УДК 621.176 **DOI 10.20535/1813-5420.2.2022.261363**

П.О. Барабаш, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1252-494X
А.С. Соломаха, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1061-6277
В.Г. Петренко, канд. техн. наук, с.н.с., ORCID 0000-0001-6591-9550
В.Ю. Мараховська, магістрантка, ORCID 0000-0002-0039-2054
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АВТОНОМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУМИННОГО КОМПРЕСОРА ДЛЯ ВІДЦЕНТРОВОЇ СИСТЕМИ ДИСТИЛЯЦІЇ

Стаття присвячена розробці та дослідженню енергозберігаючих технологій в промисловій теплоенергетиці, а саме використанню струминного компресора для підвищення енергоефективності дистиляційної установки на базі відцентрового дистилятора. Використання відцентрових сил в дистиляційній установці інтенсифікує в ній теплообмінні процеси, а значить зменшує матеріалоємність системи. Використання теплового насоса на базі струминного компресора утилізує теплоту конденсації вторинної пари при випаровуванні розчину, що забезпечує зменшення питомих витрат енергії на отримання дистиляту. В статті приведено результати автономних досліджень оригінального струминного компресора, в якому передбачено кріплення робочого сопла на нерухомому корпусі відцентрового дистилятора, а камери змішування і дифузора на роторі відцентрового дистилятора, що дозволяє розробити відцентровий дистилятор без використання ущільнень між паровими порожнинами з різним тиском. Проведено порівняння експериментальних характеристик струминного компресора з розрахунковими.

Проведені експериментальні дослідження струминного компресора підтвердили його ефективність, показано задовільне співпадіння експериментальних і розрахункових залежностей. Показано, що зміщення осі робочого сопла струминного компресора відносно осі змішувальної камери на ± 0,52 мм зменшує коефіцієнт впорскування менше ніж на 10%. Робиться висновок, що осі робочого сопла і змішувальної камери можуть не збігатися абсолютно точно в реальних умовах експлуатації. Зміна довжини вхідного перерізу змішувальної камери в межах ± 1 мм і зміщення осі робочого сопла струминного компресора відносно осі змішувальної камери в межах ± 0,2 мм допускається при проектуванні та майбутніх експериментальних дослідженнях дистилятора зі струминним компресором.

Результати експериментального дослідження дають можливість в майбутньому розробити відцентровий дистилятор зі струминним компресором, в якому робоче сопло компресора буде закріплено на нерухомому корпусі, а дифузор і змішувальна камера – на роторі.

Ключові слова: *регенерація води, струминний компресор, дистилятор, ефективність***.**

Вступ. В системах регенерації води на пілотованих космічних об'єктах перспективними є відцентрові термічні дистилятори [1-2]. До таких систем висуваються жорсткі вимоги щодо габаритів, маси та енерговитрат. Тому при їх розробці актуальним є використання різних методів інтенсифікації процесів теплообміну (забезпечують зниження габаритів та маси), а також методів зниження питомого енергоспоживання (багатоступінчаста випарка, застосування теплових насосів). В якості теплового насосу можуть бути: термоелектрична батарея (ТТН), механічний або струминний компресор. Зокрема, на Міжнародній космічній станції (МКС) працює відцентровий дистилятор з механічним компресором [3-6]. На основі 15 років експлуатації дистилятора на МКС було зроблено висновок, що незважаючи на в цілому хороші показники, для майбутніх далеких космічних місій потрібна інша система. Застосування механічного компресора не дозволяє забезпечити достатню надійність системи через відсутність надійних промислових зразків.

Дистилятор з термоелектричним тепловим насосом було детально досліджено раніше, нині він доведений до пілотного зразку [7-16]. Він має високу ефективність, проте вимагає застосування такого складного у виготовленні та експлуатації елемента, як термоелектрична батарея.

