

DOI 10.15589/jnn20160309
 УДК 629.128:621.359.7
 ШЗ7

THE DEVELOPMENT, TESTING AND IMPLEMENTATION OF ELECTRODIALYSIS DESALINATION PLANT ON SHIPS

РОЗРОБКА, ВИПРОБУВАННЯ І ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОДІАЛІЗНОГО ОПРІСНЮВАЧА НА МОРСЬКИХ СУДНАХ

Viktor V. Shevchenko

e-mail: —
 ORCID: —

Oleksandr M. Filipshchuk

e-mail: —
 ORCID: —

Oleksandr M. Frolov

e-mail: —
 ORCID: —

В. В. Шевченко,

канд. техн. наук, проф.

О. М. Філіпшук,

ст. викл.

О. М. Фролов,

канд. техн. наук, доц.

Kherson branch of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson

Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон

Abstract. In this work the elektrodialysing desalination method is selected that reasonably tied to the ship's practice. On the basis of the calculated and experimental data experimental industrial design elektrodialysing desalter is developed, manufactured and tested which is intended for desalination of sea water from the technological binding on sea vessels.

Keywords: electro dialysis; desalination; fishing vessel; EDD; cell; membrane; energy consumption.

Анотація. Обрано електродіалізний метод опріснення, який обґрунтовано прив'язаний до судової практики. На основі розрахункових і дослідних даних розроблено, виготовлено й випробуване дослідно-промисловий зразок електродіалізного опріснювача, який призначений для опріснення морської води з технологічною прив'язкою на морських судах.

Ключові слова: електродіаліз; опріснювач; рибпромислове судно; електродіалізний опріснювач; осередок; мембрана; енерговитрати.

Аннотация. Избран электродиализный метод опреснения, который обосновано привязан к судовой практике. На основе расчетных и исследовательских данных разработан, изготовлен и испытан опытно-промышленный образец электродиализного опреснителя, который предназначен для опреснения морской воды с технологической привязкой на морских судах.

Ключевые слова: электродиализ; опреснитель; рыбопромышленное судно; электродиализный опреснитель; ячейка; мембрана; энергозатраты.

REFERENCES

- [1] Artemov H. A., Horbov V. M. *Sudnovi enerhetychni ustanovky* [Ship Power Plants]. Mykolaiv, UDMTU Publ., 2002. 356 p.
- [2] Korshunov L. P. *Energeticheskie ustanovki promyslovykh sudov* [Power plants of fishing vessels]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1991. 360 p.
- [3] Shevchenko V. V., Filipshchuk A. N., Pokornyy V. V. *Analiz i otsenka tselesoobraznosti vnedreniya membranoy tekhnologii v sudovoy energetike* [Analysis and evaluation of the feasibility of the introduction of membrane technology in the marine energy sector]. *Sudovye energeticheskie ustanovki: nauchno-tekhnicheskyy sbornik* [Ship Power Plants: Science and Technology collection]. Odessa, ONMA Publ., 2006, issue 16, pp. 24–31.
- [4] Shevchenko V. V. *Sovershenstvovanie sudovykh elektrodializnykh opresniteley ratsionalnymi tekhnologicheskimi metodami* [Improving marine electro dialysis desalination rational technological methods]. Autoref. dis. cand. tekhn. sciences. Nikolaev, NKI Publ., 1988. 28 p.

- [5] Shevchenko V. V. *Intensifikatsiya massoperenosa v elektrodializnoy yacheyke opresnitelya sudovogo naznacheniya* [Intensification of mass transfer in electro dialysis cell desalination ship destination]. Odessa, Lybid Publ., 1991, pp. 109–114.
- [6] Pilat B. V. A case for elektrodialysis. *Asian water*, 2000, vol. 16, pp. 22–25.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Потреби морського флоту в прісній воді великі, оскільки для більшості морських транспортних суден добова потреба складає $5\div 10$ т для суден з дизельною установкою й $20\div 50$ т для суден з паротурбінною установкою [1]. Такі вимоги можуть бути задоволені в результаті роботи автономної опріснювальної установки або за рахунок суднового запасу, що характерно для суден рибпромислового (РП) флоту.

