

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОЧЕЙ ПЛОЩАДИ МЕМБРАН И КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕМЕНТОВ В МЕМБРАННОМ АГРЕГАТЕ

© С.И. Лазарев, В.Ю. Попов, Д.С. Лазарев, А.А. Левин

Тамбовский государственный технический университет
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106
E-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Разработана методика инженерного расчета рабочей площади мембран и количества мембранных элементов в мембранном агрегате комбинированного типа для обратноосмотического процесса разделения промышленных растворов, содержащих анилин. Проведенный расчет оптимальных геометрических параметров мембранного агрегата из условия минимизации массы аппарата позволяет нам значительно уменьшить расход мембранного материала и габариты аппарата при сохранении технических требований по жесткости и прочности аппарата. Выполненные исследования позволяют отметить, что в аппаратах комбинированного типа возможно дифференцированно извлекать вещества из многокомпонентных систем, получать чистую воду с высокими требованиями по качеству воды и снизить материалоемкость и энергозатраты на процесс разделения, очистки и концентрирования промышленных растворов.

Ключевые слова: мембранный агрегат; методика; расчет; рабочая площадь

Теоретические исследования по конструкциям мембранных аппаратов и технологическому оформлению показали необходимость разработки аппаратов, способных дифференцированно извлекать вещества из многокомпонентных систем. Комбинирование плоскокамерно-трубчатых аппаратов не требует дополнительных затрат в аппаратурно-технологическом, энергетическом обеспечении, а также повышенных требований к безопасности проведения технологического процесса очистки сточных вод, особенно при разделении промышленных растворов, содержащих токсичные вещества [1–3].

Мембранный агрегат представляет собой аппарат комбинированного типа, состоящий из двух крышек, представляющих собой открытые торообразные оболочки, сопряженные по наружному контуру с кольцом, а по внутреннему отверстию – с круглой пластиной. Основными несущими узлами корпуса мембранного аппарата являются верхняя (1) и нижняя крышки (2), соединенные между собой с помощью замкового байонетного кольца (3) (рис. 1). Каждая крышка представляет собой открытую торообразную оболочку, сопряженную по наружному диаметру с кольцом, а по внутреннему отверстию – с круглой пластиной. Внутри корпуса аппарата имеется три камеры, одна для плоскокамерного модуля (4) и две для трубчатых разделительных элементов (5). Для обеспечения герметизации внутри камер имеются уплотнения (6). В процессе эксплуатации со стороны плоскокамерного модуля на круглую пластину действует рабочее давление (P_0), максимальная величина которого может достигать до 1 МПа, а со стороны трубчатого модуля на стенки торовой оболочки действует давление (P), максимальное значение которого составляет примерно треть часть от рабочего давления (P_0). Для обеспечения качества и эффективности разделения и очистки растворов необ-

ходимо иметь в аппарате требуемую площадь разделения. Поэтому изложим методику определения необходимой площади разделения и рассмотрим пример расчета аппарата по этой методике.

Для мембранного аппарата комбинированного типа расчет площади мембран и количества элементов проводится в две стадии: сначала рассчитывается площадь и количество мембран в плоскокамерном модуле, затем производится расчет площади и количества трубок в двух трубчатых модулях [3].

Расчет проводится в следующей последовательности.

1. Расчет удельной производительности плоскокамерного модуля:

$$J_n = J_0 \left(1 - K_{к.п} \frac{1}{K_{з.д.п}} \right). \quad (1)$$

2. Расчет площади мембраны в плоскокамерном модуле:

$$F_n = \frac{L_n \cdot C_{н.к} \cdot \frac{1}{K_{з.д.п}} \cdot C_{р.в.т}}{K_{з.д.п}} \int_{C_{н.к}}^{C_{р.в.т}} \frac{dx}{J \cdot x^2}. \quad (2)$$

3. Расчет площади элемента в плоскокамерном модуле:

$$F_{э.п} = 2 \cdot F_{м.п} - 2 \left(\left(\pi \cdot \frac{d^2}{4} \right) + a \cdot b \right), \quad (3)$$

где a , b – длина малой и большой полуоси прокладочного эллипса.

