

М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, Н. В. Цветкова

Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ЗА СЧЕТ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОДОПОДГОТОВКИ

Рассмотрена и решена проблема усовершенствования работы замкнутого цикла водоснабжения, посредством модернизации технологической схемы мембранной водоподготовки (обратноосмотической установки) за счет изменения конфигурации включения мембранных аппаратов и применения других типов мембран, позволяющая снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду. Предложено внедрение мембранного концентратора в схему водоподготовки замкнутого цикла предприятия.

Ключевые слова: оборотный цикл водоснабжения, схема водоподготовки, пермеат, мембранный концентратор, ретенат, обратный осмос

Введение

Рост масштабов хозяйственной деятельности и научно-технический прогресс приводят к исчерпанию природных ресурсов и загрязнению окружающей среды, в частности водных ресурсов, за счет сброса стоков водоподготовительных установок. Наиболее остро данная проблема возникает в промышленно развитых регионах, поскольку промышленным предприятиям необходима вода в значительных количествах и надлежащего качества. Одной из самых распространенных технологий водоподготовки пока еще остается ионообменная технология (ввиду использования устаревших основных фондов предприятий бывшего СССР). Однако она имеет ряд известных недостатков (расходы реагентов и значительное количество засоленных стоков), и сегодня на смену ионообменной, приходит мембранная технология водоподготовки [1, 2]. Использование последней также сопряжено с рядом определенных эксплуатационных факторов, в том числе с образованием высокоминерализованных стоков (концентрата (ретената) обратноосмотических аппаратов). Последние, по сравнению с ионообменной технологией, имеют большую концентрацию при меньших удельных объемах их образования.

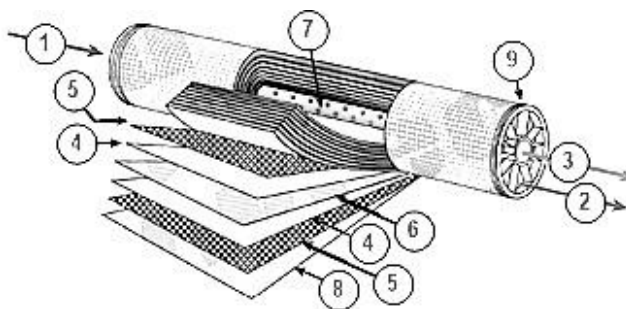
Недостатки существующих технологий обессоливания воды служат толчком к использованию альтернативных источников водоснабжения с повышенной минерализацией, а также к усовершенствованию существующих технологий водоподготовки.

Цель исследования: повышение эффективности работы мембранной технологии водоподготовки путем изменения конфигурации мембранной установки и сокращения сброса стоков (рассола обратноосмотических модулей) за счет увеличения степени концентрирования последних с применением мембранных (обратноосмотических) аппаратов.

Изложение основного материала

В настоящее время наибольшее распространение в процессах водоподготовки получили рулонные фильтрующие элементы (РЭ), которые состоят из одного или нескольких мембранных пакетов (рисунок 1) [3, 4].

Между пакетами расположена разделительная сетка, которая турбулизирует поток воды, создавая зазор между полотнами мембран и формируя напорный канал, а также снижает образование отложений на мембране. Внутри упаковки находится разделительная прокладка с меньшим размером ячейки. Стандартные рулонные мембранные элементы выпускаются диаметром от 1,5 до 8 дюймов [3].



1 – исходная вода; 2 – выход концентрата; 3 – выход фильтрата;
 4 – ОО-мембрана; 5 – прокладка; 6 – прокладка для сбора пермеата;
 7 – перфорированная труба для сбора пермеата;
 8 – внешнее покрытие из стекловолокна; 9 – крышка
 Рисунок 1 – Рулонный мембранный элемент [1]

Во время работы исходный раствор подается в конец корпуса катушки и движется вдоль поверхности мембраны параллельно центральной трубе через разделительную решетку. Концентрат удаляется с противоположного конца. Исходный раствор фильтруется внутри склеенных мембранных пакетов. Пермеат вдоль дренажной прокладки, расположенной внутри упаковки между мембранами, перемещается к центру элемента и проникает через отверстия в центральную трубу для сбора фильтрата и удаляется из устройства.