Забезпечення морських транспортних та рибпромислових суден прісною водою для технологічних і господарсько-побутових потреб екіпажу являє собою складне технічне завдання. Від правильного вирішення залежать технічно-економічні показники експлуатації судна, комфортність умов пасажирів й екіпажу, а також сталість екології навколишнього середовища [2].

МЕТОЮ РОБОТИ є удосконалення суднової системи прісної води шляхом введення в її структуру автономного опріснювача, який забезпечує отримання прісної води, необхідної якості з морської. Переваги очевидні, оскільки економічно не вигідно запасатись водою, вартість якої дорожча від опрісненої, а об'єми суднових приміщень, що звільняються можна додатково використовувати під корисні вантажі.

На основі аналізу й теоретичних досліджень у сфері мембранних технологій було обрано електродіалізний метод опріснення морської води, який має ряд переваг перед іншими видами опріснення [3, 6].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На основі розрахункових і дослідних даних розроблено й виготовлено на базі Херсонської філії НУК електродіалізний опріснювач (ЕДО) прямооточного типу, який призначений у першу чергу для експлуатації на РП судах типу СРТМ, оскільки на них не передбачено опріснювальну установку.

ЕДО спроектовано згідно з прийнятою методикою розрахунку [4] і відповідно до технічних завдань: продуктивність за діалізом $Q_d = 2,0$ т/доб.; концентрація вихідної води $C_{вих.} = 16$ г/л і жорсткістю до 60 мг-екв/л (показники Чорноморського басейну), а концентрація опріснювальної води (діалізат) $C_d = 0,5$ г/л, що призначена для господарсько-побутових потреб екіпажу.

За конструкцією електродіалізатор — це апарат прямооточного типу для експлуатації на РП судах типу СРТМ, що встановлюється в шахті машинного відділення (рис. 1).

Технологічну схему складання ЕДО подано на рис. 2, модуль виконано з базовою площею $0,79 \times 0,25$ м² й набрано з пакету робочих каналів 1

(знесольюючих і розсілюючих), електродних камер 2, виконаних з текстоліту і розміщених по обох сторонах пакету, що стискаються прижимними плитами 3 за допомогою болтів 4.

Корпусні рамки робочих каналів 5 виготовлено з пластичного матеріалу, що забезпечує достатню герметичність каналів у процесі збирання апарата. При цьому вони регулюють висоту й створюють зовнішні стінки камер, які розподілені іоноселективними мембранами (МА-40 і МК-40) 6, з активною площею $(0,710 \times 0,210$ м²). У корпусних рамках робочих каналів ЕДО укладено переривчасті сепаратори-турболізатори (СТ) 7 з промислової сітки ПВХ (гофри впоперек потоку) шляхом просічки в них відповідних отворів з поперечними зв'язками, що виключає змикання іоноселективних мембран між собою в процесі електродіалізу. У даному випадку використано сітки ПВХ з кислотних акумуляторів, які відбули свій термін служби.

