэлектрическим тепловым насосом. Получены следующие *результаты*. На основании анализа известных разработок установлено, что центробежная вакуумная дистилляция является наиболее перспективной технологией для регенерации воды из жидких отходов в системах жизнеобеспечения в космических полетах. Главным в выборе предпочтительной технологии для дальних пилотируемых космических миссий является максимальная надежность системы при минимальной массе, габаритах и низком энергопотреблении. Проанализированы центробежные вакуумные дистилляторы с тремя и пятью ступенями и несколько вариантов схем рекуперации энергии на основе термоэлектрического теплового насоса. Показаны результаты испытаний центробежного вакуумного дистиллятора на урине и смесях сточных вод. Показано преимущества разработанного дистиллятора по сравнению с аналогом, установленным на Международной космической станции. *Выводы.* Сравнение технологических схем VCD (США) и центробежной вакуумной дистилляции (ЦВД), а также самих узлов дистилляции показывает ряд преимуществ системы регенерации воды на базе ЦВД с термоэлектрическим тепловым насосом (ТТН): отсутствие внешних насосов, отсутствие механического компрессора, меньшее влияние физико-химической температурной депрессии на эффективность ТТН по сравнению с механическим компрессором, более простая, а значит и более надежная, конструкция блока дистилляции. Это позволяет сделать вывод о перспективности этой системы (особенно после ее модернизации с учетом новых требований) для дальних и длительных космических миссий с космонавтами на борту.

Ключевые слова: центробежная вакуумная дистилляция; микрогравитация; регенерация воды; термоэлектрический тепловой насос.

Введение

Обеспечение пилотируемых космических объектов питьевой и технической водой представляет собой достаточно сложную задачу. Связано это с рядом причин, главной из которых является высокая стоимость вывода груза в космос с Земли. Например, доставка груза на низкую (опорную) орбиту составляет больше \$3000 на кг груза, и эта цифра растет с увеличением высоты орбиты или дальности полета от Земли [1]. С учетом этого, решение поставленной задачи за счет запаса, хранимого на борту аппарата, или периодической доставки воды с земной поверхности при длительных и особенно дальних экспедициях является проблемной, а в ряде случаев практически неосуществимой.

Более перспективным является создание системы регенерации чистой воды из жидких продуктов жизнедеятельности космонавтов и загрязненной санитарно-гигиенической воды на борту космического аппарата. Приемлемым способом

очистки воды является дистилляция жидких отходов. Этот способ широко используется в земных условиях для опреснения морской и минерализованной воды, а также для очистки сточных вод промышленных предприятий. Однако использовать отработанные в земных условиях дистилляционные установки на космических объектах в большинстве случаев невозможно. Препятствием является невесомость, при которой должна работать дистилляционная установка.

Целью статьи является выбор наиболее приемлемого способа обеспечения космонавтов питьевой водой, особенно в условиях дальних космических миссий.

Системы дистилляции, пригодные для пилотируемых космических объектов

В настоящее время существуют несколько отработанных систем регенерации воды для условий космических полетов.

Первая из возможных систем регенерации воды основана на технологии Vapor Compression Distiller (VCD) (США) [2]. Упрощенная схема VCD показана на рис. 1.

Использованные отходы собираются в резервуаре для сточных вод. Насос для жидкости представляет собой четырехтрубный перистальтический насос, который перемещает загрязненную жидкость из резервуара для сточных вод в дистилляционный узел (DA), рециркулирует концентрированные отходы из DA в резервуар для рассола и обратно в DA и откачивает дистиллят из DA. DA состоит из вращающейся центрифуги, где отработанная жидкость испаряется при вакууме, полученный пар сжимается механическим компрессором и используется в качестве греющего испарителя.

VCD функционирует при низких оборотах (<150 об/мин). По этой причине встроенные в DA насосы на основе трубки Пито не обеспечивают достаточного для циркуляции потоков в контурах VCD напора. Эта проблема решена за счет дополнительных внешних перистальтических насосов, что усложняет гидравлический контур и систему управления. По мере увеличения концентрации раствора растет температурная депрессия и, соответственно, степень сжатия компрессора, что приводит к уменьшению производительности VCD и, соответственно, увеличению удельного расхода энергии. Наличие механического компрессора дополнительно усложняет конструкцию и снижает надежность системы.

