

УДК 537.32

Ріферт В.Г., док. техн. наук¹
Анатичук Л.І., акад. НАН України^{2,3}
Соломаха А.С., канд. техн. наук¹
Барабаш П.О., канд. техн. наук¹
Усенко В.І., канд. техн. наук¹
Петренко В.Г., канд. техн. наук¹

¹НТУ «КПІ», вул. Політехнічна, 6, Київ, 03056, Україна; e-mail: vgrifert@ukr.net;

²Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна; e-mail: anatyuch@gmail.com

³Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58000, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ТЕРМІЧНОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ ДЛЯ ТРИВАЛИХ КОСМІЧНИХ МІСІЙ

У статті описані основні методи термічної дистиляції, які можна використовувати для довготривалих космічних місій з людьми. Показано їх переваги та недоліки, наведено основні відомості щодо характеристик роботи систем, а саме: продуктивності по дистиляту, питомої витрати енергії на одиницю маси одержуваного дистиляту і якості дистиляту при випарюванні (концентруванні) водного розчину NaCl, урини й сумішей – урини з конденсатом, урини з конденсатом і гігієнічною водою. Вказано на обмеження, що не дозволяють їх використовувати для польотів та можливі шляхи їх вирішення. Бібл. 36, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: термоелектрика, тепловий насос, дистилятор.

Вступ

Очищення стічних вод (рідких відходів життєдіяльності людини) критично важлива для успішного польоту людини на Місяць і Марс [1 – 2]. Серед усіх відомих систем регенерації стічних вод найбільш перспективним способом є термічна дистиляція [3 – 4].

Принцип роботи термічної дистиляції заснований на підводі теплоти до вихідного розчину, випаровуванні води з розчину і конденсації отриманої пари. Таким чином, в процесі термічної дистиляції присутні етапи підведення теплоти (випаровування) і відведення теплоти (конденсація), що дозволяє для підвищення ефективності системи використовувати тепловий насос. В умовах невагомості і відносно невеликих продуктивностей може ефективно працювати термоелектричний тепловий насос. Його очевидною перевагою є відсутність рухомих частин, простота і надійність конструкції.

На єдиному заселеному неземному об'єкті – Міжнародній космічній станції (МКС) – для регенерації стічних вод встановлено термічний вакуумний компресійний відцентровий дистилятор. Він працює з 2008 року і переробив понад 13 тон води. Це істотно зменшило витрати на її доставку (вартість доставки 1 кг вантажу на МКС становить близько 3000 доларів). Однак, як уже зазначено в

багатьох роботах, його конструкція не дозволяє гарантувати роботу в разі тривалих місій, а усунути цей недолік принципово неможливо [5].

В даній статті наведено короткий огляд і критичний аналіз термічних способів дистиляції для умов роботи в невагомості.

Статичний термоелектричний мембранний дистиллятор (TIMES)

Цей дистиллятор був розроблений у Hamilton Seastrand Space Systems International в 1970 роках [6 – 8].

Система використовує полімерну мембрану, яка вибірково пропускає воду з джерела стічних вод. В ідеальному випадку небажані розчинені і нерозчинені тверді речовини не проходять мембрану, і виходить якісний дистилат (рис. 1). Важлива особливість TIMES – загальна рециркуляція потоку вихідної речовини, яка в процесі роботи дистиллятора стає все більш і більш концентрованою. Споживання енергії мінімізується за рахунок використання твердотільних (нерухомих) теплових насосів (термоелектричних пристроїв).

Нагрітий в термоелектричному пристрої розчин забирається циркуляційним насосом і проходить через спеціальну мембрану, а отримана водяна пара конденсується на холодній стороні термоелектричного пристрою.

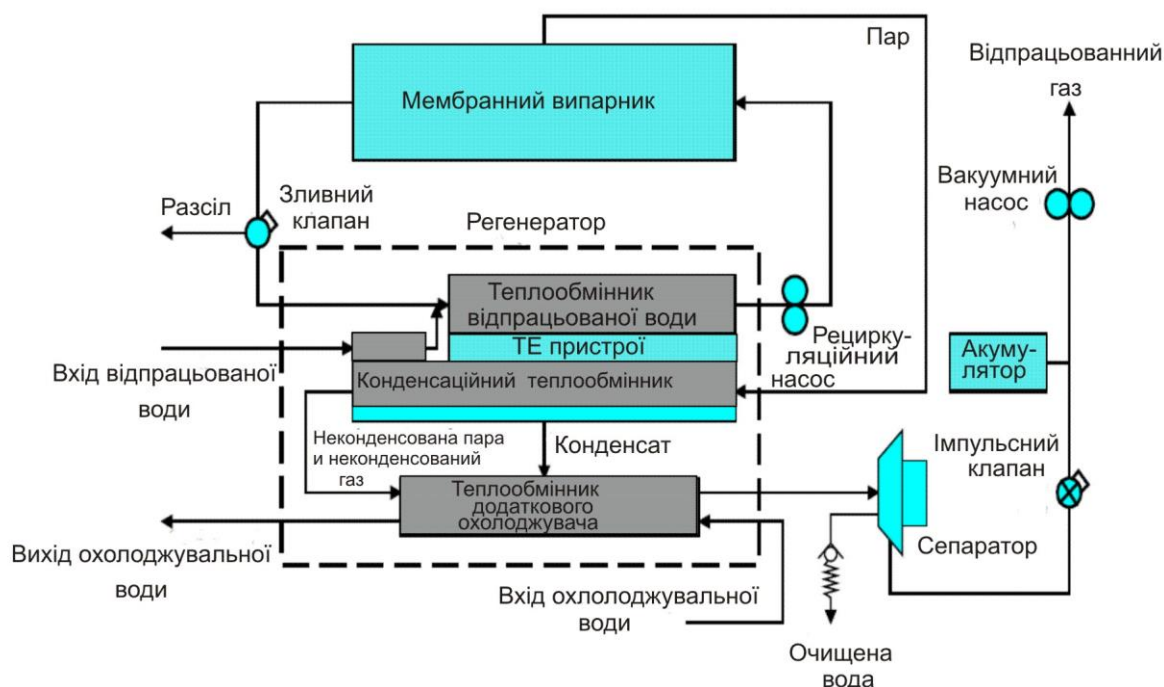


Рис. 1 Принципова схема TIMES

На основі відомих рівнянь і властивостей напівпровідників [7] була розроблена безрозмірна діаграма термоелектричних характеристик, яка показана на рис.2.