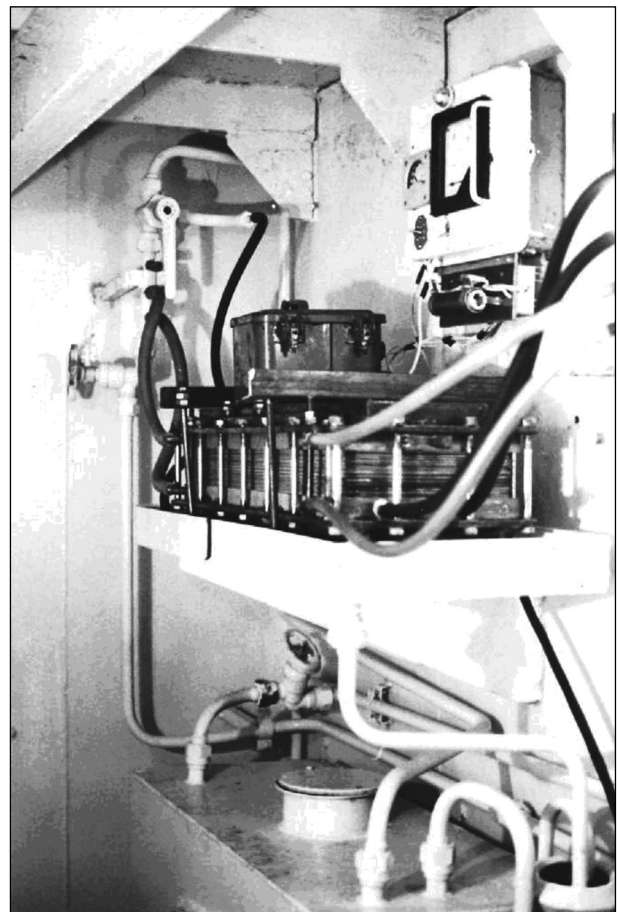


Рис. 1. Випробування дослідно-промислового ЕДО на РП судні

Висота робочих каналів прийнята як $h = 2,0$ мм за середньої висоти сіток ПВХ $\sigma = 1,8$ мм. Електроди анодної і катодної камер виготовлено з графітових пластин марки АМТ, що допускають зміну потенціалів напруги (реверс струму) для зменшення осадкоутворення на іонітових мембранах. З іншого боку, графітові електроди значно дешевші за електроди з платинованого титану й стійкі в агресивному середовищі. В електродних камерах збільшено швидкість протікання розчину вдвічі порівняно зі швидкістю потоку в робочих каналах, щоб полегшити винесення продуктів реакцій у процесі електродіалізу.

Подача водних розчинів у робочі канали електродіалізатора здійснюється через співположні наскрізні отвори в корпусних рамках і мембранах, які у зібраному вигляді утворюють тракт знесолення і концентрування. Рух потоків рідини в робочих каналах відбувається за принципом протитечії, що дозволяє підтримувати постійну різницю тиску між парою різнорідних осередків. Це зменшує дифузійне перенесення солі й збільшує вихід по струму. Щоб виключити внутрішні перетоки рідини між осередками знесолення і концентрування, були передбачені незалежні введення і виведення розчину робочих каналів як по тракту діалізату, так і розсолу (концентрату). Для підведення і відведення водних розчинів з робочих каналів ЕДО застосовано з'єднувальні трубки з поліетилену марки ПНП.

У процесі випробовування багатокамерний електродіалізатор підключається до гідравлічної системи експериментальної установки (рис. 3), яка забезпечує подачу вихідних розчинів води в ЕДО за розімкненим і замкненим циклом, а також у режимі циркуляційно-порційної дії.

Через регульований клапан 1 вихідна морська вода з початковою концентрацією C_{II} через фільтр