Вторая перспективная система регенерации воды (рис. 2), разработана в НТУУ «КПИ» с использованием центробежного вакуумного дистиллятора (ЦВД) в сочетании с термоэлектрическим тепловым насосом (ТТН) [3-18], существенно снижающим удельное энергопотреб-

ление системы. В системе используется многоступенчатый центробежный дистиллятор ($n = 600 \div 1200$ об/мин).

Исходная жидкость поступает из емкости 3 во вращающийся ротор вакуумированного с помощью вакуум-насоса 1 центробежного дистиллятора 2, заполняет до необходимого уровня ступени испарения дистиллятора, контур 5 и греющую полость термоэлектрической батареи 6. Холодная полость термоэлектрической батареи соединяется с конечным конденсатором дистиллятора с помощью контура 7 ("холодный" контур). Отвод избыточного тепла из системы осуществляется с помощью холодильника 8. Дистиллят-продукт, как результат испарительно-конденсационного процесса, откачивается в емкость 10, а концентрат – в емкость 4. При выходе из строя ТТН, система сможет работать с пониженной эффективностью при подогреве жидкости в горячем контуре с помощью подогревателя 11.

Дистиллятор выполнен многоступенчатым и включает 3 или 5 ступеней с вращающимися поверхностями теплопередачи, разделяющими рассол и конденсат. Ряд встроенных насосов (на основе трубок Пито) обеспечивают орошение теплообменных поверхностей в каждой ступени дистиллятора. Сточные воды последовательно проходят через каждую из ступеней испарения. Конечная ступень испарения представляет собой ступень мгновенного вскипания перегретого раствора, который перегревается на горячей стороне ТТН. Полученный в этой ступени пар является греющим в предыдущей ступени дистиллятора. Дистиллят из каждой ступени и пар ступени испарения с самым низким давлением поступают в конечный конденсатор, охлаждаемый дистиллятом, циркулирующим по контуру: конечный конденсатор – холодная сторона ТТН – конечный конденсатор.

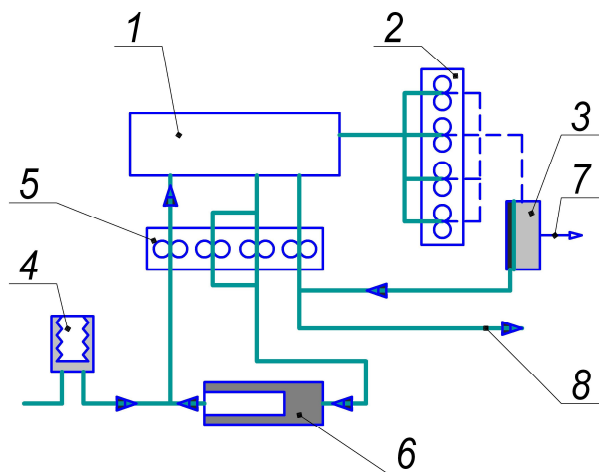


Рис. 1. Схема VCD

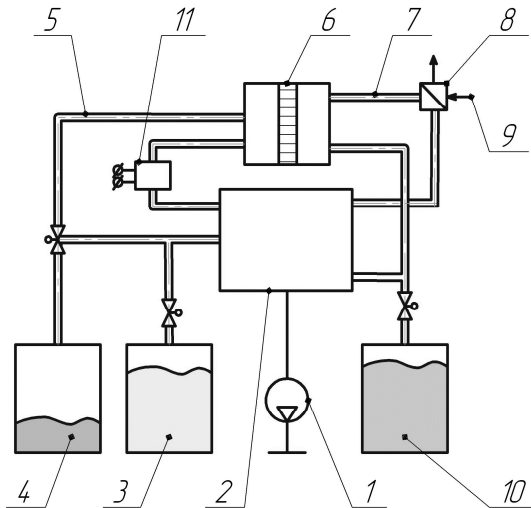


Рис. 2. Принципиальная схема системы извлечения воды из жидких отходов с ЦВД:

1 – вакуум-насос; 2 – дистиллятор; 3 – емкость исходной жидкости; 4 – емкость концентрата; 5 – «горячий» контур; 6 – термоэлектрический трансформатор тепла; 7 – «холодный» контур; 8 – балансирующий охладитель; 9 – подача охлаждающей жидкости; 10 – сборник дистиллята-продукта; 11 – резервный подогреватель

Избыточный дистиллят, откачивается из аппарата трубкой Пито. После достижения в горячем контуре максимальной (расчетной) концентрации неиспарившегося остатка, его вытесняют из внешней части горячего контура в отдельный резервуар свежим раствором, и система может начать новый цикл.

