

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 629.78.048

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/22>

**Соломаха А.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Барабаш П.О.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ярошевич М.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ СТУПЕНІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ДИСТИЛЯЦІЇ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

*Коротко проаналізовано існуючі та перспективні технології для регенерації води в умовах космічного польоту. Показано недоліки встановленого зараз на Міжнародній космічній станції відцентрового вакуумного дистилятора, будова якого не дозволяє використовувати його для майбутніх далеких космічних місій. Показано, що вказаних недоліків позбавлені розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського відцентрові дистилятори з термоелектричним тепловим насосом в якості джерела теплоти. Описано принципову схему такого відцентрового дистилятора та розглянуто принцип його роботи. Побудовано математичну модель для визначення оптимальної кількості ступенів у багатоступінчатому дистиляторі, в якій враховано ефективність роботи термоелектричного теплового насосу та фізико-хімічну температурну депресію розчину в процесі дистиляції. На основі попередньо отриманих експериментальних даних було визначено ефективність термоелектричного теплового насосу в залежності від загального температурного перепаду на дистиляторі. Розраховано загальний температурний перепад в залежності від кількості ступенів дистилятора, що дозволило отримати рівняння для визначення ефективності (COP) термоелектричного теплового насосу при різній кількості ступенів дистилятора. Для знаходження залежності впливу концентрації розчину NaCl на фізико-хімічну температурну депресію при вакуумі було використано власні експериментальні дані. Показано, що для отримання 5-7 л/год оптимальна конструкція дистилятора з 5-6 ступенями. Показано, що при зменшенні потужності термоелектричного теплового насосу продуктивність по виробленому дистиляту зменшується, але ефективність системи зростає (зменшуються витрати енергії на отримання 1 кг дистиляту). Наведено спрощення, які були використано при побудові математичної моделі та показано перспективи для майбутніх досліджень.*

**Ключові слова:** дистиляція, регенерація води, термоелектричний тепловий насос, оптимізація, математична модель.

#### Постановка проблеми.

В найближчі роки такі компанії як НАСА, SpaceX, Боїнг, планують довготривалі місії людей на Місяць та Марс. Далекі пілотовані космічні місії не можуть бути реалізовані без використання спеціальних систем регенерації води з різноманітних стічних вод життєдіяльності членів екіпажу [1]. Розробка надійних і ефективних систем реге-

нерації води для пілотованих космічних об'єктів дозволяє істотно знизити витрати на забезпечення космонавтів водою.

Відсутність на пілотованих космічних об'єктах гравітації суттєво ускладнює реалізацію багатьох традиційних для земних умов технологічних процесів, в тому числі процесів дистиляції. З цієї точки зору створення штучної гравітації за

рахунок використання відцентрових сил (відцентрові дистилятори) є перспективним напрямком розробки ефективних систем життєзабезпечення для пілотованих космічних місій [2]. Системи, які базуються на цьому способі, можуть забезпечити регенерацію води з усіх відомих рідких продуктів життєдіяльності космонавтів (сеча, санітарно-гігієнічна вода, конденсат атмосферної вологи) із забезпеченням високої якості отриманого дистиляту.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Технологія відцентрової дистиляції з паровим компресором (VCD) із невисокою швидкістю обертання (до 180 об/хв.) з 2008 року використовується американцями для регенерації води на МКС і є основною в програмі NASA [3-4]. Незважаючи на великий прогрес в розробці і дослідженні VCD в США ця технологія має деякі суттєві недоліки. До них відносяться значний ріст витрати енергії (до 100%) при збільшенні концентрації рідини, що випаровується, невелика продуктивність системи (менше 3 л/год очищеної води), завелика питома вага пристрою (більше 50кг на 1л очищеної води), неможливість функціонування системи при ушкодженні парового компресора, необхідність встановлення допоміжних насосів для забезпечення подачі в систему і циркуляції в ній робочих рідин. В результаті було зроблено висновок про неможливість використання VCD для далеких космічних місій до Місяця та Марсу [5].