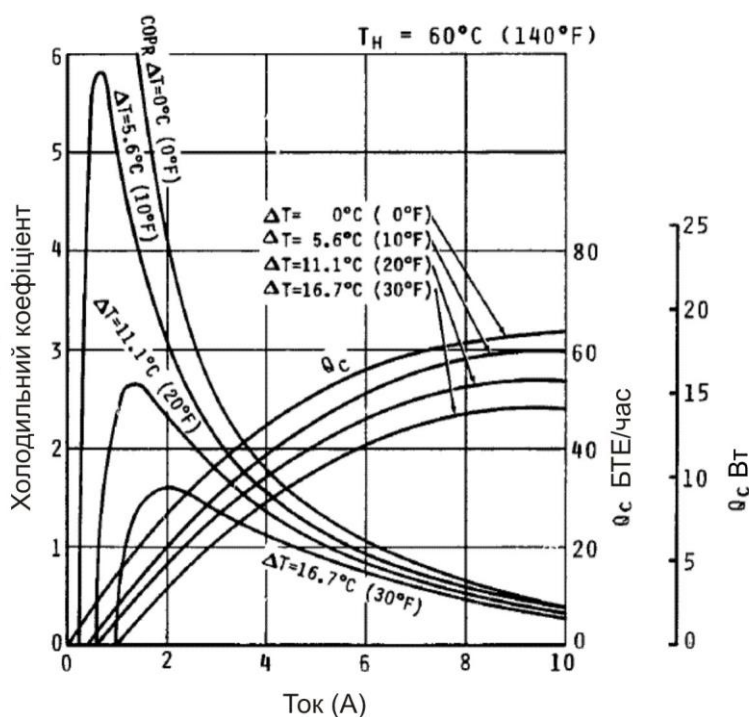


Рис. 2 Технічні характеристики термоелектричного пристрою

На термоелектричну ефективність (COP_R) впливає не тільки конструкція конденсатора, а й площа мембрани, швидкість рециркуляції урини, конструкція теплообмінника урини, термоелектричний струм і концентрація твердих речовин в стічних водах і т.д. В результаті при експериментальних випробуваннях з неконцентрованою уриною номінальний COP_R приблизно дорівнював 2.8. Основні характеристики розробленої системи показані на рис. 3.

Пізніше TIMES був модифікований [8] для усунення виявлених недоліків: площа мембрани була збільшена в 2.6 рази, термоелектрична теплообмінна площа була збільшена в 4.2 рази, а конденсатор був перероблений. Результатом такої модернізації системи стало збільшення продуктивності при роботі на неконцентрованій урині в 1.9 рази і збільшення термоелектричного COP_R до 3.1 в порівнянні з прогнозованим теоретично $COP_R = 5$. Аналіз системи показав, що конденсаційний теплообмінник є основною причиною цього зниження продуктивності. По-перше, проточна частина конденсатора неефективно відводила воду, що призводило до підтоплення теплообмінної поверхні, в результаті чого припинялося ефективне відведення теплоти в процесі конденсації. По-друге, блокування всіх каналів призводило до скупчення неконденсованих газів в конденсаторі. Це викликало підвищений тепловий опір процесу конденсації, що ще більше збільшило термоелектричну різницю температур ΔT . Зрештою, тиск в конденсаторі збільшувався до тих пір, поки, принаймні, через деякі з каналів не видувалася вода, і процес накопичення починався заново.

Все це призводило до дуже невисокої енергоефективності системи.

Були серйозні проблеми і з якістю одержуваної води. Були виявлені перетікання на стику мембран та їх колектору. Друге джерело забруднення полягає в тому, що розчинені тверді речовини всередині мембран транспортуються безпосередньо через стінки мембрани, коли мембрани вступають в контакт з водяним конденсатом продукту всередині випарника. Утворення конденсату в випарнику може відбуватися в процесі різних перехідних режимів роботи. Третьою причиною зниження якості води є утворення водорозчинних газів, які можуть проходити через мембрани.

Основним небажаним газом є аміак. Оскільки утворення аміаку залежить від температури, то зниження робочої температури TIMES має привести до поліпшення якості води. Однак це вимагає переходу на більш низький робочий тиск, а конструкція конденсаційних теплообмінників TIMES була чутливою до робочого тиску, стаючи менш ефективними при більш низькому тиску.

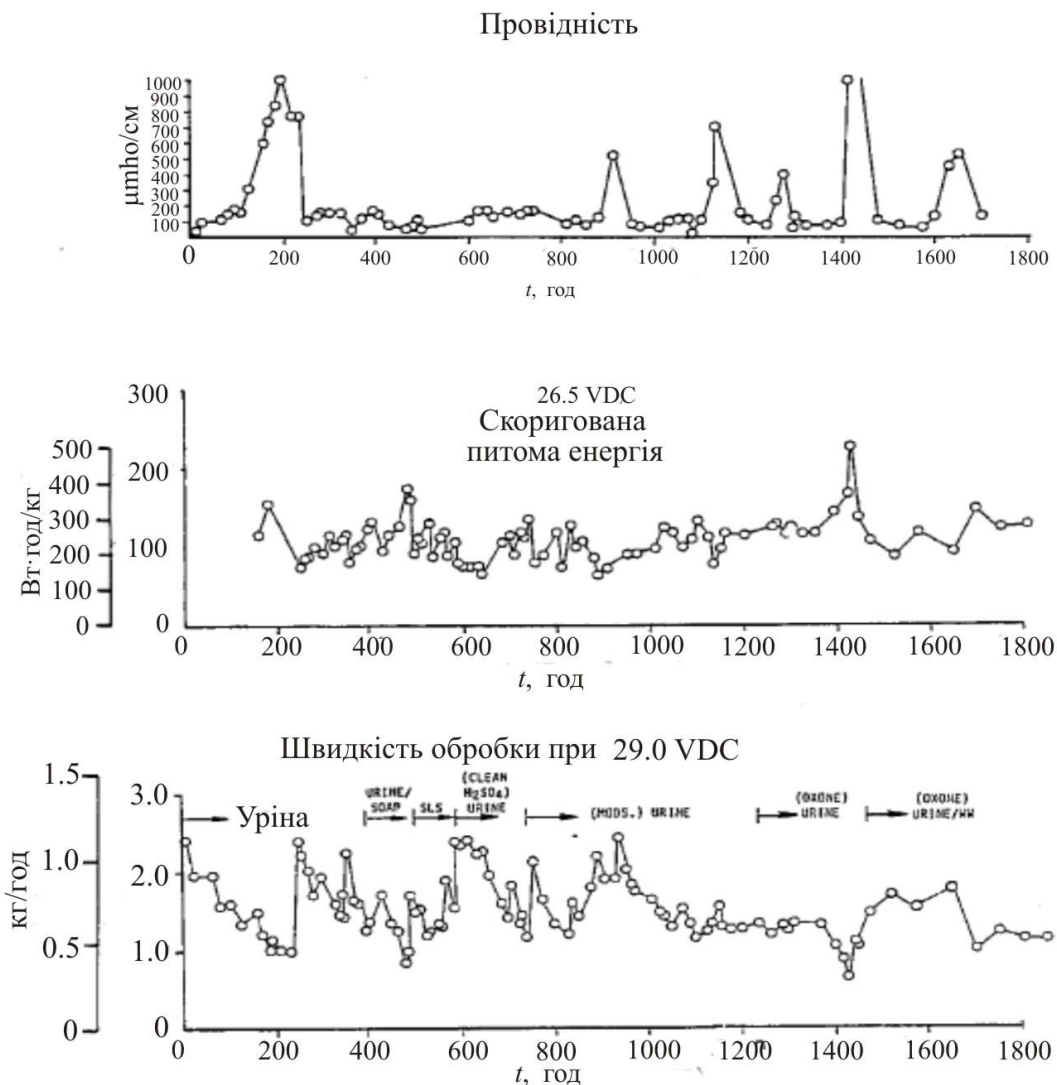


Рис. 3. Робочі параметри TIMES

Крім того, граничне концентрування рідини в системі TIMES обмежене через відкладення солей в порах мембранного випарника. Аналогічні процеси спостерігаються в мембранах зворотного осмосу при знесоленні солоних вод з концентрацією близькою до урини і рівнем вилучення води до 60 %.

Таким чином, незважаючи на цікаву ідею, система TIMES працювала нестабільно, особливо в плані енергоефективності та якості одержуваного дистилляту. Зазначені недоліки неможна було усунути без кардинальної зміни концепції всієї системи. В результаті на початку 1990-х років розробка системи TIMES практично припинилася, а для льотних випробувань для переробки урини на Міжнародній космічній станції була обрана конкуруюча технологія відцентрової термічної дистиляції VCD.

Відцентровий парокомпресійний дистиллятор (VCD)

Парокомпресійний відцентровий дистиллятор (VCD) був створений і виготовлений в 1962 році на замовлення NASA [9]. У 2008 році останній варіант VCD був встановлений на МКС, де продовжує працювати по теперішній час. За його допомогою на МКС було отримано понад 13 тон дистилляту [10].

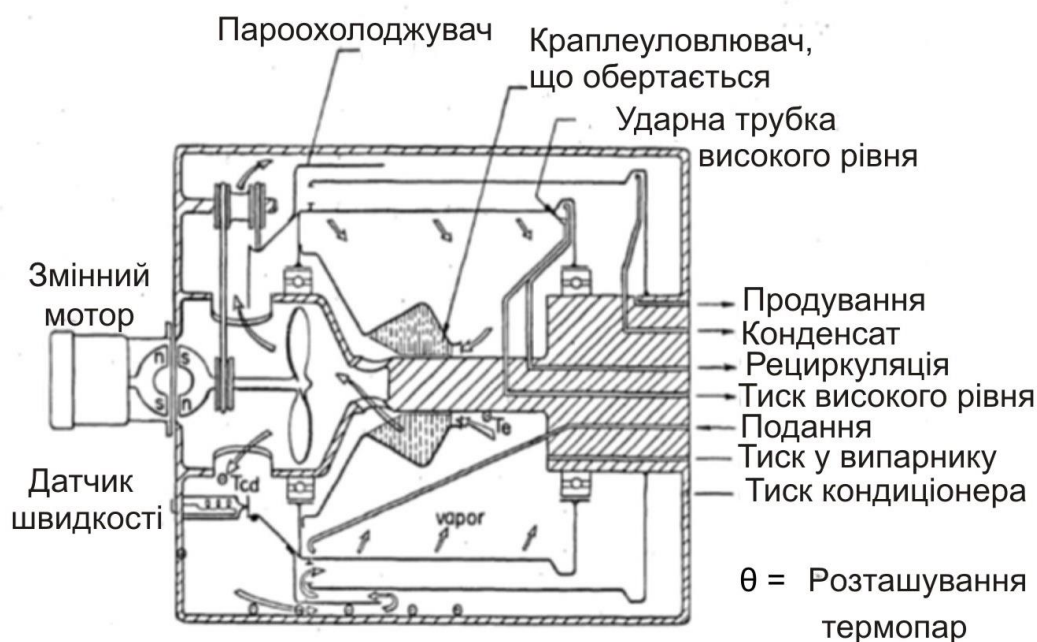


Рис. 4. Принципова схема VCD

На рис. 4 показаний блок дистиляції, який є основним робочим компонентом, навколо якого розроблений модуль VCD. Всередині дистиллятора є дві основні частини: центрифуга для поділу рідкої і газової фаз та компресор. Центрифуга складається з двох циліндрів: внутрішнього циліндра, по якому тече плівка рідини, що випаровується, і зовнішнього циліндра, призначеного для збору крапель води, сконденсованих на його поверхні. Компресор призначений для відводу пари, що утворюється при випаровуванні, підвищення температури і тиску та подачі її в конденсатор. Не вся рідина випаровується при проходженні через циліндр, що обертається; та частина, що залишилася, разом з твердими частинками, які були розчинені у воді, відводиться в кільцевий відстійник на протилежному кінці. Кінетична енергія рідини перетворюється в статичний тиск, який досить високий для подачі рідини до впускного отвору насоса без миттєвого випаровування. Так само вода, сконденсована на протилежному боці внутрішньої поверхні, збирається в обертовому кільцевому відстійнику, забирається стаціонарною трубкою і направляєється до впускного отвору відповідного насоса.

Компресор представляє собою двороторну машину з приводом від електродвигуна, зі швидкістю 3600 об/хв. Для полегшення доступу двигун розташований зовні дистиллятора. Синхронна магнітна муфта застосовується для передачі крутного моменту двигуна через границю камери на вхідний вал компресора без необхідності динамічного ущільнення вала. Центрифуга приводиться в рух валом компресора через систему ременів і шківів (швидкість обертання центрифуги 290 об/хв).

На вході в компресор встановлений обертовий демістер, щоб виключити попадання рідини з потоку пари. Продуктивність дистилятора по воді при роботі на урині становить близько 1.3 л/год.

Питома витрата енергії дистиляційної установки суттєво залежить від концентрації розчину (див. рис. 5).

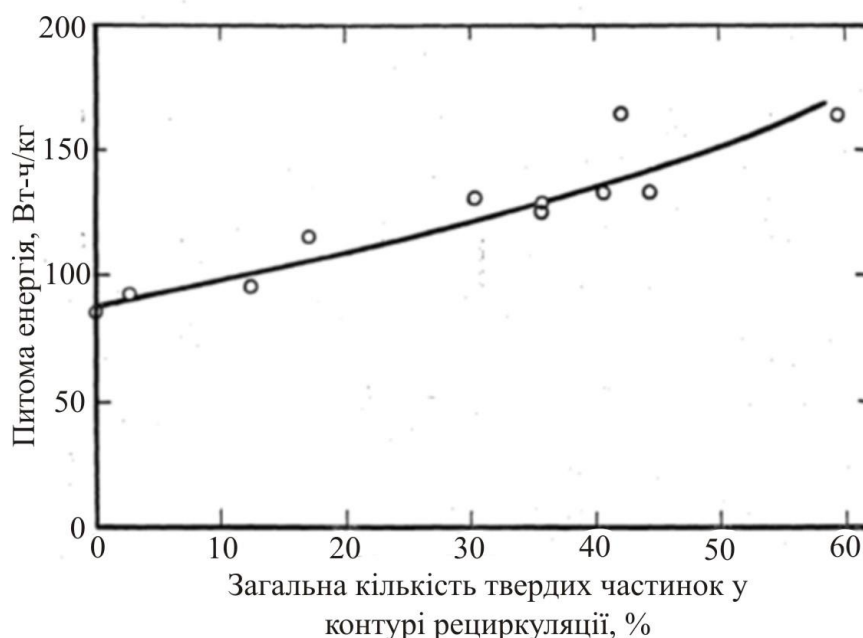


Рис. 5 Вплив концентрації в рециркуляційному контурі на питоме споживання енергії

До поставки на станцію було виготовлено понад 10 прототипів з докладною публікацією результатів випробувань цих дистиляторів [11]. Уже за результатами експлуатації на МКС наведені відомості про різні пошкодження в роботі, як механічні, так і проблем з якістю дистиляту. Щороку в доповідях на конференції із життєзабезпечення ICES повідомляється інформація про стан системи [10, 12 – 13].

