УДК 66.081.63
10.20310/1810-0198-2017-22-5-1142-1147

ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСТВОРОВ БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБРАТНОГО ОСМОСА

© С.И. Лазарев[1)], Д.С. Лазарев[2)], А.А. Арзамасцев[2)], Д.Н. Протасов[1)], В.Ю. Богомолов[1)], А.А. Лавренченко[1)]
[1)] Тамбовский государственный технический университет
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106
E-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru
[2)] Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина
392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Интернациональная, 33
E-mail: arz_sci@mail.ru

В работе сформулирована задача исследования, что ужесточение требований к качеству очистки промышленных вод поставило перед предприятиями задачу по созданию малосточных, малоотходных и безотходных производств с применением мембран. Выполнены исследование по коэффициенту задержания и выходному потоку в зависимости от концентрации и вида мембран. Исследовано влияние плотности тока на выходной поток при анодной и прикатодной мембран, что позволяет получать пермеат большего количества на прикатодных мембранах, который можно использовать обратно в технологическом процессе. Предложены модифицированные аналитические уравнения для расчета технологических параметров. Отмечено, что при наложении тока наибольшую эффективность разделения по качеству очистки имеет ацетатцеллюлозная мембрана вида МГА-100.
Ключевые слова: мембрана; очистка; обратный осмос; выходной поток; коэффициент задержания

ВВЕДЕНИЕ

Промышленные растворы биохимических производств насыщены разного рода химическими элементами, которые приносят вред человеку и окружающей природе. Их очистка – важная задача не столько для сохранности природы, сколько для обеспечения жизнедеятельности в больших городах, которые, как правило, являются и промышленными центрами. В последнее время во всем мире мембранные технологии широко применяются для выделения высокотоксичных и ценных элементов, разделения водных растворов, водоподготовки и очистки сточных вод. Лидирующее положение в мембранной технологии отводится методам баро- и электромембранной очистки и концентрированию сточных вод и промышленных растворов, возникающих и используемых при воздействии градиентов трансмембранного давления и электрического потенциала. Поэтому исследование кинетических коэффициентов массопереноса в процессе обратноосмотического разделения является актуальной задачей, имеющей важное научное и практическое значение. В настоящей работе изучено влияние концентрации и вида мембран на коэффициент задержания и выходной поток процесса обратноосмотического разделения технологических растворов биохимических производств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на установке, описание и методика проведения исследований которой приведены в работе [1]. При оценке значений экспериментальных данных по коэффициенту задержания от концентрации растворенных веществ для исследуемых типов мембран и для определения характеристик обратноосмотической системы следует учитывать изменения обрабатываемого раствора в результате выделения воды. Большая часть данных по коэффициенту задержания растворенных веществ получена в условиях, когда выделялась лишь незначительная доля воды. В практическом случае обычно желательно выделить большее количество воды, например, сконцентрировать раствор до возможно больших концентраций.

При обратноосмотическом разделении промышленных растворов производства спирта из зернового сырья коэффициент задержания, приведенный на рис. 1, с повышением концентрации уменьшается. Лишь незначительное повышение коэффициента задержания от исходной концентрации раствора в интервале от 24,0 до 26,0 кг/м^3 (рис. 1) связано, вероятно, с уплотнением мембраны ОПМ-К в нормальном положении [2–4].

На основе анализа полученных экспериментальных и литературных данных было принято решение применить для расчета коэффициента задержания математическое уравнение Б.В. Дерягина, Н.В. Чураева, В.М. Старова и Г.А. Мартынова

$$k = 1 - \frac{1}{1 + (\gamma - 1)\left[1 - \exp\left(-\frac{\nu \cdot h}{D_m}\right)\right] \cdot \exp\left(-\frac{\nu \cdot \delta}{D_0}\right)}, \qquad (1)$$