Застосування в якості теплового насоса струминного компресора (парового ежектора) є перспективним внаслідок його простоти, малих габаритів та маси. У його конструкції немає вузлів і деталей, на роботу яких можуть впливати вібрація, ударні навантаження, а також елементів, які мають обмежений ресурс, що гарантує високу надійність пристрою. Слід зазначити, що створення дистилятора на будь-яку задану потужність, при використанні в ньому струменевого компресора, не призведе до труднощів технологічного плану.

Мета та завдання. Враховуючи необхідну малу продуктивність дистиляційної системи для пілотованих космічних апаратів (1...10 л/год) і, відповідно, мініатюрні розміри необхідного струменевого компресора, виникає питання придатності застосування відомих методик розрахунку струменевих

компресорів для нашого випадку. У зв'язку з цим у цій роботі було проведено експериментальні дослідження струменевого компресора продуктивністю по робочій парі (0,15...0,25) кг/годину і проведено зіставлення отриманих результатів з розрахунковими характеристиками за відомими методиками.

Опис схеми та методики дослідження.

Експериментальні дослідження характеристик струминного компресора були проведені на стенді, схема якого наведена на рис. 1.

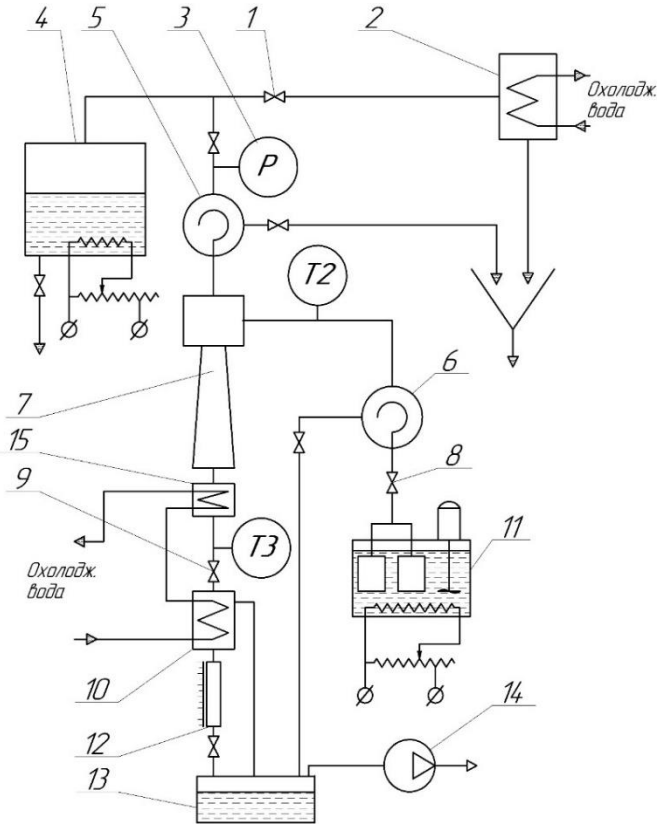


Рисунок 1 – Принципова схема експериментальної установки.

Експериментальна установка складається з струминного насоса 7, котла робочої пари 4, генератора пари для інжекції 11, краплеуловлювачів 5 і 6, основного конденсатора 10, допоміжного конденсатора 2, ємності збору конденсату 13, вакуум-насоса 14, регулюючої і запірної арматури 1,8,9, системи електроживлення, а також приладів та обладнання, призначених для проведення необхідних замірів.

Робота установки відбувається в такий спосіб. Робоча пара від котла 4 з тиском 1,5 ата надходить через краплеуловлювач 5 (призначений для відділення і відведення в дренаж конденсату) до сопла струминного насосу 7. Продуктивність котла робочої пари 4 регулюється зміною електричної потужності ТЕНів та зміною витрати пари через регулюючий вентиль 1 до допоміжного конденсатора 2. Пара від генератора пари для інжекції 11 через регулюючий вентиль 8, призначений для зміни тиску інжектованої пари на вході в струминний насос 7, і краплеуловлювач 6 надходить у приймальну камеру струминного насоса 7. В якості генератора пари 11 використано рідинний термостат СЖМК-19/2,5 з зануреними в нього двома заповненими водою скляними посудинами.