Розроблений в КПІ ім. Ігоря Сікорського багатоступеневий відцентровий дистилятор дозволяє отримати близько 7 л/год очищеної води, що дає змогу переробити усі відходи життєдіяльності на борту пілотованого космічного апарата з командою до 7 осіб. Використання термоелектричного теплового насоса в якості джерела теплоти суттєво знижує питоме електроспоживання системи. В результаті питома витрата енергії на виробництво чистої води менше 100 Вт·год/л і на цей показник практично не впливає ступінь концентрування вихідної рідини [6-8]. Для циркуляції рідин не потрібні допоміжні насоси – переміщення рідин в системі, а також відведення продукту (дистиляту) і концентрату відбувається за рахунок використання відцентрових сил.

На сьогоднішній день виготовлено одноступеневий (продуктивність до 1,5 кг/год) [6], триступеневий (до 3,5 кг/год) [7] та п'ятиступеневий (до 7 кг/год) [8] дистилятори. Всі вони здатні ефективно переробляти рідкі відходи життєдіяльності людини, що показано в численних експериментальних роботах.

#### Постановка завдання

На основі раніше отриманих експериментальних даних визначити оптимальну кількість ступенів для відцентрового дистилятора з точки зору мінімальної витрати енергії на процес дистиляції. Розрахунок виконано для випадку дистиляції розчину NaCl.

#### Виклад основного матеріалу досліджень.

Система регенерації води, розроблена в «КПІ ім. Ігоря Сікорського» з використанням відцентрового вакуумного дистилятора (ВД) в поєднанні з термоелектричним тепловим насосом (ТТН) представлена на рис. 1. У системі використовується багатоступінчастий відцентровий дистилятор (частота обертів  $600 \div 1200$  об/хв).

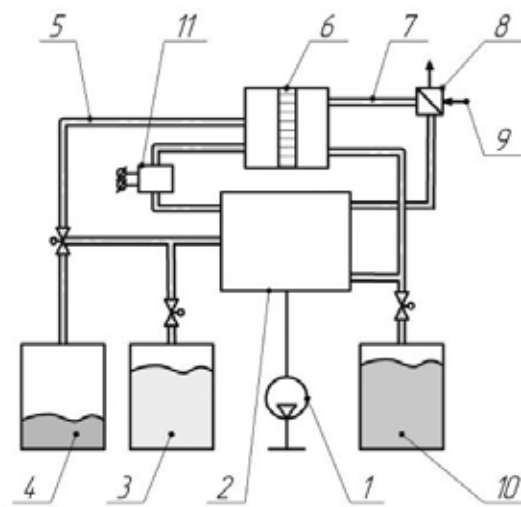


Рис. 1. Принципова схема системи вилучення води з рідких відходів ВВД: 1 – вакуум-насос; 2 – дистилятор; 3 – ємність вихідної рідини; 4 – ємність концентрату; 5 – «гарячий» контур; 6 – термоелектричний тепловий насос; 7 – «холодний» контур; 8 – балансуєчий охолоджувач; 9 – подача охолоджуючої рідини; 10 – збірник продукту-дистиляту; 11 – резервний підігрівач

Робочий розчин надходить з ємності 3 у вакуумований ротор, що обертається, за допомогою вакуум-насоса 1, заповнює до необхідного рівня ступені випаровування відцентрового дистилятора 2, гарячий контур 5 і гарячу сторону термоелектричної батареї 6. Холодна сторона термоелектричної батареї з'єднується з кінцевим конденсатором дистилятора за допомогою контуру 7 («холодний» контур). Відведення надлишкового тепла із системи здійснюється за допомогою холодильника 8. Дистилят-продукт, як результат випарно-конденсаційного процесу, відкачується в ємність 10, а концентрат – в ємність 4. При виході з ладу ТТН, система зможе працювати

зі зниженою ефективністю при підігріві рідини в гарячому контурі за допомогою підігрівача 11. Дистилятор виконаний багатоступінчастим з поверхнями теплопередачі, що обертаються. Вони розділяють розчин і конденсат. Ряд вбудованих насосів (на основі трубок Піто) забезпечує зрошення теплообмінних поверхонь у кожному ступені дистилятора. Стічні води послідовно проходять через кожну з ступенів випаровування.