Ведущими мировыми производителями рулонных элементов обратного осмоса являются: «DOW Chemical (Filmtec)»; «Toray»; «Hydranautics». В России мембраны обратного осмоса и нанофильтрации производятся небольшими партиями ЗАО «Мембрана» (г. Владимир) [3, 4].

Рулонные элементы помещаются в специальные напорные корпуса с внутренним диаметром 2,5; 4 и 8 дюймов. В корпусе располагаются последовательно от 1 до 7 элементов.

Преимуществами рулонного аппарата являются высокая плотность упаковки мембран, технологичность, простота замены элементов. Недостатками являются высокая чувствительность таких мембран к наличию механических примесей и необходимость предварительной очистки исходного раствора от грубых суспензий [5].

Применение мембранного оборудования сопряжено с соблюдением ряда эксплуатационных факторов, которые влияют на производительность и срок службы мембран, а также на эффективность обессоливания и энергетические показатели [6]. Это вызывает необходимость выполнения исследований по повышению эффективности работы мембранного оборудования.

Во время моделирования процессов работы мембранного оборудования при различных конфигурациях подключения аппаратов в ходе обессоливания воды использовалась программа «ROSA 7.27». На рисунках 2 и 3 изображены, соответственно, двухступенчатая и одноступенчатая схемы обратноосмотической установки с применением наиболее распространенных обратноосмотических элементов Filmtec BW30-400.

Изменение конфигурации подключения корпусов обратноосмотических аппаратов позволяет гибко регулировать производительность оборудования за счет изменения выхода пермеата [7, 8]. В ряде случаев (например, при использовании ретентата для дальнейшего его концентрирования) целесообразно применять одноступенчатую схему включения мембранных аппаратов, так как при этом достигаются лучшие показатели пермеата по сравнению с другими схемами (ввиду отсутствия усреднения при смешении пермеата каждой ступени) и сохраняется достаточный уровень выхода пермеата. Предложено использование современных высокопроизводительных и энергосберегающих мембранных обратноосмотических элементов XFRLE-400/34i, а также HSRO-390-FF с достаточно низким номинальным рабочим давлением, что позволяет снизить затраты на электроэнергию с 0,7 до 0,47 кВт/м³, а с рециркуляцией до 0,56 кВт/м³ полученного пермеата.

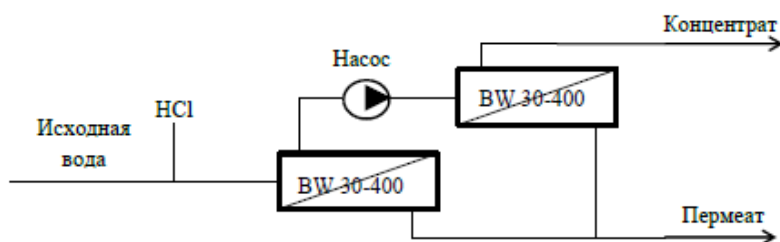


Рисунок 2 – Двухступенчатая схема установки обратного осмоса

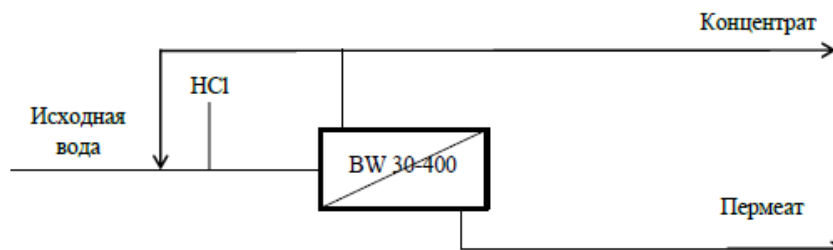


Рисунок 3 – Одноступенчатая схема установки обратного осмоса с повторным использованием концентрата

Показатели работы мембранных элементов и качества продуктов (пермеата и концентрата) при использовании обратноосмотических элементов HSRO-390-FF в двухступенчатой и одноступенчатой схемах мембранной водоподготовки сведены в таблицы 1 и 2. Указанные элементы более устойчивы к повышению температуры исходной воды и промывочного раствора.

