

Ріферт В.Г.<sup>1</sup>, Анатичук Л.І.<sup>2</sup>, Барабаш П.А.<sup>3</sup>, Усенко В.І.<sup>3</sup>,  
Стрикун А.П.<sup>1</sup>, Прибила А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Компанія «Термодистилляція», Київ, Україна;

<sup>2</sup>Інститут термоелектрики НАН і МОН України,  
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна;

<sup>3</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

## ПОКРАЩЕННЯ МЕТОДІВ ДИСТИЛЯЦІЇ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦІЇ ВОДИ ПІД ЧАС КОСМІЧНИХ ПОЛЬОТІВ

*Оцінка регенерації й чистоти відпрацьованої води належить до проблем, які необхідно розв'язати під час довгострокових польотів людини в космос. Найбільш перспективним методом одержання високоякісної води є імплементація вакуумної роторної дистиляції (VRD). Даний метод забезпечує високий ступінь концентрації залишку в порівнянні з іншими технологіями (зворотний осмос і випар на пористих мембранах). Також гарні результати відносно індексу споживання електроенергії дають методи багатокаскадної дистиляції (MVRD) і термоелектричного теплового насоса (ТНП). Даний звіт присвячений історії й еволюції розробки VRD та ТНП, починаючи із трьохкаскадного MVRD, розробленого й випробуваного в Київському політехнічному інституті (КПІ). В 1999 році компанія «Термодистилляція» (Україна) розробила 5-каскадний відцентровий дистилятор, який одержав назву каскадного дистилятора (CD). Приводиться аналіз результатів MVRD з 3 каскадами й CD; розглянуті роботи різних авторів, що вивчали характеристики CD. Представлені нові результати, що демонструють поліпшені характеристики MVRD з ТНП.*

**Ключові слова:** дистилятор, термоелектричний тепловий насос, гідравлічна схема.

*Validation of waste water recovery and purification takes its place among the problems to be solved in long-term human space missions. Implementation of vacuum rotary distillation (VRD) is the most promising method of getting high quality water. This method gives a high degree of residue concentration in comparison with other technologies (reverse osmosis and evaporation on porous membranes). The methods of multi-stage distillation (MVRD) and of thermal-electric heat pump (THP) give good results as to power consumption index as well. The report concerns the history and evolution of VRD and THP development starting from a 3-stage MVRD manufactured and tested in Kyiv Polytechnic Institute (KPI). In 1999 Thermodistillation Co., Ukraine, developed a 5-stage centrifugal distiller named cascade distiller (CD). The results of MVRD with 3 stages and CD are analyzed; the works of various authors who studied CDS characteristics are reviewed. New results demonstrating improved performance of MVRD with THP are represented.*

**Key words:** distiller, thermoelectric heat pump, hydraulic circuit.

## Вступ

Технологія роторних дистиляторів виникла в 1974 році в колишньому Радянському Союзі на кафедрі термічного опріснення КПП. Перші роботи були спрямовані на фундаментальні дослідження гідродинаміки рідких плівок і тепломасопереносу в умовах конденсації й випару на обертовій поверхні [1 – 7]. У співробітництві із НДІ Хіммаш (Москва, Росія) був розроблений і випробуваний ряд роторних дистиляторів [8 – 13]. Конструкції варіювалися від одноступінчастої до багатоступінчастої для забезпечення внутрішньої регенерації тепла. Дистилятори були об'єднані з обладнаннями регенерації тепла, які включали термоелектричні теплові насоси.

За період з 2000 по 2006 роки були створено три системи MVRD з 5-каскадним дистилятором CD. Вони пройшли випробування на стендах «Термодистиляції» і «Honeywell». В 2007 році один з CD був установлений на іспитовому стенді НАСА, і, починаючи з 2009 року до сьогоднішнього дня, було опубліковано близько 20 звітів і різних видів інформації, пов'язаних з CDS. Ці публікації головним чином стосувалися таких невід'ємних властивостей як питоме споживання енергії, продуктивність і якість очищеної води. Були початі спроби моделювання властивостей CDS.

У даній роботі звертається увага на характеристики CD і результати збільшення продуктивності й зменшення питомого споживання енергії без зміни конструкції CD.

## Історія й еволюція багатокаскадної вакуумної роторної дистиляції

Багатокаскадний роторний дистилятор був розроблений і виготовлений в 1988 році й включав три каскади. Схематичне зображення MVRD показано на рис. 1. Він складається з комплексного роторного вузла 20 на підшипниках 26, 27 і нерухомого вала 25, установленного в корпусі 24. Випар і конденсація відбуваються в роторі. Теплий розсіл проходить по сполучних патрубках 2 і 3, а охолоджений дистилят проходить по сполучних патрубках 22 і 23, установлених на нерухомому валу.

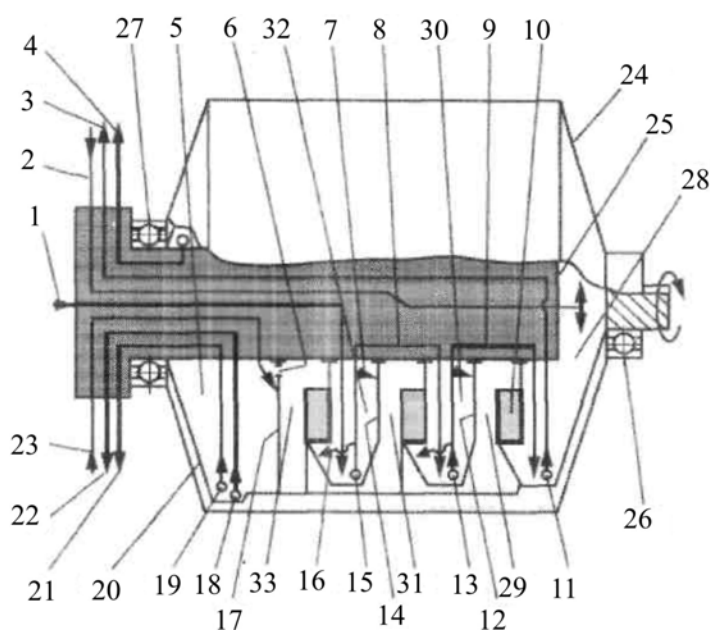


Рис. 1. Схема багатокаскадної системи вакуумної дистиляції (MVRD).