Кінцевий ступінь випаровування є ступенем миттєвого закипання перегрітого розчину, який перегрівається на гарячій стороні ТТН. Отримана в цьому ступені пара є гріючою у попередньому ступені дистилятора. Дистилят з кожного ступеня та пара ступеня випаровування з найнижчим тиском надходять у кінцевий конденсатор, що охолоджується дистилятом, який циркулює по контуру: кінцевий конденсатор – холодна сторона ТТН – кінцевий конденсатор.

Надлишковий дистилят відкачується з апарата трубкою Піто. Після досягнення в гарячому контурі максимальної (розрахункової) концентрації залишку, що не випарувався, його витісняють із зовнішньої частини гарячого контуру в окремий резервуар свіжим розчином, і система може почати новий цикл.

Відцентрові сили, що виникають при обертанні ротора дистилятора, забезпечують транспортування всіх рідин у системі та роботу дистилятора при зниженій гравітації без застосування зовнішніх насосів.

#### Розрахункові формули

Оптимальне число ступенів багатоступінчастого відцентрового дистилятора для роботи в комплексі з ТТН на борту пілотованого космічного апарата можна отримати наступним чином.

Ефективність роботи теплового насосу:

$$COP_{ТТН} = \frac{Q_1}{N_{ТТН}}$$

де:  $Q_1$  – кількість теплоти, що підведена в першу ступінь дистилятора;

$N_{ТТН}$  – електрична потужність ТТН.

Питома витрата енергії в системі багатоступінчастого відцентрового дистилятора в комплексі з ТТН визначається формулою

$$\eta = \frac{G_d}{N_{ТТН} + N_D}, \quad (1)$$

де  $N_D$  – електрична потужність приводу дистилятора;

$G_d$  – продуктивність дистилятора по дистиляту.

Продуктивність дистилятора визначається по формулі:

$$G_d = \frac{\sum Q}{r} = \frac{n \cdot Q_1}{r} = \frac{N_{ТТН} \cdot COP_{ТТН} \cdot n}{r}, \quad (2)$$

де  $n$  – число ступенів;

$r$  – середня теплота фазового переходу води в ступенях випаровування багатоступінчастого дистилятора.

Таким чином (без врахування  $N_D$ ) можна записати:

$$\eta = \frac{N_{ТТН} \cdot COP_{ТТН} \cdot n}{(N_{ТТН} + N_D)r} \approx \frac{COP_{ТТН} \cdot n}{r}, \quad (3)$$

З цієї формули видно, що вигідно збільшувати кількість ступенів  $n$ . Проте збільшення кількості ступенів в дистиляторі веде до росту сумарного температурного перепаду в ньому:

$$\Delta t = t_{ex} - t_{вих}$$

де  $t_{ex}$  – температура розчину на вході в дистилятор;

$t_{вих}$  – температура дистиляту на виході з дистилятора.

В свою чергу зростання загального температурного перепаду призводить до зниження коефіцієнта ефективності ТТН (див рис. 2). Тобто повинна бути оптимальна кількість ступенів для максимальної ефективності роботи відцентрового дистилятора.