Таблица 1 – Показатели работы мембранных элементов HSRO-390-FF и качества продуктов двухступенчатой установки

Ступень	Элемент	Выход на каждый элемент	Показатели пермеата		Показатели концентрата		Давление, бар
			м ³ /ч	мг/л	м ³ /ч	мг/л	
1	1	0,12	1,23	15,18	10,71	3376,63	На входе
	2	0,12	1,16	18,15	9,48	3814,41	10,78
	3	0,13	1,08	22,02	8,32	4342,97	10,56
	4	0,14	1,00	27,19	7,24	4988,21	10,38
	5	0,15	0,91	34,27	6,24	5783,37	10,24
	6	0,15	0,82	44,30	5,33	6769,05	10,12
2	1	0,13	0,69	58,19	5,26	7988,89	9,68
	2	0,13	0,59	77,02	4,57	9192,67	9,58
	3	0,12	0,48	104,18	3,98	10 533,41	9,51
	4	0,11	0,38	143,66	3,50	11 958,26	9,44

Таблица 2 – Показатели работы мембранных элементов HSRO-390-FF и качества продуктов одноступенчатой установки с повторным использованием концентрата

Ступень	Элемент	Выход на каждый элемент	Показатели пермеата		Показатели концентрата		Давление, бар
			м ³ /ч	мг/л	м ³ /ч	мг/л	
1	1	0,12	0,94	23,05	7,73	4105,92	9,18
	2	0,13	0,87	28,29	6,78	4674,73	9,01
	3	0,13	0,79	35,34	5,91	5357,11	8,88
	4	0,14	0,70	45,03	5,13	6175,06	8,77
	5	0,14	0,61	58,66	4,42	7148,22	8,68
	6	0,14	0,52	78,19	3,81	8285,54	8,60

В результате анализа работы обратноосмотического оборудования было предложено применение в схемах обессоливания двух типов мембранных обратноосмотических элементов (XFRLE-400/34i, HSRO-390-FF). Исследования показали, что использование мембранных элементов XFRLE-400/34i и HSRO-390-FF улучшает энергетические показатели (снижает удельный расход электроэнергии) работы установки и обеспечивает сохранение высокого качества пермеата.

На рисунках 4 и 5 представлены уравнения зависимостей производительности мембранных элементов от температуры и давления.

Приведенные зависимости позволяют прогнозировать изменение эксплуатационных параметров работы обратноосмотической установки без снижения срока службы мембран, что особенно важно при использовании элементов HSRO-390-FF.

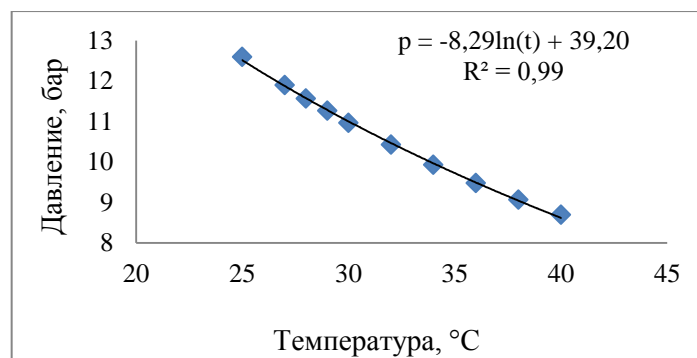


Рисунок 4 – Зависимость величины давления исходного раствора от температуры

Приведенная графическая зависимость описывается следующей формулой:

$$p = -8,292\ln(t) + 39,205.$$

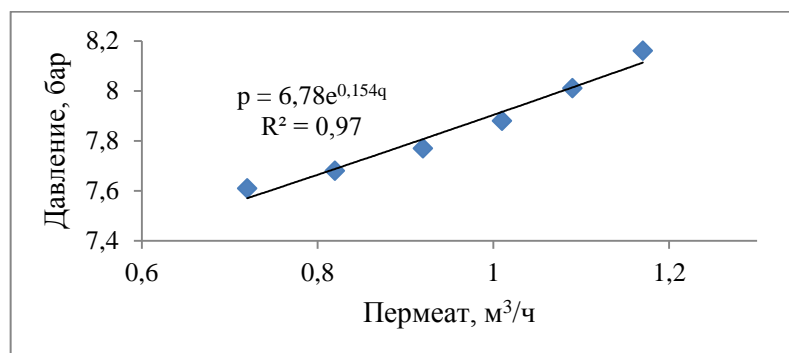
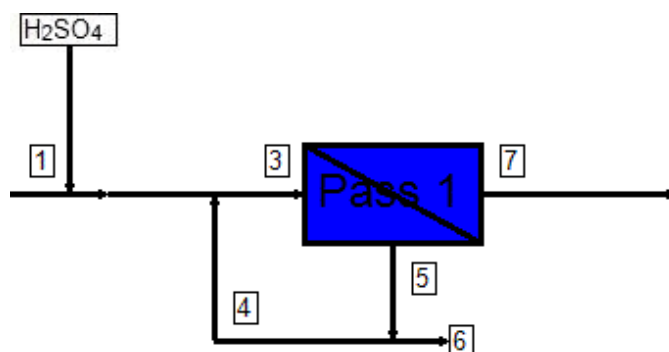


