

УДК 628.105+541.18.045+541.67

Высоцкий С.П., д.т.н., Коновальчик М.В., магистр

АДИ ГВУЗ «ДонНТУ», г. Горловка

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ МЕМБРАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Выполнено сравнение эксплуатационных параметров мембранных установок при использовании расчетных программ фирм "Filmtec" и "Hydranautics". Проведен анализ влияния технологических схем подключения мембранных аппаратов на производительность оборудования. Определены содержание отдельных ионов в пермиате и затраты электроэнергии.

Постановка проблемы

В последнее время постоянно увеличивается область применения мембранных технологий очистки воды. Эффективная работа, долговечность и надежность их использования зависит от целого ряда факторов: технологии предочистки воды, солесодержания и ионного состава воды, конфигурации включения аппаратов, рабочего давления и др.

На энергетических комплексах (тепловых и атомных электростанциях), а также химических предприятиях до настоящего времени основной технологией очистки воды является ее очистка в ионитных фильтрах. Однако при эксплуатации последних потребляется значительное количество реагентов, которые в виде разбавленных засоленных стоков поступают в поверхностные водоемы. Это приводит к деградации поверхностных водных источников и в ряде случаев исключает возможность использования воды приоритетными потребителями. [3]

В настоящее время предъявляются повышенные требования к сбросу засоленных стоков, что вызывает необходимость замены существующих ионообменных технологий на мембранные. Последние обладают рядом достоинств: практически полное исключение потребления реагентов на процесс обессоливания воды, высокая степень обессоливания за один проход и снижение сброса солей до уровня, эквивалентного содержанию солей в исходной воде.

При использовании обратноосмотического оборудования, несмотря на некоторую простоту схемы соединения аппаратов и обслуживания, необходимо учитывать специфические особенности их эксплуатации, в частности, распределение нагрузки между корпусами и мембранными элементами. В противном случае наблюдаются потери эксплуатационных свойств технологического процесса: повышение затрат электроэнергии, снижение степени обессоливания и выхода чистой воды – пермиата или увеличения капитальных затрат на установки.

Цель работы

Цель данного исследования – сравнение параметров элементов производства «Hydranautics» и «Filmtec» и выявление недостатков или преимуществ конкретных мембран. Анализ осуществляется на основе данных полученных с помощью программ анализа систем обратного осмоса ROSA 6.0 предоставленных фирмой "FilmTec Corporation" и IMSdesign 8.8 – фирмой «Hydranautics». В исследованиях была использована шахтная вода с наиболее распространенным ионным составом для донецкого региона, основные показатели которой представлены в таблице 1.

Основная часть

Высокоселективные мембраны фирмы «Hydranautics» широко используются в мировой практике при подготовке воды для промышленных циклов. По данным фирмы «Hydranautics», более 5,68 млн. м³/сутки чистой воды вырабатывается во всем мире использованием их мембран. Многие производители полупроводниковой техники также применяют

Сравнение показателей работы мембранных элементов при различной конфигурации включения обратноосмотических аппаратов

Параметр	Концентрация ионов в исходной воде	3-х ступенчатая система			
		Концентрат		Пермиат	
		Элементы		Элементы	
		Film Tec	Hydranautics	Film Tec	Hydranautics
	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>
Na	186,8	788,7	793,6	4,18	3,11
Mg	95,7	408,7	397,7	0,79	0,32
Ca	117,8	502,8	489,6	0,95	0,40
CO₃	0,00	0,1	3,8	0,00	0,00
HCO₃	84,5	355,7	403,0	4,49	2,68
NO₃	0,4	1,7	1,5	0,05	0,04
Cl	184,2	776,9	758,7	4,37	2,79
SO₄	734,2	3132,4	3049,9	6,49	2,80
SiO₂	25,0	106,5	103,3	0,27	0,29
CO₂	293,8	293,9	-	292,2	-
Солесодержание	1428,7	6073,7	6001,0	21,6	12,4
pH	5,5	6,0	8,6	4,4	6,5