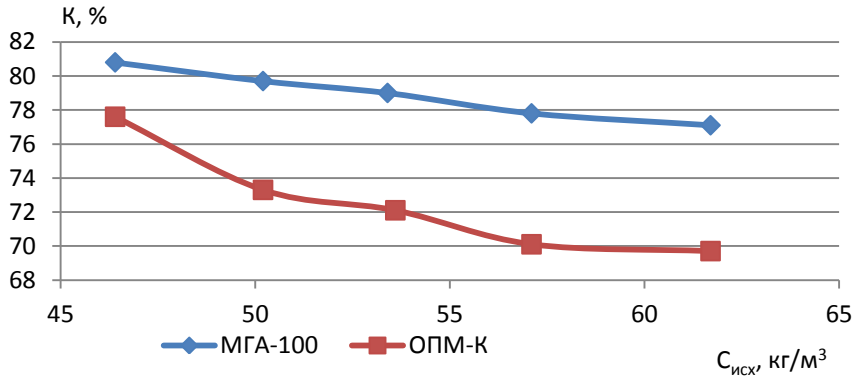

Рис. 1. Зависимость коэффициента задержания мембран МГА-100 и ОПМ-К от концентрации растворенных веществ при разделении технологических растворов производства спирта и дрожжей из мелассы

Таблица 1

Значения коэффициентов k_1, k_2, k_3, n

Раствор	Мембрана	k_1	n	k_2	k_3
Производство спирта и дрожжей из мелассы	МГА-100	141,4111	0,6663	0,0006	–0,3360
	ОПМ-К	209,3150	–0,5759	0,1265	0,3103

Таблица 2

Значения коэффициентов корреляции от концентрации

Вид растворенного вещества	Тип мембраны	Коэффициент корреляции
Производство спирта и дрожжей из мелассы	МГА-100	–0,995
	ОПМ-К	–0,944

где D_0, D_m – коэффициенты диффузии в свободном объеме и в мембране соответственно, которые зависят от концентрации растворенного вещества и температуры раствора.

После обработки экспериментальных данных были получены конкретные значения коэффициентов k_1, k_2, k_3, n для мембран и компонентов, содержащихся в исследованных растворах. Значение коэффициентов k_1, k_2, k_3, n приведено в табл. 1.

Для оценки влияния параметров процесса на коэффициент задержания по методике, изложенной в приложении, были рассчитаны коэффициенты корреляции от концентрации для коэффициента задержания, представленные в табл. 2. Из табл. 2 видно, что коэффициент задержания имеет сильную обратную зависимость от концентрации растворенного вещества, что подтверждает влияние концентрации раствора на коэффициент задержания мембран.

В большей части промышленного оборудования для обратного осмоса используются отечественные ацетатцеллюлозные и полиамидные мембраны. При постоянном рабочем давлении выходной поток растворителя через анизотропные мембраны постепенно снижается. Это связано непосредственно с явлением ползучести мембран, в котором тонкий верхний слой увеличивается по толщине вследствие соединения с тонкопористым подслоем. На рис. 2 приведена зависимость выходного потока от концентрации.

Стоит отметить, что снижение выходного потока растворителя мембран от концентрации растворенных веществ, вероятно, происходит при засорении мембран (рис. 2). Скорость снижения выходного потока растворителя при экспериментальных исследованиях часто превышает скорость снижения, обусловленную уплотнением мембран. Засорение мембран характерно не только для обратного осмоса и других мембранных процессов.

Входной поток для мембран описывается уравнением следующего вида:

$$J = k \cdot (\Delta P - \Delta\pi), \qquad (2)$$

где k – проницаемость мембраны по дистиллированной воде, м/с МПа; ΔP – перепад давления на мембране, МПа; $\Delta\pi$– перепад осмотического давления в растворах по обе стороны мембраны, МПа.

В связи с вышесказанным нами предложена следующая зависимость выходного потока от концентрации внешнего раствора, и температуры определяется по формуле:

$$J = k \cdot (\Delta P - k_1 \cdot C) \cdot \exp(k_2 \cdot C^n) \cdot \exp\left(\frac{A_1}{T}\right), \qquad (3)$$

где k_1, k_2, n, A_1 – числовые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 3.

