

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.4.181280

УДК 629.78.048:628.16.048

П.О. Барабаш¹, А.С. Соломаха^{1*}, В.Г. Ріферт¹, В.Г. Петренко¹, В.І. Усенко¹, В.П. Боянівський²¹КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна²ТОВ “Роберт Бош Лтд.”, Київ, Україна

*corresponding author: as_solomaha@ukr.net

КРИСТАЛІЗАЦІЯ РОЗЧИНУ NaCl
У ВАКУУМНОМУ ВІДЦЕНТРОВОМУ ПЛІВКОВОМУ ДИСТИЛЯТОРІ

Проблематика. Використання відцентрових сил у тепломасообмінних апаратах забезпечує високу ефективність процесів тепломасообміну і дає змогу створити апарати, які працездатні в умовах мікрогравітації, характерних для космічних апаратів. Малий час контакту розчину з теплообмінною поверхнею створює передумови для попередження відкладання розчинених речовин при підвищенні концентрації розчину. Внаслідок цього відцентровий дистиляційний апарат може працювати в режимі кристалізатора, що забезпечить збільшення коефіцієнта регенерації води в системах життєзабезпечення пілотованих космічних апаратів.

Мета дослідження. Дослідження роботи одноступеневого відцентрового дистилятора вибухового скипання при концентруванні розчину NaCl.

Методика реалізації. Експериментальні дослідження на дослідному зразку відцентрового вакуумного одноступеневого дистилятора.

Результати дослідження. Отримано результати при концентруванні розчину NaCl, у т.ч. у режимі кристалізації (коли розпочинається випадання розчинених кристалів NaCl). Визначено фізико-хімічну температурну депресію залежно від концентрації розчину і тиску в апараті з контролем якості отриманого дистиляту. Проведено порівняння отриманих результатів із даними інших авторів. Показано хороший збіг. Використання фільтра в гарячому контурі дає змогу працювати в режимі кристалізатора без появи відкладень на конструктивних елементах апарата.

Висновки. Інтенсивний теплообмін у відцентровому апараті забезпечує повне спрацювання перегріву розчину, що дає можливість використовувати його для вивчення фізико-хімічної температурної депресії розчинів за різних тисків. При цьому якість дистиляту не залежить від концентрації розчинених речовин у гарячому контурі (у т.ч. у режимі кристалізації). Використання фільтра в гарячому контурі забезпечує можливість роботи системи в режимі кристалізатора до забивання фільтра. Після заміни фільтра процес може бути подовжений.

Ключові слова: кристалізація; відцентровий дистилятор; мікрогравітація; NaCl.

Вступ

На найближчі роки такі компанії, як НАСА, SpaceX, Боїнг та ін., запланували довготривалі місії людей на Місяць і Марс [1, 2]. При цьому далекі пілотовані космічні місії при поточному рівні розвитку космонавтики не можуть бути реалізовані без використання спеціальних систем регенерації води з різноманітних стічних вод життєдіяльності членів екіпажу. Розробка надійних і ефективних систем регенерації води для пілотованих космічних об'єктів дасть можливість істотно знизити витрати на забезпечення космонавтів водою.

Відсутність земного тяжіння суттєво ускладнює реалізацію багатьох традиційних технологічних процесів, у т.ч. дистиляції. З цієї точки зору застосування відцентрових сил (відцентрові дистилятори) є перспективним напрямом у галузі систем життєзабезпечення пілотованих

космічних місій. 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 отриманням дистиляту високої якості.

У результаті раніше проведених досліджень була показана можливість досягнення регенерації води на рівні $93 \pm 1\%$ [3–5].

Одним із можливих способів підвищення коефіцієнта вилучення води із різноманітних розчинів є переведення їх у режим кристалізації, коли по досягненні граничної (максимально можливої) концентрації в розчині починається випадання (кристалізація) розчинених речовин. Для забезпечення надійної роботи системи в такому режимі необхідно враховувати можливість відкладання твердих частинок, які випали з розчину, на конструкційних елементах дистиляційної системи, що може унеможливити її подальшу роботу.

Для перевірки можливості роботи системи в режимі кристалізатора було проведено серію експериментів на розчині NaCl у відцентровому одноступеневому дистиляторі [6].