MVRD складається із трьох каскадів вакуумної дистиляції, послідовно з'єднаних з термоелектричним тепловим насосом для нагрівання й охолодження. Є три камери випару 28, 30 і 32 і три камери конденсації 29, 31 і 33. Камери розділені перегородками й роздільниками. Камери, що чергуються, випару й конденсації утворюють різні каскади. Перший каскад складається з камер 28 і 29, другий каскад – з камер 30 і 31, а третій каскад – з камер 32 і 33. Поверхні 12, 14 і 17, що розділяють каскади, служать теплопередавальними поверхнями. Саме тут відбувається рекуперация тепла за рахунок одночасного випару й конденсації на протилежних сторонах поверхонь. Така конструкція дозволяє здійснювати рекуперацию тепла шляхом послідовного розміщення каскадів вакуумної дистиляції, так що приховане тепло в результаті фазового перетворення може повторно застосовуватися кілька разів і є головною особливістю видатної продуктивності даної технології.

MVRD функціонує в такий спосіб. Перед початком роботи всі гази, що не конденсуються, видаляються через вакуумний отвір 4. Роторний приводний двигун підтримує постійну робочу швидкість. Теплий розсіл/урина від зовнішнього теплового насоса проходить через впускний патрубок 2 до камери випару першого каскаду 28. Під дією відцентрової сили рідина розтікається у вигляді тонкої плівки, рухаючись до периферії камери. Частина води в тонкій плівці, що рухається, випаровується в пару й проходить через вологоуловлювач до камери конденсації першого каскаду 29. У процесі випару розсіл проохолоджується. Більша частина рідкого розсолу переміщається до зовнішнього краю камери випару, де утворює рідкий шар на внутрішній стороні барабана камери й рухається зі швидкістю обертання. Нерухлива трубка Піто (насос) 11 відкачує розсіл до зовнішнього теплового насоса через впускний патрубок 3. Тепловий насос забезпечує процес тепловою енергією під час циркуляції розсолу. Пара від випарника першого каскаду конденсується на поверхні 12 відносно холодного випарника другого каскаду. Це, у свою чергу, викликає випар у випарнику другого каскаду 30. Отримана пара проходить через вологовідділювач до конденсатора другого каскаду 31. Вона конденсується на теплопередавальній поверхні 14 відносно холодного випарника третього каскаду 32. І знову, випар відбувається у випарнику третього каскаду частково за рахунок конденсації в сусідній камері. Отримана пара надходить у камеру конденсації третього каскаду 33 і конденсується на первинній поверхні, що конденсує, 17. Ця поверхня проохолоджується холодним дистилятом.

Конденсат, що утворювався в кожному з каскадів 29, 31 і 33, надходить до зовнішнього барабана за рахунок відцентрових сил. Виявившись на внутрішній стороні барабана, він протікає від одного каскаду до наступного, поки не збереться в кінцевій камері конденсації 5. Тут він прокачується трубою Піто 18 через впускний патрубок дистиляту 22 до холодної сторони теплового насоса. Пройшовши через коригувальний охолоджувач, охолоджений дистилят проходить через патрубок 23 і обприскує первинну поверхню, що конденсує, 17. При цьому тепловий насос забезпечує нагрівання й охолодження процесу з ефективністю, яка вимірюється його холодильним коефіцієнтом (COP). Коли об'єм дистиляту збільшується за рахунок конденсації, він видаляється за допомогою трубки Піто для дистиляту 19 і патрубка для дистиляту 21.

Коли об'єм розсолу в циркуляційному контурі зменшується за рахунок випару, свіжа урина надходить через вхідний патрубок 1 до випарника третього каскаду 32. Ця рідина проходить до периферії за рахунок відцентрових сил і утворює рідке кільце із внутрішньої сторони барабана камери. Вхідна урина частково випаровується й рідина проохолоджується. Отримана пара проходить через вологовідділювач до камери конденсатора 33. Коли об'єм

рідини збільшується, рідкий шар стає глибшим й накриває ропний насос третього каскаду Піто 15. Потім він перекачується до випарника другого каскаду 30 через канал 8 у нерухомому валу 25. Під час перекачування розсолу до наступного каскаду, частина рідини розпорошується на теплопередавальні поверхні в камері за допомогою форсунок 7 і 16. Це підсилює випар при нагріванні конденсату в сусідній камері. Цей процес повторюється у випарнику другого каскаду; розсіл, що надходить, утворює рідкий шар, який перекачується до першого каскаду через канал 9. У процесі перекачування відбувається його розпилення, випар і охолодження.

Унікальність технології багатокаскадної роторної дистиляції захищена патентами Росії [14], України [15] і США [16] і полягає в наступному:

- усі процеси, що відбуваються в MVRD (перенос тепла, відділення пари, ріст концентрації між каскадами, перекачування потоків рідини) забезпечуються відцентровими силами, що перевищують силу ваги в 100 і більше раз;
- тонкі плівки паруючої рідини й конденсату забезпечують високі коефіцієнти теплопередачі, низький тиск і перепади температури в каскадах і дистилляторі в цілому, що є актуальним для більш високої ефективності термоелектричного теплового насоса;
- специфіка конструкції каскадів під час відсутності сили ваги й обертання ротора запобігає самовільній міграції дистилляту й оброблюваної рідини в порожнині дистиллятора;
- випар у тонких плівках, що рухаються з високою швидкістю, запобігає формуванню відкладань на теплообмінних поверхнях; і знижує вимоги до попередньої обробки рідких відходів, що надходять у дистиллятор.
- у табл. 1 представлені результати випробування першої моделі багатокаскадного роторного дистиллятора, проведеного в компанії «Термодистиляція» в 1991, і випробування, спільно проведеного компанією «Alliedsignal» і НДІ Хіммаш (Москва, Росія) в 1999 [17].