Стиснута пара на виході з струминного насосу 7 через регулюючий вентиль 9 (призначений для зміни тиску змішаного потоку пари на виході з дифузора струминного насосу 7) надходить в основний конденсатор 10. Конденсат стисненої пари з конденсатора 11 через мірник 12 надходить у ємність для збору конденсату 13. Початкове розрідження і відсмоктування неконденсованих газів проводиться вакуум-насосом 14. Перегрів стисненої пари знімався охолоджувачем 15.

На пульті керування роботою установки розміщені всі вимірювальні та контрольні прилади, а також пристрої комутації.

На рис. 2 наведена принципова схема струминного компресора.

Конструкція дослідного зразка струминного компресора дозволяла змінювати відстань *L1* від зрізу робочого сопла до входу в циліндричну камеру змішування 1 в межах 7,4…10,4 мм. Була також передбачена можливість задавати есцентриситет осі парового каналу робочого сопла2 по відношенню до осі парового каналу камери змішувння 1 в межах ± 0,52мм (див. рис. 3) шляхом провертання несиметричного сопла 2 на певний кут в посадочному отворі корпуса 3.

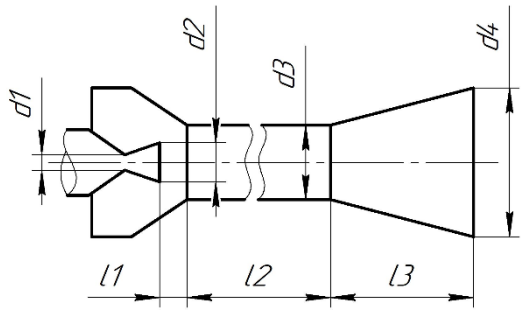
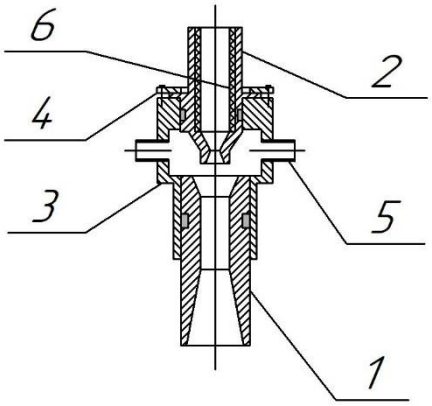


Рисунок 2 – Схема струминного компресора.



1 – камера змішування (дифузор), 2 – робоче сопло, 3 – корпус, 4 – прижимне кільце, 5 – трубки для підведення пари для інжекції, 6 – теплоізоляційна вставка
Рисунок 3 – Конструкція струминного компресора

У процесі проведення експериментів з дослідження характеристик струминного компресора при автономному режимі його роботи вимірювалися наступні величини: витрата конденсату стисненої пари на виході з струминного компресора, тиск робочої пари, температура насичення пари для інжекції та температура насичення стисненої пари виході з дифузора струминного компресора.

Вимірювання витрати конденсату стисненої пари на виході зі струминного компресора здійснювалося об'ємним методом, для чого служив мірник 12 (див. рис. 1). Надлишковий тиск робочої пари вимірювався манометром 3 (клас точності 0,4). Атмосферний тиск визначався барометром-анероїдом (клас точності 1,5).

Температура насичення інжектованої та стисненої пари на виході з дифузора струминного компресора вимірювалися хромель-копелевими термопарами, що були розташовані в паровому об'ємі інжектованої і стиснутої пари відповідно перед входом до приймальної камери і на виході з дифузора струминного компресора 7. ЕДС термопар вимірювалася електронним цифровим вольтметром (клас точності 1,5).