Рисунок 5 – Зависимость производительности мембранного элемента (для корпуса из 6 элементов) от давления

Приведенная графическая зависимость описывается следующей формулой:

$$p = 6,78e^{0,154q}.$$

Для уменьшения объема концентрата и соответствующего снижения нагрузки на наиболее дорогостоящие процессы с фазовым переходом предложено использование мембранного концентратора (МК) на основе мембран для высокоминерализованной воды (морской) SW30HRLE-440i и им подобных по техническим параметрам. Схема мембранного концентратора показана на рисунке 6, а основные параметры работы мембранных элементов в концентраторе сведены в таблицу 3.



1 – входной поток; H₂SO₄ – дозируемая кислота;
 3 – входной поток с рециркуляцией; 4 – рециркуляция; 5 – рассол;
 6 – рассол; 7 – пермеат

Рисунок 6 – Схема мембранного концентратора

Предложенный двухступенчатый МК дает возможность увеличить концентрацию ретентата обратноосмотических модулей предыдущего цикла водоподготовки до 4 раз. При этом полученный на двухступенчатом концентраторе пермеат имеет параметры, позволяющие направлять его на дальнейшее глубокое обессоливание в ФСД. Параметры работы мембранного концентратора (по каждому элементу корпуса) представлены в таблице 4.

Таблица 3 – Показатели работы мембранного одноступенчатого концентратора с применением мембран SW30HRLE-440i

Ступень	Элемент	Выход на каждый элемент	Показатели пермеата		Показатели концентрата		Давление, бар на входе
			м ³ /ч	мг/л	м ³ /ч	мг/л	
1	1	0,10	1,36	18,95	14,00	16 225,57	36,62
	2	0,10	1,29	22,0	12,64	17 970,36	36,14
	3	0,11	1,21	25,88	11,35	20 005,11	35,73
	4	0,11	1,12	30,90	10,15	22 382,55	35,37
	5	0,11	1,02	37,51	9,03	25 156,92	35,07

Таблица 4 – Показатели работы мембранного двухступенчатого (по ретентату) концентратора с применением мембран SW30HRLE-440i

Ступень	Элемент	Выход на каждый элемент	Показатели пермеата		Показатели концентрата		Давление, бар На входе
			м ³ /ч	мг/л	м ³ /ч	мг/л	
1	1	0,8	1,26	27,91	16,67	24 767,74	49,66
	2	0,8	1,18	32,15	15,41	26 786,33	49,03
	3	0,8	1,09	37,28	14,23	28 995,28	48,47
	4	0,8	1,01	43,53	13,14	31 399,47	47,97
	5	0,8	0,92	51,22	12,14	33 996,52	47,52
2	1	0,8	1,38	38,26	16,83	36 773,54	61,77
	2	0,8	1,27	45,03	15,45	40 062,47	61,13
	3	0,8	1,15	53,52	14,18	43 650,38	60,56
	4	0,8	1,03	64,28	13,02	47 515,90	60,06
	5	0,8	0,91	78,04	11,99	51 612,14	59,61

Использование указанного МК с рециркуляцией потока ретентата обеспечивает получение дополнительного количества подготовленной воды (пермеата). Выход пермеата в дан-

ном концентрате с использованием рециркуляции составляет до 75 % от исходного потока. Схема включения обратноосмотической установки с применением мембранного концентратора представлена на рисунке 7.