Центробежные силы, возникающие при вращении ротора дистиллятора, обеспечивают транспортировку всех жидкостей в системе и работу дистиллятора при пониженной гравитации без применения внешних насосов.

На рис. 3 показана схема трехступенчатого дистиллятора ЦВД. Аналогичную конструкцию имеет и пятиступенчатый аппарат, основным отличием которого является количество ступеней.

ЦВД имеет герметичный корпус 1, в котором установлен на подшипниках ротор 2. Вращение ротора обеспечивается приводом через герметичную магнитную муфту. Ротор разделен перегородками на ряд ступеней дистилляции и конечный конденсатор. Технологический (исходный) раствор 3 подается на ЦВД по каналу 4, где он распределяется по ступеням дистилляции. Раствор через канал 5 подается в нагреватель системы, из которого (в перегретом состоянии) через канал 6 возвращается в устройство, где перегрев жидкости снимается самовскипанием. Полученный пар

используется в качестве греющего в предыдущей ступени. Пар последней ступени испарения конденсируется в конечном конденсаторе при контакте с дистиллятом, охлажденным вне устройства. Охлажденный дистиллят поступает в устройство через канал 7, нагревается и снова удаляется для охлаждения встроенным насосом через канал 8. Избыточный конденсат, полученный в аппарате, отводится трубкой Пито потребителю (в резервуар для хранения) через канал 10. Вакуумирование аппарата осуществляется через канал 11.

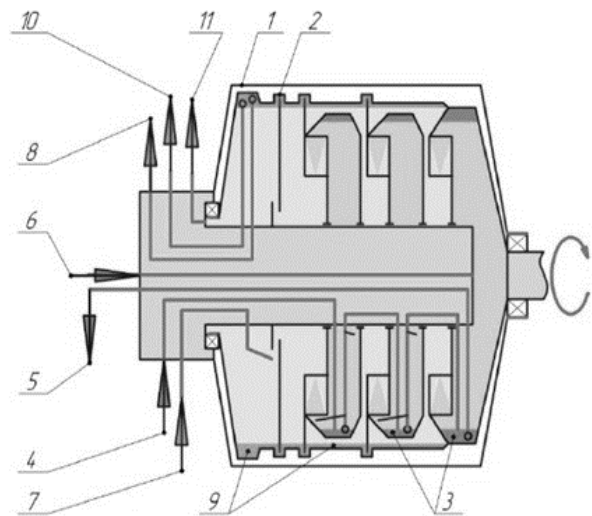


Рис. 3. Схема центробежного трёхступенчатого дистиллятора:

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – исходный раствор; 4 – вход исходного раствора; 5 – отводящий канал; 6 – подводящий канал; 7 – вход охлажденного конденсата; 8 – выход подогретого конденсата; 9 – конденсат; 10 – выход дистиллята-продукта; 11 – отвод неконденсирующихся газов

Преимуществами ЦВД являются:

1. Высокие коэффициенты теплопередачи (до 10^4 Вт/($m^2 \cdot K$)) обеспечивают небольшие разности температур на ступенях дистиллятора.

2. Способность достичь степени извлечения воды из раствора до 96% без отложений на поверхности теплообмена.

3. Лучшее чем у VCD качество дистиллята.

4. Отсутствие внешних насосов с отдельными приводами.

5. Отсутствие уплотнений с трением по твердой поверхности.

6. Саморегулирование уровней раствора и конденсата в полостях ротора дистиллятора.

На рис. 4 и рис. 5 представлено сравнение характеристик VCD [2] и ЦВД с 5 ступенями [14-16] при концентрировании урины с начальной

концентрацией растворенных веществ $C = 3,5 \dots 3,7 \%$ и конечной до $C = 40 \dots 50 \%$.

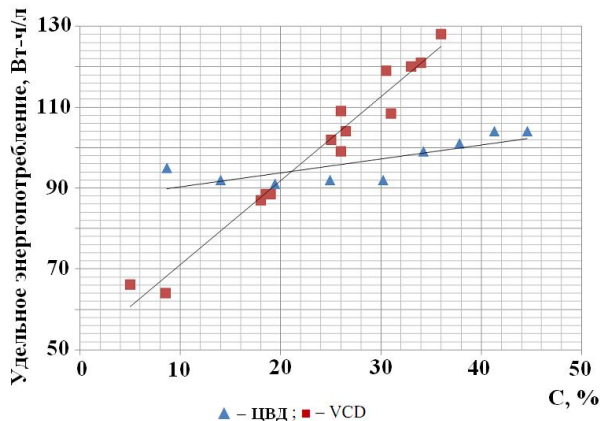


Рис. 4. Удельное потребление энергии дистилляторами в зависимости от концентрации солей в контуре