Для визначення коефіцієнтів інжекції при різних ступенях стиснення $P_c/P_н$ (відношеннях тиску стиснутої пари P_c до початкового тиску пари $P_н$) була отримана залежність витрати робочої пари від її тиску перед соплом $P_р$ струминного компресора $G_Р = f(P_р)$ для сопла експериментального зразка струминного насоса. Експериментальні дані (рис. 3) підтвердили з точністю 1,5% розрахункову залежність.

Експерименти з дослідження характеристик струминного компресора проводилися при постійних тисках робочої пари (1,5 ата) і тиску пари, що ежектується 0,11 ата. Тиск стисненої пари змінювався від 0,11 до 0,16 ата через кожні 0,01 ата. При цьому витрата робочої пари приймалася $G_р = 0,2$ кг/год.

Вимірювання основних величин (тиск робочої пари перед апаратом, температури насичення обох потоків пари, витрата конденсату змішаної пари) проводилися при досягненні ними стаціонарних значень тобто таких значень, які не змінювалися протягом 3…5 хв. Для зменшення випадкової похибки після виходу на заданий режим роботи ежектора вимірювання проводилися по 3-6 разів для кожного режиму роботи струминного компресора.

Витрата інжектованої пари визначалася як різниця між витратою змішаного потоку пари, що вимірювався об'ємним методом, і витратою робочої пари. Витрата робочої пари визначалася по отриманій залежності її витрати від тиску перед соплом струминного компресора (рис. 4).

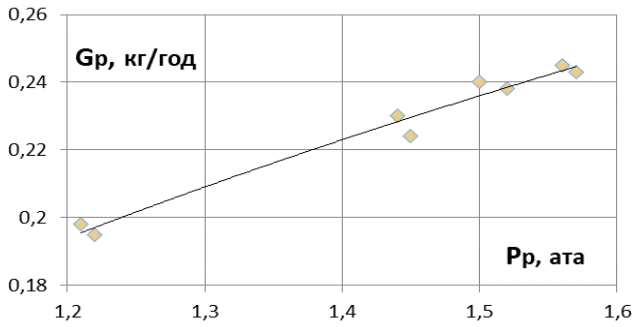


Рисунок 4 – Залежність витрати робочої пари G_p від її тиску перед соплом P_p струминного компресора при критичному діаметрі сопла $d_{кр}$ = 0,61мм.

Результати експериментальних досліджень. Експериментально встановлено вплив на роботу компресора розташування сопла не на одній осі по відношенню до камери змішування. Як видно з рис. 5, зміщення осі сопла відносно осі камери змішування в межах ±0,5 мм при всіх відношеннях тисків $P_c/P_н$ призводить до зменшення коефіцієнту інжекції не більше, ніж на 10%.

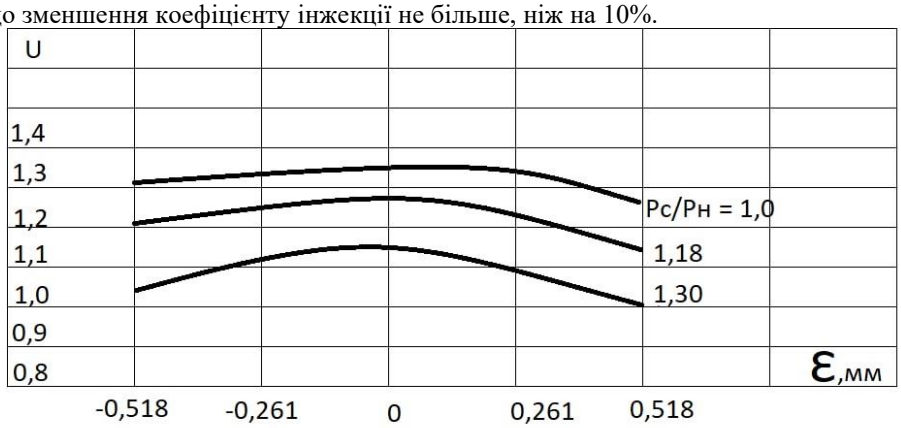


Рисунок 5 – Експериментальна залежність коефіцієнта інжекції U від ексцентриситету ε при постійній довжині вхідної ділянки