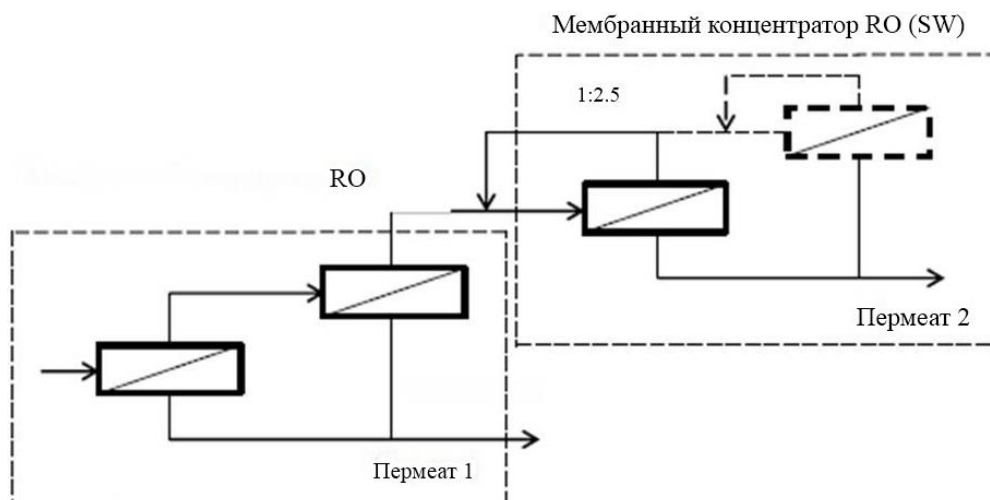


Рисунок 7 – Схема включения обратноосмотической установки с использованием мембранного концентратора

Образовавшийся после МК рассол целесообразно подавать на установки упаривания, работа которых приближена к режиму идеального вытеснения, работающих за счет солнечной энергии, которая позволит еще более чем в 2 раза повысить концентрацию, что в свою очередь позволит снизить затраты энергии на дальнейшее упаривание.

Выводы

В ходе исследований обоснованно усовершенствование функционирования замкнутого цикла водоснабжения, путем модернизации технологической схемы мембранной водоподготовки (обратноосмотической установки) за счет изменения конфигурации включения мембранных аппаратов и применения других типов мембран.

Выполнено программное моделирование мембранного концентратора для увеличения степени концентрирования ретентата. Предложено его внедрение в схему мембранной водоподготовки замкнутого цикла водоснабжения предприятия.

Список литературы

1. Высоцкий, С. П. Совершенствование технологий очистки воды / С. П. Высоцкий, А. В. Фаткулина, М. В. Коновальчик // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2006. – № 67 (90). – С. 81–94.
2. Zularisam, A. W. Behaviours of Natural Organic Matter in Membrane Filtration for Surface Water Treatment – a Review / A. W. Zularisam, A. F. Ismail, R. Salim // Desalination. – 2006. – 194. – P. 211–231.
3. Янковский, Н. А. Создание замкнутой системы водообеспечения промышленного предприятия / Н. А. Янковский, В. А. Степанов, Б. В. Кравченко. – Донецк : Лебедь. – 2004. – 284 с. – ISBN 966-508-252-3.
4. Высоцкий, С. П. Проблемы выбора технологий обессоливания воды / С. П. Высоцкий, М. В. Коновальчик // Энергосбережение и водоподготовка. – 2016. – № 2 (100). – С. 29–35.
5. Drioli, E. Progress and New Perspectives on Integrated Membrane Operations for Sustainable Industrial Growth / E. Drioli, M. Romano // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2001. – 40 (5). – P. 1277–1300.
6. Orchard, B. Better Efficiency in RO Plants / B. Orchard // Desalination. – 2006. – № 9. – P. 24–27.
7. Vysotky S. The Improvement of Water Treatment Technologies for Saline Wastes Discharge Reduction / S. Vysotky, M. Konovalchik // Проблеми екології: загальнодерж. наук.-техн. журн. – 2013. – № 1 (31). – С. 14–18.
8. Voutchkov, N. Desalination Cost Reduction: the Facts / N. Voutchkov // Desalination. – 2006. – № 8. – P. 26–30.