*Таблиця 1*

*Результати випробувань 3-каскадного відцентрового дистиллятора*

Дослідник	Рідина	Швидкість обертання, оборотів/хв	Потужність ТТН, Вт	Продуктивність, кг/година	Питоме споживання потужності, Вт·год./кг	Регенерація, %
Компанія Термодистиляція, 1991	Вода	1500	297	2.80	132	
	Урина	1550	310	2.50	154	91
НДІ Хіммаш + компанія Alliedsignal, 1999	Урина	1400	293	2.56	144	88

На початку 2000 року компанія «Термодистиляція» розробила, виготовила й випробувала новий роторний каскадний дистиллятор [19 – 21]. Це обладнання складається з п'яти каскадів, що забезпечують значне поліпшення характеристик. Принцип його роботи

повністю збігається з описаним вище принципом роботи MVRD. Деякі конструктивні зміни дозволили збільшити теплообмінну поверхню кожного каскаду на 17 %. В 2009 був отриманий патент США [18], де принципово новою була тільки схема контуру оброблюваної рідини. У цьому випадку вихідна рідина направлялася до першого каскаду, а максимальна концентрація мала місце в останньому каскаді.

На рис. 2 представлена гідравлічна схема CD [22].

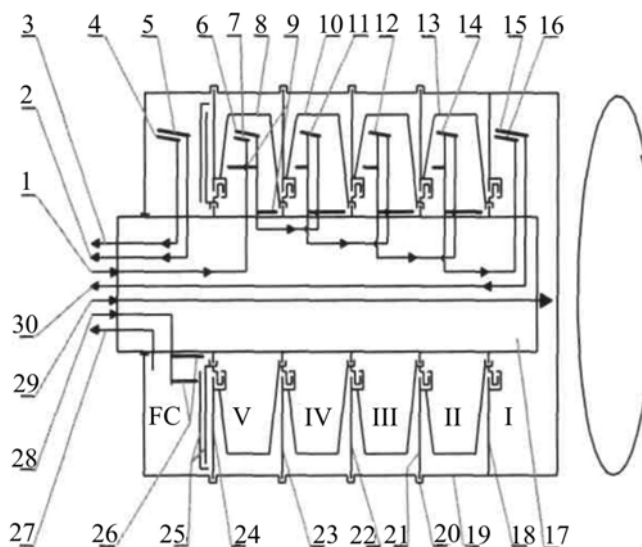


Рис. 2. Гідравлічна схема CD.

Основні компоненти дистиллятора наступні. Обертюва частина: ротор 19, розділений перегородками 18, 21 – 24 на п'ять каскадів (I – V) і кінцевий конденсатор (FC); поверхні теплообміну 8, 10, 13, 24, 25. Нерухома частина: вхід 17 з каналами для подачі й відводу рідини й пари; насоси Піто 4 – 7, 11, 12, 14 – 16, прикріплені до вала усередині кожного каскаду й кінцевого конденсатора.

Новий термоелектричний тепловий насос був також розроблений і виготовлений компанією «Алтек» (Чернівці, Україна). Компанія «Honeywell» спонсорувала й керувала розробкою CD і ТНР. Ці два пристрої були протестовані на іспитових майданчиках «Термодистиляції» у Києві за участю персоналу «Honeywell» з метою оцінки якості регенерації води.

Тепловим насосом служить термоелектрична батарея Алтек-7001, що використовує ефекти Пельтьє й Джоуля [22, 23]. Вона забезпечує відведення тепла від одного об'єкта й передачу цього тепла разом з теплом Джоуля іншому. У батарею Алтек-7001 входять спеціальні рідинні теплообмінники, термоелектричні модулі й рідинні колектори, що формують рух рідин по теплообмінниках. Теплообмінники задовольняють високим технічним вимогам: вони повинні мати низький термічний опір і, з іншого боку, повинні бути виготовлені з матеріалів, стійких до впливу агресивних рідин. Такі матеріали звичайно мають підвищений термічний опір.

Оптимізація конструкції теплообмінників проводилася комп'ютерним моделюванням. У результаті отримані конструкції теплообмінників, що складаються із титанових трубок, охоплених алюмінієвими концентраторами тепла. Для забезпечення турбулентного режиму руху рідини в титанові трубки вмонтовані спіральні титанові вставки. До термоелектричних модулів пред'являються підвищені вимоги, особливо по надійності. З метою підвищення

ресурсу теплового насоса елементи модулів включені в паралельно-послідовні ланцюги, що підвищують MTBF у сотні раз.

На рис. 3 представлена типова схема ККД термобатарей як функції електричного навантаження й різниці температур рідини на вході в термобатарей.

ККД або коефіцієнт нагрівання був розрахований як відношення виходу теплового потоку з нагрівальної порожнини термобатарей до вхідної електричної потужності:

$$Q_h / N_{ip} = G_h c_h (T_{hout} - T_{hin}) / (IU),$$

де:  $G_h$  – масова витрата рідини в «гарячому» контурі, кг/год;  $c_h$  – теплоємність рідини в «гарячому» контурі, Дж/ кг·град;  $T_{hout}$  – температура рідини в «гарячому» контурі на виході з нагрівальної порожнини термобатарей, град;  $T_{hin}$  – температура рідини в «гарячому» контурі на вході в нагрівальну порожнину термобатарей, град;  $I, U$  – електричний струм і напруга живлення термобатарей, відповідно.

З рис. 3 випливає, що зі збільшенням різниці температур  $\Delta T_{in} = T_{hout} - T_{hin}$  і збільшенням електричного навантаження ефективність зменшується. Тобто, збільшення кожного із цих  $j$  факторів приводить до росту різниці температур на спаях термоелемента й погіршенню їх характеристик.