Постановка задачі

Основна мета дослідження – перевірка роботи CFD (одноступеневого відцентрового дистилятора вибухового скипання) при концентруванні розчину NaCl.

Основні задачі дослідження:

- дослідити зміну якості отриманого дистиляту в процесі концентрування розчину;
- зафіксувати максимально можливе концентрування;
- дослідити, як буде змінюватися фізико-хімічна температурна депресія в процесі концентрування розчину NaCl.

Опис принципової схеми

Основними елементами експериментального стенда (рис. 1) є відцентровий одноступеневий дистилятор (ЦД) 1 (рис. 2), термоелектричний

тепловий насос (ТТН) 2, теплообмінник охолоджувач 3, ємність вихідного розчину 4, збирач дистиляту 5, клапан-регулятор живлення системи вихідним розчином 6, вакуум-насос 7, фільтр 8. Крім цього, стенд має кілька допоміжних (технологічних) ємностей та оснащений системою вимірювання витрат і температур теплоносіїв на вході та виході дистилятора 1, ТТН 2 і теплообмінника 3, а також електричної потужності, яку споживають ТТН і двигун, що обертає ротор ЦД. Поточний контроль якості дистиляту забезпечується солеміром 9, продуктивність дистилятора визначається електронними вагами 10, тиск у ЦД визначається за показами вакуумметра 11 і барометра. Втрати тиску на фільтрі 8 вимірюються диференційним манометром 12.

Основне та допоміжне обладнання стенда об'єднується системою трубопроводів, які утворюють два циркуляційних контури. В одному з них (гарячому) циркулює випарований розчин, а в іншому (холодному) – дистилят.

Працює стенд таким чином. Включається двигун дистилятора 1, який забезпечує задані оберти ротора дистилятора, та вакуум-насосом 7

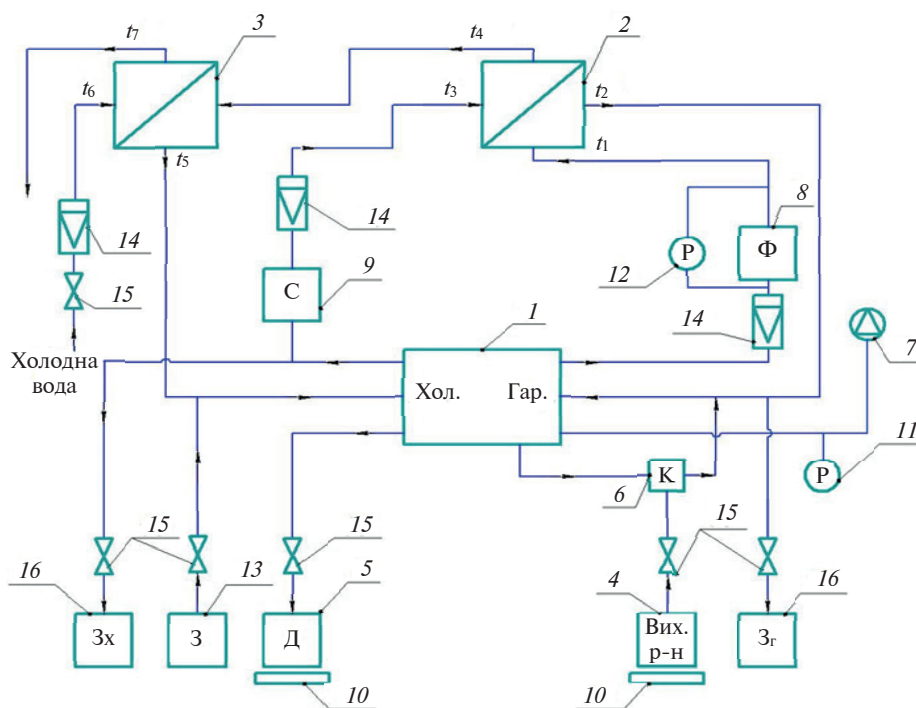


Рис. 1. Принципова схема експериментального стенда: 1 – вакуумний відцентровий дистилятор; 2 – термоелектричний тепловий насос; 3 – теплообмінник (охолоджувач); 4 – ємність вихідного розчину; 5 – збирач дистиляту; 6 – клапан-регулятор живлення системи вихідним розчином; 7 – вакуумний насос; 8 – фільтр; 9 – солемір; 10 – електронні ваги; 11 – вакуумметр; 12 – диференційний манометр; 13 – дистилят для заповнення системи; 14 – ротаметри; 15 – клапани; 16 – ємності для спорожнення системи