М. В. Коновальчик, Н. В. Цветкова
Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка
Повышение эффективности работы замкнутого цикла водоснабжения предприятия
за счет усовершенствования мембранной технологии водоподготовки

Рост масштабов хозяйственной деятельности и научно-технический прогресс приводят к истощению природных ресурсов и загрязнению окружающей среды, в частности водных ресурсов, за счет сброса стоков водоподготовительных установок. Наиболее остро данная проблема возникает в индустриально развитых регионах, поскольку промышленным предприятиям необходима вода в значительных количествах и надлежащего качества. Одной из самых распространенных технологий водоподготовки пока еще остается ионообменная технология (ввиду использования устаревших основных фондов предприятий бывшего СССР). Однако она имеет ряд известных недостатков (расходы реагентов и значительное количество засоленных стоков).

В настоящее время на смену ионообменной приходит мембранная технология водоподготовки, использование которой также сопряжено с рядом определенных эксплуатационных факторов, в том числе с образованием высокоминерализованных стоков (концентрата (ретентата) обратноосмотических аппаратов). Последние, по сравнению с ионообменной технологией, имеют большую концентрацию при меньших удельных объемах их образования.

Недостатки существующих технологий обессоливания воды служат толчком к усовершенствованию существующих технологий водоподготовки и использованию вод повышенной минерализации (в том числе шахтных) как альтернативного источника водоснабжения.

Обоснованно усовершенствование работы замкнутого цикла водоснабжения, путем модернизации технологической схемы мембранной водоподготовки (обратноосмотической установки) за счет изменения конфигурации включения мембранных аппаратов и применения других типов мембран.

Выполнено программное моделирование мембранного концентрата для увеличения степени концентрирования ретентата, и предложено его использование в схеме мембранной водоподготовки замкнутого цикла водоснабжения предприятия.

ОБОРОТНЫЙ ЦИКЛ ВОДОСНАБЖЕНИЯ, СХЕМА ВОДОПОДГОТОВКИ, ПЕРМЕАТ, МЕМБРАННЫЙ КОНЦЕНТРАТОР, РЕТЕНТАТ, ОБРАТНЫЙ ОСМОС

M. V. Konovalchik, N. V. Tsvetkova
Automobile and Highway Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka
Operating Efficiency Increase of the Closed Cycle of the Enterprise Water Supply Due to the
Improvement of the Water Treatment Membrane Technology

The growth of economic activity and scientific and technical progress lead to the exhaustion of natural resources and environment pollution in particular water resources due to the waste discharge of water treatment plants. This problem is the most acute in industrially developed regions, since industrial enterprises need water in large quantities and of good quality. One of the most common water treatment technologies is still ion-exchange technology (due to the use of outdated fixed assets of the former USSR enterprises). However, it has a number of known drawbacks (reagent costs and a significant amount of salted water flows).

Currently, ion-exchange technology is being replaced by membrane technology of water treatment, the use of which also involves a number of specific operational factors, including the formation of highly mineralized effluents (concentrate (retentate) of reverse-osmosis machines). The latter, as compared with the ion-exchange technology, have a greater concentration with smaller specific volumes of their formation.

The disadvantages of existing water desalination technologies serve as an impetus to the improvement of the existing water treatment technologies and the use of increased salinity waters (including mine waters) as an alternative source of water supply.

It is reasonable to improve the work of the water supply closed cycle by upgrading the technological scheme of membrane water treatment (of reverse-osmosis plant) by changing the configuration of the reverse-osmosis machines engaging and the use of other types of membranes.

A software simulation of a membrane concentrator is performed to increase the degree of the retentate concentration, and its use in the membrane water treatment scheme of a closed cycle water supply plant is proposed.

REVERSE WATER SUPPLY CYCLE, WATER TREATMENT SCHEME, PERMEATE, MEMBRANE CONCENTRATOR, RETENTATE, REVERSE OSMOSIS

Сведения об авторах:

М. В. Коновальчик

SPIN-код: 1616-9285

ORCID ID: 0000-0002-3943-2922

Телефон: +38 (071) 364-33-43

Эл. почта: max.k30@mail.ru

Н. В. Цветкова

Телефон: +38 (071) 443-42-70

Эл. почта: zvetko96@mail.ru

Статья поступила 18.03.2019

© М. В. Коновальчик, Н. В. Цветкова, 2019

Рецензент: А. П. Карпинец, канд. хим. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»