На рис. 6 наведені результати дослідження впливу довжини вхідної ділянки *L1* камери змішування струминного компресора на його коефіцієнт інжекції $U = G_н/G_p$. Із рис.6 видно, що в діапазоні ступеня стиснення компресора $P_c/P_н$ = 1,05…1,43 оптимальним значенням довжини вхідної ділянки камери змішування є відстань *L1* = 8,4мм, при діаметрі камери змішування d3 = 2,8мм та критичному діаметрі робочого сопла $d_{кр}$ = 2,8мм.

На рис. 7 зіставлені експериментальні характеристики дослідного струминного компресора з розрахунковою залежністю за методикою, викладеною в роботі [17]. Як видно з рис.7 експериментальна залежність (1) для оптимального струменевого насоса розташовується нижче розрахункової на 5% (при великих Pc/Pн) та близько15% (при малих Pc/Pн), що необхідно враховувати при проектуванні таких мініатюрних струминних компресорів.

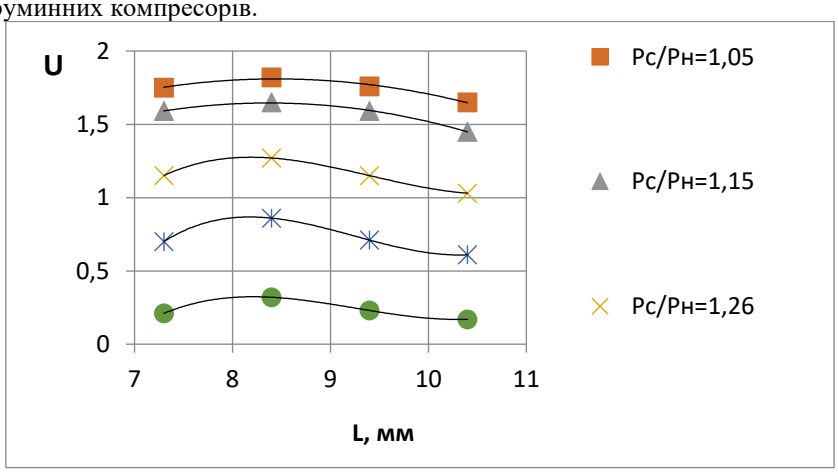


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта інжекції U від довжини вхідної ділянки камери змішування L.

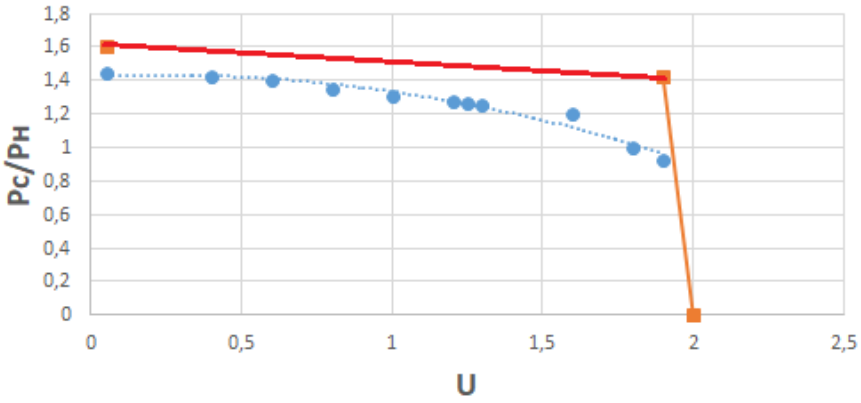


Рисунок 7 – Порівняння експериментальної залежності Pc/Pн=f(U) струминного компресора з розрахунковою: точки – експериментальні дані; суцільна лінія – розрахунок по [17].

Висновки та рекомендації

1. Проведений цикл досліджень струминного компресора підтвердив його працездатність та достатню узгодженість розрахункових та експериментальних характеристик компресора.