в апараті встановлюється необхідний тиск, який відповідає необхідній температурі кипіння розчину. З ємності 13 дистилатом заповнюється холодний контур, у якому забезпечується циркуляція дистилату через конденсатор дистилатора 1, солемір 9, ротаметр 14, холодну сторону ТТН 2, теплообмінник-охолоджувач 3 та знову конденсатор дистилатора.

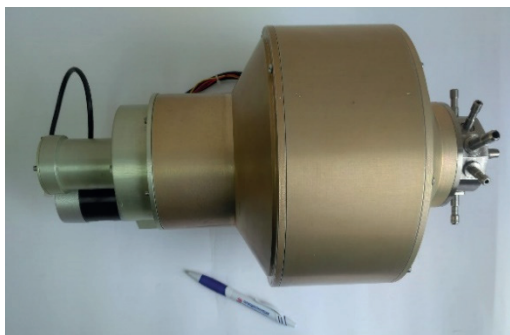


Рис. 2. Зовнішній вигляд відцентрового дистилатора

Гарячий контур заповнюється із ємності 4 до рівня, що задається клапаном-регулятором 6. У гарячому контурі розчин циркулює із випарника дистилатора 1 через ротаметр 14, фільтр 8, гарячу сторону ТТН 2 та знову у випарник дистилатора 1. При підведенні електроенергії до ТТН 2 відбувається охолодження конденсату в холодному контурі та нагрівання розчину в гарячому контурі. Розчин, перегрітий у ТТН 2 відносно температури насичення у випарнику ЦД 1, частково вибухово випаровується, а отримана пара конденсується в контактному конденсаторі ЦД 1. Надлишок дистилату з холодного контуру автоматично відводиться у збирач дистилату 5. Клапан 6 компенсує свіжим розчином випарену частину розчину, що циркулює в гарячому контурі.

При цьому відбувається підвищення концентрації розчинених речовин у гарячому контурі. По досягненні граничної концентрації в розчині розпочинається випадання кристалів солі, які вловлюються фільтром 8. У зв'язку з тим що в ТТН 2

$$Q_{\Gamma} = m_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot (t_2 - t_1) > Q_{\chi} = m_{\chi} \cdot c_{\chi} \cdot (t_4 - t_3),$$

для забезпечення стаціонарності процесу надлишок тепла відводиться в теплообмінник-охолоджувач 3 у навколишнє середовище.

Після закінчення експерименту відключається електричне живлення ТТН 2, а холодний і гарячий контури спорожнюються у відповідні ємності 16.

Температура вимірювалася на вході та виході з термобатарей по гарячій (t_1 , t_2) та холодній сторонах (t_3 , t_4), після теплообмінника-охолоджувача в холодному контурі (t_5) та на вході й виході з теплообмінника-охолоджувача зі сторони охолодження (t_6 , t_7). Тиск в апараті вимірювався вакуумметром 11.

Результати дослідження

Експерименти проводилися на розчині NaCl. Для зменшення часу проведення експерименту початкова концентрація розчину (в гарячому контурі) становила 20 %. Свіжий розчин подавався з концентрацією 5 %.

У процесі роботи системи в гарячому контурі підвищувалася концентрація NaCl, що спричиняло ріст фізико-хімічної температурної депресії.