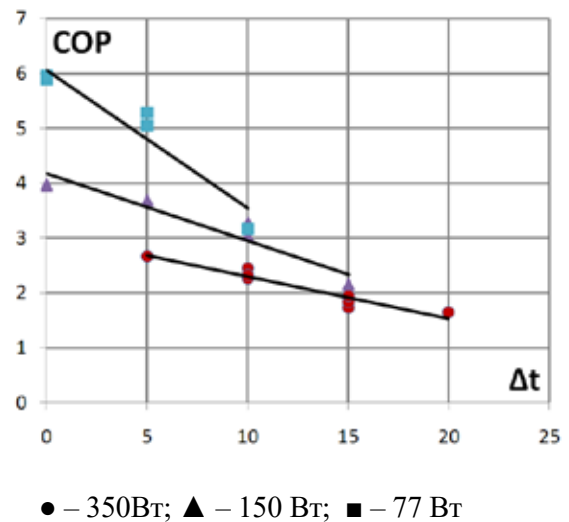


Рис. 2. Вплив різниці температур та електричної потужності ТТН на COP (витрата води в обох контурах 160 кг/год) [9]

Таким чином, для розрахунку ефективності потрібно знати загальний перепад температур в апараті в залежності від кількості ступенів.

**Визначення температурного перепаду у відцентровому дистиляторі**

Очевидно, що загальний температурний перепад у відцентровому дистиляторі є сумою температурних перепадів на кожній ступені:

$$\Delta t = \sum \Delta t_i = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_i \quad (4)$$

Перепад температури в одній ступені з урахуванням фізико-хімічної температурної депресії можна записати як:

$$\Delta t_i = (Q_i / KF) + \Delta t_{depr} \quad (5)$$

де:  $Q_i / KF$  – температурний перепад на теплообмінній поверхні, за експериментальними даними  $\approx 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  [10];

$\Delta t_{depr}$  – фізико-хімічна температурна депресія.

Фізико-хімічну температурну депресію було визначено експериментально в роботах [6, 10], див. рис. 3.

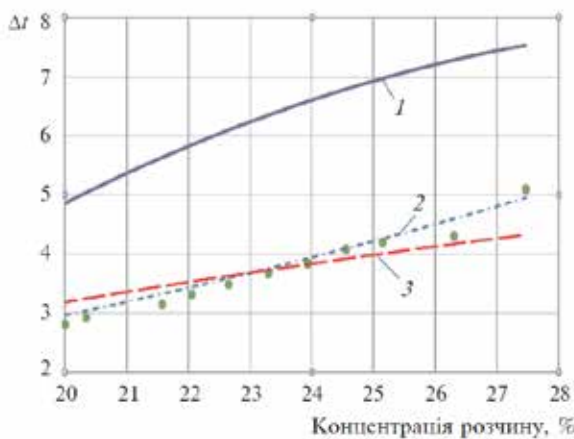


Рис. 3. Вплив концентрації розчину NaCl на фізико-хімічну температурну депресію: 1 – фізико-хімічна температурна депресія за атмосферного тиску; 2, 3 – фізико-хімічна температурна депресія за температури 40 °С, розрахована по [11] і [12]; • – експеримент.

**Розрахунок оптимальної кількості ступенів**

Крім розглянутої вище різниці температур в багатоступеневому дистиляторі існують і інші фактори, які впливають на його ефективність: теплові втрати та перетоки теплоти; витрати теплоти на догрівання свіжого розчину до температури насичення в ступені випаровування, в яку він подається; догрівання розчину, який перетікає з ступені з меншим тиском до ступені з більшим тиском та ін. Це призводить до зменшення кількості теплоти, яка іде на випаровування розчину при переході від ступені з більшим тиском до ступені з меншим тиском. З експериментальних даних [10] можна орієнтовно прийняти, що

$$Q_i = 0,95^{i-1} \cdot Q_1 \quad (6)$$

де  $Q_i$  – витрати теплоти на випаровування в  $i$ -тій ступені.