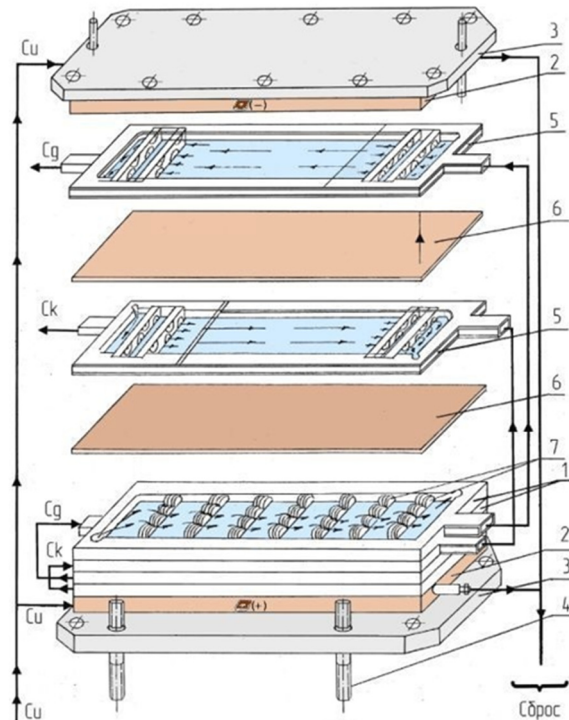


Рис. 2. Технологічна схема складання ЕДО

грубої очистки 2 і регульований клапан 3 подається на розподільний колектор 4, який забезпечує рівномірний розподіл водного розчину електродними камерами і робочими каналами електродіалізатора 5, який складається з двох шаблів (модулів). Перший модуль ЕДО працює в номінальному режимі ($I = I_{ном}$), а другий в області заграничних струмів ($I = 1,2 I_{ном}$), що забезпечує оптимальний режим процесу електродіаліза. ЕДО отримує струм від тиристорного блоку живлення БП 6, який забезпечує регулювання напруги в необ-

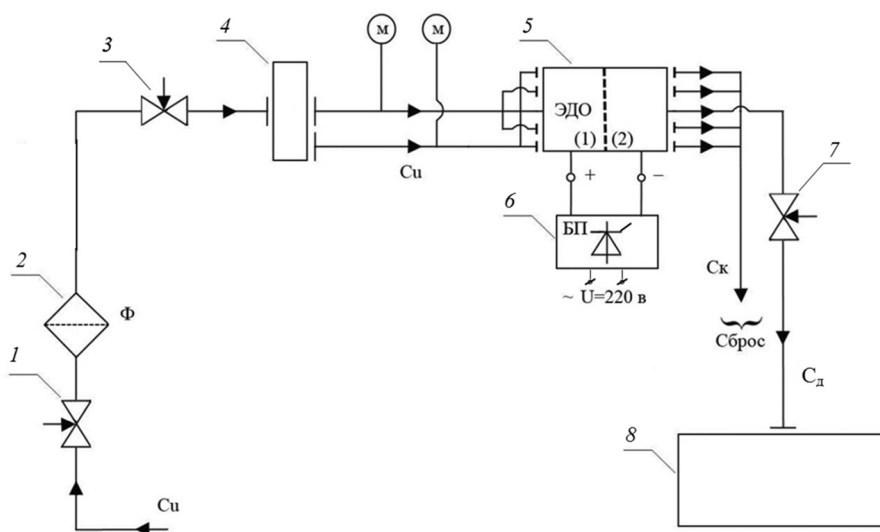


Рис. 3. Гідравлічна схема підключення ЕДО

хідному робочому діапазоні зміни струмів. Опріснена вода (діалізат з концентрацією C_d) через регульований електромагнітний клапан 7 подається в накопичувальну ємність 8. Відпрацьований розчин з розсілних робочих каналів і електродних камер з концентрацією C_k через забортний кінгстон повертається в море, не порушуючи екології водного басейну.

Було виконано умови гідродинамічної стабілізації на всіх експлуатаційних режимах роботи ЕДО. Технологічні й вольт-амперні параметри визначались згідно з програмою випробувань. Тиск розчину на вході і виході апарата підтримувався постійним на всіх швидкісних режимах і контролювався за допомогою зразкових манометрів. Розчин на вході безперервно термостатувався, щоб уникнути впливу температури на процес знесолення в електродіалізованому осередку.

Випробування дослідно-промислового ЕДО було наближене до суднових умов і згідно з прийнятою методикою проводилося в два етапи: з вихідною концентрацією водного розчину $C_n = 0,4N$, що є характерним для морської води Чорноморського басейну; $C_n = 0,01N$ — концентрація опрісненої води господарсько-побутового призначення.