2. Зміщення осі робочого сопла струминного компресора щодо осі камери змішування (ексцентриситет зазначених осей) на величину ±0,52 мм дає зменшення коефіцієнта інжекції не більше ніж на 10%. Тому при складанні апарату цілком допустима неспівпадіння осей робочого сопла та камери змішування в межах ±0,2 мм.

3. Зміна довжини вхідної ділянки камери змішування в межах ±1 мм та зміщення осі робочого сопла струминного компресора щодо осі камери змішування в межах ±0,2 мм є допустимі при конструюванні та складанні дистилятора з струминним тепловим насосом.

Отримані в результаті експериментального дослідження висновки дають можливість розробити відцентровий дистилятор із струминним компресором, в якому робоче сопло компресора буде закріплено на нерухомому корпусі, а дифузор і камера змішування будуть закріплені на роторі. Така конструкція дозволить відмовитись від ущільнення між робочим соплом і камерою змішування струминного компресора.

Список використаної літератури

1. 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. https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/87310 (accessed 04 June 2022).

2.M. L. Hancock, S. J. Snyder, P. E. Hintze, An Environmental Control and Life Support System (ECLSS) for Deep Space and Commercial Habitats. 50th International Conference on Environmental Systems. 12-15 July 2021. ICES-2021-223. https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/87157 (accessed 04 June 2022).

3.J. Lee Broyan, Jr., L.Shaw, M. McKinley, C. Meyer, M. K. Ewert, W. F. Schneider, M. Meyer, G. A. Ruff, A. C. Owens, R. L. Gatens. NASA Environmental Control and Life Support Technology Development for Exploration: 2020 to 2021 Overview. 50th International Conference on Environmental Systems. 12-15 July 2021. ICES-2021-384. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210010866/downloads/ICES_384-FY2021%20ECLSS%20Overview-1676Review%20-%20Final.docx.pdf (accessed 04 June 2022).

4.Vapor compression distillation module. (Contracts NAS9-13714 $ NAS9-14234. Prepared by P. P. Nuccio June 1975. https://ntrs.nasa.gov/citations/19750023674 (accessed 04 June 2022).

5.L. D. Noble, F. H. Schubert, R. J. Pudoka. J. H. Miernik. Phase Change Water Recovery for the Space Station Freedom and Future Exploration Missions. 20th lntersociety Conference on Environmental Systems. Williamsburg, Virginia, July 9-1 2, 1990. Paper no 901294. https://www.jstor.org/stable/44472538 (accessed 04 June 2022).

6. 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 https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19980211458/downloads/19980211458.pdf (accessed 04 June 2022).

7.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 31st International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2001. https://doi.org/10.4271/2001-01-2248

8.V. G.Rifert, V. I. Usenko, I. V. Zolotukhin, A. MacKnight, A. Lubman, Cascaded Distillation Technology for Water Processing in Space, SAE Paper 2003-01-2625. 34st International Conference on Environmental Systems, Orlando, July 2003. https://doi.org/10.4271/2003-01-2625

9.A. Lubman, A. MacKnight, V. Rifert, I. Zolotukhin, K.Pickering, Wastewater Processing Cascade Distillation Subsystem. Design and Evaluation. SAE International, 2006-01-2273, July 2006. https://doi.org/10.4271/2006-01-2273

10.A. Lubman, A. MacKnight, V.Rifert, P. Barabash, Cascade Distillation Subsystem Hardware Development for Verification Testing. SAE International, 2007-01-3177, July 2007. https://doi.org/10.4271/2007-01-3177

11.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 pages.