Враховуючи наведені припущення, за допомогою формул 1-6 було побудовано розрахункову модель та визначено ефективність дистилятора при його роботі на розчині NaCl для трьох різних потужностей теплового насоса (див. рис. 4). Було прийнято, що дистилятор працює в стаціонарному режимі, концентрація розчину в останній ступені випаровування для всіх випадків дорівнює 27%, а свіжий розчин має початкову концентрацію 3%

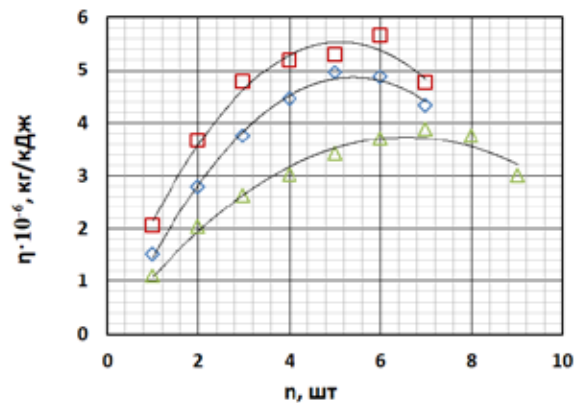


Рис. 4. Ефективність роботи дистилятора в залежності від кількості ступенів. Потужність теплового насоса: ▲ – 350Вт; ◆ – 150 Вт; ■ – 77 Вт

Як видно з рис. 4 оптимум по ефективності роботи дистиляційної системи залежить від потужності теплового насоса. Чим менша потужність теплового насоса, тим більш ефективно працює дистилятор, тобто менші затрати енергії на виробництво дистиляту. При цьому для потужності 77 Вт і 150 Вт максимум ефективності система досягає коли дистилятор має 5 ступенів. Для потужності 350 Вт цей максимум знаходиться, коли дистилятор має 7 ступенів. Це відбувається з тієї причини, що, як видно з рис. 2, чим менша потужність ТТН, тим більш суттєвим є вплив різниці температур на його COP. Для потужності 350 Вт залежність  $COP = f(\Delta t)$  має найбільш пологої характеристику, в результаті зростання загальної різниці температур внаслідок збільшення кількості ступенів не так сильно погіршує ефективність систем. Тому для цього випадку оптимальна кількість ступенів більше, ніж для меншої потужності ТТН.

**Висновки.**

В класичній багатоступеневій системі дистиляції (випарній системі) додавання кожного наступного ступеня підвищує ефективність установки. В резуль-

таті вибір оптимальної кількості ступенів здійснюється на основі техніко-економічного розрахунку.

Для системи дистиляції, в якій в якості джерела теплоти використовується термоелектричний тепловий насос ситуація кардинально змінюється. Як і для будь-якого теплового насоса, COP ТТН в першу чергу залежить від загального температурного перепаду між гарячою і холодною сторонами. Додавання кожної наступної ступені призводить до зростання цього температурного перепаду  $\Delta t$ . Проведений аналіз дозволив оцінити оптимальну кількість ступенів для системи багатоступінчастої дистиляції в комплексі з ТТН. При продуктивності системи по дистиляту  $G_d = 3 \dots 5$

л/год оптимальне число становить 5 ступенів. За необхідності збільшення продуктивності до  $G_d = 7$  л/год необхідно збільшити потужність ТТН і оптимальна кількість зростає до 7 ступенів.

Необхідно відмітити, що аналіз був проведений з деякими спрощеннями, зокрема не враховувалася необхідна потужність на привод ротора дистилятора. Зі збільшенням числа ступенів в дистиляторі збільшується кількість занурених у рідину черпакових насосів, отже, збільшується і потужність на привод дистилятора. В наступних роботах планується доповнити систему рівнянь, щоб при визначенні ефективності системи врахувати затрачену роботу на привод дистилятора.