Результати виконаних випробувань наведено в таблиці, що свідчать про те, що за допомогою за-

пропонованого ЕДО можна отримувати опріснену воду з необхідною концентрацією, яка відповідає Європейським стандартам для господарсько-побутових потреб екіпажу судна. Для порівняльної оцінки ефективності ЕДО з переривчатим С — Т, в таблиці наведено дані модуля дослідно-промислового ЕДО й термічного опріснювача (дистилятора) використаного як прототип [5].

Енергетичні показники й показники ефективності роботи дослідного електродіалізатора визначались відповідно до методики експериментальних досліджень. Техніко-економічні показники Q_{Σ} , W_{Σ} , G_{Σ} (табл. 1) віддзеркалюють продуктивність, споживання електричної енергії і витрати води в процесі знесолення за рік. При розрахунках вказаних показників використано поправочний коефіцієнт $k_n = 0,8$, що враховував час, витрачений на ревізію, профілактику ЕДО й ремонт електродіалізованої опріснювальної установки.

На основі отриманих результатів побудовано залежності, що характеризують ефективність процесу опріснення морської води ЕДО з переривчатими С — Т (рис. 4): $V = f(U)$ — питоме знімання солі з активної площі іоноселективних мембран; $W = f(U)$ — питомі енергозатрати на опріснення морської води.

Таблиця 1. Порівняльна оцінка ефективності ЕДО

Найменування	Технічні дані					
	Продуктивність		Ел. енергія		Витрати води	
	Q , л/годин	Q_{Σ} , т	W , кВт·годин	W_{Σ} , кВт/рік	G , т/доб	G_{Σ} , т/рік
Дистилятор	50	302	36	252228	50	13200
ЕДО	50	302	0,5	4380	3	792

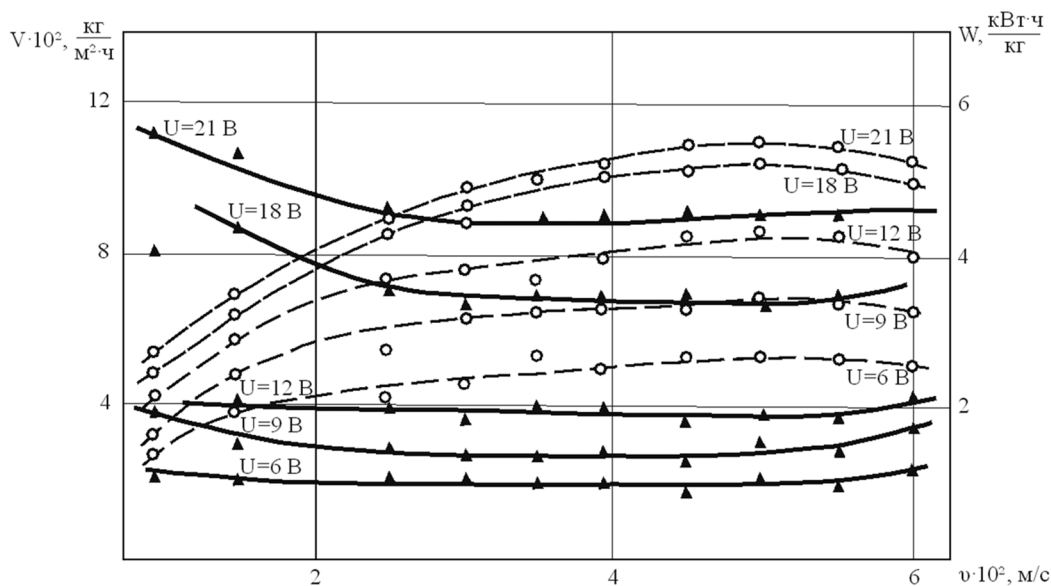


Рис. 4. Оцінка ефективності дослідно-промислового ЕДО

Питоме знімання солі з одиниці активної площі мембран визначається за формулою:

$$V = \frac{Q(C_{\text{и}} - C_{\text{к}})}{S}, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}, \quad (1)$$

де Q — продуктивність опріснювача, м³/с; $C_{\text{и}}$ і $C_{\text{к}}$ — концентрація розчину на вході і виході електродіалізатора, г/л; S — активна площа мембран, м².

Питомі витрати енергії розраховувались таким чином:

$$V = \frac{UI_{\text{гр}}}{Q(C_{\text{и}} - C_{\text{к}})}, \text{ кВт} \cdot \text{рік}, \quad (2)$$

де U — падіння напруги на електродах, В; $I_{\text{гр}}$ — граничний струм, визначався за методикою Кауна-Брауна і коригувався за зміною активної реакції рН розчину.

У формулах (1, 2) введений коефіцієнт k , який враховує час роботи ЕДО й дорівнює $k = 0,85 \div 0,80$, таким чином, 15 ÷ 20% не робочого часу пов'язано з профілактикою й обслуговуванням опріснювача.

Аналіз дослідних даних доводить, що робота ЕДО за заданої продуктивності порівняно з термічним дистилятором характеризується низькими енерговитратами на електродіалізний процес опріснення.

Так, сумарні витрати електроенергії W_{Σ} зменшуються в середньому в 58 разів, а витрати води в процесі знесолення G_{Σ} в 16 разів, відповідно.

Наведені в таблиці зіставлення свідчать про те, що демінералізація водного розчину до рівня господарсько-побутового призначення і до рівня дистиляту здійснюється більш ефективно, ніж в термічних опріснювачах (дистиляторах).

ВИСНОВКИ. 1. Конструкція ЕДО враховує зміни основних показників вихідної води, що опріснюється, із загальним солевмістом (C , г/л) і жорсткістю (J , мг-екв/л) у процесі електродіалізу. 2. Для інтенсифікації масоперенесення в електродіалізованому осередку опріснювача запропоновано переривчасті СТ у робочих каналах ЕДО замість суцільних. 3. Впровадження переривчастих СТ дозволяє зменшити гідравлічний опір у трактах знесолення й концентрування в середньому у 2...3 рази, а також виключити внутрішні петроки електроліту між знесолюючими і розсілюючими осередками, що виключає витрати струму. 4. Зі збільшенням щільності струму інтенсифікується процес масоперенесення в електродіалізованому осередку, так при $I = I_{\text{гр}}$ ($Re = 230$) питоме знімання солі збільшується на 30%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Артемів, Г. А.** Суднові енергетичні установки [Текст] / Г. А. Артемів, В. М. Горбов. — Миколаїв : УДМТУ, 2002. — 356 с.
- [2] **Коршунов, Л. П.** Энергетические установки промышленных судов [Текст] / Л. П. Коршунов. — Л. : Судостроение, 1991. — 360 с.
- [3] **Шевченко, В. В.** Анализ и оценка целесообразности внедрения мембранной технологии в судовой энергетике [Текст] / В. В. Шевченко, А. Н. Филипчук, В. В. Покорный // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. — Одесса : ОНМА, 2006. — Вып. 16. — С. 24–31.
- [4] **Шевченко, В. В.** Совершенствование судовых электродиализных опреснителей рациональными технологическими методами [Текст] / В. В. Шевченко ; автореф. дис. канд. техн. наук. — Николаев : НКИ, 1988. — 28 с.
- [5] **Шевченко, В. В.** Интенсификация массопереноса в электродиализной ячейке опреснителя судового назначения [Текст] / В. В. Шевченко. — Одесса : Лыбидь, 1991. — С. 109–114.
- [6] **Pilat, V. V.** A case for elektrodialysis [Text] / V. V. Pilat // J. Asian water, 2000. — V. 16. — P. 22–25.

© В. В. Шевченко, О. М. Філіпчук, О. М. Фролов

Надійшла до редколегії 18.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. М. Рябенський*