12.V.G.Rifert, L.I.Anatychuk, P.A. Barabash, V.I.Usenko, A.P.Strikun, A.V. Prybyla, Improvement of the distillation methods by using centrifugal forces for water recovery in space flight applications (2017) Journal of Thermoelectricity, (1), pp. 71-83. http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2017_01_en.pdf

13.V. G. Rifert, L. I. Anatychuk, A. S. Solomakha, P.A. Barabash, V. Usenko, A.V. Prybyla, M. Naymark, V. Petrenko. Upgrade the centrifugal multiple-effect distiller for deep space missions. 70th International Astronautical Congress (IAC), Washington D.C., United States, 21-25 October 2019. IAC-19-A1,IP,11,x54316.

14.V.G.Rifert, L.I.Anatychuk, P.O.Barabash, V.I.Usenko, A.P.Strikun, A. S. Solomakha, V.G.Petrenko, A.V. Prybyla, 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. Journal of Thermoelectricity, 2019, 3, pp. 5 – 19. http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2019_03_en.pdf

15.V.G.Rifert, L.I.Anatychuk, P.O.Barabash, V.I.Usenko, A.P.Strikun, A. S. Solomakha, V.G.Petrenko, A.V.Prybyla (2019). Comparative analysis of thermal distillation methods with heat pumps for long space flights. Journal of Thermoelectricity, 2019, 4, pp. 5 – 17. http://jt.inst.cv.ua/jt/jt_2019_04_en.pdf

16.A. S. Solomakha, V. G. Rifert, P. A. Barabash, V. Petrenko, M. Yaroshevich. Centrifugal flash distiller for life support system. 72th International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates, 25-29 October 2021. IAC-21,A1,IP,6,x66795

17.Sokolov Ya.E., Singer N.M. Inkjet devices. M .: Energy, 1970.

P.O. Barabash, Ph.D. tech. Sciences, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-1252-494X
A.S. Solomakha, Ph.D. tech. Sciences, Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-1061-6277
V.G. Petrenko, Ph.D. tech. Sciences, S.Sc., ORCID 0000-0001-6591-9550
V.Yu. Marakhovskaya, master's student, ORCID 0000-0002-0039-2054
National Technical University of Ukraine
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

AUTONOMOUS INVESTIGATIONS OF JET COMPRESSOR FOR CENTRIFUGAL DISTILLATION SYSTEM

The article is devoted to the development and research of energy-saving technologies in the industrial heat industry, namely the use of a jet compressor to increase the energy efficiency of a distillation unit based on a centrifugal distiller. The use of centrifugal forces in the distillation unit intensifies the heat transfer processes in it, and thus reduces the material consumption of the system. The use of a heat pump based on a jet compressor utilizes the heat of condensation of secondary steam during evaporation of the solution, which reduces the specific energy consumption for the distillate. The article presents the results of autonomous research of the original jet compressor, which provides mounting of the working nozzle on the stationary body of the centrifugal distiller, and the mixing chamber and diffuser on the rotor of the centrifugal distiller, which allows to develop a centrifugal distiller without The experimental characteristics of the jet compressor are compared with the calculated ones.

Studies of the jet compressor confirmed its efficiency and sufficient consistency of the calculated and experimental characteristics of the compressor. Shifting the axis of the working nozzle of the jet compressor relative to the axis of the mixing chamber (eccentricity of these axes) by ± 0.52 mm gives a reduction in the injection ratio of not less than 10%. Therefore, when assembling the apparatus, it is quite permissible that the axes of the working nozzle and the mixing chamber do not coincide within ± 0.2 mm. Changing the length of the inlet section of the mixing chamber within ± 1 mm and shifting the axis of the working nozzle of the jet compressor relative to the axis of the mixing chamber within ± 0.2 mm are allowed when designing and assembling a distiller with jet compressor.

The results of the experimental study make it possible to develop a centrifugal distiller with a jet compressor, in which the working nozzle of the compressor will be mounted on a fixed body, and the diffuser and mixing chamber will be mounted on the rotor. This design will eliminate the seal between the working nozzle and the mixing chamber of the jet compressor.

Key words: *water regeneration, jet compressor, distiller, efficiency.*

Надійшла 9.06.2022
Received 9.06.2022