4. Расчет количества элементов в плоскокамерном модуле:

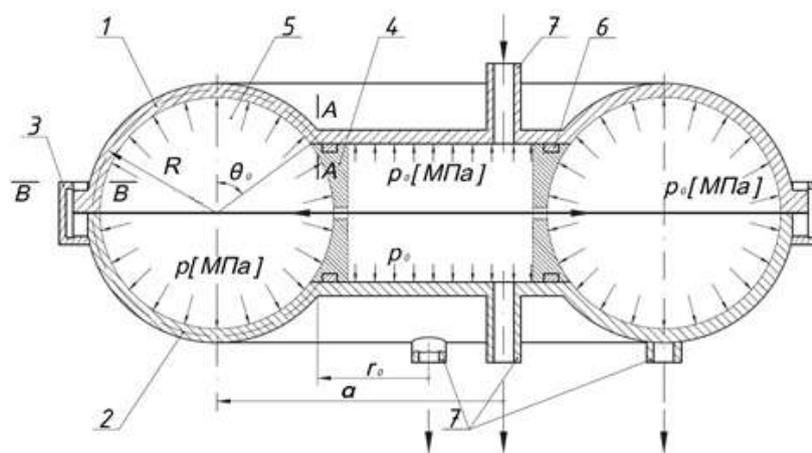


Рис. 1. Мембранный агрегат: 1 – верхняя крышка; 2 – нижняя крышка; 3 – байонетное кольцо (замок); 4 – корпус плоскокамерного модуля; 5 – камера трубчатого модуля; 6 – уплотнение; 7 – патрубки для входа и выхода разделяемого раствора

$$n_{\Pi} = \frac{F_{\Pi}}{F_{\text{Э.л}}}. \quad (4)$$

5. Расчет расхода пермеата в плоскокамерном модуле:

$$W_{\Pi} = L_{\Pi} \left(1 - K_{\text{к.л}}^{\frac{-1}{K_{\text{зад.л}}}}\right). \quad (5)$$

6. Расчет концентрации пермеата в плоскокамерном модуле:

$$C_{\text{пер.л}} = C_{\text{исх}} \frac{K_{\text{зад.л}}^{\frac{-1}{K_{\text{к.л}}}}}{1 - K_{\text{к.л}}^{\frac{-1}{K_{\text{зад.л}}}}}. \quad (6)$$

7. Расчет удельной производительности трубчатых модулей модуля:

$$J_{\text{T}} = J_0 \left(1 - K_{\text{к.т}}^{\frac{-1}{K_{\text{зад.т}}}}\right). \quad (7)$$

8. Расчет площади мембраны в трубчатом модуле:

$$F_{\text{T}} = \frac{W_{\Pi} \cdot C_{\text{пер.л}} \cdot K_{\text{зад.л}}^{\frac{1}{K_{\text{к.л}}}}}{K_{\text{зад.л}}} \int_{C_{\text{пер.л}}}^{C_{\text{рет.т}}} \frac{dx}{J_{\text{T}} \cdot x^2}. \quad (8)$$

9. Расчет площади элемента в трубчатом модуле:

$$F_{\text{Э.т}} = \pi d_{\text{T}} l_{\text{T}}, \quad (9)$$

где d_{T} и l_{T} – эквивалентный диаметр и длина трубки.

10. Общее число элементов в трубчатых модулях определяется по следующей формуле:

$$n_{\text{T}} = \frac{F_{\text{T}}}{F_{\text{Э.т}}}. \quad (10)$$

Рассмотрим пример расчета рабочей площади и количества элементов в аппарате комбинированного типа для процесса обратноосмотического разделения растворов, содержащих анилин.

Исходные данные для расчета плоскокамерного модуля:

$$\begin{aligned} K_{\text{к}} &= 4; \\ K_{\Pi} &= 0,967; \\ J_0 &= 3,85 \cdot 10^{-6}; \\ C_{\text{исх}} &= 0,74 \text{ кг/м}^3; \\ L_{\Pi} &= 4,11 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}; \\ b &= 0,007 \text{ м}; \\ a &= 0,05 \text{ м}; \\ F_{\text{м}} &= 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Исходные данные для расчета трубчатых модулей:

$$\begin{aligned} K_{\text{к2}} &= 8; \\ K_{\text{T}} &= 0,967; \\ d_{\text{T}} &= 0,004 \text{ м}; \\ l_{\text{T}} &= 0,24 \text{ м}. \end{aligned}$$

Произведем расчет плоскокамерного модуля.