На рис. 6 показаний графік сумарної продуктивності пароконпресійного дистилятора в період з 21.11.2008 по 21.11.2018 [10]. Середня продуктивність VCD була 4 ... 5 л/добу, і не перевищувала 1.8 л/год, ступінь вилучення води становив 75 %, і тільки після 2016 року його вдалося збільшити до 85 %. Основною причиною низької продуктивності є низький коефіцієнт теплопередачі, який не перевищує 800 Вт/м². Відбувається це через невисоку швидкості обертання центрифуги дистилятора. Також в роботі [9] зазначається, що у зв'язку з особливістю роботи компресора, на вхід в теплообмінник надходить перегріта пара. В результаті значна частина теплообмінної поверхні використовується для неефективного процесу охолодження перегрітої пари і тільки потім починається конденсація пари.

В результаті, незважаючи на успішний досвід експлуатації VCD на МКС в останніх публікаціях йдеться про неможливість використання цього дистилятора для тривалих космічних місій. Для повноцінної космічної подорожі у нього дуже низька продуктивність (менше 2 л/год), невисока ефективність (яка до того ж сильно залежить від розчину, що переробляється), в конструкції системи присутні неефективні перельстатичні насоси для перекачки рідких потоків, ступінь регенерації 85 % також недостатній для тривалих місій. І що дуже важливо, наявність складного парового компресора

в принципі не дозволяє гарантувати безперебійну роботу тривалий період часу, що критично важливо при тривалих космічних місіях. Зазначені недоліки неможливо усунути без повної перебудови конструкції дистиллятора.

Таким чином, існує необхідність розробки системи, яка б відповідала всім вимогам до тривалих польотів.



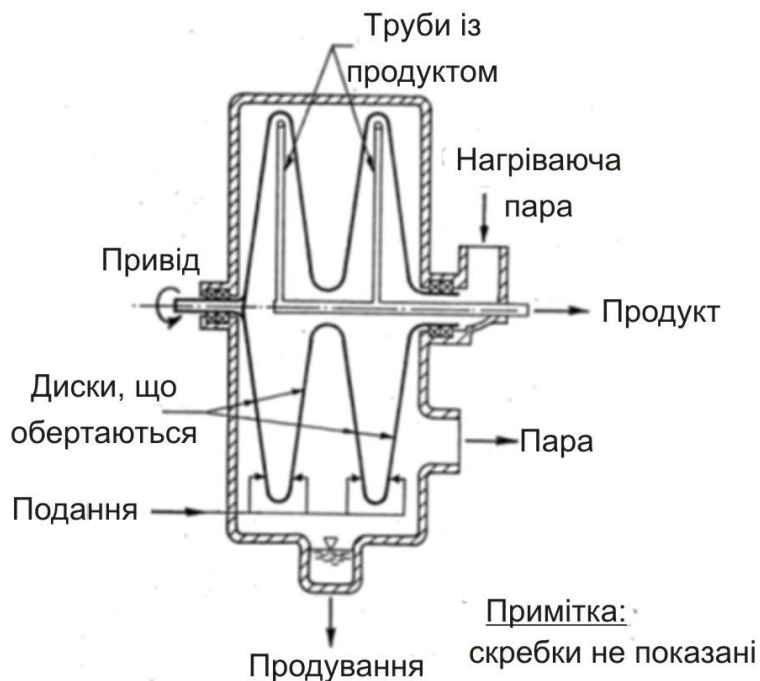
Рис. 6. Сумарна та річна кількість виробленого дистилляту на МКС за допомогою VCD

Відцентровий плівковий скребковий дистиллятор (WFRD)

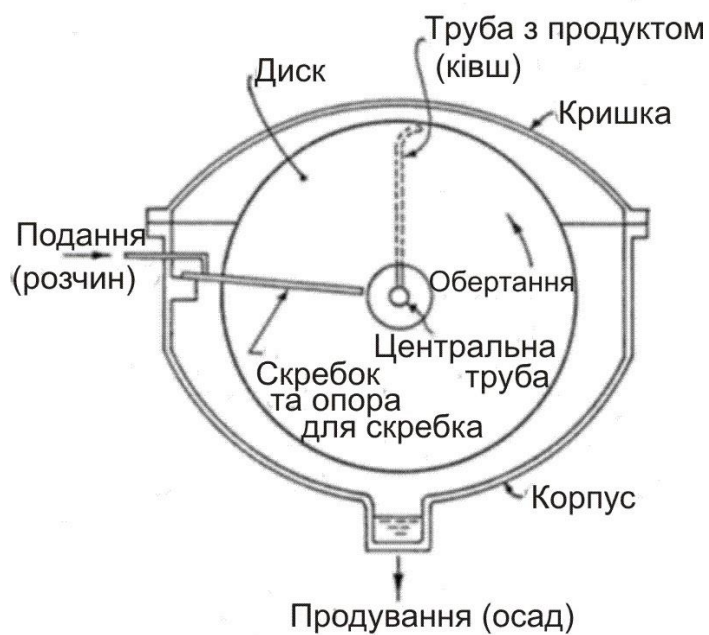
Відцентровий плівковий дисковий випарник був сконструйований і випробуваний в Центрі водних технологій Каліфорнійського університету в Берклі [14 – 16].

На рис. 7,а схематично показано поперечний переріз дистиллятора, а на рис. 7,б – схематичний розріз двох пар дисків. Ротор складається з дисків, з'єднаних разом на периферії з утворенням порожнин, які також пов'язані одна з одною по периферії внутрішніх отворів. Ротор встановлений на ступиці, яка закрита з одного кінця і відкрита з іншого. Пара вводиться через відкритий кінець і конденсується на внутрішніх поверхнях дисків, що обертаються. Конденсат, що утворюється на внутрішніх поверхнях дисків, викидається на периферію, де він надходить в стаціонарні трубки (черпаки) для продукту-дистилляту, які з'єднані з центральною трубкою. Ротор обертається по горизонтальній осі всередині камери, в яку водний розчин подається по довжині стаціонарних скребків (рис.7,б), і розподіляється у вигляді тонкої однорідної плівки на зовнішніх поверхнях обертових дисків без утворення сухих плям. Рідина, яка не випарувалася, скидається на периферію

дисків і виводиться з камери. Використання відцентрової сили і скребка призводить до зменшення товщини плівки дистиляту, що збільшує коефіцієнт тепловіддачі.