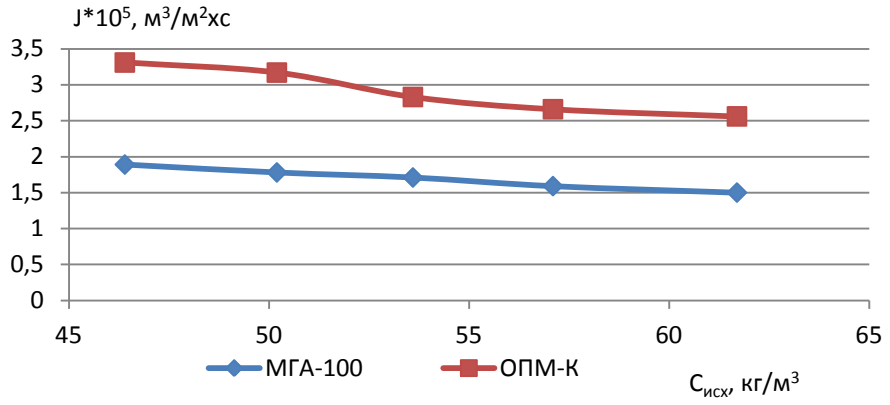

Рис. 2. Зависимость выходного потока мембран МГА-100 и ОПМ-К от концентрации растворенных веществ при разделении технологических растворов производства спирта и дрожжей из мелассы

Таблица 3

Коэффициенты для расчета выходного потока

Раствор	Мембрана	k_1	k_2	n	A_1
Производство спирта и дрожжей из мелассы	МГА-100	0,0969	0,0451	0,0051	237,894
	ОПМ-К	0,1110	0,0369	0,0049	–239,091

Таблица 4

Значения коэффициент корреляции от выходного потока

Вид растворенного вещества	Тип мембраны	Коэффициент корреляции
Производство спирта из зернового сырья	МГА-100	–0,981
	ОПМ-К	–0,969
Производство спирта и дрожжей из мелассы	МГА-100	–0,997
	ОПМ-К	–0,970

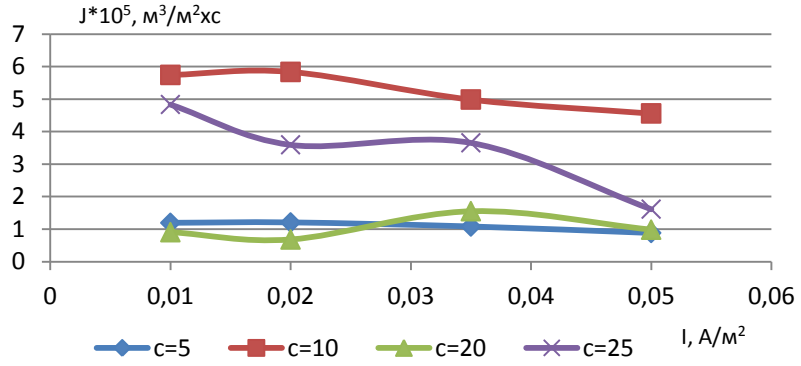

Рис. 3. Зависимость выходного потока мембран от плотности тока, наложенного на прианодной мембране при разделении технологических растворов производства спирта и дрожжей из мелассы

Вид данной аппроксимационной формулы был выбран исходя из следующих соображений: данная формула должна отражать большую часть параметров процесса, которые влияют на выходной поток через мембраны, и учитывать особенности взаимодействия материала мембраны и растворенного вещества.