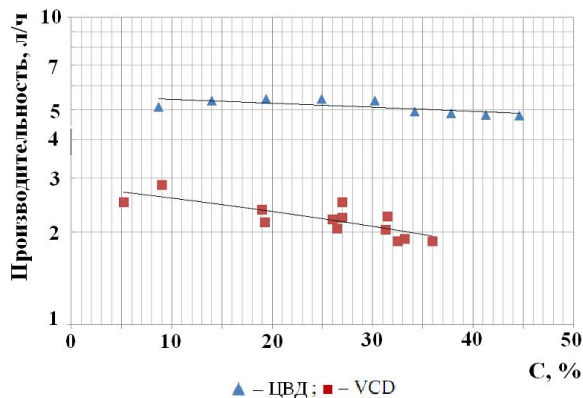


Рис.5. Производительность дистилляторов в зависимости от концентрации солей в контуре

Из представленных данных видно, что производительность VCD при увеличении концентрации раствора от 5 до 35 % падает почти в 1,3 раза (рис. 5), а удельный расход энергии возрастает вдвое с 65 до 130 Вт ч/л (рис.4).

В ЦВД рост концентрации мало влияет на производительность дистиллятора и повышает удельный расход энергии в пределах 5...7 %.

Объяснение этих данных заключается в следующем. В VCD с ростом концентрации и, соответственно, температурной депрессии возрастает степень сжатия компрессора, что естественно ведет к росту удельного энергопотребления системы.

В ЦВД общий перепад температур мало зависит от температурной депрессии. Кроме того, ТТН менее чувствительный к перепаду температур, чем механический компрессор.

В работе [13] описан стенд Honeywell и основные результаты испытания, разработанного и

изготовленного в Украине 5-ти ступенчатого дистиллятора. Наши результаты и результаты, представленные в работах [11, 17], хорошо согласуются.

В [15, 16] описаны результаты испытаний ЦВД на нескольких жидких растворах, которые могут концентрироваться (очищаться) в условиях космического полета.

В работах [19, 20] было отмечено, что эффективность ЦВД в большей степени зависит от коэффициента COP термоэлектрического теплового насоса. Были показаны результаты тестовых испытаний на стенде КПИ, где при одинаковых характеристиках, таких как мощность термоэлектрического теплового насоса $N_{ТТН}$, количество оборотов n , степень концентрирования раствора и температурный перепад $\Delta T_{in} = T_{in,h} - T_{in,c}$ ($T_{in,h}$ – температура жидкости из 1 ступени дистиллятора в ТТН по горячей стороне, $T_{in,c}$ – температура конденсата из последней ступени дистиллятора на входе в ТТН по холодной стороне). Этот перепад температур ΔT_{in} зависит от интенсивности теплообмена при конденсации и испарении на вращающихся поверхностях дистиллятора и от степени охлаждения конденсата ΔT_c в охладителе этого конденсата перед подачей в аппарат.

В тестовых испытаниях как у нас – изготовителей ЦВД, так и на стенде Honeywell и тем более в Центре НАСА не обращали внимания на контроль температуры конденсата на входе в последнюю ступень ЦВД. Этим объясняются различия в полученных данных по производительности и удельному энергопотреблению во многих тестах при одинаковых режимных параметрах: $N_{ТТН}$, n , перерабатываемая жидкость.

При увеличении ΔT_{in} существенно снижается COP термобатареи, а, следовательно, растет удельное энергопотребление. Нами была выполнена модернизация конденсатора дистиллятора, где происходит конденсация пара последней ступени испарения. Конденсатор разбит на две части: высокотемпературную и низкотемпературную. Высокотемпературная часть включена в холодный контур термобатареи, а низкотемпературный в дополнительный контур балансирующего теплообменника. Эта модернизация не требует никакой дополнительной системы регулирования. Это позволило устранить влияние температуры охлажденного конденсата на входе в дистиллятор на эффективность COP ТТН.

В [21] NASA обращает внимание на наиболее важные параметры (характеристики), по которым необходимо делать выбор лучшей системы для длительных космических полетов. Главным параметром при этом является надежность системы. Расход энергии, габариты и некоторые другие параметры системы при длительных экспедициях не имеют уже определяющего значения, в отличие от случая применения системы на МКС.