а)



б)

Рис. 7 Принципова схема відцентрового плівкового скребкового дистилятора (а) і розріз його випарної секції (б)

Система стабільно працювала при температурі випаровування 60 °С, плоскі диски були зроблені з міді товщиною 0.036 дюйма, коефіцієнт теплопередачі доходив до 60 кВт/м² при різниці температур від 0.1 до 3 °С.

Вихідний розчин проходив через фільтр патронного типу, регенеративний теплообмінник, дегазатор і потім подавався у випарник. Частина рідини випаровувалася з вихідного розчину, а залишок відкачувався з нижньої частини камери в регенеративний теплообмінник для охолодження. Утворена пара відводилася зовнішнім компресором, стискалася для підвищення тиску і температури насичення, а потім подавалася в порожнину для конденсації.

Недоліком запропонованого дистиллятора (як і для VCD) є наявність компресора і присутність в системі циркуляційних насосів. Крім того, не передбачено відведення продукту (конденсату) в умовах невагомості. За технічними характеристиками дистиллятор також поступався своїм конкурентам (див. порівняння нижче).

Термічні відцентрові дистиллятори з термоелектричними тепловими насосами, розроблені в Київському політехнічному інституті (КПІ)

З 1974 по 1993 рік вчені та інженери КПІ за завданням російської фірми, яка бере участь у виготовленні обладнання для космічних місій, розробляли і тестували кілька типів відцентрових дистилляторів з термоелектричними тепловими насосами для умов функціонування в космосі. Серед них:

- термоелектричний відцентровий дистиллятор, в якому теплообмінна обертова поверхня була також термоелектричним тепловим насосом [17];
- відцентровий багатоступінчастий дистиллятор, який працює в комплексі зі стаціонарною термоелектричною батареєю.

Багатоступінчастий відцентровий дистиллятор з тепловим насосом (CDS)

Система багатоступінчастої (каскадної) дистиляції в спрощеному вигляді показана на рис. 8 [18 – 22].

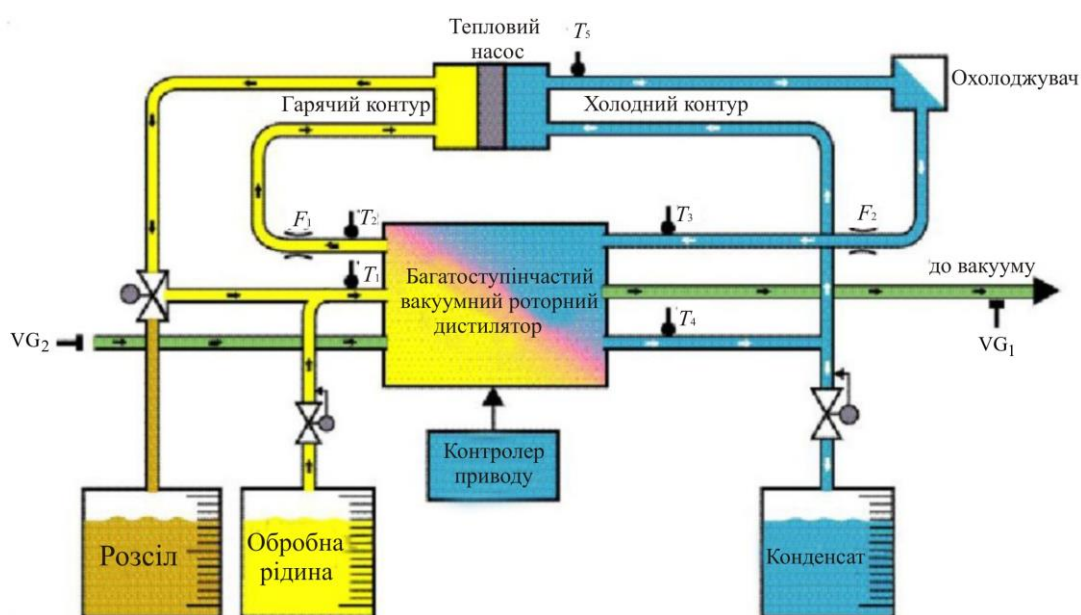


Рис. 8. Функціональна схема каскадної системи.

Система складається з двох основних компонентів: багатоступінчастого вакуумного відцентрового дистилятора і термоелектричного теплового насосу. Робоча рідина подається в багатоступінчастий вакуумний відцентровий дистилятор, де відбувається випаровування і конденсація води. Кілька ступенів працюють паралельно, щоб забезпечити високу продуктивність. Енергія для процесу надходить від теплового насоса, в якому дистиляційна вода охолоджується, а вихідна робоча рідина нагрівається. Обидва потоки циркулюють, відповідно, через холодний і гарячий контури теплового насоса і повертаються в дистилятор. Температура в гарячому контурі 35... 45 °С і в холодному від 20 до 25 °С. Подача і видалення рідин контролюються клапанами з регульованим тиском і не вимагають цифрового контролера. Робоча рідина утримується в робочому баку і подається в гарячий контур через клапан з регульованим тиском. Система працює під вакуумом, і коли в процесі випаровування об'єм гарячого контуру зменшується, тиск в ньому зменшується, і в дистилятор засмоктується додаткова вихідна рідина. Продукт або конденсат подається в резервуар для продукту через клапан з регульованим тиском. Резервуар для продукту також підтримується під вакуумом. Коли об'єм холодного контуру збільшується, тиск збільшується і клапан відкривається для відведення дистиляту (продукту).

Процес триває до тих пір, поки гарячий контур не заповниться концентрованим розсолем і температура випаровування не підвищиться. У цей момент тепловий насос вимикається, і тиск відновлюється до атмосферного. Зазвичай це відбувається, коли більше 90% води витягується з вихідного розчину і збирається в резервуарі для продукту. Потім розсіл відкачується з системи в резервуар для розсолу, і дистилятор вимикається.

Було виготовлено два варіанти дистилятора: з трьома і з п'ятьма ступенями.

На рис. 9 показана схема триступеневого дистилятора. Аналогічну конструкцію має і п'ятиступеневий апарат, основною відмінністю якого є лише кількість ступенів.