#### Список літератури:

1. H. W. Jones. Should Oxygen, Hydrogen, and Water on the Moon Be Provided by Earth Supply, Life Support Recycling, or Regolith Mining? 50th International Conference on Environmental Systems, 12-15 July 2021. ICES-2021-147
2. П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.І. Усенко, В.Г. Петренко. Центробежные дистиляторы в системах жизнеобеспечения пилотируемых космических объектов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 5(149). – с. 28-35.
3. P. Wieland, C. Hutchens, D. Long, B. Salyer. Final Report on Life Testing of the Vapor Compression Distillation/Urine Processing Assembly (VCD/UPA) at the Marshall Space Flight Center (1993 to 1997). August 1998
4. 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.
5. L. K. Kelsey, S.P. Boyce, G. Speight, P. Pasadilla, P. Tewes, E. Rabel, C. Meyer. Closing the Water Loop for Exploration: 2020-2021 Status of the Brine Processor Assembly. 50th International Conference on Environmental Systems, 12-15 July 2021. ICES-2021-428.
6. A.S. Solomakha, V.G. Rifert, P.A. Barabash, V. Petrenko, M. Yaroshevych. Centrifugal flash distiller for life support system. 72st International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates, 25-29 October 2021. IAC-20- A1,IP,6,x66795. 7 pages.
7. V.G. Rifert, P.A. Barabash, V. Usenko, A.S. Solomakha, L.I. Anatychuk, 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.
8. В.Г. Ріферт, Л.І. Анатичук, П.О. Барабаш, А.С. Соломаха, В.І. Усенко, А.В. Прибыла, В.Г. Петренко, В.В. Серета Порівняльний аналіз методів термічної дистиляції з тепловими насосами для тривалих космічних польотів // Термоелектрика. – 2019. – № 4. – с. 5 – 18.
9. П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.І. Усенко, В.Г. Петренко, В.П. Боянівський. Влияние режимных параметров на эффективность работы термоэлектрического теплового насоса ALTEC-7005 // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2018. – № 4. – с. 29-33.
10. П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.Г. Ріферт, В.Г. Петренко, В.І. Усенко, В.П. Боянівський. Кристалізація розчину NaCl у вакуумному відцентровому плівковому дистиляторі // Наукові вісті КПП. – 2019. – № 4. – с. 77-82.
11. Б.П. Никольский. Справочник химика, 2 изд. Москва, Химия, 1986.
12. И.И. Черныбильский. Машины и аппараты химических производств, 3 изд. Москва, Машиностроение, 1974.

**Solomakha A.S., Barabash P.O., Yaroshevych M.V. DETERMINATION OF THE OPTIMAL NUMBER OF STAGES FOR A DISTILLATION SYSTEM WITH A THERMOELECTRIC HEAT PUMP**

*Existing and perspective technologies for water regeneration for deep space missions are briefly analyzed. The shortcomings of the centrifugal vacuum distiller currently installed at the International Space Station are shown. The design of this distiller does not allow it to be used for deep space missions. It is shown that developed in Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute centrifugal distillers with thermoelectric heat pump (as a heat source) could remove these shortcomings. The schematic diagram of such a centrifugal distiller is described and the principle of its operation is considered. A mathematical model for determining the optimal number of stages in a multistage distiller is made, which takes into account the efficiency of the thermoelectric heat pump and temperature depression of the solution during distillation. Based on previously obtained experimental data, the efficiency of the thermoelectric heat pump depending on the total temperature difference on the distiller was determined. The total temperature difference depending on the number of stages of the distiller was calculated, which allowed to obtain the equation for determining the efficiency (COP) of thermoelectric heat pump with different number of stages of the distiller. To find the dependence of the effect of NaCl solution concentration on the temperature depression under vacuum, we used our own experimental data. It is shown that to obtain 5-7 liters /h the optimal design of the distiller with 5-6 stages. It is shown that when the power of a thermoelectric heat pump decreases, the productivity of the produced distillate decreases, but the efficiency of the system increases (energy consumption for 1 kg of distillate decreases). The simplifications that were used in the mathematical model are presented and the prospects for future research are shown.*

**Key words:** *distillation, water regeneration, thermoelectric heat pump, optimization, mathematical model.*