Связано это с тем, что при дальних полетах исключается возможность замены оборудования доставкой его с Земли. Поэтому система должна быть максимально надежной, а значит иметь как можно меньше конструктивных элементов, которые нельзя будет заменить в условиях космического полета.

Исходя из этих особых требований по надежности, появляются новые подходы к выбору перспективной системы регенерации воды. В связи с этим стоит задача модернизации существующих систем регенерации воды в направлении упрощения их конструкции с соответствующим повышением надежности. При этом необходимо предусматривать обеспечение возможности замены узлов системы с ограниченным ресурсом в условиях длительных космических миссий.

Заключение

В статье представлены технологии регенерации воды из отходов для космических систем жизнеобеспечения.

1. Наиболее перспективной технологией регенерации воды можно назвать ЦВД. Разработка этой уникальной технологии была проведена в Киевском политехническом институте в Украине.

2. С 2000 года Thermodistillation Co. разработала и изготовила три системы с пятью ступенями, которые позволили увеличить производительность ЦВД до 7 л/час и снизить удельное энергопотребление на 20-25%.

3. Сравнение технологических схем VCD и ЦВД, а также самих узлов дистилляции, показывает ряд преимуществ системы регенерации воды на базе ЦВД с термоэлектрическим тепловым насосом:

- отсутствие внешних насосов;
- отсутствие механического компрессора;
- меньшее влияние физико-химической температурной депрессии на эффективность ТТН по сравнению с механическим компрессором;
- более простая, а значит и более надежная, конструкция блока дистилляции.

Все это позволяет сделать вывод о перспективности системы на базе ЦВД с ТТН, особенно с учетом новых требований для дальних и длительных космических миссий с космонавтами на борту.

Литература

1. *Distillation Technology Down-selection for the Exploration Life Support (ELS) Water Recovery Systems Element [Text] / Jeff McQuillan, Karen D. Pickering, Molly Anderson, Layne Carter, Michael Flynn, Michael Callahan, Leticia Vega, Rama Allada and Jannivine Yeh // The 40th International Conference on Environmental Systems. – 2010. – P. AIAA 2010-6125.*
2. *Carter, D. L. VCD ELS Distillation Down-Select Test Final Report [Text] / D. L. Carter // Final Report, submitted to Online Project Information System (OPIS) for the Exploration Life Support Office. – 2009.*
3. *Development of Urine Processor Distillation Hardware for Space Stations [Text] / N. M. Samsonov, L. S. Bobe, V. Novikov, V. G. Rifert, P. A. Barabash et al. // SAE Paper 951605, the 25th International Conference on Environmental Systems. – 1995. – San Diego, July 1995.*
4. *Самсонов, Н. М. Система и вакуумный центробежный дистиллятор для регенерации воды из мочи на борту космического летательного аппарата [Текст] / Н. М. Самсонов, Л. С. Бобе, В. Новиков, В. Г. Риферт, П. А. Барабаш и др. // Патент РФ №2127627 от 21.07.1998.*
5. *Development of Urine Processor Distillation Hardware for Space Stations [Text] / N. M. Samsonov, L. S. Bobe, V. Novikov, V. G. Rifert, P. A. Barabash et al. // SAE Paper 951605, the 25th International Conference on Environmental Systems. – 1995. – San Diego, July 1995.*
6. *System and Rotary Vacuum Distiller for Water Recovery from Aqueous Solutions, Preferably from Urine Aboard Spacecraft [Text] / N. M. Samsonov, L. S. Bobe, V. G. Rifert, P. A. Barabash et al. // Patent of US #6,258,215 B1. Date of Patent: Jul. 10, 2001.*
7. *Performance Evaluation of a Three-Stage Vacuum Rotary Distillation Processor [Text] / A. Lubman, A. MacKnight, M. Reddig, S. L. Bobe, B. Y. Pinski, V. V. Rakov and M. Edeen // SAE Paper 00ICES-292, the 30th International conference Environmental Systems. – 2000. – Toulouse, France, July.*
8. *Apparatus and methods for water regeneration from waste [Text]: US Patent 7610768 / Alex M. Lubman, Allen K. MacKnight of Signal Hill, Calif, Volodimir G. Rifert, Ivan V. Zolotukhin, Vladimir I. Usenko, Petr A. Barabash and Aleksandr P. Strikun; November 4, 2009.*
9. *Rifert, V. Design Optimisation of Cascade Rotary Distiller with the Heat Pump for Water Reclamation from Urine [Text] / V. Rifert, V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight and A. Lubman // SAE*

Paper 2001-01-2248, the 31st International Conference on Environmental Systems. – 2001. – Orlando, July.