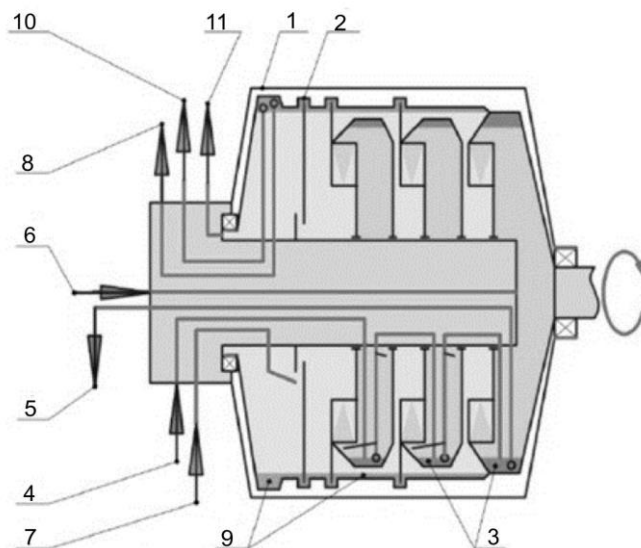


Рис. 9. Схема відцентрового триступінчастого дистилятора:

- 1 - корпус; 2 - ротор; 3 - вихідний розчин; 4 - вхід вихідного розчину; 5 - відвідний канал;*
- 6 - підвідний канал; 7 - вхід охолодженого конденсату;*
- 8 - вихід підігрітого конденсату; 9 - конденсат;*
- 10 - вихід дистиляту-продукту; 11 - відведення газів*

Дистилятор має герметичний корпус 1, в якому встановлений на підшипниках ротор 2. Обертання ротора забезпечується приводом через герметичну магнітну муфту. Ротор розділений перегородками на ряд ступенів дистиляції і кінцевий конденсатор. Технологічний (вихідний) розчин 3 подається по каналу 4, де він розподіляється по ступенях дистиляції. Розчин через канал 5 подається в нагрівач системи, з якого (в перегрітому стані) через канал 6 повертається в пристрій, де перегрів рідини знімається самозакипанням. Отримана пара використовується в якості гріючої в попередній ступені. Пара останньої ступені випаровування конденсується в кінцевому конденсаторі при контакті з дистилятом, охолодженим на холодній стороні теплового насосу та в додатковому теплообміннику. Охолоджений дистилят надходить в пристрій через канал 7, нагрівається і знову видаляється для охолодження вбудованим насосом через канал 8. Надлишок конденсату 9(дистилят, продукт) відводиться трубою Піто в резервуар для зберігання через канал 10. Вакуумування апарату здійснюється через канал 11.

Перевагами відцентрового дистилятора є:

1. Високі коефіцієнти теплопередачі (до 10^4 Вт/(м²·К)) забезпечують невеликі різниці температур на ступенях дистилятора.
2. Здатність досягти ступеня вилучення води з розчину до 96% без відкладень на поверхні теплообміну.
3. Краще ніж у відцентрового парокompресійного дистилятора (VCD) якість дистиляту.
4. Відсутність зовнішніх насосів з окремими приводами.
5. Відсутність ущільнень з тертям по твердій поверхні.
6. Саморегулювання рівнів розчину і конденсату в порожнинах ротора дистилятора.

В [23 – 32] було виконано велику кількість різних досліджень характеристик відцентрового триступінчатого та п'ятиступінчатого дистилятора при концентруванні різних типів стічних вод [33], моделювання дистилятора, питання надійності системи [34-36] та ін.

Порівняння характеристик розглянутих дистиляторів.

В [33] проведено порівняння характеристик трьох технологій відцентрової дистиляції: вакуумного компресійного дистилятора (VCD); відцентрового дистилятора з скребковим пристроєм Wiped-Film Rotating Disk (WFRD) і термічного відцентрового дистилятора з термоелектричним тепловим насосом (CDS).

В якості робочих рідин використовували два розчину [22], кількість було вибрано з розрахунку для 30-денної місії. Перший розчин 1, складався з попередньо обробленої урини і попередньо обробленого конденсату вологи. Другий розчин 2 включав попередньо очищені гігієнічні стічні води (від душу, миття рук, чищення зубів і вологого гоління), а також попередньо оброблену урину і попередньо оброблений конденсат вологи. Сумарні характеристики за результатами випробувань наведені в таблиці 1. Для розчину 1 ступінь вилучення води для всіх систем становив 93,5%, а для розчину 2 – 90%.

Дані в таблиці 1 показують, що кожна технологія добре зарекомендувала себе при виробництві якісного дистиляту. В цілому CDS був трохи краще з точки зору якості дистиляту, хоча всі системи ефективно видаляли більше 99% неорганічних компонентів і 98% органічних компонентів. Ця ефективність зводить до мінімуму необхідність подальшої обробки для виробництва питної води.

Оцінка експертів результатів випробувань: система VCD буде успішною з ймовірністю 84 % - 90 % і ризиком 3 %; система CDS буде успішною з ймовірністю 84 % - 87 % і ризиком 5 %; система WFRD буде успішною з ймовірністю 52 % - 61 % і ризиком 7 %.

Результати випробування

Дистилятор	CDS ¹		VCD ²		WFRD ³	
	1	2	1	2	1	2
Розчин						
Продуктивність (кг/год)	3.7	4.88	1.63	1.87	16.1	16.8
Питоме споживання енергії (Вт·час/кг)	109	110	188	163	85	86
Середня потужність (Вт)	375	485	279	296	1252	1293

1 – CDS: відцентровий вакуумний дистилятор з термоелектричним тепловим насосом (Україна)

2 – VCD: відцентровий вакуумний дистилятор з паровим компресором (США)

1 – WFRD: відцентровий дистилятор із скребковим пристроєм (США)

Дані для WFRD показали аномалію в тому, що концентрація забруднюючих речовин в дистиляті вище, ніж для CDS і VCD. Аналіз даних показує, що в WFRD потоки вихідної рідини і дистиляту частково змішувалися під час роботи.

Продуктивність CDS приблизно в два рази більше ніж у VCD, а WFRD приблизно в 10 разів більше, ніж VCD. Отже, хоча підведена енергія для WFRD і CDS вище, питома енергія менше, ніж для VCD. Значення для VCD також представлені для випадку, коли вимкнені нагрівачі, які використовуються для запобігання конденсації в корпусі дистилятора.

Висновки

На основі зробленого огляду можна стверджувати, що проблема забезпечення астронавтів водою при тривалих польотах ще дуже далека від вирішення. Встановлена на МКС система дистиляції VCD непридатна з точки зору надійності і стабільності роботи. TIMES і WFRD мають конструкцію, непридатну для умов роботи в невагомості. Система CDS показує найкращі результати як з точки зору енергоефективності, так і за якістю одержуваного дистиляту. Однак у неї ступінь вилучення води все ще недостатній.

Саме на збільшення надійності і ступеня вилучення води будуть спрямовані подальші дослідження для майбутніх систем регенерації стічних вод.