1. Рассчитаем концентрацию ретентата:

$$C_{\text{рет}} = K_{\text{к}} \cdot C_{\text{исх}} = 2,96 \text{ кг/м}^3.$$

2. Рассчитываем коэффициент задержания:

$$K_{\Pi} = 1 - \frac{C_{\text{пер}}}{C_{\text{пер}}} = 1 - \frac{0,095}{2,96} = 0,967.$$

3. По формуле (1) определяем удельную производительность плоскокамерного модуля:

$$\begin{aligned} J &= J_0 \left(1 - K_{\text{к}}^{\frac{1}{K_{\Pi}}}\right) = 3,85 \cdot 10^{-6} \left(1 - 4^{\frac{1}{0,967}}\right) = \\ &= 2,92 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2} \cdot \text{с}. \end{aligned}$$

4. Площадь мембраны в плоскокамерном модуле определяем по формуле (2):

$$F_{\Pi} = \frac{L_{\Pi} \cdot C_{\text{исх}} \cdot K_{\Pi}}{K_{\Pi}} \int_{C_{\text{исх}}}^{C_{\text{рет}}} \frac{dx}{J \cdot x^2} = 0,108 \text{ м}^2.$$

5. Рассчитываем площадь мембраны в одном элементе по формуле (3):

$$F_{э.п} = 2 \cdot F_{м.п} - 2 \left(\left(\pi \cdot \frac{d^2}{4} \right) + a \cdot b \right) =$$

$$= 2 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{3,14 \cdot 0,07^2}{4} + 0,05 \cdot 0,007 \right) = 0,0166 \text{ м}^2.$$

6. Рассчитываем количество элементов в плоскокамерном модуле по формуле (4):

$$n_{п} = \frac{F_{п}}{F_{э.п}} = \frac{0,108}{0,0166} \approx 7.$$

7. Рассчитываем расход пермеата в плоскокамерном модуле по формуле (5):

$$W_{п} = L_{п} \left(1 - K_{к.п} \frac{-1}{K_{зал.п}} \right) = 4,11 \cdot 10^{-7} \left(1 - 4 \frac{1}{0,967} \right) =$$

$$= 3,14 \cdot 10^{-7}.$$

8. Произведем расчет концентрации в пермеате плоскокамерного модуля по формуле (6):

$$C_{пер.п} = C_{исх} \frac{K_{п.п}^{-1}}{1 - K_{к.п}^{-1}} = 0,74 \frac{1 - 4 \frac{0,967 - 1}{0,967}}{1 - 4 \frac{1}{0,967}} = 0,045 \text{ кг/м}^3.$$

9. Рассчитаем удельную производительность трубчатых модулей по формуле (7):

$$J_{т} = J_0 \left(1 - K_{к.т} \frac{-1}{K_{т}} \right) = 3,85 \cdot 10^{-6} \left(1 - 8 \frac{1}{0,967} \right) =$$

$$= 3,402 \cdot 10^{-6}.$$

10. Произведем расчет площади мембраны в трубчатых модулях по формуле (8):

$$F_{т} = \frac{W_{п} \cdot C_{пер.п} \frac{1}{K_{т}}}{C_{пер.п} J_{т} x^2} = 0,071 \text{ м}^2.$$

9. Произведем расчет площади элемента в трубчатом модуле по формуле (9):

$$F_{э.т} = \pi d_{т} l_{т} = 0,003 \text{ м}^2.$$

10. Рассчитаем общее число элементов в трубчатых модулях по формуле (10):