Продолжение табл. 1

Параметр	2-х ступенчатая система				1-но ступенчатая система				Тип и количество элементов
	Концентрат		Пермиат		Концентрат		Пермиат		
	Элементы		Элементы		Элементы		Элементы		
	Film Tec	Hydranautics	Film Tec	Hydranautics	Film Tec	Hydranautics	Film Tec	Hydranautics	
	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	<i>мг/л</i>	
Na	774,4	819,9	3,54	2,32	767,2	798,0	3,41	1,73	FIMTEC BW30-400 и Hydranautics Membrane SPA3 132 шт.
Mg	400,6	409,9	0,68	0,24	396,6	398,2	0,69	0,18	
Ca	492,8	504,6	0,82	0,30	487,9	490,1	0,82	0,22	
CO₃	0,1	3,9	0,00	0,00	0,09	3,8	0,00	0,00	
HCO₃	349,3	417,3	4,29	2,00	345,9	406,8	4,28	1,49	
NO₃	1,7	1,6	0,04	0,03	1,72	1,6	0,04	0,02	
Cl	763,1	783,7	3,69	2,09	756,1	762,6	3,52	1,55	
SO₄	3070,2	3143,8	5,58	2,09	3039,9	3053,8	5,60	1,56	
SiO₂	104,4	106,6	0,23	0,21	103,4	103,7	0,22	0,16	
CO₂	293,9	-	292,07	-	293,9	-	292,10	-	
Солесодержание	5956,6	6191,3	18,8	9,3	5899,1	6018,5	18,6	6,9	
pH	5,9	8,6	4,4	6,4	5,9	8,6	4,4	6,3	

мембраны «Hydranautics» для получения ультрачистой воды. Указанная фирма выпускает широкий диапазон мембранных элементов (серии CPA, LFC, SWA, ESNA, ESPA). Мембраны CPA являются наиболее универсальными. Они имеют разновидности: CPA 2 – самые распространенные элементы и имеющие производительность до 37,9 м³/сутки; CPA 3 – элементы с наилучшим сочетанием производительности и селективности (до 41,6 м³/сутки и 99,6% соответственно); CPA 4 – применяются там, где требуется высокая селективность (в среднем до 99,7%). Последние используют, в основном, для получения подпиточной воды для котлов высоко давления [4]. Выгодно отличаются элементы серии LFC – новое поколение мембран с

высокой устойчивостью к биообрастанию и загрязнению. Мембранные элементы ESNA являются **наночелнофилтрационными**. Они обеспечивают высокую селективность при больших значениях жесткости и концентрации соединений железа в исходной воде. Мембраны SWC используются для **обессоливания морской воды**. Мембраны серии ESPA обеспечивают высокую производительность и селективность в сочетании с низкими затратами энергии.

Эксперты фирмы рекомендуют использовать их для получения питьевой воды. Производительность этих мембран достигает до $53 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Активным участником рынка в области водоподготовки является компания Dow Liquid Separations, которая также занимает лидирующие позиции по технологиям очистки воды для промышленного, бытового и питьевого водоснабжения. Одним из методов очистки воды, которым занимается данная компания, является мембранная технология, основанная на применении обратноосмотических (RO) и наночелнофилтрационных (NF) элементов FILMTEC. Данные элементы выпускаются фирмой "FilmTec Corporation", являющейся составной частью Dow. Элементы FILMTEC обеспечивают эффективную очистку воды от широкого спектра растворенных веществ как органического, так и неорганического происхождения и работоспособны даже при относительно низком избыточном давлении. Они характеризуются высокой стабильностью структуры и обеспечивают более высокую производительность, чем большинство аналогов (по заявлениям производителя) [2].

При изготовлении элементов FILMTEC используются конструкционные материалы, сочетающие высокие рабочие характеристики с их невысокой стоимостью. Обратноосмотические элементы FILMTEC имеют большую поверхность активной мембраны, благодаря чему их производительность на 20-40% выше, чем у аналогов. Усовершенствованная конструкция элементов, применяемых в технологическом цикле производства полупроводников, позволяет сократить до минимума количество общего органического углерода, поступающего в обрабатываемую воду из элемента. NF-элементы FILMTEC обладают высокой селективностью по солям кальция, магния и других поливалентных элементов.

В основе конструкции элементов FILMTEC лежит тонкопленочная композитная мембрана FT30, которая уже длительное время используется в обратноосмотических элементах. Мембраны FILMTEC состоят из трех слоев: ультратонкого барьерного слоя из полиамида, микропористого полисульфонового среднего слоя и высокопрочной полиэфирной основы. Подложкой конструкции является нетканый материал. Полиамидный барьерный слой хорошо пропускает воду, задерживая при этом соли и двуокись кремния, и отличается высокой химической стойкостью. Толстый полисульфоновый средний слой обладает необходимыми пористостью и прочностью, предотвращающими повреждение мембраны под воздействием значительных перепадов давления в условиях обратного осмоса.