Література

1. M. B. Abney, J. L. Perry, G. B. Sanders. A Discussion of Integrated Life Support and In Situ Resource Utilization Architectures for Mars Surface Mission. 48th International Conference on Environmental Systems Albuquerque, New Mexico, 8-12 July 2018, ICES-2018-23
2. H. W. Jones Developing Reliable Life Support for Mars. 47th International Conference on Environmental Systems, 16-20 July 2017, Charleston, South Carolina. ICES-2017-84
3. 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.
4. 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.
5. Max B. Gorenssek, David Baer-Peckham. Space station water recovery trade study – Phase change technology. SAE paper 881015
 6. 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 1999-01-1990
 7. G. F. Dehner TIMES Regenerator Redesign Description Timothy D. Scull Hamilton Standard Space Systems International, Inc. Addendum development of a preprototype times wastewater recovery subsystem. Prepared under contract no. nas 9-15471, 1984
 8. 2000-01-2385 A New Membrane for the Thermoelectric Integrated Membrane Evaporative Subsystem (TIMES) Catherine Thibaud-Erkey and James H. Fort Hamilton Sundstrand Space Systems International Marybeth A. Edeen NASA-Johnson Space Center Water Recovery Technology," SAE Technical Paper 820849, 1982.
 9. Vapor compression distillation module (Contracts NAS9-13714 \$ NAS9-14234), Prepared by P. P. Nuccio, 1975
 10. L. Carter, J. Williamson, C. A. Brown, J. Bazley, D. Gazda, R. Schaezler, F. Thomas, S. Molina. Status of ISS Water Management and Recovery. 49th International Conference on Environmental Systems, 7-11 July 2019, Boston, Massachusetts. ICES-2019-36
 11. 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.
 12. L. Carter, J. Williamson, C.A. Brown, J. Bazley, D. Gazda, R. Schaezler, Frank Thomas. Status of ISS Water Management and Recovery. 48th International Conference on Environmental Systems. 8 - 12 July 2018, Albuquerque, New Mexico. ICES-2018-088.
 13. L. Carter, J. Williamson, C.A. Brown, J. Bazley, D. Gazda, R. Schaezler, Frank Thomas. Status of ISS Water Management and Recovery. 47th International Conference on Environmental Systems, 17 – 20 July 2017, Charleston, South Carolina. ICES-2016-036
 14. B. Tleimat. Wiped-Film Rotating Disc Evaporator for water Reuse. Grant No. 14-34-0001-0537. 1982
 15. B. Tleimat, M. Tleimat, G. Quinn, M. Flynn, F. Smith. The Development of the Wiped-Film Rotating-Disk Evaporator for the Reclamation of Water at Microgravity. SAE TECHNICAL PAPER SERIES. 2002-01-2397
 16. B.W. Tleimat, M.C. Tleimat. Water recovery from and volume reduction of gray water using an energy efficient evaporator. Desalination 107 (1996) 111-119
 17. Расчетно-пояснительная записка к эскизному проекту центробежного термоэлектрического дистиллятора, Киев, 1975 год. Доступ по ссылке: <https://drive.google.com/file/d/1Jab5d-FXBGdFRaofVGAFx77VcW9G5BLW/view?usp=sharing>. 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.
 18. 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.
 19. 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.
20. 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.
 21. A. Lubman, A. MacKnight, V. Rifert, and P. Barabash, "Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing". SAE International, 2007-01-3177, July 2007.
 22. 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.
 23. 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
 24. 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.
 25. 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.
 26. Rifert, V.G., Anatyshuk, 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.
 27. Vladimir G. Rifert, Petr A. Barabash, Vladimir Usenko, Andrii S. Solomakha, Lukyan I. Anatyshuk, 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.
 28. Vladimir G. Rifert, Lukyan I. Anatyshuk, 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.
 29. A.S.Solomakha, L.I.Anatyshuk, V.G.Rifert, P.A.Barabash, V.Usenko, V.Petrenko. Thermal distillation system for deep space missions: rationale for the choice. 71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12-14 October 2020. IAC-20- A1,VP,15,x61344. 7 pages.
 30. Rifert, V.G., Anatyshuk, L.I., Barabash, P.O., Solomakha A.S., Strykun A.P., Sereda, V.V., Prybyla, A.V. Evolution of centrifugal distillation system with a thermoelectric heat pump for space missions // Journal of Thermoelectricity. – 2019. – №3. – pp. 5 – 19.
 31. Rifert V.G., Anatyshuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Solomakha A.S., Petrenko V.G., Prybyla A.V., Sereda V.V. Comparative analysis of thermal distillation methods with heat pumps for long space flights // Journal of Thermoelectricity. – 2019. – №4. – pp.5 – 18.
 32. Jeff McQuillan, Karen D. Pickering, Molly Anderson, Layne Carter, Michael Flynn, Michael Callahan, Leticia Vega, Rama Allada and Jannivine Yeh, "Distillation Technology Downselection for the Exploration Life Support (ELS) Water Recovery Systems Element", the 40th International Conference on Environmental Systems, AIAA 2010-6125.
 33. M. Callahan, A. Lubman, A. MacKnight, H. Thomas and K. Pickering. "Cascade Distillation Subsystem Development Testing". SAE International, 2008-01-2195, July 2008.
 34. M. Callahan, A. Lubman, and K. Pickering, "Cascade Distillation Subsystem Development: Progress

- toward a Distillation Comparison Test”. SAE International, 2009-01 -2401, July 2009.
35. M. Callahan, V. Patel, and K. Pickering, “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.

Надійшла до редакції 10.02.2021

Риферт В.Г., *док. техн. наук*¹
Анатичук Л.І., *акад. НАН України*^{2,3}
Соломаха А.С., *канд. техн. наук*¹
Барабаш П.А., *канд. техн. наук*¹
Усенко В.І., *канд. техн. наук*¹
Петренко В.Г., *канд. техн. наук*¹

¹НТУ «КПІ», ул. Политехническая, 6, Киев, 03056, Украина, *e-mail: vgrifert@ukr.net;*

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

³Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, Черновцы, 58000, Украина

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ С ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЕПЛОВОЙ НАСОС ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

В статье описаны основные методы термической дистиляции, которые можно использовать для длительных космических миссий с людьми. Показано их преимущества и недостатки, приведены основные сведения о характеристиках работы систем, а именно: производительность по дистилляту, удельного расхода энергии на единицу массы получаемого дистиллята и качества дистиллята при испарении (концентрировании) водного раствора NaCl, урины и смесей - урины с конденсатом, урины с конденсатом и гигиенической водой. Указано на ограничения, не позволяющие их использовать для полетов и возможные пути их решения. Библиография. 36, табл. 1.

Ключевые слова: Термоэлектричество, тепловой насос, дистиллятор.