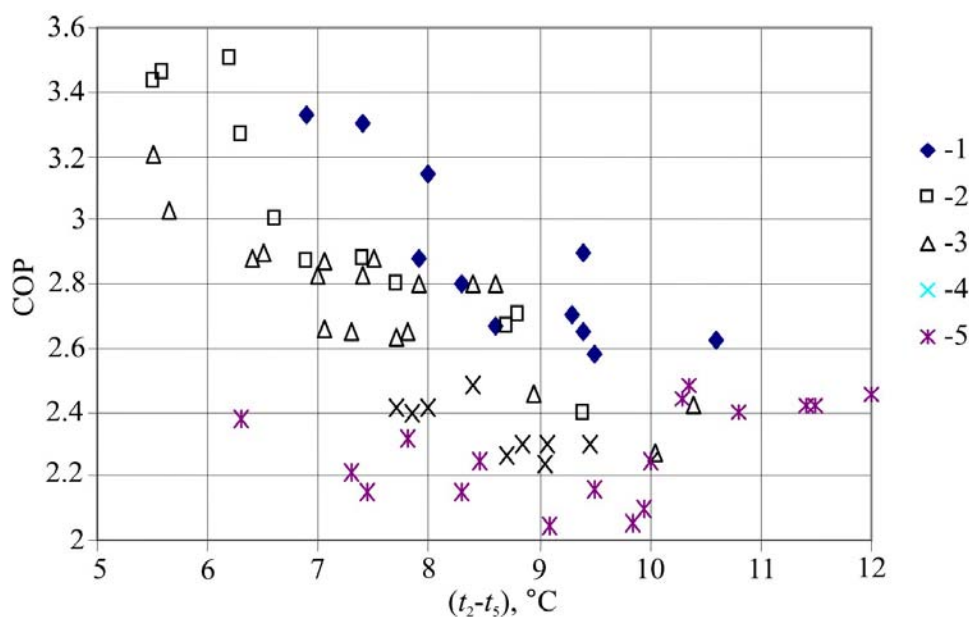


Рис. 3. Вплив електричного навантаження й різниці температур потоків рідини на вході в термобатарей на ефективність термобатарей:  
 NTHP, Вт: 1 – 100; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400.

Система каскадної дистиляції в спрощеному вигляді показана на рис. 4. Система складається із двох основних компонентів: багатокаскадного вакуумного роторного дистилятора й термоелектричного теплового насоса. Вихідна рідина, наприклад, збережена урина, подається в багатокаскадний вакуумний роторний дистилятор (каскадний дистилятор),

де відбувається випар і конденсація води. Множинні каскади працюють паралельно, забезпечуючи високу швидкість виробництва води. Енергія для цього процесу надходить від теплового насоса, де водний дистилат проохолоджується, а технологічна рідина нагрівається. Обидва потоки прокачуються за допомогою CD у контурах до теплового насоса й повертаються до CD. Температури процесу становлять  $35^{\circ}\text{C}$  -  $45^{\circ}\text{C}$  для гарячого контуру й  $20^{\circ}\text{C}$  -  $25^{\circ}\text{C}$  для холодного. Інші компоненти системи використовуються для збереження й контролю рідин, використовуваних у процесі. Подача й відведення рідин контролюються за допомогою клапанів, керованих тиском, і цифрового контролю не вимагають. Вихідна рідина зберігається в збірнику дистилатів і подається в гарячий контур за допомогою клапана, керованого тиском. Система працює у вакуумі, і коли об'єм гарячого контуру зменшується за рахунок дистиляції, тиск у ньому знижується й більше вихідної рідини всмоктується в CD. Очищена вода або конденсат надходить у бак для збору очищеної води за допомогою клапана, керованого тиском, який працює у зворотному напрямку. У цьому випадку бак для збору очищеної води також утримується при вакуумному тиску системи. Коли об'єм холодного контуру збільшується за рахунок дистиляції, тиск у ньому зростає й клапан відкривається для подачі очищеної води.

Даний процес здійснюється циклами для досягнення максимальної регенерації води з вихідної рідини. CD дистилує очищену воду з гарячого контуру, спустошуючи об'єм гарячого контуру. Вихідна рідина додається в гарячий контур для підтримки в ньому постійного об'єму. Цей процес триває доти, поки гарячий контур не буде заповнений концентрованим розсолем, а температура дистиляції підвищиться. У цей момент тепловий насос відключається, а тиск відновлюється до атмосферного. Це звичайно відбувається, коли понад 90% вихідної води дистилується й збирається в баку для збору очищеної води. Потім відбувається перекачування розсолу із системи в бак для розсолу й CD відключається. Типовий цикл включає обробку 10 літрів вихідної води, одержання 9 літрів очищеної води й один літр розсолу.

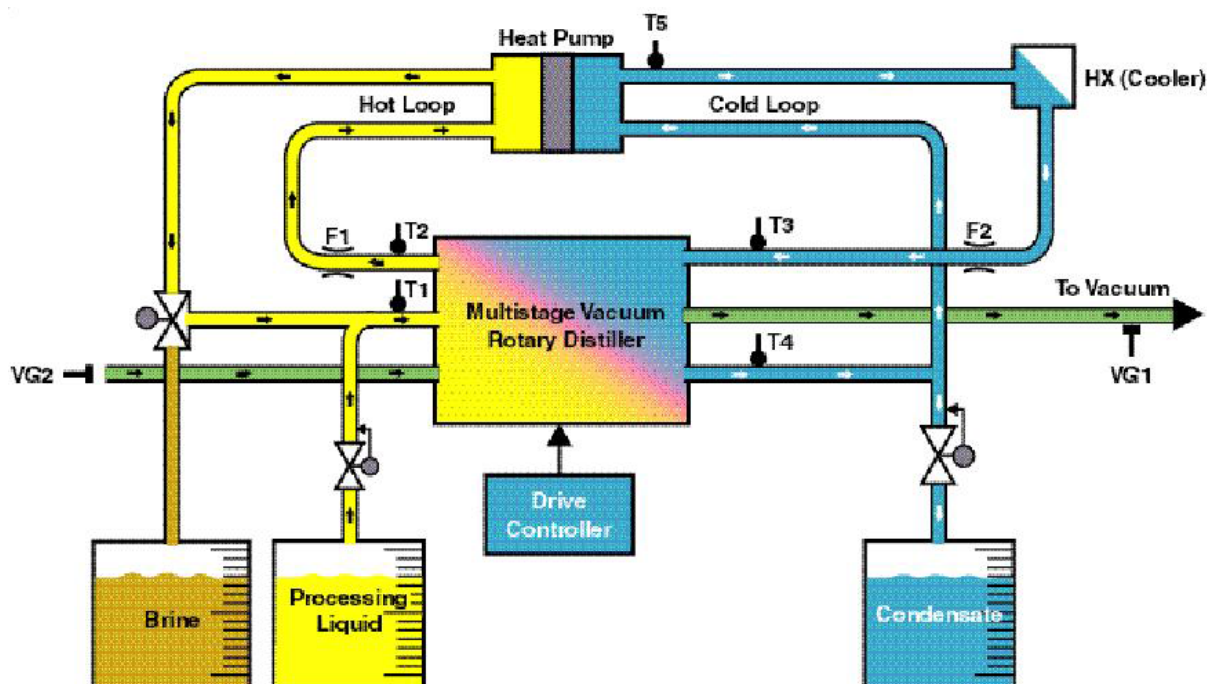


Рис. 4. Функціональна схема каскадної підсистеми

У роботі [27] описаний іспитовий стенд, створений в «Honeywell» для механізму розробки вдосконалених систем регенерації води JSC (космічний центр Джонсона).