Фирма "FilmTec Corporation" также выпускает широкий спектр обратноосмотических мембранных элементов для морской воды (SW, SW-HR и низкого давления SW-XLE), солоноватой (BW, BW-XLE) и речной (TW, TW-XLE), а также наночелнофилтрационные элементы.

Мембранные элементы в обратноосмотической установке могут быть собраны по разным схемам, конфигурациям.

При двухступенчатой схеме (по концентрату) обработки воды (рис. 1) первая и третья ступени концентрирования включаются как первая ступень, а вторая – эксплуатируется в прежнем режиме. При этом нормально закрытые задвижки находятся в открытом состоянии, а нормально открытые – в закрытом.

Мембранные элементы различных производителей имеют разные рабочие характеристики, поэтому установки разной конфигурации могут работать с отличающимися друг от друга показателями. В данной работе было проведено исследование основных параметров работы мембранных элементов (установок) фирм "FilmTec" и "Hydranautics".

Изменение схемы подключения корпусов (рис. 1, 2) дает возможность, не повышая давление, увеличить выход обсоленной воды, при этом предотвращая "крип" мембран.

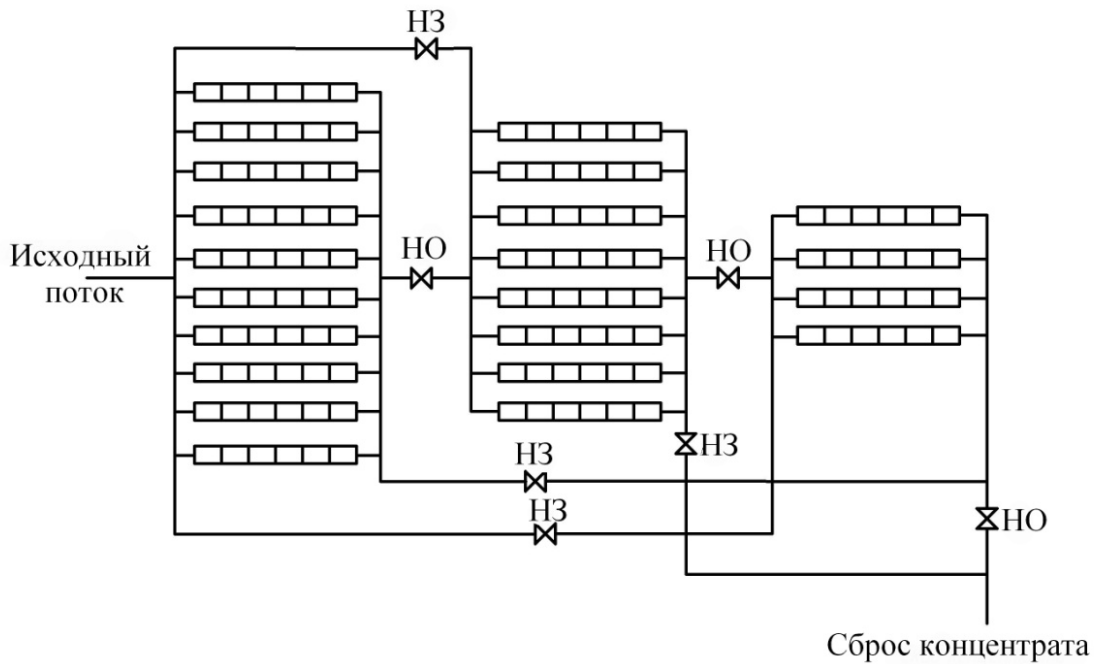


Рис. 1. Организация потоков обрабатываемой воды с переходом от трехступенчатой схемы к двухступенчатой (по концентрату): НО, НЗ — нормально открытые и закрытые задвижки