На рис. 3 зображена залежність фізико-хімічної температурної депресії від часу проведення експерименту. Фізико-хімічна температурна депресія визначалася як різниця між температурою розчину на виході з апарата t_1 і температурою насичення чистої води за заданого тиску:

$$\Delta t_{\text{депр}} = t_1 - t(p_{\text{вак}}).$$

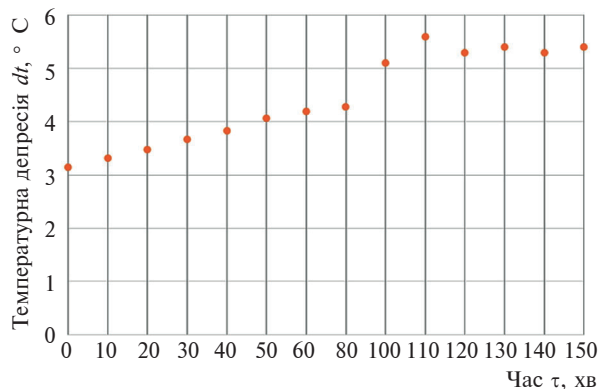


Рис. 3. Залежність фізико-хімічної температурної депресії від часу проведення експерименту

Зроблено припущення, що в зоні вибухового скипання дистилатора внаслідок високої інтенсивності процесу при плівковій течії перегрітої рідини в полі відцентрових сил [7–9] перегрів рідини спрацьовується повністю. Після виходу на режим початкова депресія становила 2,8 °C. У процесі дистиляції концентрація солей у гарячому контурі підвищувалася, що призводило до зростання температурної депресії. Через 100 хв температурна депресія стабілізувалася на

рівні 5,2 °С. Це свідчило про те, що в гарячому контурі з розчину почали випадати кристали солі, що привело до стабілізації концентрації розчину, а отже, і температурної депресії.

Кристали NaCl потоком, що циркулює в гарячому контурі, виносились із зони вибухового скипання, уловлювалися фільтром і частково накопичувалися у його прозорому контурі. Фото фільтра з уловленою сіллю, яка випала в процесі дистилювання, показане на рис. 4.

Як правило, в усіх літературних джерелах температурна депресія наведена для атмосферного тиску. Для отримання теоретичної кривої для умов вакууму (тиск $p = 40$ кПа) було використано дві методики: Тищенко [10] та Бабо [11].

На рис. 5 показано теоретичну криву за атмосферного тиску та розраховані за робочого тиску в зоні вибухового скипання ($p = 40$ кПа): за методиками дві теоретичні криві та результати експерименту. Як видно з рисунка, має місце хороший збіг розрахункових і експериментальних даних, що свідчить про обґрунтованість покладеного раніше припущення про повне спрацювання перегріву в дистиляторі та надійність системи вимірювання необхідних параметрів.

Проведення процесу в умовах вакууму приводить до зменшення температурної депресії порівняно з атмосферними умовами, що позитивно впливає на роботу теплового насоса та сприяє підвищенню ефективності всієї системи.

У процесі проведення експерименту солевміст дистиляту в холодному контурі на перевищував 12–13 ppm, що свідчить про хорошу якість сепарації крапель розчину із парокрапельної суміші, яка утворюється в зоні випаровування.

Масові баланси по солі та тепловий баланс системи збіглися з точністю $\pm 5\%$.

Після зупинки дистилятора в кінці експерименту дистиляційний апарат було розібрано. На теплообмінних поверхнях відкладення солі було повністю відсутнім, більшість кристалів солі знаходиться у фільтрі.

У той же час було виявлено, що в процесі проведення експерименту відбувалося заростання сіллю сигнального каналу керування клапаном підживлення свіжим розчином, у якому був відсутній протік рідини. Це зумовило необхідність ведення процесу в ручному режимі через певний проміжок часу після початку роботи апарата в режимі кристалізатора.

На сьогодні проблема заростання відкладеннями сигнального каналу керування клапаном підживлення дистилятора свіжим розчином вирішена. Проведена успішна експериментальна

перевірка модернізованої системи, на яку готується заявка на корисну модель.