В 2007 «Honeywell» поставила в НАСА системи з CD і TNP, розроблені ТОВ «Термодистиляція РВ». З 10.10.2007 по 02.08.2008 співробітники «Honeywell» проводили випробування CDS з декількома рідинами [26, 27]. У табл. 2 наведені усереднені дані по опрісненню семи різних рідин.

*Таблиця 2*

*Резюме термодинамічних характеристик – перевірочні випробування розчинів*

Тип розчину	Партія (кг)	Швидкість виробництва (кг/година)	Регенерація %	Питоме енергоспоживання (Вт*год/кг)
Деіонізована вода	6.10	4.53	91.3	93.2
Transit Ersatz	6.37	4.50	77.6	89.3
EPB, Ersatz	6.11	4.53	75.5	88.5
MSFC, істинний	6.21	4.27	75.9	94.1
Попередньо оброблена урина (UP)	9.11	4.10	84.4	99.9
TME (триметиолетан)	9.53	3.93	84.5	103.7
UP+вуглеводень	6.5	4.40	80.0	93.9

В 2009 році проведена оцінка трьох конкуруючих технологій для застосування в системі замкнутого циклу, включаючи парокompресійну дистиляцію (VCD), CDS і плівковий обертовий диск (WFRD).

Ці три технології дистиляції пройшли порівняльні випробування у двох центрах НАСА: у Центрі космічних польотів імені Маршалла (MSFC) випробовували WFRD і VCD, а в Космічному центрі імені Джонсона (JSC) випробовували CDS відповідно до детальних вимог випробувань. Випробування полягало в обробці двох різних потоків відходів за допомогою кожної з технологій протягом періоду, еквівалентного 30 дням польоту. Випробування проводилося з метою збору достатньої кількості даних про продуктивність для адекватного порівняння трьох технологій. Перший потік відходів, розчин 1, складався з попередньо обробленої урини й попередньо обробленого конденсату вологи. Другий потік відходів, розчин 2, включав попередньо оброблені гігієнічні стічні води (після душу, миття рук, чищення зубів і вологого гоління) плюс попередньо оброблена урина й попередньо оброблений конденсат вологи. Дані про якість отриманої води після опріснення цих двох розчинів виявили більш високу якість CDS по всіх параметрах. У таблицях 3 і 4 наведені дані по чотирьох параметрах



питомого енергоспоживання для трьох випробуваних систем [28].

*Таблиця 3*

*Резюме аналітичних даних по розчину № 1 (усі одиниці наведені в мг/л,  
якщо не зазначене інше)*

Пара-метр	CDS			VCD			WFRD		
	Вихідна рідина	Дисти-лят	Розсіл	Вихідна рідина	Дисти-лят	Розсіл	Вихідна рідина	Дисти-лят	Розсіл
ТОС (загальний органічний вуглець)	9.28	0.04	146.23	10.47	0.08	84	9.7	0.1	81
Провідність (мС/см)	1586	18	25064	1417	24.5	21260	1428	25.5	21520
ТІС (токсичний промисловий хімікат)	<0.5	<0.5	<0.5	11.8	4.76	4.4	11.7	<0.5	5.8
Аміак	79	<0.5	1048	175	0.5	2392	65.3	1.5	169

*Таблиця 4*

*Резюме аналітичних даних по розчину № 2 (усі одиниці наведені в мг/л,  
якщо не зазначене інше)*

Пара-метр	CDS			VCD			WFRD		
	Вихідна рідина	Дисти-лят	Розсіл	Вихідна рідина	Дисти-лят	Розсіл	Вихідна рідина	Дисти-лят	Розсіл
ТОС (загальний органічний вуглець)	5.33	0.03	54.9	5.56	0.05	38.7	8.7	0.11	29.7
Провідність (мС/см)	817	9.03	8350	649	15.3	6852	1348	18.2	3250
ТІС (токсичний промисловий хімікат)	<0.5	<0.5	<0.5	7.9	5.64	9.3	13.3	<0.5	10.4
Аміак	24.7	<0.5	265.8	51	0.6	263	9.3	<0.5	178.5

У табл. 5 і 6 наведені дані по питомому енергоспоживанню для трьох випробуваних систем.

Слід зазначити, що WFRD, як показано в [28], не підходить для роботи в умовах невагомості, оскільки спуск розсолу в цьому дистилляторі можливий тільки під дією сили ваги.

У роботі [29] також наведені такі критерії оцінки систем як імовірність успіху й ризику.

За прогнозами, технологія VCD була успішна на 84 – 90 %, з ризиком 3 % у результаті. За прогнозами, технологія CDS була успішна на 84 – 87 %, з ризиком 5 % у результаті. Успіх технології WFRD становив за прогнозами 52 – 61 %, а ризик – 7 %.

Для CDS, історія розробки якого нараховує близько 10 років, такі параметри досить гарні й наближені до параметрів VCD, історія якого перевищує 50 років.

### Удосконалення CDS

У плани НАСА й «Honeywell» входять розробка, виготовлення й випробування CD III покоління в 2020 році. Для досягнення якісного ефекту модернізації CDS необхідно глибоке розуміння принципів його роботи й впливу багатьох факторів на його ефективність. У всіх процитованих вище джерелах не аналізуються процеси CDS і їх вплив на характеристики системи. Крім того, те ж стосується даних по питомому енергоспоживанню, продуктивності, COP, основних параметрах дистиллятора й ТНР. Повинно бути ясным, що питома ефективність ТНР залежить від характеристик CD (швидкість обертання, число каскадів, конфігурація й розмір теплообмінної поверхні) і параметрів електричного й гідравлічного контурів ТНР.