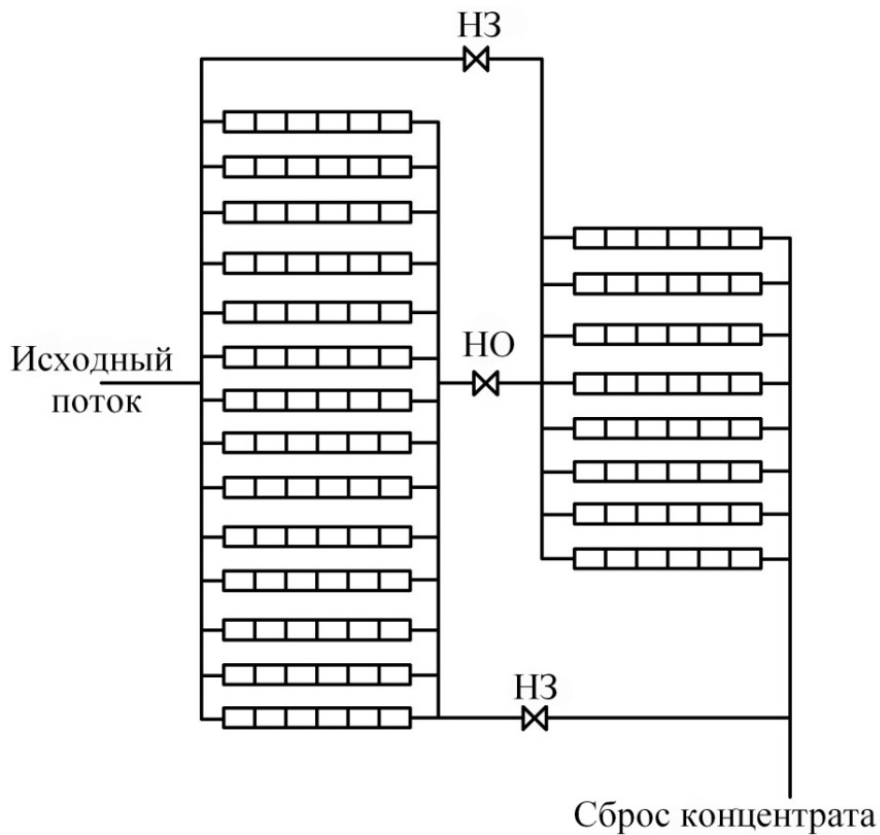


Рис. 2. Изменение схемы подключения корпусов для двухступенчатой установки с последовательной (по концентрату) на параллельную

На рис. 1, 2 показаны только потоки обрабатываемой (обессоленной) воды.

Из приведенной на рис. 3 диаграммы видно, что мембранные элементы фирмы «Hydranautics» и «Filmtec» имеют близкие характеристики по затратам энергии при их 1, 2, 3-х ступенчатом включении мембранных элементов.