Рис. 4. Зовнішній вигляд фільтра після проведення експерименту

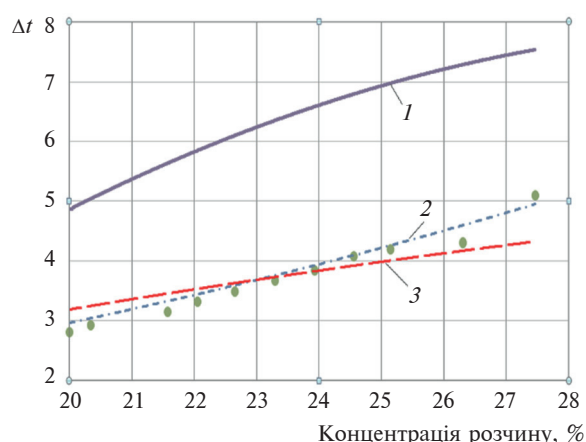


Рис. 5. Вплив концентрації розчину на фізико-хімічну температурну депресію: 1 – фізико-хімічна температурна депресія за атмосферного тиску; 2 – фізико-хімічна температурна депресія за тиску $p_{\text{абс}} = 40$ кПа [10]; 3 – фізико-хімічна температурна депресія за тиску $p_{\text{абс}} = 40$ кПа [11]; ● – експеримент

Висновки

Проведені експерименти дали можливість зробити такі висновки:

1. Відсутність відкладень в апараті навіть у режимі кристалізації розчинених речовин. Кристали NaCl акумулювались у фільтрі.

2. У процесі роботи було встановлено, що система підживлення потребує модернізації для роботи дистилятора в режимі кристалізатора.

3. Інтенсивний теплообмін у відцентровому апараті забезпечує повне спрацювання перегріву розчину, що дає можливість використовувати його для вивчення фізико-хімічної температурної депресії розчинів за різних тисків.

4. Якість дистилату не залежить від концентрації розчинених речовин у гарячому контурі (в т.ч. у режимі кристалізації).

5. Методика визначення фізико-хімічної температурної депресії підтвердила свою ефективність для різних тисків.

6. Штатний режим роботи системи регенерації води на пілотованому космічному об'єкті циклічний. По його закінченні концентрат із

гарячого контуру витісняється свіжим розчином, і цикл повторюється. Використання фільтра в гарячому контурі істотно збільшує кількість свіжого розчину, який переробляється в циклі до забивання фільтра. Після заміни фільтра цикл повторюється. При цьому в рази зменшуються безповоротні втрати води, що особливо важливо для далеких космічних місій.

Отримані результати будуть використані при розробці ефективного та надійного дистиллятора-кристалізатора для системи регенерації води із водовмісних відходів на пілотованих космічних апаратах.

References

- [1] B. Morgan *et al.*, "A discussion of integrated life support and *in situ* resource utilization architectures for mars surface missions", in *Proc. 48th Int. Conf. Environmental Systems Albuquerque*, New Mexico, ICES-2018-23, 8–12 July 2018.
- [2] L. Kelsey and B. Finger, "Inspiration Mars ETDU water management system test results", in *Proc. 44th Int. Conf. Environmental Systems*, Arizona, ICES-2014-270, 13–17 July 2014.
- [3] V. Patel *et al.*, "Cascade Distillation System – A water recovery system for deep space missions", in *Proc. 44th Int. Conf. Environmental Systems*, Arizona, ICES-2014-12, 13–17 July 2014.
- [4] V.G. Rifert *et al.*, "Improvement of the distillation methods by using centrifugal forces for water recovery in space flight application", in *Proc. 46th Int. Conf. Environmental Systems*, Vienna, ICES-2016-369, 10–14 July 2016.
- [5] V.G. Rifert *et al.*, "Improvement the cascade distillation system for long-term space flights", in *Proc. 68th International Astronautical Congress*, Adelaide, Australia, IAC-17-A1.IP.25, 25–29 September 2017.
- [6] V. Rifert *et al.*, "Cascaded Distillation Technology for Water Processing in Space", SAE Technical Paper, 2003-01-2625, 2003. doi: 10.4271/2003-01-2625
- [7] O.A. Dolinskij *et al.*, "Temperature field of an overheated film of a fluid moving along a rotating disk", *Industrial Heat Eng.*, vol. 5, no. 5, pp. 33–38, 1983.
- [8] O.A. Dolinskij *et al.*, "Calculation of the concentration of salts on the surface of an adiabatically evaporating solution film", *Industrial Heat Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 16–21, 1983.
- [9] O.A. Dolinskij, "The results of an experimental study of the adiabatic evaporation of a liquid film on a rotating disk", *Industrial Heat Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 41–45, 1988.
- [10] B.P. Nikol'skij, *Chemist's Handbook*, 2 ed. Moscow, SU: Himiya, 1986.
- [11] I.I. Chernobyl'skij, *Machines and Apparatus for Chemical Production*, 3 ed. Moscow, SU: Mashinostroenie, 1974.