10. Samsonov, N. M. Rationale and Selection of a Distillation Subsystem for Water Reclamation from Urine [Text] / N.M Samsonov, L.S Bobe, V. Novikov, et al. // SAE Paper 981714, the 28th International Conference on Environmental Systems. – 1998. – Danvers, MA, July.

11. Rifert, V. G. Water Recovery System from Brines and Wastewater for Extreme Living Conditions of the Man [Text] / V. G. Rifert, A. M. Lubman, A. K. MacKnight et al. // IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. – 2001. – Manama, Bahrain, October 26 – 31.

12. Термоелектричний тепловий насос, як засіб підвищення ефективності системи очищення води для біологічних потреб при космічних польотах [Текст] / Л. І. Анатичук, П. А. Барабаш, В. Г. Ріферт та ін. // Термоелектрика. – 2013. – № 6. – С. 72-76.

13. Wastewater Processing Cascade Distillation Subsystem Design and Evaluation [Text] / A. MacKnight, V. Rifert, I. Zolotukhin et al. // SAE International. – 2006-01-2273.

14. Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing [Text] / A. Lubman, A. MacKnight, V. Rifert and P. Barabash // SAE International. – 2007-01-3177.

15. Cascade Distillation Subsystem Development Testing [Text] / M. Callahan, A. Lubman, A. MacKnight et al. // SAE International. – 2008-01-2195.

16. Callahan, M. Cascade Distillation Subsystem Development: Progress toward a Distillation Comparison Test [Text] / M. Callahan, A. Lubman and K. Pickering // SAE International. – 2009-01-2401.

17. Improvement of the distillation methods by using centrifugal forces for water recovery in space flight application [Text] / V. G. Rifert, V. G. Razumovskiy, A. P., Strikun et al. // ICES-2016-369. pp. 46th International Conference on Environmental Systems. – 10-14 July 2016. – Vienna, Austria

18. Callahan, M. Cascade Distillation Subsystem Development: Early Results from the Exploration Life Support Distillation Technology Comparison Test [Text] / M. Callahan, V. Patel and K. Pickering // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – 2010-6149, July 2010.

19. Improvement The Cascade Distillation System For Long-Term Space Flights [Text] / V. G. Rifert, P. A. Barabash, V. I. Usenko, A. S. Solomakha et al // 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25-29 September 2017. IAC-17-A1.IP.25

20. Cascade Distillation Subsystem – A water recovery system for deep space missions [Text] / V. Patel, Henry Au, S. Shull, M. J. Sargusingh, M. R. Callahan // 44th International Conference on Environmental Systems ICES-2014-12, 13-17 July 2014, Tucson, Arizona.

21. Sargusingh, M. J. Cascade Distillation System Design for Safety and Mission Assurance [Text] / M. J. Sargusingh // 45th International Conference on Environmental Systems ICES-2015-151. 12-16 July 2015, Bellevue, Washington.

References

1. McQuillan, Jeff., Pickering, Karen D., Anderson, Molly., 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. *The 40th International Conference on Environmental Systems*, 2010, pp. AIAA 2010-6125.

2. Carter, D. L. VCD ELS Distillation Down-Select Test Final Report. *Final Report, submitted to Online Project Information System (OPIS) for the Exploration Life Support Office*, 2009.

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*, 1995, San Diego, July 1995.

4. Samsonov, N. M., Bobe, L. S, Novikov, V., Rifert, V. G., Barabash, P. A, et al. *Sistema i vakuumnyj centrobezhyj distilljator dlja regeneracii vody iz mochi na bortu kosmicheskogo letatel'nogo apparata* [The system and Vacuum Centrifugal Distiller for Water Recovery from Urine Aboard of Spacecraft]. Patent of Russia Federation for invention, no. 2127627, 1998.

5. 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*, 1995, San Diego, July 1995.

6. Samsonov, N. M., Bobe, L. S, Rifert, V. G., Barabash, P. A, et al. System and Rotary Vacuum Distiller for Water Recovery from Aqueous Solutions, Preferably from Urine Aboard Spacecraft. Patent of US, no. 6,258,215 B1. Date of Patent: Jul. 10, 2001.