Из анализа данных, приведенных в табл. 3, видно, что выходной поток имеет сильную обратную зависи-

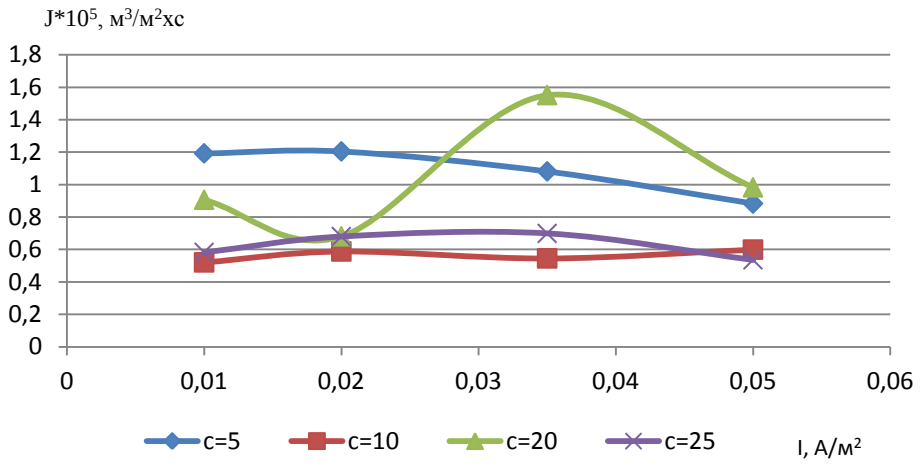

Рис. 4. Зависимость выходного потока мембран от плотности тока на прикатодной мембране при разделении технологических растворов производства спирта и дрожжей из мелассы

мость от концентрации растворенного вещества, что подтверждает влияние концентрации раствора на выходной поток мембран [5–12]. В табл. 4 приведены значения коэффициентов корреляции от концентрации для выходного потока.

На рис. 3–4 показаны зависимости выходного потока растворителя мембран при разной концентрации от плотности тока на мембранах в водных растворах производства спирта и дрожжей из мелассы [6–7].

На прианодной мембране происходит процесс окисления, при этом образуется кислород, при процессе окисления способствующий осадкообразованию, гелеобразованию и т. д. Где дополнительно за счет образования кислорода происходит частичная блокировка пограничного слоя и пор мембраны, вследствие повышения плотности тока выходной поток уменьшается.

На катоде происходит процесс восстановления, где образуется атомарный водород, раствор постепенно подщелачивается, что снижает осадкообразование и увеличивает выходной поток с повышением плотности тока в прикатодной мембране.

ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования по коэффициенту задержания и выходному потоку в зависимости от концентрации и вида мембран и усовершенствованы аналитические уравнения для расчета коэффициента задержания и выходного потока. Отмечено, что наибольшую эффективность разделения имеет ацетатцеллюлозная мембрана типа МГА-100.

2. Исследовано влияние плотности тока на выходной поток прианодной и прикатодной мембран. Выявлено, что большее количество пермеата, которое можно использовать обратно в технологическом процессе, получается на прикатодной мембране.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лазарев С.И., Вязовов С.А.* Исследования кинетических характеристик ионообменной мембраны МК-40 при обратноосмотическом разделении водных растворов белофора // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2005. Т. 48. Вып. 3. С. 91-94.
2. *Кочетов В.И., Лазарев С.И., Попов В.Ю., Богомолов В.Ю.* Расчет и проектирование мембранного агрегата для очистки сточных вод // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2014. Т. 19. Вып. 6. С. 1883-1888.
3. *Кочаров Р.Г., Каграманов Г.Г.* Расчет установок мембранного разделения жидких смесей. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001. 128 с.
4. *Стабников В.Н., Баранцев В.И.* Процессы и аппараты пищевых производств. М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. 348 с.
5. Очистка производственных сточных вод / под ред. С.В. Яковлева. М.: Стройиздат, 1985. 364 с.
6. *Микасян Н.В., Степанян И.О., Соломян М.А., Микасян О.Х.* Очистка сточных вод методом обратного осмоса // Промышленность Армении. 1982. № 7. С. 15-17.
7. *Янаги Т.* Обратный осмос и его применение // Фусэн. 1983. Т. 30. № 1. С. 18-26.
8. *Ясминов А.А., Калгада В.Т., Кожевников А.В.* Разделение растворов низкомолекулярных органических веществ методом обратного осмоса // Химическая промышленность. 1978. № 10. С. 25-30.
9. *Ивара М.* Механизм разделения растворенных веществ методом обратного осмоса // Хёмэи. 1978. Т. 16. № 7. С. 399-412.
10. *Семенов А.Г., Тимофеев А.Е.* Моделирование и расчет ультрафильтрационных установок периодического действия // Техника и технология пищевых производств. 2011. № 1. С. 84-89.
11. *Лазарев С.И., Головашин В.Л., Полянский К.К., Мальцева О.Ю.* Исследование коэффициента задержания в процессе обратноосмотического разделения биологических растворов биохимических производств // Вестник ВГУИТ. 2015. № 2. С. 204-208.
12. *Лазарев С.И., Шестаков К.В., Корнеева О.С., Пронина О.В.* Исследование удельного потока растворителя в процессах ультрафильтрафильтрационного и обратноосмотического разделения биологических растворов // Вестник ВГУИТ. 2015. № 4. С. 176-180.