При випробуванні CD-1, CD-2 і CD-3 у компанії «Термодистиляція», були обмірювані всі дані, необхідні для майбутніх прогнозів і аналізу. До них відносяться:

- струм і напруга ТНР для розрахунків його потужності;
- струм і напруга привода для розрахунків потужності привода;
- кількість вихідної рідини, продукту;
- кількість вилученої рідини (дренаж або дистиллятор);
- температури гарячої рідини на вході й виході з ТНР;
- температури холодної рідини на вході й виході з ТНР;
- витрата циркулюючої рідини в гарячому контурі,  $G_h$ ;
- витрата циркулюючої рідини в холодному контурі,  $G_c$ ;
- температура пари в зоні конденсації останнього каскаду;
- вміст солі в концентраті,  $C$  і температура охолоджуючої рідини, що надходить у зону конденсації останнього каскаду.

Усі ці дані були зафіксовані з 6-хв інтервалом протягом усього циклу випару. Цикли випробування (випар) становили 60, 120 і 180 хвилин.

У цілому було проведено 240 циклів випробування з водою, уриною й розчином  $NaCl$ .

Для подальшого аналізу процесів по вимірюваних параметрах були розраховані наступні параметри:

Потужність –  $NTHP$ , потужність приводу –  $Nd$ ;

різниця температур в ТНР,  $\Delta t_{in} = t_{h1} - t_{h2}$ ;

різниця температур гарячої лінії (перегрів рідини),  $\Delta t_h = t_h - t_n$ ;

різниця температур холодної лінії,  $\Delta t_c = t_{c2} - t_{c1}$ ;

кількість тепла, виділеного на гарячій стороні ТНР,  $Q_h = cG_h \Delta t_h$ ;

кількість тепла, виділеного на холодній стороні ТНР,  $Q_{\bar{n}} = cG_{\bar{n}}\Delta t_{\bar{n}}$ ;

ККД ТНР,  $COP = Q_h / N_{ТНР}$ ; і питоме енергоспоживання  $S_e = (N_{ТНР} + N_h) / G_d$ .

Ще в 1990 – 1995 нами була розроблена програма проектування MRD з параметрами ТНР для оцінки як динамічних характеристик (зміни температури й тиску в конкретних точках системи дистиляції, продуктивність, питоме енергоспоживання, погіршення температури залежно від часу), так і інтегральних і середніх за цикл характеристик. Точність розрахунків очікуваних характеристик, насамперед, залежить від точності визначення коефіцієнта теплопередачі  $U$  в каскадах дистиллятора. Величина  $U$  дозволяє визначити перепад температур  $\Delta T$  у кожному з каскадів і дистилляторі в цілому.  $\Delta T$  визначає перепад температур між гарячою й холодною сторонами ТНР.

Параметр COP як ефективність ТНР залежить від  $\Delta T_{in}$ . Коефіцієнт теплопередачі визначається як

$$U = \frac{1}{1/\alpha_c + 1/\alpha_i + \delta_u/\lambda_u}, \quad (1)$$

де  $\alpha_c$  – коефіцієнт теплопередачі при конденсації на обертових елементах каскаду;  $\alpha_i$  – коефіцієнт теплопередачі при випарі рідкої плівки на обертових елементах каскадів;  $\delta_u$  і  $\lambda_u$  – товщина й теплопровідність теплообмінних поверхонь.

Теплопередача в умовах конденсації на поверхні обертового диска або конуса (95 % теплообмінної поверхні в MRD) була теоретично й експериментально досліджена в [1 – 7].

У роботах [1, 2, 5 і 6] показано, що експериментальні дані перебувають у гарному узгодженні з теорією Нуссельта для ламінарної плівкової конденсації:

$$Nu = \frac{\alpha_c}{\lambda_c} \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = 0.66 Re_c^{-1/3}, \quad (2)$$

якщо замінити  $g$  відцентровим прискоренням  $\omega^2 R \sin \varphi$  ( $\varphi$  – кут між віссю обертання й поверхнею теплопередачі). В (2),  $Re = qR / (r\mu_c)$ .

Теплопередачу в умовах випару рідкої плівки на обертовій поверхні  $\alpha_v$  можна також визначити за допомогою (2), тому що на основній частині теплопередавальної поверхні  $Re = G_v / (2\pi r\mu_c) < 50$ , тобто має місце ламінарний потік випаровуваної рідини. Тут  $G_v$  – кількість рідини, яка обприскує поверхню випару каскаду за допомогою трубки Піто.

У період з 2001 по 2008 рік було досліджено кілька інтегральних характеристик CDS, таких як продуктивність  $Gd$  як функція потужності ТНР, швидкість ротора  $n$  і час роботи системи, ефективність ТНР (COP як функція  $N_{ННР}$ ). Ці дані не дозволяють проаналізувати вплив наступних параметрів опріснення: перепад температур у каскадах CD  $\Delta T_{ef}$ , ступінь концентрації  $C$  і пов'язане з нею погіршення температури  $\Delta T_{deg}$ , а також витрата циркулюючої рідини в холодному й гарячому контурах системи  $G_c$  і  $G_h$ , відповідно, на ці основні характеристики CDS.

У програмі, близькій до тієї, яка описана у звіті [20], створена модель для прогнозування ступеня концентрації рідини в кожному каскаді CD з врахуванням того, що максимальна концентрація має місце в першому каскаді дистиллятора. Цей прогноз дозволяє визначити як погіршення температури  $\Delta T_{deg}$  в кожному каскаді, так і загальний перепад температур в 5

каскадах  $\sum \Delta T_{deg}$  у будь-якому інтервалі циклу.