7. Lubman, A., MacKnight, A., Reddig, M., Bobe, S. L., Pinski, B. Y., Rakov, V. V. and Edeen, M. Performance Evaluation of a Three-Stage Vacuum Rotary Distillation Processor. *SAE Paper 00ICES-292, the 30th International conference Environmental Systems*, 2000, Toulouse, France, July.

8. Lubman, Alex M., MacKnight of Signal Hill Allen K., Calif, Rifert, Volodimir G., Zolotukhin, Ivan V., Usenko, Vladimir I., Barabash, Petr A. and Strikun, Aleksandr P. *Apparatus and methods for water regeneration from waste*. Patent US, no. 7610768, November 4, 2009.

9. Rifert, V., Usenko, V., Zolotukhin, I., MacKnight, A. Lubman, A. 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, 2001, Orlando, July.

10. Samsonov, N. M., Bobe, L. S., Novikov, V. et al. Rationale and Selection of a Distillation Subsystem for Water Reclamation from Urin. *SAE Paper 981714, the 28th International Conference on Environmental Systems*, 1998, Danvers, MA, July.

11. Rifert, V. G., Lubman, A. M., MacKnight, A. K. et al. Water Recovery System from Brines and Wastewater for Extreme Living Conditions of the Man. *IDA World Congress on Desalination and Water Reuse*, 2001, Manama, Bahrain, October 26 – 31.

12. Anatyshuk, L. I., Barabash, P. A., Rifert, V. G. et al. Termoelektrychnyy teplovyy nasos, yak zasib pidvyshchennya efektyvnosti systemy ochyshchennya vody dlya biolohichnykh potreb pry kosmichnykh pol'otakh [Thermoelectric heat pump as a means of improving efficiency of water purification systems on space missions]. *Journal of Thermoelectricity*, 2013, no. 6, pp. 72-76.

13. Lubman, A., MacKnight, A., Rifert, V., Zolotukhin, I. et al. Wastewater Processing Cascade Distillation Subsystem Design and Evaluation. *SAE International*, 2006-01-2273.

14. Lubman, A., MacKnight, A., Rifert, V., Barabash, P. Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing. *SAE International*, 2007-01-3177.

15. Callahan, M., Lubman, A., MacKnight, A. et al. Cascade Distillation Subsystem Development Testing. *SAE International*, 2008-01-2195.

16. Callahan, M., Lubman, A., Pickering, K. Cascade Distillation Subsystem Development: Progress toward a Distillation Comparison. *SAE International*, 2009-01-2401.

17. Rifert, V. G., Razumovskiy, V. G., Strikun, A. P. et al. Improvement of the distillation methods by using centrifugal forces for water recovery in space flight application. *ICES-2016-369. pp. 46th International Conference on Environmental Systems*, 10-14 July 2016, Vienna, Austria.

18. Callahan, M., Patel, V., Pickering, K. 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.

19. Rifert, V. G., Barabash, P. A., Usenko, V., Solomakha, A. S. et al. 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

20. Patel, V., Au, Henry., Shull, S., Sargusingh, M. J., Callahan, M. R. Cascade Distillation Subsystem – A water recovery system for deep space missions. *44th International Conference on Environmental Systems ICES-2014-12*, 13-17 July 2014, Tucson, Arizona.

21. Sargusingh, M. J. Cascade Distillation System Design for Safety and Mission Assurance. *45th International Conference on Environmental Systems ICES-2015-151*, 12-16 July 2015, Bellevue, Washington.

Поступила в редакцию 12.09.2018, рассмотрена на редколлегии 3.10.2018

ВІДЦЕНТРОВІ ДИСТИЛЯТОРИ В СИСТЕМАХ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІЛОТОВАНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