Поступила в редакцию 20 июля 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

Лазарев Дмитрий Сергеевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, магистрант, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Арзамасцев Александр Анатольевич, Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, г. Тамбов, Российская Федерация, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой математического моделирования и информационных технологий, e-mail: arz_sci@mail.ru

Протасов Дмитрий Николаевич, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат экономических наук, доцент кафедры высшей математики, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Богомолов Владимир Юрьевич, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры природопользования и защиты окружающей среды, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Лавренченко Анатолий Александрович, Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация, кандидат технических наук, ассистент кафедры эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, e-mail: anatoliy_658@mail.ru

UDC 66.081.63
10.20310/1810-0198-2017-22-5-1142-1147

CLEARING OF COMMERCIAL SOLUTIONS OF BIOCHEMICAL PRODUCTION WITH THE USE OF REVERSED OSMOSE

© S.I. Lazarev[1)], D.S. Lazarev[2)], A.A. Arzamastsev[2)], D.N. Protasov[1)], V.Y. Bogomolov[1)], A.A. Lavrenchenko[1)]

[1)] Tambov State Technical University
106 Sovetskaya St., Tambov, Russian Federation, 392000
E-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

[2)] Tambov State University named after G.R. Derzhavin
33 Internatsionalnaya St., Tambov, Russian Federation, 392000
E-mail: arz_sci@mail.ru

The work formulates the task of the study, that requirement strengthening to the quality of sewage treatment set a task to create low-waste and non-waste production and the use of membranes. The research on rejection coefficient and downstream depending on concentration and type of membranes is carried out. The influence of current density on downstream of preanodic current density on downstream of preanodic and precathodic membranes, that let get permeate water more at precathodic membranes, which can be used reverse in technological progress. The modified analytical equations for technological parameters calculation are proposed. It is marked that at current application the most effective is cellulose acetate membrane of type MGA-100.