$$n_{т} = \frac{F_{т}}{F_{э.т}} = \frac{0,071}{0,003} \approx 24.$$

Разработанная методика инженерного расчета рабочей площади мембран и количества мембранных элементов в мембранном агрегате и проведенный расчет оптимальных геометрических параметров мембранного агрегата из условия минимизации массы аппарата показали, что для очистки водных анилиносодержащих растворов необходимо семь плоскокамерных элементов и двадцать четыре трубчатых элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Платэ Н.А.* Мембранные технологии – авангардное направление развития науки и техники XXI века // Химические науки и образование в России. URL: <http://www.chem.msu.su/rus/journals/membranes/1/st0.htm> (дата обращения: 25.05.2015).
2. *Лазарев С.И., Кочетов В.И., Богомолов В.Ю., Попов В.Ю.* Расчет и проектирования мембранного агрегата для очистки сточных вод // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2014. Т. 19. Вып. 6. С. 1883-1888.
3. Патент № 2496560 РФ. Мембранный аппарат комбинированного типа / В.И. Кочетов, С.И. Лазарев, В.Ю. Попов. МПК В 01 D 61/18. 2012114024/05; заявл. 10.04.2012; опубл. 27.10.2013. Бюл. № 30. 10 с.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания.

Поступила в редакцию 7 февраля 2017 г.

Лазарев Сергей Иванович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной геометрии и компьютерной графики, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Попов Вадим Юрьевич, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры прикладной геометрии и компьютерной графики, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Лазарев Дмитрий Сергеевич, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, студент, кафедра прикладной геометрии и компьютерной графики, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Левин Александр Александрович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, магистрант по направлению подготовки «Техносферная безопасность», e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Информация для цитирования:

Лазарев С.И., Попов В.Ю., Лазарев Д.С., Левин А.А. Методика расчета рабочей площади мембран и количества элементов в мембранном агрегате // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 1. С. 60-63. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-22-1-60-63

Lazarev S.I., Popov V.Yu., Lazarev D.S., Levin A.A. Metodika rascheta rabochey ploshchadi membran i kolichestva elementov v membrannom agregate [The methods of membranes' working area computation and the amount of elements in membranous aggregate]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 60-63. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-60-63 (In Russian).

UDC 66.08
DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-1-60-63

THE METHODS OF MEMBRANES' WORKING AREA COMPUTATION AND THE AMOUNT OF ELEMENTS IN MEMBRANOUS AGGREGATE

© S.I. Lazarev, V.Y. Popov, D.S. Lazarev, A.A. Levin
Tambov State Technical University
106 Sovetskaya St., Tambov, Russian Federation, 392000
E-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

The methods of engineering computation of membrane space and the amount of membrane elements in membrane aggregate of combined type for reverse-osmosis partition process of commercial solutions containing aniline are worked out. The carried out calculation of optimal geometric parameters of membrane aggregate from the condition of minimization of apparatus mass let us significantly decrease the spending of membrane material and the dimensions of apparatus at keeping the technical requirements on toughness and strength of apparatus. The carried out researches let notice that in apparatus of combined type it is possible to take out the differentiated materials from multi-component systems, to get clean water with high requirements on water quality and decrease the specific material requirement and energy demands on the process of division, cleaning and concentration of commercial solutions.

Key words: membrane aggregate; methods; computation; working space

REFERENCES

1. Plate N.A. Membrannye tekhnologii – avangardnoe napravlenie razvitiya nauki i tekhniki XXI veka [Membranous technologies – vanguard direction of science and technics development of XXI century]. *Khimicheskie nauka i obrazovanie v Rossii* [Chemical Science and Education in Russia]. Available at: <http://www.chem.msu.ru/rus/journals/membranes/1/st0.htm> (accessed 25.05.2015).
2. Lazarev S.I., Kochetov V.I., Bogomolov V.Yu., Popov V.Yu. Raschet i proektirovaniya membrannogo agregata dlya ochistki stochnykh vod [Calculation and design of membrane unit for wastewater treatment]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2014, vol. 19, no. 6, pp. 1883-1888. (In Russian).
3. Kochetov V.I., Lazarev S.I., Popov V.Yu. *Membrannyy apparat kombinirovannogo tipa* [Membranous apparatus of combined type]. Patent no. 2496560 RF, 2013. (In Russian).

GRATITUDE: The work is fulfilled under financial support of Ministry of Education and Science of Russian Federation within the framework of state assign.

Received 7 February 2017

Lazarev Sergey Ivanovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor, Head of Applied Geometry and Computer Graphics Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Popov Vadim Yurevich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Candidate of Technics, Junior Research Worker of Applied Geometry and Computer Graphics Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Lazarev Dmitriy Sergeevich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Student, Applied Geometry and Computer Graphics Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Levin Aleksander Aleksandrovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Master's Degree Student on Training Direction "Security in Technical Sphere", e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru