УДК 537.32

**Ріферт В.Г.,** *док. техн. наук*[1]
**Анатичук Л.І.,** *акад. НАН України*[2,3]
**Соломаха О.С.,** *канд. техн. наук*[1]
**Барабаш П.О.,** *канд. техн. наук*[1]
**Петренко В.Г.,** *канд. техн. наук*[1]
**Снеговской О.П.**[1]

[1]НТУ «КПІ», вул. Політехнічна, 6, Київ, 03056, Україна; *e–mail: vgrifert@ukr.net*;
[2]Інститут термоелектрики НАН і МОН України, вул. Науки, 1,
Чернівці, 58029, Україна; *e–mail: anatych@gmail.com*
[3]Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського 2, Чернівці, 58000, Україна

# ВПЛИВ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ ВІДЦЕНТРОВОГО ДИСТИЛЯТОРА

*У статті проведено аналіз роботи термоелектричного теплового насоса у комплексі з відцентровим дистилятором для регенерації стічних вод системи життєдіяльності людини в умовах майбутніх космічних місій. Показано залежність питомого споживання енергії системи від часу за різних потужностей теплового насоса, проаналізовано вплив різниці температур теплоносіїв на ефективність роботи теплового насоса. Бібл. 24, рис. 5, табл. 2.*
**Ключові слова:** кабіна: термоелектрика, тепловий насос, дистилятор.

**Список позначень**

CMED – відцентровий дистилятор;
*ср* - теплоємність, Дж/(кг·К)
*G* – витрата рідини, л/год;
*Q* – тепловий потік, Вт;
*G* – витрата, кг/год;
*I* – сила струму, А;
*N* - підведена до THP потужність, Вт;
*n* – обороти, про / хв;
SPC – питома витрата енергії, Вт·годину/кг;
THP – термоелектричний тепловий насос;
*T, t* – температура, °З;
*U* – напруга, В;
$\eta_{thp}$ - ефективність теплового насоса,

**Індекси:**

*h* – гарячий;
*c* – холодний;
*d* – дистилят;
avg – середній;
in – вхід;
out – вихід;
thp – тепловий насос;
*cd* – двигун

## Вступ

Однією з важливих вимог до систем відновлення води із рідких відходів в умовах тривалих космічних експедицій на Місяць, Марс та роботі на Міжнародній космічній станції (МКС) є мінімальне споживання енергії.

Команда інженерів та вчених з КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інституту термоелектрики НАН України та комерційної компанії «Термодистиляція РВ» розробили у період 2000-2003 років систему очищення стічних вод для роботи в умовах мікрогравітації. У публікаціях [1 – 5] ця система називається системою каскадної дистиляції (CDS). Більш правильна назва, яка тут використовується, це система відцентрової багатоступінчастої дистиляції (CMED). Система містить два головні компоненти – власне відцентровий багатоступінчастий дистилятор та термоелектричний тепловий насос. Застосовується два методи зниження витрат енергії: 1) принцип багатоступінчастого випаровування та концентрування рідини та 2) регенерація енергії за рахунок використання термоелектричного теплового насоса.

У роботах [6 – 15] наведені інтегральні характеристики CMED 3-и ступінчастої та 5-ти ступінчастої дистиляції. Показано результати тестування при концентруванні урини, конденсату атмосферної вологи, сангігієнічної води та їх сумішей при фіксованих режимних параметрах системи, потужності теплового насоса ≈ 400 Вт, швидкості обертання двигуна ротора і т.д.

У цій статті показано результати тестування відцентрового багатоступінчастого дистилятора з термоелектричним тепловим насосом, який було розроблено в Інституті термоелектрики НАН України та виготовлено фірмою ALTEC. Наведено розрахункові значення параметрів, що впливають на ефективність $\eta_{thp}$.

## Методика досліджень характеристик відцентрового дистилятора з термоелектричного теплового насоса

Компанією «Термодистиляція РВ» були розроблені та виготовлені три ідентичні п'ятиступінчасті відцентрові дистилятори. «Altec» виготовив два термоелектричні теплові насоси, розроблені Інститутом термоелектрики НАН та МОН України (ITE). Ці дистилятори разом із термоелектричними тепловими насосами були випробувані спочатку в компанії «Термодистиляція РВ», а пізніше були передані в компанію Honeywell International Inc. Ці апарати потім випробовувалися на стендах Honeywell та на стенді NASA у Центрі Маршала.

Представлені результати випробувань дистиляторів і ТНР раніше не публікувалися.

На рис. 1 представлено принципову схему стенду для випробувань трьох дистиляторів та двох теплових насосів.

Основне та допоміжне обладнання стенду об'єднуються системою трубопроводів, які утворюють два циркуляційні контури. В одному з них («гарячому») циркулює розчин, що випаровується, а в іншому («холодному») – дистилят.

Працює стенд в такий спосіб. Вмикається двигун дистилятора 1, який забезпечує задані оберти ротора дистилятора, і вакуум-насосом 7 в апараті встановлюється необхідний тиск, який відповідає температурі кипіння розчину. З ємності 13 дистилятом заповнюється холодний контур, в якому забезпечується циркуляція дистиляту через конденсатор дистилятора 1, солемір 9, ротаметр 14, холодну сторону ТНР 2, теплообмінник-охолоджувач 3 і знову конденсатор дистилятора. «Гарячий» контур заповнюється з ємності 4 до рівня, що задається клапаном-регулятором 6. У гарячому контурі розчин циркулює з випарника дистилятора 1 через ротаметр 14, гарячу сторону ТНР 2 і знову випарник дистилятора 1. При підведенні електроенергії до ТНР 2 відбувається охолодження конденсату в холодному контурі і нагрівання розчину в гарячому контурі. Розчин, перегрітий у ТНР 2

відносно температури насичення у випарнику CMED 1, частково випаровується, а отримана пара використовується як гріюча в наступному ступені випаровування дистилятора; пара, отримана в останньому ступені дистилятора, конденсується в контактному конденсаторі CMED 1. У процесі випаровування відбувається зростання концентрації розчинених речовин у гарячому контурі. Надлишок дистиляту з холодного контуру автоматично відводиться в збірник дистиляту 5. Підживлення свіжого розчину відбувається через клапан 6. Для забезпечення стаціонарності процесу дистиляції надлишок тепла відводиться теплообмінником-охолоджувачем 3 в навколишнє середовище. У процесі випаровування відбувається зростання концентрації розчинених речовин у гарячому контурі. Надлишок дистиляту з холодного контуру автоматично відводиться в збірник дистиляту 5. Підживлення свіжого розчину відбувається через клапан 6. Для забезпечення стаціонарності процесу дистиляції, надлишок тепла відводиться теплообмінником-охолоджувачем 3 в навколишнє середовище.

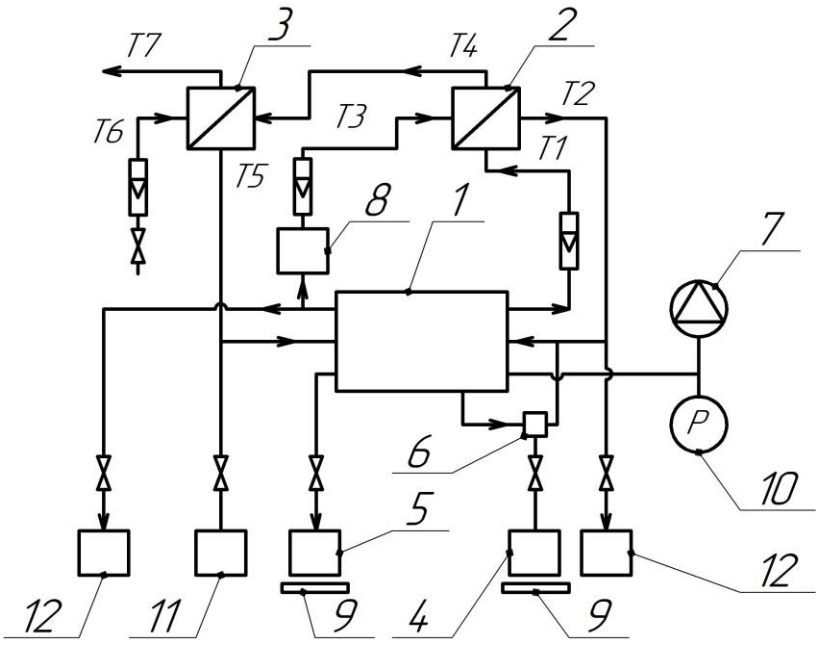


*Рис. 1. Схема експериментального стенду.*
*1 - відцентровий вакуумний дистилятор; 2 – термоелектричний тепловий насос;*
*3 – теплообмінник-охолоджувач; 4 – вихідний розчин; 5 - збірник дистиляту;*
*6 – клапан – регулятор живлення системи; 7 – вакуум-насос;8 – солемір; 9 – солемір;*
*10 – електронні ваги; 11 - вакуумметр; 13 - ємність із дистилятом для*
*заправки холодного контуру; 14 – ротаметри; 15 – запірний клапан;*
*16 – ємності для спорожнення контурів.*

Після закінчення експерименту відключається електроживлення ТНР 2, а холодний і гарячий контури спорожняються у відповідні ємності 16.

Температура вимірювалася на вході та виході з термобатареї по гарячій ($t_1$, $t_2$) та холодній сторонах ($t_3$, $t_4$), після теплообмінника-охолоджувача у «холодному» контурі ($t_5$) і на вході та виході з теплообмінника-охолоджувача з боку охолодження ($t_6$, $t_7$). Температури в гарячому і холодному контурах вимірювалися хромель-копелевими термопарами, точність вимірювання становила ± 0.1 °С.

Тиск в апараті вимірювався вакуумметром 11 зі шкалою виміру - 1…0 бар (клас точності 1.0) у комплекті з барометром.

Маса отриманого дистиляту (продукту) та вихідного розчину вимірювалася електронними

вагами, точність виміру ± 2 г, діапазон виміру ± 10 кг.

Солевміст у «холодному» контурі вимірювалося солеміром Hanna (0 ... 999 ppm).

Потужності приводу двигуна та теплового насоса вимірювалися вольтметром та амперметром, клас точності 0,5. Оберти вимірювалися тахометром з точністю ±1 об/хв.

Час випробування (одного тесту) становив 60 ... 120 хв.

## Результати експериментального дослідження

У Київському політехнічному інституті було проведено дослідження (випробування) трьох CMED. У дослідах використовувалися два теплові насоси. Швидкість обертання теплообмінної поверхні змінювалася від 900 до 1300 об/хв, потужність термоелектричного теплового насоса змінювалася від 100 до 600 Вт. Як робочі рідини використовувалися 1) дистильована вода; 2) розчин *NaCl* концентрацією 5...30 %; 3) урина концентрацією від 5 до 50%.

***Експериментальне визначення $\eta_{thp}$ залежно від підведеної потужності та різниці температур.***

Тепловий потік, що створюється на виході з теплового насоса, визначається як

$$Q_h = G_h c_p \left(t_2 - t_1\right), \tag{1}$$

де $t_2$ і $t_1$ відповідно температура на виході та на вході ТНР,°С.