Rifert V.G., *doc. tech. Sciences*¹
Anatyuchuk L.I., *acad. of the National Academy
of Science of Ukraine*^{2,3}
Barabash P.O., *cand. of tech. Sciences*¹
Solomakha A.S. *cand. of tech. Sciences*¹
Usenko V.I., *cand. of tech. Sciences*¹
Petrenko V.G. *cand. of tech. Sciences*¹

¹NTUU “Ihor Sikorskyi KPI”, 6 Politekhnicheskaya 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: anatysh@gmail.com;

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

JUSTIFICATION OF THERMAL DISILLATION METHOD WITH A THERMOELECTRIC HEAT PUMP FOR LONG-TERM SPACE MISSIONS

This article describes the main methods of thermal distillation that can be used for long-term space missions with humans. Their advantages and disadvantages are shown, the basic information on the characteristics of the systems, namely: productivity of the distillate, specific energy consumption per unit mass of the distillate and the quality of the distillate by evaporation (concentration) of aqueous NaCl solution, urine and mixtures - urine with condensate, with condensate and hygienic water. Restrictions that do not allow them to be used for flights and possible ways to solve them are indicated.

Key words: thermoelectricity, heat pump, distiller.

References

1. Abney M. B., Perry J. L., Sanders G. B. (2018). A discussion of integrated life support and in situ resource utilization architectures for Mars surface mission. *48th International Conference on Environmental Systems Albuquerque, New Mexico, 8-12 July 2018, ICES-2018-23*
2. Jones H. W. (2017). Developing reliable life support for Mars. *47th International Conference on Environmental Systems, 16-20 July 2017, Charleston, South Carolina. ICES-2017-84*
3. McQuillan Jeff, Pickering Karen D., Anderson Molly, Carter Layne, Flynn Michael, Callahan Michael, Vega Leticia, Allada Rama and Yeh Jannivine (2010). Distillation technology down-selection for the exploration life support (ELS) water recovery systems element [Text]. *The 40th International Conference on Environmental Systems, 2010, AIAA 2010-6125.*
4. Carter D. L. (2009). VCD ELS distillation down-select test final report [Text]. *Final Report, submitted to Online Project Information System (OPIS) for the Exploration Life Support Office.*
5. Gorenshek Max B., Baer-Peckham David. Space station water recovery trade study – Phase change technology. *SAE paper 881015*
6. 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 1999-01-1990*
7. Dehner G.F. (1984). TIMES regenerator redesign description Timothy D. Scull Hamilton Standard Space Systems International, Inc. Addendum development of a preprototype times wastewater recovery subsystem. *Prepared under contract no. nas 9-15471.*
8. Thibaud-Erkey Catherine and Hamilton James H. Fort 2000-01-2385 A new membrane for the thermoelectric integrated membrane evaporative subsystem (TIMES) Edeen Marybeth A. (1982). Sundstrand space systems international NASA-Johnson Space Center Water Recovery Technology, *SAE Technical Paper 820849.*
9. Vapor compression distillation module (*Contracts NAS9-13714 \$ NAS9-14234*), Prepared by P. P. Nuccio, 1975

10. Carter L., Williamson J, Brown C.A., Bazley J., Gazda D., Schaezler R., Thomas F., Molina S. (2019). Status of ISS water management and recovery. *49th International Conference on Environmental Systems, 7-11 July 2019, Boston, Massachusetts. ICES-2019-36*
11. 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.*
12. Carter L., Williamson J., Brown C.A., Bazley J., Gazda D., Schaezler R., Thomas Frank.(2018). Status of ISS water management and recovery. *48th International Conference on Environmental Systems. 8 - 12 July 2018, Albuquerque, New Mexico. ICES-2018-088.*
13. Carter L., Williamson J., Brown C.A., Bazley J., Gazda D., Schaezler R., Thomas Frank (2017). Status of ISS water management and recovery. *47th International Conference on Environmental Systems, 17 – 20 July 2017, Charleston, South Carolina. ICES-2016-036*
14. Tleimat B. (1982). Wiped-film rotating disc evaporator for water reuse.
15. Tleimat B., Tleimat M., Grant No. 14-34-0001-0537.Quinn G., Flynn M., Smith F. (2002). The development of the wiped-film rotating-disk evaporator for the reclamation of water at microgravity. *SAE TECHNICAL PAPER SERIES. 2002-01-2397*
16. Tleimat B.W., Tleimat M.C. (1996). Water recovery from and volume reduction of gray water using an energy efficient evaporator. *Desalination, 107,111-119.*
17. Raschetno-poiashnitelnaia zapiska k eskiznomu proektu tsentrobezhnogo termoelektricheskogo distillatora [Calculation and explanatory note to the draft design of a centrifugal thermoelectric distiller], Kyiv, 1975. Access by link: <https://drive.google.com/file/d/1Jab5d-FXBGdFRaofVGAFx77VcW9G5BLW/view?usp=sharing>
18. 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.*
19. 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.*
20. Rifert V. G., Usenko V.I., Zolotukhin I.V., MacKnight A. and Lubman A. (2003). Cascaded distillation technology for water processing in space. *SAE Paper 2003-01-2625. 34st International Conference on Environmental Systems. Orlando, July 2003.*
21. 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.*
22. Samsonov N., Bobe L, Novikov V., Rifert V. and others (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.*
23. 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*
24. 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.*
25. 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.*
26. Rifert V.G., Anatyshuk 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.
 27. Rifert Vladimir G., Barabash Petr A., Usenko Vladimir, Solomakha Andrii S., Anatyshuk Lukyan I., Prybyla A.V. (2017). 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.
 28. Rifert Vladimir G., Anatyshuk 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,11,x54316.
 29. A.S.Solomakha, L.I.Anatyshuk, V.G.Rifert, P.A.Barabash, V.Usenko, V.Petrenko (2020). Thermal distillation system for deep space missions: rationale for the choice. *71st International Astronautical Congress (IAC) – The CyberSpace Edition, 12-14 October 2020.* IAC-20-A1,VP,15,x61344. 7 pages.
 30. Rifert, V.G., Anatyshuk, L.I., Barabash, P.O., Solomakha A.S., Strykun A.P., Sereda, V.V., Prybyla, A.V. (2019). Evolution of centrifugal distillation system with a thermoelectric heat pump for space missions. *J.Thermoelectricity*, 3, 5 – 19.
 31. Rifert V.G., Anatyshuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Solomakha A.S., Petrenko V.G., Prybyla A.V., Sereda V.V. (2019). Comparative analysis of thermal distillation methods with heat pumps for long space flights. *J.Thermoelectricity*, 4, 5 – 18.
 32. Jeff McQuillan, Karen D. Pickering, Molly Anderson, Layne Carter, Michael Flynn, Michael Callahan, Leticia Vega, Rama Allada and Jannivine Yeh (2010). Distillation technology downselection for the exploration life support (ELS) water recovery systems element. *40th International Conference on Environmental Systems, AIAA 2010-6125.*
 33. M. Callahan, A. Lubman, A. MacKnight, H. Thomas and K. Pickering (2008). Cascade distillation subsystem development testing. *SAE International*, 2008-01-2195.
 34. M. Callahan, A. Lubman, and K. Pickering (2009). Cascade distillation subsystem development: progress toward a distillation comparison test. *SAE International*, 2009-01 -2401.
 35. M. Callahan, V. Patel, and K. Pickering (2010). Cascade distillation subsystem development: early results from the exploration life support distillation technology comparison test. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2010-6149.

Submitted 10.02.2021