П. А. Барабаш, А. С. Соломаха, В. І. Усенко, В. Г. Петренко

Предметом вивчення в статті є системи регенерації води в умовах космічного польоту. **Метою** є вибір найбільш прийнятної способу забезпечення космонавтів питною водою, особливо в умовах далеких космічних місій. **Завдання:** аналіз відомих технологій очищення стічних вод і рідких продуктів життєдіяльності космонавтів, порівняння основних параметрів систем: продуктивності, питомого енергоспоживання і т.д. Основним **методом** дослідження є експериментальний, в результаті чого були отримані реальні показники роботи відцентрового вакуумного дистилятора в комплекті з термоелектричним тепловим насосом. Отримані наступні **результати**. На підставі аналізу відомих розробок встановлено, що відцентрова вакуумна дистиляція є найбільш перспективною технологією для регенерації води з рідких відходів в системах життєзабезпечення в космічних польотах. Головним у виборі кращої технології для далеких пілотованих космічних місій є максимальна надійність системи при мінімальній масі, габаритах і низькому енергоспоживанні. Проаналізовано відцентрові вакуумні дистилятори з трьома і п'ятьма ступенями і кілька варіантів схем рекуперації енергії на основі термоелектричного теплового насоса. Показані результати випробувань відцентрового вакуумного дистилятора на урині та сумішах стічних вод. Показано переваги розробленого дистилятора в порівнянні з аналогом, встановленим на Міжнародній космічній станції. **Висновки.** Порівняння технологічних схем VCD (США) і відцентрового вакуумного дистилятора (ЦВД), а також самих вузлів дистиляції показує ряд переваг системи регенерації води на базі ЦВД з термоелектричним тепловим насосом (ТТН): відсутність зовнішніх насосів, відсутність механічного компресора, менший вплив фізико-хімічної температурної депресії на ефективність ТТН в порівнянні з механічним компресором, більш проста, а значить і більш надійна, конструкція блоку дистиляції. Це дозволяє зробити висновок про перспективність цієї системи (особливо після її модернізації з урахуванням нових вимог) для далеких і тривалих космічних місій з космонавтами на борту.

Ключові слова: відцентрова вакуумна дистиляція; мікрогравітація; регенерація води; термоелектричний тепловий насос.

**CENTRIFUGAL DISTILLERS IN LIFE-SUPPORT SYSTEMS
OF PILOT-CONTROLLED SPACECRAFTS***P. A. Barabash, A. S. Solomakha, V. I. Usenko, V. G. Petrenko*

The **subject** of the article is studying water regeneration systems in space flight conditions. The **aim** is to select the most appropriate method for providing astronauts with drinking water, especially in conditions of deep space missions. The **tasks** to be solved are: analysis of known technologies for wastewater treatment and liquid products of astronauts' life, comparison of basic parameters of systems: productivity, specific energy consumption, etc. The main **method** of research is experimental, which help to obtain real performance indicators of the centrifugal vacuum distiller with a thermoelectric heat pump. The following **results** were obtained. Based on the analysis of known developments, it has been determined that centrifugal vacuum distillation is the most promising technology for the regeneration of water from the liquid waste in life support systems in space flight. The key factor in the choice of the best technology for pilot-controlled space missions is the maximum reliability of the system with minimal mass, dimensions, and low power consumption. The centrifugal vacuum distillers with three and five stages and several variants of energy recovery schemes based on the thermoelectric heat pump have been analyzed. The results of tests of a centrifugal vacuum distiller on urine and sewage mixtures are demonstrated. The advantages of the developed distiller in comparison with the analogue installed at the International Space Station are shown. **Conclusions.** The comparison of the technological schemes of the VCD (USA) and the centrifugal vacuum distiller (Ukraine), as well as the distillation units itself, demonstrates a lot of advantages of the water regeneration system based on the centrifugal vacuum distiller with the thermoelectric heat pump (THP): the absence of external pumps, the absence of a mechanical compressor, the lower influence of physical and chemical properties and temperature depression on the efficiency of the THP in comparison with the mechanical compressor, is more simple, and therefore more reliable, the design of the distillation unit. This allows us to conclude that this system is promising (especially after its modernization) for deep space missions with astronauts on board.

Key words: centrifugal vacuum distillation; microgravity; water recovery; thermoelectric heat pump.

Барабаш Петр Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: barabash_tef@ukr.net.

Соломаха Андрей Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: as_solomaha@ukr.net.

Усенко Владимир Иванович – канд. техн. наук, с.н.с. кафедры теоретической и промышленной теплотехники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: us_zena@ukr.net.

Петренко Валерий Георгиевич – канд. техн. наук, с.н.с. кафедры теоретической и промышленной теплотехники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина, e-mail: petrko@ukr.net.

Barabash Petr A. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Chair of Theoretical and Industrial Heat Engineering of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, e-mail: barabash_tef@ukr.net.

Solomakha Andrii S. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Chair of Theoretical and Industrial Heat Engineering of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, e-mail: as_solomaha@ukr.net.

Usenko V.I. – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer at the Chair of Theoretical and Industrial Heat Engineering of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, e-mail: us_zena@ukr.net.

Petrenko V.G. – Candidate of Technical Sciences, Senior Research Officer at the Chair of Theoretical and Industrial Heat Engineering of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine, e-mail: petrko@ukr.net.