П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.Г. Риферт, В.Г. Петренко, В.И. Усенко, В.П. Бояновский

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ РАСТВОРА NaCl В ВАКУУМНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПЛЕНОЧНОМ ДИСТИЛЛЯТОРЕ

Проблематика. Использование центробежных сил в теплообменных аппаратах обеспечивает высокую эффективность процессов теплообмена и позволяет создать аппараты, которые работоспособны в условиях микрогравитации, характерных для космических аппаратов. Малое время контакта раствора с теплообменной поверхностью предупреждает отложение растворенных веществ при повышении концентрации раствора. В результате центробежный дистилляционный аппарат может работать в режиме кристаллизатора, что обеспечивает увеличение коэффициента регенерации воды в системах жизнеобеспечения пилотируемых космических аппаратов.

Цель исследования. Исследование работы одноступенчатого центробежного дистиллятора взрывного вскипания при концентрировании раствора NaCl.

Методика реализации. Экспериментальные исследования на опытном образце центробежного вакуумного одноступенчатого дистиллятора.

Результаты исследования. Получены результаты при концентрировании раствора NaCl, в т.ч. в режиме кристаллизации (когда начинается выпадение растворенных кристаллов NaCl). Определена физико-химическая температурная депрессия в зависимости от концентрации раствора и давления в аппарате с контролем качества полученного дистиллята. Проведено сравнение полученных результатов с данными других авторов. Показано хорошее совпадение. Использование фильтра в горячем контуре позволяет работать в режиме кристаллизатора без появления отложений на конструктивных элементах аппарата.

Выводы. Интенсивный теплообмен в центробежном аппарате обеспечивает полное срабатывание перегрева раствора, что позволяет использовать его для изучения физико-химической температурной депрессии растворов при разных давлениях.

При этом качество дистиллята не зависит от концентрации растворенных веществ в горячем контуре (в т.ч. в режиме кристаллизации). Использование фильтра в горячем контуре обеспечивает возможность работы системы в режиме кристаллизатора до забивания фильтра. После замены фильтра процесс может быть продлен.

Ключевые слова: кристаллизация; центробежный дистиллятор; микрогравитация; NaCl.

P.O. Barabash, A.S. Solomakha, V.G. Rifert, V.G. Petrenko, V.I. Usenko, V.P. Boianivskyi

CRYSTALLIZATION OF A NaCl SOLUTION IN A VACUUM CENTRIFUGAL FILM DISTILLER

Background. The use of centrifugal forces in heat exchangers provides high efficiency of heat and mass transfer processes and allows creating devices that are operable under microgravity conditions. The short contact time of the solution with the heat exchange surface prevents deposits of dissolved substances when concentration of the solution increases. As a result, the centrifugal distillation apparatus can operate as a crystallizer, which provides an increase in the coefficient of water recovery in the life support systems for deep space missions.

Objective. The purpose of the paper is investigation of a single-stage centrifugal flash-boiling distiller for concentration of a NaCl solution.

Methods. Experimental studies on a prototype of centrifugal vacuum single-stage distiller.

Results. The results were obtained by concentrating a NaCl solution and in the crystallization mode (when precipitation of dissolved NaCl crystals begins). The physicochemical temperature depression was determined depending on the concentration of the solution and the pressure in the apparatus with quality control of the obtained distillate. The results were compared with the data of other authors, and the match was pretty good. Using a filter in a hot circuit allows you to work in crystallizer mode without the appearance of deposits on the structural elements of the apparatus.

Conclusions. Intensive heat transfer in a centrifugal apparatus ensures the complete operation of the solution overheating, which makes it possible to use it to study the physicochemical temperature depression of solutions at different pressures. In this case, the quality of the distillate does not depend on the concentration of dissolved substances in the hot circuit (and in the crystallization mode). The use of the filter in the hot circuit allows the system to operate in crystallizer mode until the filter becomes clogged. After replacing the filter, the process can be extended

Keywords: crystallization; centrifugal distiller; microgravity; NaCl.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
18 червня 2019 року

Прийнята до публікації
05 вересня 2019 року