У табл. 5А і 5В, як приклад, представлені експериментальні дані, пов'язані з локальними характеристиками технології концентрації урини, отриманої в 2006 році, оціночні дані по загальному перепаду температур за рахунок теплопереносу  $\sum \Delta T_{ef}$ , експериментальний загальний перепад температур на вході в ТНР  $\Delta T_{in} = T_1 - T_5$  і оціночний загальний перепад температур у дистилляторі  $\sum \Delta T_{inca} = \sum \Delta T_{ef} + \sum \Delta T_{deg}$ , де  $T_1$  – експериментальне значення температури рідини на виході з 1-го каскаду CD, а  $T_5$  – температура конденсату, що надходить в ТНР з камери конденсації 5-го каскаду.

$$\sum \Delta T_{ef} = \sum Q_d / (U \sum F),$$

де  $\sum Q_d = G_d r$ ;  $\sum F = 0.35 m^2$  - загальна поверхня випару CD.

Таблиця 5

*Резюме експериментальних і прогнозованих даних*

	$\Phi_{ТНР}$	$\Phi_{SP}$ Вт-Г/кг	$G_{pr}$ кг/год	$\Delta T_{in}$ °C	$C$ %	$\Delta t_{deg}$ °C	$\sum \Delta t_{ef}$ °C	$\sum \Delta t_{cal}$ °C
A1	2.40	107	2.58	10.2	23	2.4	3.4	5.8
A2	2.02	116	4.26	14.4	26	2.6	5.5	8.1
B1	2.62	80	3.41	7.7	23	2.3	4.1	6.4
B2	2.35	94	5.40	10.8	18	1.8	6.4	8.2

У табл. 5: A1, B1:  $N_{ТНР} = 200$  Вт; A2, B2:  $N_{ТНР} = 400$  Вт.  $n = 1100 - 1200$  об/хв.  
 $G_h \approx G_c = 92$  л/х.

Як видно з таблиці, в обох випадках, даних для порівняння, експериментальний перепад температур на вході в ТНР  $\Delta T_{in}$  на кілька градусів вище оціночних значень.

Зі збільшенням швидкості ротора дистиллятора, витрата рідини, що циркулює в гарячому й холодному контурах CDS, також зростає. Це полегшує поліпшення конвективного теплообміну в ТНР і знижує загальний перепад температур  $\sum \Delta T$  ТНР, що, у свою чергу, збільшує COP. Це збільшення рівне 6...8 % при рості  $n$  від 800 до 1100 об/хв. У цьому випадку  $N_d$  збільшується в 2 рази. Отже, доцільно збільшити витрату в контурах циркуляції при високих навантаженнях ТНР ( $> 400$  Вт), коли споживана потужність приводу набагато нижче, ніж потужність ТНР.

Виходячи з результатів випробувань для трьох систем CDS, ми перевірили кілька методів поліпшення характеристик CDS.

**Зниження перепаду температур на вході в ТНР**

Причини зниження температури конденсату в останньому каскаді на 3 – 5 °C нижче температури пари в кінцевому конденсаторі були встановлені й усунуті.

Випробування показують, що коли переохолодження конденсату в останньому каскаді (кінцевий конденсатор) менше, а температура конденсату  $t_5$  наближається до температури пари в

останньому каскаді, перепад температур на вході в ТНР наближається до прогнозованої величини. У результаті, при рівних вихідних даних продуктивність ТНР в експериментах на 25 – 30 % вище, а питома витрата на 15 – 20 % нижче.

### **Удосконалення ТНР: електрогідравлічна схема**

В 2015 році разом з Алтек – 7001 (Чернівці, Україна) ми розробили новий двокаскадний ТНР2. Основна відмінність ТНР2 від ТНР, який ми використовували разом з компанією «Honeywell» в 2004 – 2010 роках, полягає в зниженні робочого струму майже вдвічі при тій же потужності ТНР.

Тестування нового ТНР2 було проведено на початку 2016 року на нашому іспитовому стенді в ТОВ «Термодистиляція РВ» при використанні MVRD із трьома каскадами шляхом випару води й розчину  $NaCl$  з концентрацією 2.8 % при  $NTHP = 200$  і 300 Вт.

Результати цих випробувань виявили збільшення COP на 30% і зниження питомого споживання енергії на 20 – 25 %.

В 5-каскадному CD із продуктивністю відновлення урини 5 л/ч застосування ТНР2 знизить питоме споживання енергії на 20 – 25 % до 80 – 85 Вт·год./л.

### **Збільшення витрати циркулюючої рідини в гарячому й холодному контурах**

Ефективність ТНР залежить як від різниці температур на вході  $\Delta t_m$ , так і від перепаду температур  $\Sigma \Delta t_m$  у самому модулі ТНР. Цей перепад може бути зменшений шляхом поліпшення конвективного теплообміну по обидва боки робочих модулів ТНР. В умовах турбулентного руху рідини теплоперенос  $\alpha_c$  пропорційний витраті циркулюючої рідини в степені 0.8, тобто  $\alpha_c = f(G^{0.8})$ . Витрату в контурах можна збільшити двома способами: шляхом модернізації трубки Піто й застосування додаткових насосів.

Раніше при випробуванні HVRD ми використовували додатковий насос, який збільшував витрату рідини в контурі в 1.3 – 1.4 раз при живленні не вище 10 Вт. Таким чином, холодильний коефіцієнт збільшувався на 10 – 11 %.

### **Зменшення теплового опору на обертовій теплообмінній поверхні**

Цей метод дозволяє знизити перепад температур  $\Delta t_c$  у каскадах і, відповідно, перепад температур на вході в ТНР, що забезпечує збільшення коефіцієнта ефективності.

Конструкція існуючого CD дає можливість збільшити теплообмінну поверхню на 10 – 15 % і зменшити товщину обертових теплообмінних елементів на 20 %. Це забезпечує зменшення  $\Sigma \Delta t_{ef}$  приблизно на 15 %.

### **Висновок**

Представлена історія й еволюція технології багатокаскадної відцентрової вакуумної дистиляції для регенерації води з відходів у космічних системах життєзабезпечення.

Розробка цієї унікальної технології здійснена в Київському політехнічному інституті (Україна) в 1988 році.

Потім ця технологія була вдосконалена за рахунок застосування MRVD із трьома каскадами.

З 2000 року ТОВ «Термодистиляція РВ» розробила й виготовила три системи MRVD з п'ятьма каскадами. Ці системи, що одержали назву CDS, досліджуються дотепер з перспективою

їх застосування в космічних польотах. Повідомляються результати поліпшення характеристик CDS при зниженні питомого споживання енергії на 20 – 25 %.

### Список літератури

1. Butuzov A.I. and Rifert V.G. An Experimental Study of Heat Transfer during Condensation of Steam at a Rotating Disk. *Heat Transfer-Soviet Research*. 1972. Vol.4. No. 6. November-December
2. Butuzov A.I. and Rifert V.G. Heat Transfer in Evaporation of Liquid from a Film on a Rotating Disk. *Heat Transfer-Soviet Research*. 1973. Vol. 5. No. 1. January-February.
3. Butuzov A.I., Pukhovoy I.I. and Rifert V.G. Experimental Determination of the Minimum Irrigation Density in a Thin-Film Rotating Disk Apparatus. *Fluid Mechanics-Soviet Research*. 1976. Vol. 5. No. 1. January-February.
4. Rifert V.G., Barabash P.A. and Goliyad N.N. Condensation of Steam on a Water Film Falling Down onto Rotating Surface. *Heat Transfer-Soviet Research*. 1984. Vol. 16 No. 3. May-June .
5. Rifert V.G., Intensification of Heat Exchange at Condensation and Evaporation of Liquid in 5 Flowing-Down Films. Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference Heat Transfer, Israel. 1990. pp. 293 – 298.
6. Rifert V.G., Pukhovoy I.I., and Nikitenko E.I. Character and Intensity of Heat Exchange at Evaporation of the Fluid Film on the Rotation Disk. *Proc. of the 2<sup>nd</sup> European Thermal- Sciences and the 14<sup>th</sup> UIT National Heat Transfer Conference*. Rome, Italy. 1996. May 29 – 31. Vol. 1. pp. 249 – 252.
7. Rifert V.G., Barabash P.A., and Muzhilko A. Flow of Liquid Film over the Surface of a Rotation Disk. *Heat Transfer-Soviet Research*. 1983. Vol. 15. No. 5. pp. 1 – 6.
8. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert, V.G., et al. Systems for Water Reclamation from Humidity Condensate and Urine for Space Station. SAE Paper 941536, 24th International Conference on Environmental Systems, and 5th European Symposium on Space Environmental Control Systems, Friedrichshafen, Germany. 1994. June
9. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V.M., Rifert V.G., Barabash P.A., et al. Development of Urine Processor Distillation Hardware for Space Stations. SAE Paper 951605, the 25<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, San Diego. 1995. July.
10. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V.M, Rifert V.G., et al. Problems of Developing Systems for Water Reclamation from Urine for Prospective Space Stations. SAE Paper 961409, the 26<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, Monterey. 1996. July.
11. 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 27<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, Lake Tahoe, July 1997.
12. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V.M., et al. Experience in Development of Systems for Water Reclamation from Urine Based on Distillation with Heat Energy Recuperation. the 6<sup>th</sup> European Symposium on Space Environmental Control Systems, SP400. 1997. vol. 2. pp. 786 – 791. ESA.
13. Samsonov, N.M., Bobe, L.S, Novikov, V., Rifert V.G., et al. Rationale and Selection of a Distillation Subsystem for Water Reclamation from Urine. SAE Paper 981714, the 28<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, Danvers, MA. 1998. July.
14. Samsonov, N.M., Bobe, L.S., Rifert, V.G., Barabash, P.A., et al. The system and Vacuum Centrifugal Distiller for Water Recovery from Urine Aboard of Spacecraft. Patent of Russia Federation for invention #2127627 of 21.07.1998.

15. Rifert, V.G., Usenko, V.I., Strikun, A.P., and Zolotukhin, I.V. Multi-stage Centrifugal Distiller. Patent of Ukraine for invention # 35941A of 16.04.2001.
16. 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 #6,258,215 B1. Date of Patent: Jul. 10, 2001.
17. 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 30<sup>th</sup> International conference Environmental Systems, Toulouse, France. 2000. July.
18. Apparatus and methods for water regeneration from waste. US Patent 7610768 -. November 4, 2009. 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.
19. Rifert, V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. Macknight and A. Lubman, "Design Optimisation of Cascade Rotary Distiller with the Heat Pump for Water Reclamation from Urine", SAE Paper 2001-01-2248, the 31<sup>st</sup> International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2001.
20. Rifert, V. G., V. I. Usenko, I. V. Zolotukhin, L. I. Anatychuk, 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*. 2001. Vol. 23. No. 4-5.
21. Rifert, V. G., Lubman, A. M., Macknight, A. K., Usenko, V. I. , and Zolotukhin, I. V. Water Recovery System from Brines and Wastewater for Extreme Living Conditions of the Man” – IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. Manama, Bahrain. 2001. October 26 – 31.
22. Anatychuk, L.I., Zolotukhin, I.V., Rifert, V.G., Rozver, Yu.Yu., and Usenko, V.I. Use of Thermopile in Water Recovery System for Manned Space Vehicles. *Journal of Thermoelectricity*, 2002. p. 69 – 73.
23. Anatychuk, L.I., Barabash, P.A., Rifert, V.G., Rozver, Yu.Yu., Usenko, V.I., and Cherkez, R.G. Thermoelectric heat pump as a means of improving efficiency of water purification systems on space missions. *Journal of Thermoelectricity*. 2013. #6. pp. 72 – 76.
24. A. Lubman, A. Macknight, V. Rifert, I. Zolotukhin, and K. Pickering. Wastewater Processing Cascade Distillation Subsystem Design and Evaluation. *SAE International*. 2006. 01 – 2273. July.
25. A. Lubman, A. Macknight, V.Rifert, and P. Barabash. Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing. *SAE International*. 2007. 01 – 3177. July.
26. M. Callahan, A. Lubman, A. Macknight, H. Thomas, and K. Pickering. Cascade Distillation Subsystem Development Testing. *SAE International*. 2008. 01 – 2195. July.
27. M. Callahan, A. Lubman, and K. Pickering, Cascade Distillation Subsystem Development: Progress toward a Distillation Comparison Test. *SAE International*. 2009. 01 -2401. July.
28. Jeff Mcquillan, 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. *The 40<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems*. AIAA 2010 – 6125.
29. 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 16.02.2017