Keywords: membrane; clearing; reversed osmose; downstream; rejection coefficient

REFERENCES

1. Lazarev S.I., Vyazovov S.A. Issledovaniya kineticheskikh kharakteristik ionoobmennoy membrany MK-40 pri obratnoosmoticheskom razdelenii vodnykh rastvorov belofora [The study of kinetics characteristics of ion membrane MK-40 at reverse-osmosis division of water solutions of belofor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya – Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*, 2005, vol. 48, no. 3, pp. 91-94. (In Russian).
2. Kochetov V.I., Lazarev S.I., Popov V.Yu., Bogomolov V.Yu. Raschet i proektirovanie 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. Kocharov R.G., Kagramanov G.G. *Raschet ustanovok membrannogo razdeleniya zhidkikh smesey* [The calculation of membrane separation of liquid compositions]. Moscow, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia Publ., 2001, 128 p. (In Russian).
4. Stabnikov V.N., Barantsev V.I. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and Food Facility Production]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1983, 348 p. (In Russian).
5. Yakovlev S.V. (ed.). *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod* [Clearing of Industrial Effluent Waters]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1985, 364 p. (In Russian).
6. Mikasyan N.V., Stepanyan I.O., Solomyan M.A., Mikasyan O.Kh. Ochistka stochnykh vod metodom obratnogo osmosa [Sewage water treatment by the method of reverse osmosis]. *Promyshlennost' Armenii – Industry of Armenia*, 1982, no. 7, pp. 15-17. (In Russian).
7. Yanagi T. Obratnyy osmos i ego primenenie [Reverse Osmosis and its Application]. *Fusen*, 1983, vol. 30, no. 1, pp. 18-26. (In Russian).
8. Yasminov A.A., Kalgada V.T., Kozhevnikov A.V. Razdelenie rastvorov nizkomolekulyarnykh organicheskikh veshchestv metodom obratnogo osmosa [Solute portioning of low-molecular organic substance by reverse osmosis method]. *Khimicheskaya promyshlennost' – Russian Chemical Industry*, 1978, no. 10, pp. 25-30. (In Russian).
9. Ivara M. Mekhanizm razdeleniya rastvorennykh veshchestv metodom obratnogo osmosa [Mechanism of dissolved solids division by the method of reverse osmosis]. *Khemei*, 1978, vol. 16, no. 7, pp. 399-412. (In Russian).

10. Semenov A.G., Timofeev A.E. Modelirovanie i raschet ul'trafil'tratsionnykh ustanovok periodicheskogo deystviya [Modeling and calculation of batch operation ultrafiltration plants]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv – Food Processing: Techniques and Technology*, 2011, no. 1, pp. 84-89. (In Russian).
11. Lazarev S.I., Golovashin V.L., Polyanskiy K.K., Maltseva O.Yu. Issledovanie koeffitsienta zaderzhaniya v protsesse obratnoosmoticheskogo razdeleniya biologicheskikh rastvorov biokhimicheskikh proizvodstv [An estimate of the detention in the process of reverse osmosis separation biological solutions biochemical industries]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy – Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2015, no. 2, pp. 204-208. (In Russian).
12. Lazarev S.I., Shestakov K.V., Korneeva O.S., Pronina O.V. Issledovanie udel'nogo potoka rastvoritelya v protsessakh ul'trafil'trafil'tratsionnogo i obratnoosmoticheskogo razdeleniya biologicheskikh rastvorov [Research specific flux of solvent in the processes of ultrafiltration and reverse osmosis of biological solutions separation in biochemical industry]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy – Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2015, no. 4, pp. 176-180. (In Russian).

Received 20 July 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

Lazarev Dmitriy Sergeevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Master's Degree Student, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Arzamastsev Aleksander Anatolevich, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, Doctor of Technics, Professor, Head of Mathematical Modeling and Information Technologies Department, e-mail: arz_sci@mail.ru

Protasov Dmitriy Nikolaevich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Candidate of Economics, Associate Professor of Higher Mathematics Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Bogomolov Vladimir Yurevich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Candidate of Technics, Senior Research Worker of Natural Resource Management and Environmental Protection Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Lavrenchenko Anatoliy Aleksandrovich, Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, Assistant of Motor Transport and Car Service Department, e-mail: geometry@mail.nnn.tstu.ru

Для цитирования: *Лазарев С.И., Лазарев Д.С., Арзамасцев А.А., Протасов Д.Н., Богомолов В.Ю., Лавренченко А.А.* Очистка промышленных растворов биохимических производств с применением обратного осмоса // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1142-1147. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1142-1147

For citation: Lazarev S.I., Lazarev D.S., Arzamastsev A.A., Protasov D.N., Bogomolov V.Y., Lavrenchenko A.A. Ochistka promyshlennykh rastvorov biokhimicheskikh proizvodstv s primeneniem obratnogo osmosa [Clearing of commercial solutions of biochemical production with the use of reversed osmose]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2017, vol. 22, no. 5, pp. 1142-1147. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1142-1147 (In Russian, Abstr. in Engl.).