$\eta_{thp}$ – коефіцієнт перетворення (COP – Coefficient of Performance) визначається як $\eta_{thp} = Q_h / N_{thp}$

SPC – питома витрата енергії визначається як сумарні витрати підведеної енергії (потужність, підведена до двигуна дистилятора, та потужність, підведена до термобатареї) витрачена на виробництво одного кілограма дистиляту:

$$SPC = \frac{\left(N_{cd} + N_{thp}\right)}{G_d}, \tag{2}$$

Середня різниця температур у термоелектричному тепловому насосі $\Delta T_{avg}$ визначається як:

$$\Delta T_{avg} = \frac{\left(t_1 + t_2\right)}{2} - \frac{\left(t_3 + t_4\right)}{2}, \tag{3}$$

де $t_1$ - температура на вході зони нагріву ТНР, ° С; $t_2$ – температура на виході зони нагрівання ТНР, °С; $t_3$ – температура на вході зони охолодження ТНР, °С; $t_4$ – температура на виході зони охолодження ТНР, °С.

Різниця температур на вході в термоелектричний тепловий насос $\Delta T_{in}$ визначається як:

$$\Delta T_{in} = t_1 - t_3, \tag{4}$$

У табл. 1 представлений приклад одного тесту, виконаного на CMED з п'ятьма ступенями при $n$ = 1200 об/хв на урині. Вказані всі необхідні для аналізу процесу вихідні величини: оберти, потужність, час, температура, витрати тощо; та розрахункові величини: підведена теплова потужність, ступінь концентрування урини на вході та виході з апарату, концентрація у залишку, коефіцієнт корисної дії теплового насоса.

***Таблиця 1***

***Результати тестування п'ятиступінчастого відцентрового дистилятора з термоелектричним тепловим насосом (швидкість обертання 1100 об/хв, робоча рідина – урина)***

| Час | Двигун | | | THP | | | Вага | | | Витрата | | | | Температура | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *U* | *I* | *N* | *U* | *I* | *N* | Вихідна рідина | Продукт (дистилят) | Загальний вміст розчинених твердих речовин | Гар. $G_h$ | Хол. $G_c$ | Продуктивність | Питома витрата енергії SPE | Гарячий, вхід у THP, $t_1$ | Гарячий, вихід із THP, $t_2$ | Холодний, вхід у THP, $t_3$ | Холодний, вихід із THP, $t_4$ |
| хв | В | А | Вт | В | А | Вт | грам | | мг/л | л/год | | кг/год | Вт·ч/кг | °С | | | |
| 0 | 24.2 | 3.1 | 75 | 20.5 | 10.08 | 206.6 | 0 | 0 | 12 | 60 | 82 | 0 | 0 | 23.2 | 23.1 | 22.9 | 22.9 |
| 6 | 24.2 | 3.1 | 75 | 22.5 | 10.9 | 245.3 | 288 | 184 | 22 | 60 | 82 | 1.84 | 174.1 | 31.8 | 43.7 | 23.4 | 22.7 |
| 12 | 24.2 | 3.1 | 75 | 28.5 | 14.3 | 407.6 | 634 | 602 | 38 | 60 | 82 | 4.18 | 174.1 | 37.5 | 48.3 | 24.5 | 22.4 |
| **18** | **24.2** | **3.1** | **75** | **29.2** | **14** | **408.8** | **1122** | **1070** | **51** | **60** | **82** | **4.58** | **103.4** | **38.7** | **49.4** | **25.1** | **22.3** |
| 24 | 24.2 | 3.1 | 75 | 30 | 14.4 | 460.8 | 1584 | 1528 | 61 | 60 | 82 | 4.58 | 117.0 | 38.8 | 50.8 | 25.1 | 22.0 |
| 30 | 24.2 | 3.1 | 75 | 31.8 | 15.2 | 483.4 | 2078 | 2006 | 67 | 60 | 82 | 4.78 | 116.8 | 39.4 | 51.5 | 25.2 | 22.1 |
| 36 | 24.2 | 3.1 | 75 | 32.3 | 14.22 | 459.3 | 2592 | 2502 | 73 | 60 | 82 | 4.96 | 107.7 | 40.0 | 52.2 | 25.4 | 22.1 |
| 42 | 24.2 | 3.1 | 75 | 32.1 | 15.24 | 489.2 | 3110 | 3004 | 76 | 60 | 82 | 5.02 | 112.4 | 40.0 | 52.2 | 25.4 | 22.3 |
| 48 | 24.2 | 3.1 | 75 | 31.9 | 15.2 | 484.9 | 3628 | 3500 | 79 | 61 | 82 | 4.96 | 112.9 | 40.1 | 52.1 | 24.9 | 22.0 |
| 54 | 24.2 | 3.1 | 75 | 32.4 | 15.36 | 497.7 | 4136 | 3990 | 82 | 61 | 83 | 4.90 | 116.9 | 40.3 | 52.2 | 25.1 | 22.1 |
| 60 | 24.2 | 3.1 | 75 | 33 | 15.6 | 514.8 | 4656 | 4492 | 84 | 62 | 83 | 5.02 | 117.5 | 40.7 | 53.5 | 24.9 | 22.0 |
| 66 | 24.2 | 3.1 | 75 | 33.2 | 15.64 | 519.2 | 5182 | 5006 | 87 | 62 | 83 | 5.14 | 115.6 | 40.9 | 53.2 | 24.9 | 22.1 |
| 72 | 24.2 | 3.1 | 75 | 33.1 | 15.56 | 515 | 5702 | 5508 | 90 | 63 | 83 | 5.02 | 117.5 | 40.9 | 53.1 | 24.9 | 22.0 |
| 78 | 24.2 | 3.1 | 75 | 33 | 15.58 | 514.1 | 6220 | 6010 | 92 | 64 | 83 | 5.02 | 117.4 | 40.9 | 53.2 | 24.9 | 22.0 |
| 84 | 24.2 | 3.1 | 75 | 33.2 | 15.72 | 521.9 | 6740 | 6510 | 94 | 65 | 83 | 5.00 | 119.4 | 41.0 | 53.5 | 24.8 | 22.0 |
| 90 | 24.2 | 3.1 | 75 | 33.2 | 15.46 | 513.3 | 7250 | 7010 | 96 | 67 | 83 | 5.00 | 117.7 | 41.0 | 53.5 | 24.8 | 22.0 |
| 96 | 24.2 | 3.1 | 75 | 32.8 | 15.34 | 503.2 | 7755 | 7500 | 97 | 68 | 83 | 4.90 | 118.0 | 41.0 | 53.1 | 24.6 | 22.0 |
| 102 | 24.2 | 3.1 | 75 | 32.9 | 15.4 | 506.7 | 8175 | 8000 | 98 | 71 | 83 | 5.00 | 116.3 | 41.0 | 53.1 | 24.8 | 22.0 |
| 108 | 24.2 | 3.1 | 75 | 0 | 0 | 0 | 8280 | 8205 | 96 | 71 | 83 | | | | | | |

У таблиці 2 наведено основні експериментальні параметри по кожному з 32 тестів, виконаних у різний період часу на різних апаратах. Необхідно відзначити ідентичність (при однакових параметрах

вихідної рідини, обертах і потужності) основних характеристик трьох виготовлених відцентрових дистиляторів, а також двох теплових насосів: продуктивність, питоме споживання енергії, якість дистиляту [16 – 19], що підтверджує оптимальність розробленої конструкції CMED у поєднанні THP.

На рис. 2 показано залежність питомого споживання енергії від часу для трьох п'ятиступінчастих дистиляторів потужності теплового насоса 400 Вт. У експериментах на урині концентрація солей збільшувалася з часом до 50 %, і слід зазначити слабку залежність ефективності системи від концентрації розчину (див. рис. 2).

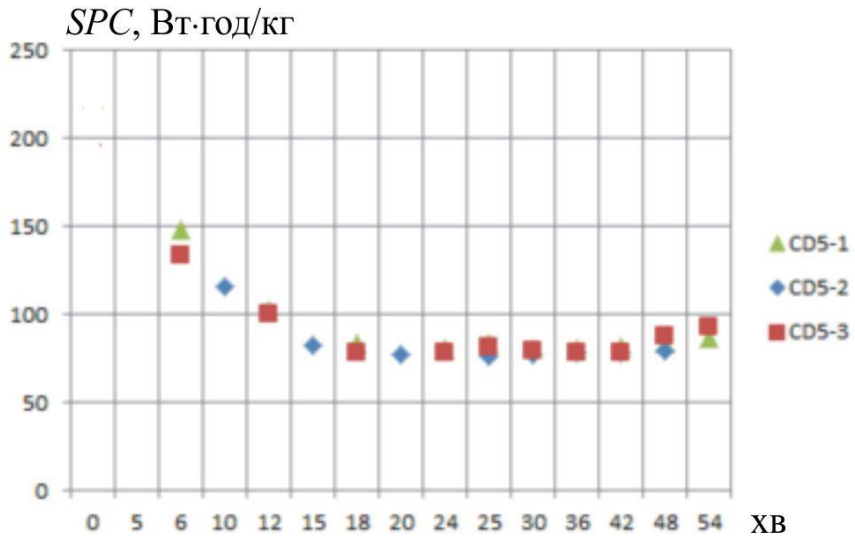


*Рис. 2. Залежність питомого споживання енергії від часу для урини, $N_{thp}$ = 400 Вт, n = 1200 об/хв.*

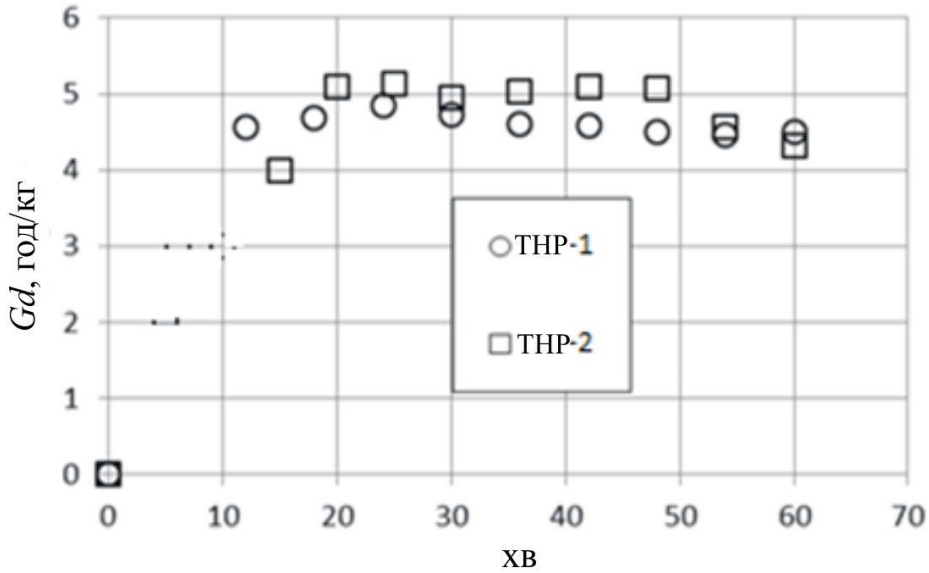


*Рис. 3. Залежність продуктивності системи часу для двох зразків термоелектричних теплових насосів, $N_{thp}$ = 400 Вт, n = 1200 об/хв.*

Найважливіший показник ефективності теплового насоса $\eta_{thp}$ має високі показники у досліджуваному діапазоні сили струму (див. табл. 2). Загалом ефективність термоелектричного теплового

насоса залежить від середньої різниці температур та різниці температур на вході в тепловий насос. Ці величини в основному залежать від процесів теплообміну у багатоступінчастому дистиляторі. У наших роботах [20 – 21] це проаналізовано і показано, що реалізація процесу в полі дії відцентрових сил суттєво інтенсифікує теплообмін, що, у свою чергу, сприятливо позначається на ефективності роботи термоелектричного теплового насоса. В результаті $\eta_{thp}$ теплового насоса у нашому випадку залежно від потужності струму змінюється від 2 до 5.

У NASA наприкінці 20 століття тестували дистилятор TIMES. Система використовує полімерну мембрану, яка вибірково пропускає воду із джерела стічних вод. Споживання енергії мінімізується за рахунок використання твердотільних теплових насосів. В результаті при експериментальних випробуваннях з неконцентрованою уриною максимальна ефективність термоелектричного теплового насоса приблизно дорівнювала лише двом [22 – 24].

Вплив середнього температурного напору, різниці температур на вході THP та сили струму на ефективність теплового насоса ALTEC показані відповідно на рис. 4 та 5.

***Таблиця 2***

***Основні результати експериментального дослідження для 32 вибраних тестів***

| № | Рідина | Обороти, $n$, про/хв | Потужність двигуна, $N_p$, Вт | Потужність теплового насоса, $N_{thp}$, Вт | Сила струму, $I$, А | Різниця температур на вході, $ДT_{in} = t_1 - t_3$ | Середня різниця температур, $ДT_{avg} = (t_1 + t_2)/2 - (t_3 + t_4)/2$ | Підведена теплова потужність, $O$, Вт | Ефективність теплового насоса, $з_{thp}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Урина | 1200 | 76 | 386 | 14.5 | 12.2 | 18.8 | 780 | 2.02 |
| 2 | Вода | 1000 | 76 | 430 | 17.7 | 9 | 16.8 | 1000 | 2.33 |
| 3 | Урина | 1000 | 76 | 235 | 11 | 9 | 15.8 | 600 | 2.55 |
| 4 | Урина | 1000 | 77 | 240 | 11 | 9.7 | 15 | 614 | 2.56 |
| 5 | Урина | 1200 | 92 | 96.4 | 6.8 | 2.4 | 11.3 | 320 | 3.32 |
| 6 | Урина | 800 | 40 | 150 | 8.8 | 6.7 | 10 | 490 | 3.27 |
| 7 | Урина | 1000 | 71 | 150 | 8.8 | 8.8 | 12 | 459 | 3.06 |
| 8 | Урина | 1200 | 77 | 386 | 14 | 12 | 23.5 | 880 | 2.28 |
| 9 | Урина | 800 | 40 | 150 | 8.8 | 6.7 | 10 | 491 | 3.27 |
| 10 | Урина | 1000 | 70 | 150 | 8.8 | 8.8 | 12 | 459 | 3.06 |
| 11 | Урина | 1200 | 78 | 386 | 14 | 12 | 23.5 | 880 | 2.28 |
| 12 | Вода | 1200 | 79 | 106 | 7.6 | 3.9 | 5.8 | 360 | 3.4 |
| 13 | Вода | 1200 | 78 | 200 | 10.4 | 4.3 | 9.3 | 600 | 3.0 |
| 14 | Вода | 1100 | 63 | 100 | 7.3 | 3.5 | 6.8 | 380 | 3.8 |
| 15 | Вода | 1200 | 78 | 400 | 14.3 | 1.0 | 13.7 | 972 | 2.43 |
| 16 | Вода | 1100 | 78 | 603 | 12.8 | 13.4 | 15.5 | 1110 | 1.84 |
| 17 | Урина | 900 | 59 | 150 | 8.7 | 5.3 | 10.5 | 495 | 3.3 |
| 18 | Урина | 1100 | 78 | 200 | 10.0 | 5.0 | 10.3 | 640 | 3.2 |
| 19 | Урина | 1300 | 100 | 63 | 2.0 | 1.5 | 3.8 | 351 | 5.4 |
| 20 | Урина | 1300 | 99 | 61 | 2.0 | 6.2 | 8.0 | 263 | 4.3 |
| 21 | Урина | 1300 | 98 | 100 | 7.0 | 3.2 | 7.3 | 330 | 3.3 |
| 22 | Урина | 1300 | 99 | 155 | 4.6 | 6.8 | 9.3 | 496 | 3.2 |
| 23 | Вода | 1000 | 35.4 | 109 | 7.5 | 3.9 | 8.2 | 352 | 3.23 |
| 24 | Вода | 1300 | 104 | 110 | 7.5 | 3.9 | 6.3 | 402 | 3.66 |
| 25 | Вода | 900 | 35 | 200 | 10 | 5.1 | 10 | 492 | 2.46 |
| 26 | Вода | 1300 | 98 | 200 | 10 | 4.5 | 10.2 | 528 | 2.64 |
| 27 | Вода | 1100 | 78 | 606 | 17.6 | 10.5 | 16.5 | 196 | 1.94 |
| 28 | Вода | 1000 | 51 | 101 | 7.3 | 3.5 | 6.8 | 379 | 3.75 |
| 29 | Урина | 1100 | 78 | 150 | 8.8 | 8.0 | 10.5 | 465 | 3.1 |
| 30 | Урина | 1100 | 77 | 150 | 8.8 | 5.7 | 9.2 | 540 | 3.6 |
| 31 | Урина | 1250 | 85 | 164 | 7.6 | 12 | - | 328 | 2.0 |
| 32 | Урина | 1100 | 79 | 165 | 13 | 13.5 | - | 396 | 2.4 |

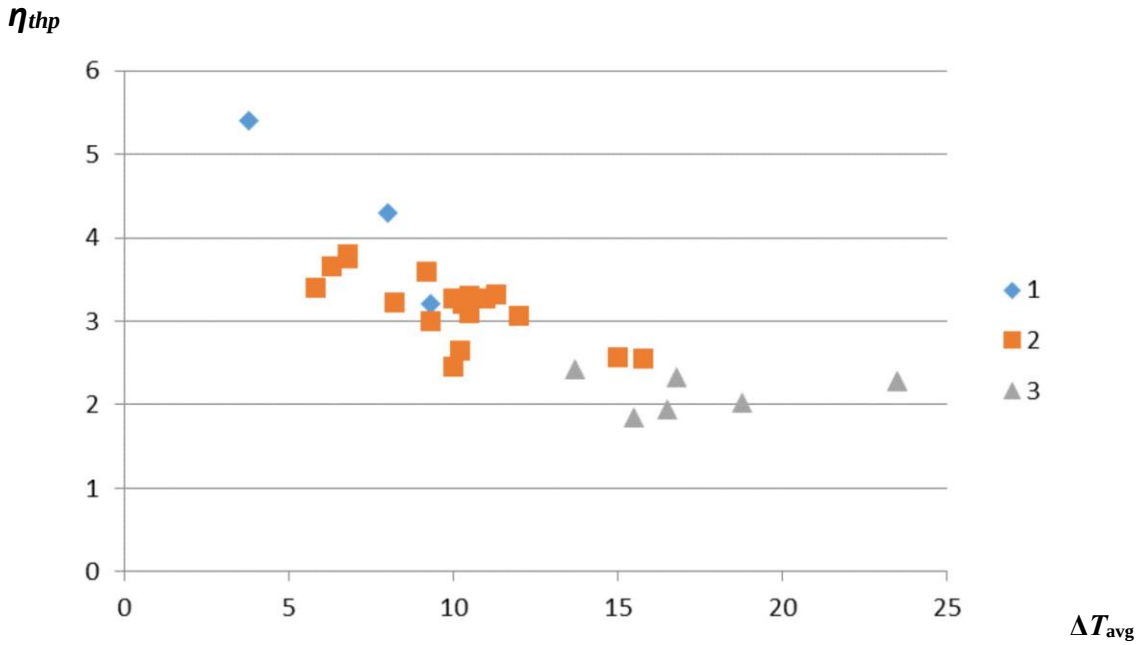


*Рис. 4. Залежність ефективності теплового насоса від середньої різниці температур; сила струму: ◆1– 2 … 4А;■2 – 7 … 10А;▲3 – 13 … 17А.*

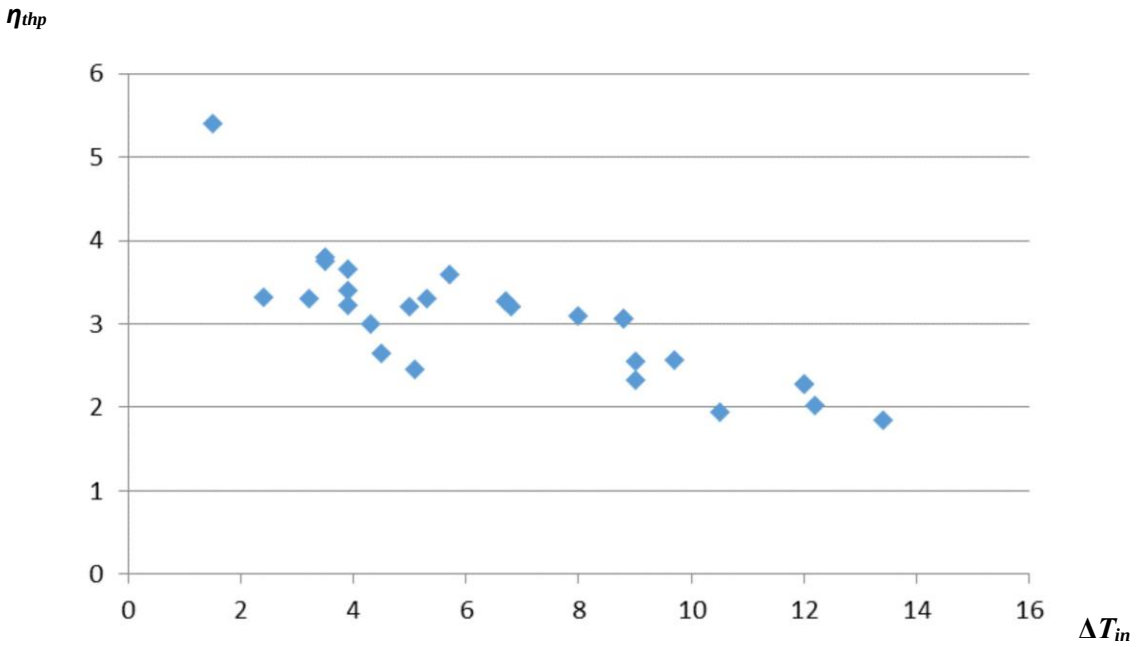


*Рис. 5 Залежність ефективності теплового насоса від різниці температури на вході в тепловий насос.*

## Висновки

Проведені експериментальні дослідження показали, що у розробленій системі відцентрового дистилятора з термоелектричним тепловим насосом вдається досягти високих показників ефективності роботи термоелектричної батареї, ефективність теплового насоса величина $\eta_{thp}$ знаходиться в межах 3…5. Цього вдається досягти за рахунок дуже інтенсивного перебігу процесів теплообміну в полі дії відцентрових сил, що дозволяє підтримувати мінімальну середню різницю

температур робочих рідин термоелектричному тепловому насосі. Отримані дані будуть використані для створення математичної моделі системи дистиляції води (відцентровий дистилятор + термоелектричний тепловий насос) та при проектуванні системи регенерації води на задану продуктивність із прогнозованою питомою витратою енергії.

*Роботу виконано за підтримки гранту МОН України «Розробка та виготовлення інноваційних дистиляторів для концентрування термочутливих розчинів», Державний реєстраційний номер: 0121U110195*.

## Література

1. Sargusingh MJ, Callahan MR, “Cascade Distillation System Design for Safety and Mission Assurance,” 45th International Conference on Environmental Systems ICES-2015-151. 12-16 July 2015, Bellevue, Washington
2. Ріферт, VG, VI Usenko, IV Zolotukhin, A. MacKnight та A. Lubman, "Каскадовані розтільності технології для термічної води в Space", SAE Paper 2003-01-2625. 34st International Conference on Environmental Systems. Orlando, July 2003.
3. Lubman A, MacKnight A, Rifert V, Zolotukhin I і Pickering K., “Wastewater Processing Cascade Distillation Subsystem. Design and Evaluation”. SAE International, 2006-01-2273. July 2006.
4. A. Lubman, A. MacKnight, V. Rifert, і P. Barabash, "Каскальне Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing". SAE International, 2007-01-3177, July 2007.
5. M.Callahan, V.Patel, KDPickering. Cascade Distillation Subsystem Development: Early Results From the Exploration Life Support Distillation Technology Comparison Test // 40th International Conference on Environmental Systems
6. V.Rifert, P. Barabash, N.Goliad, "Методи і процеси thermal distillation of water solutions for closed water supply systems", SAE Paper 901249, 20th Intersociety Conference on Environmental Systems, Williamsburg, July 199
7. N.Samsonov, L.Bobe, V.Novikov, V.Rifert та інші "Системи для water reclamation від humidity condensate and urine for space station", SAE Paper 941536, 24th International society Conference on Environmental Systems, June, 199.
8. Samsonov, NM, Bobe, LS, Novikov, V., Rifert, VG, Barabash, PA et al., "Development of Urine Processor Distillation Hardware for Space Stations" , July 1995.
9. Samsonov, NM, Bobe, LS, Novikov, V., Rifert, VG, та інші. Nevada, July 1997.
10. Samsonov, NM, Bobe, LS, Novikov, V., Rifert, VG, et al. Systems, 1999.
11. Ріферт, V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight, A. Lubman. Comparison Of Secondary Water Processors За допомогою Distillation For Space Applications. - SAE Paper 99-70466, 29th International Conference on Environmental Systems, Denver, July 1999.
12. Rifert V.,Stricun A., Usenko V. Study of dynamic and extreme performance of multistage centrifugal distiller with thethermoelectric heat pump. SAE Technical Papers2000. 30th International Conference on Environmental Systems; Toulouse; Франція; 10-13 липня 2000 року.
13. Rifert V., V. Usenko, I. Zolotukhin, A. MacKnight and A. Lubman, "Дизайн Оптимізація каскадної ротації Distiller with Heat Pump for Water Reclamation from Urine", SAE Paper 2001-01-2248, the 31st International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2001.

14. Rifert, VG, Anatychuk, LI, Barabash, PA, Usenko, VI, Strikun, AP, Prybyla, AV Improvement distillation методи з використанням центрифугальних методів для water recovery in space flight applications (2017) Journal of Thermoelectricity, pp. 71-83.
15. VG Rifert, PA Barabash, V. Usenko, AS Solomakha, LI Anatychuk, AV 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.
16. Риферт Володимир Г., Анатичук Лук'ян І., Соломаха Андрій С., Барабаш Петро А., Осенко Володимир, Прибила А.В., Наймарк Мілена, Петренко В. Удосконалення центрифужного багаступінчастого дистилятора для далеких космічних місій. 70th International Astronautical Congress (IAC) (Washington DC, United States, 21-25 October 2019). IAC-19-A1, IP, 11x54316.
17. Rifert V.G., Anatychuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Strikun A.P., Solomakha A.S., Petrenko V.G., Prybyla A.V. Evolution of centrifugal distillation system with thermoelectric heat pump for space missions. Part 3. Analysis of local and integral characteristics of centrifugal distillation system with thermoelectric heat pump. Journal of Thermoelectricity, 2019, 3, pp. 5 – 19.
18. Rifert V.G., Anatychuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Strikun A.P., Solomakha A.S., Petrenko V.G., Prybyla A.V. (2019). Comparative analysis thermal destilation methods with heat pumps for long space flights. Journal of Thermoelectricity, 2019, 4, pp. 5 – 17.
19. A.S. Solomakha, L.I. Anatychuk, 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 сторінок.
20. *V.G. Rifert, P.A. Barabash, A.S. Solomakha, V. Usenko, V.V. Sereda, V.G. Petrenko*. Hydrodynamics and heat transfer in centrifugal film evaporator // Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue K. – 2018. – pp.49-57.
21. *V.G. Rifert, A.S. Solomakha, P.A. Barabash, V. Usenko, V.V. Sereda.* Justification of method for calculating heat transfer in film evaporators with rotating surface // Bulgarian Chemical Communications, Volume 52, Special Issue F, 2020. 95-102.DOI: 10.34049/bcc.52.F.0016
22. Thibaud-Erkey, C., Fort, J., i Edeen, M., "A New Membrane for Thermoelectric Integrated Membrane Evaporative Subsystem (TIMES), 2000. SAE Technical Paper 2000-01-2385 1999-01-1990
23. G.F. Dehner TIMES Regenerator Redesign Description Timothy D. Scull Hamilton Standard Space Systems International, Inc. Addendum development of preprototype times wastewater recovery subsystem. Prepared under contract no. nas 9-15471, 1984.
24. New Membrane for Thermoelectric Integrated Membrane Evaporative Subsystem (TIMES) Catherine Thibaud-Erkey and James H. Fort Hamilton Sundstrand Space Systems International Marybeth A. Eden NASA-Johnson Space Center Water Recovery Technology," SAE Technical Paper 82 82 01-2385.

Надійшла до редакції 31.03.2021

**Риферт В.Г.,** *док. техн. наук* [1]
**Анатычук Л.И.,** *акад. НАН Украины*[2,3]
**Соломаха А. С.,** *канд. техн. наук*[1]
**Барабаш П.О.,** *канд. техн. наук*[1]
**Петренко В. Г.,** *канд. техн. наук*[1]
**Снеговской О. П.**[1]

[1]НТУ «КПИ им. И. Сикорского», ул. Политехническая, 6,
Киев, 03056, Украина, *e–mail: vgrifert@ukr.net;*
[2]Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
*e–mail: anatych@gmail.com;*
[3]Черновицкий национальный университет
им. Юрия Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58012, Украина

# ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАСОСА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И РАСХОД ЭНЕРГИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДИСТИЛЛЯТОРА

*В статье проведен анализ работы термоэлектрического теплового насоса в комплексе с центробежным дистиллятором для регенерации сточных вод системы жизнедеятельности человека в условиях будущих длительных космических миссий. Показана зависимость удельного потребления энергии системы от времени при разных мощностях теплового насоса, проанализировано влияние разности температур теплоносителей на эффективность работы теплового насоса. Библ. 24, рис. 5, табл. 2.*
**Ключевые слова**: термоэлектричество, тепловой насос, дистиллятор.

**V.G. Rifert,** *D.Sc. in Engineering*[1]
**L.I. Anatychuk,** *acad. of the NAS of Ukraine*[2,3]
**A.S. Solomakha,** *Ph.D. in Engineering*[1]
**P.O. Barabash,** *Ph.D. in Engineering*[1]
**V.G. Petrenko,** *Ph.D. in Engineering*[1]
**O.P. Snegovskoy**[1]

[1]NTUU “Ihor Sikorskyi KPI”, 6, Politekhnicheskaya str,
Kyiv, 03056, Ukraine, *e–mail: vgrifert@ukr.net;*
[2]Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine, *e–mail: anatych@gmail.com;*
[3]Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58012, Ukraine

# INFLUENCE OF THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A THERMOELECTRIC HEAT PUMP ON THE PERFORMANCE AND ENERGY CONSUMPTION OF A CENTRIFUGAL DISTILLER

*The paper analyzes the operation of a thermoelectric heat pump in combination with a centrifugal distiller for the regeneration of wastewater from a human life system in the conditions of future long-term space missions. The time dependence of the specific energy consumption of the system at different capacities of the heat pump is shown, the influence of the temperature difference of the heat carriers on the efficiency of the heat pump is analyzed. Bibl. 24, Fig. 5, Tabl. 2.*
**Key words**: thermoelectricity, heat pump, distiller.

## References

1. Sargusingh M. J., Callahan M. R. (2015). Cascade distillation system design for safety and mission assurance. *45th International Conference on Environmental Systems ICES-2015-151* (12-16 July 2015, Bellevue, Washington).
2. 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).
3. Lubman A., MacKnight A., Rifert V., Zolotukhin I. and Pickering K. (2006). Wastewater processing cascade distillation subsystem. Design and evaluation. *SAE International* (2006-01-2273, July 2006).
4. 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).
5. Callahan M., Patel V., Pickering K.D. (2010). Cascade distillation subsystem development: early results from the exploration life support distillation technology comparison test. *40th International Conference on Environmental Systems* (11 July 2010 - 15 July 2010, Barcelona, Spain).
6. Rifert V., Barabash P., Goliad N. (1990). Methods and processes of thermal distillation of water solutions for closed water supply systems, SAE Paper 901249. *20th Intersociety Conference on Environmental Systems* (Williamsburg, July 1990).
7. Samsonov N., Bobe L., Novikov V., Rifert V., et al. (1994). Systems for water reclamation from humidity condensate and urine for space station, SAE Paper 941536 *The 24th International Society Conference on Environmental Systems* (June, 1994).
8. 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, SAE Paper 951605 *The 25th International Conference on Environmental Systems* (San Diego, July 1995).
9. 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).
10. 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* (Denver, July 1999).
11. 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. *The 29th International Conference on Environmental Systems* (Denver, July 1999).

12. 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. *The 30th International Conference on Environmental Systems* (Toulouse, France, 10-13 July 2000).
13. Rifert V., Usenko V., Zolotukhin I., MacKnight A. and Lubman A. (2001). 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* (Orlando, July 2001).
14. Rifert V.G., Anatychuk 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.
15. Rifert V.G., Barabash P.A., Usenko V., Solomakha A.S., Anatychuk L.I., Prybyla A.V. (2017). Improvement the cascade distillation system for long-term space flights. *The 68th International Astronautical Congress (IAC)* (Adelaide, Australia, 25-29 September 2017). IAC-17-A1.IP.25.
16. Rifert Vladimir G., Anatychuk 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. *The 70th International Astronautical Congress (IAC)* (Washington D.C., United States, 21-25 October 2019). IAC-19-A1, IP, 11x54316.
17. Rifert V.G., Anatychuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Strikun A.P., Solomakha A. S, Petrenko V.G., Prybyla A.V. (2019).Evolution of centrifugal distillation system with a thermoelectric heat pump for space missions. Part 3. Analysis of local and integral characteristics of centrifugal distillation system with thermoelectric heat pump. *J. Thermoelectricity*, 3, 5 – 19.
18. Rifert V.G., Anatychuk L.I., Barabash P.O., Usenko V.I., Strikun A.P., Solomakha A. S, Petrenko V.G., Prybyla A.V. (2019). Comparative analysis of thermal distillation methods with heat pumps for long space flights. *J.Thermoelectricity*, 4, 5 – 17.
19. Solomakha A.S., Anatychuk L.I., Rifert V.G., Barabash P.A., Usenko V., Petrenko V. (2020). Thermal distillation system for deep space missions: rationale for the choice. *The 71st International Astronautical Congress (IAC)* (The CyberSpace Edition 12-14 October 2020). IAC-20-A1,VP,15,x61344. 7 pages.
20. Rifert V.G., Barabash P.A., Solomakha A.S., Usenko V., Sereda V.V., Petrenko V.G. (2018). Hydrodynamics and heat transfer in centrifugal film evaporator. *Bulgarian Chemical Communications*, Vol.50, Special Issue K., 49-57.
21. Rifert V.G., Solomakha A.S., Barabash P.A., Usenko V., Sereda V.V. (2020). Justification of the method for calculating heat transfer in film evaporators with a rotating surface. *Bulgarian Chemical Communications*, Vol.52, Special Issue F,95-102. DOI: 10.34049/bcc.52.F.0016
22. 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
23. Dehner G.F. 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.
24. 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. 2000-01-2385

Submitted 31.03.2021