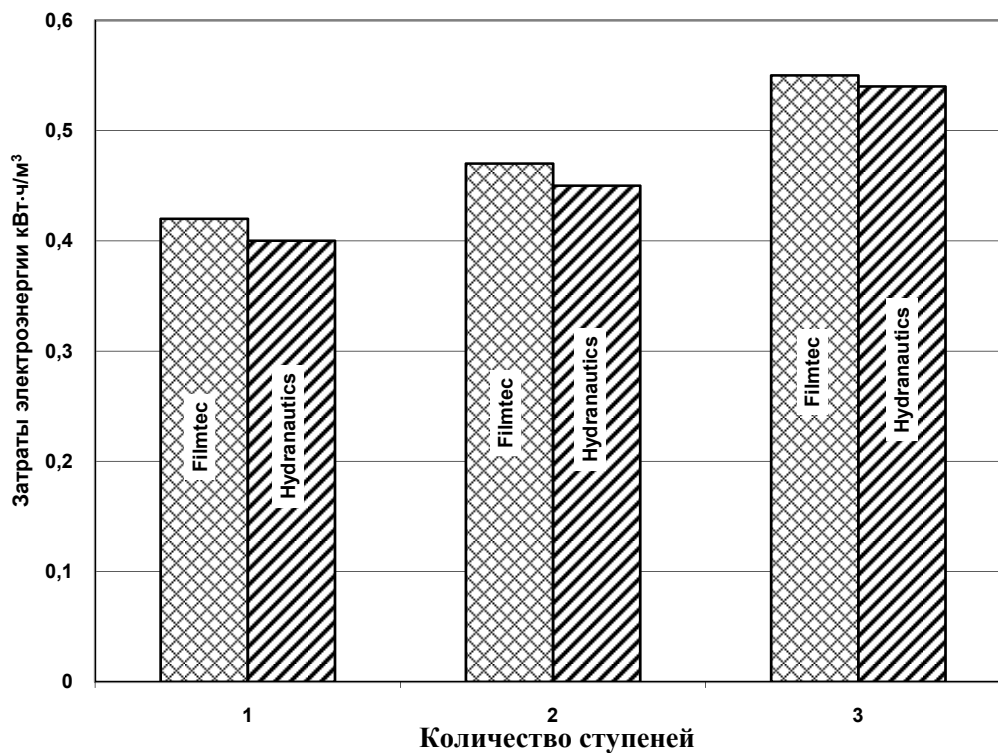


Рис. 3. Сравнительная диаграмма затрат электроэнергии мембранных установок ведущих производителей

Однако мембранные элементы Hydranautics обладают существенно большей селективностью. Они в 2 раза уменьшают солесодержание в пермиате по сравнению с мембранами Filmtec, что существенно влияет на эффективность работы фильтров смешанного действия, обеспечивающих "финишную" очистку воды. Данные сравнения работы мембранных элементов по солесодержанию пермиата представлены на рис. 4.

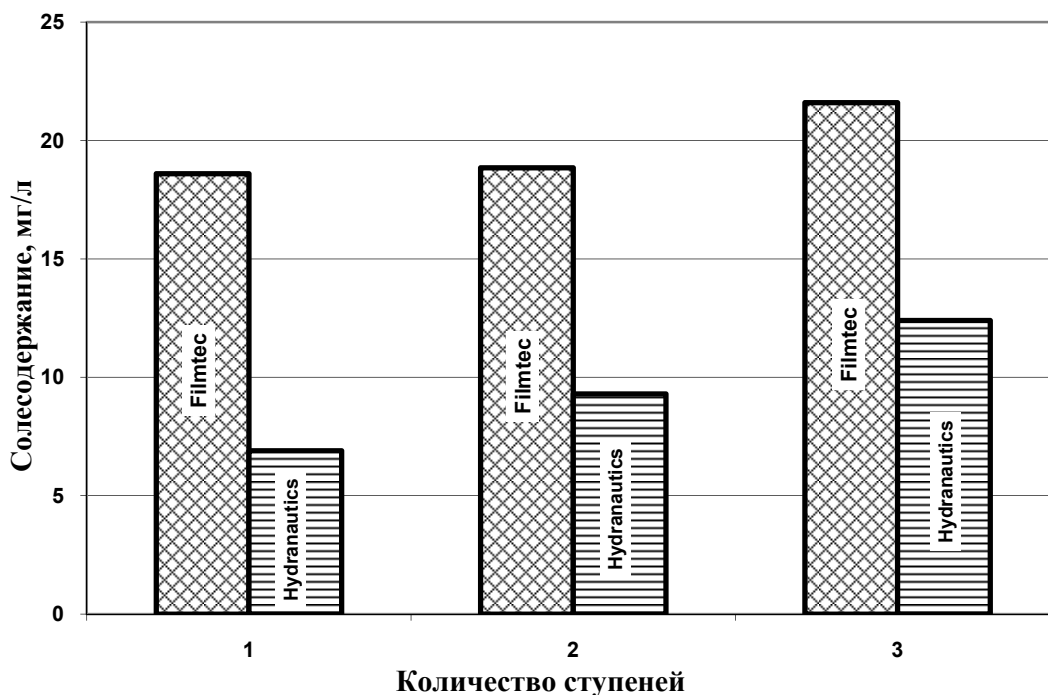


Рис. 4. Зависимость солесодержания пермиата от конфигурации подключения аппаратов

Известно, что мембраны обратноосмотических аппаратов имеют различную селективность по отношению к одно- и двухзарядным ионам [2]. Значительный практический интерес представляет определение проницаемости мембран по отношению к ионам различной валентности при изменении конфигурации подключения обратноосмотических аппаратов.

Степень задержания ионов характеризуется соотношением концентрации солей в обессоленной и исходных водах – C/C_0 . Для наглядности на рис. 5 представлены зависимости соотношения содержания ионов в пермиате и соотношение C/C_0 при 2-х ступенчатой схеме подключения мембранных аппаратов.

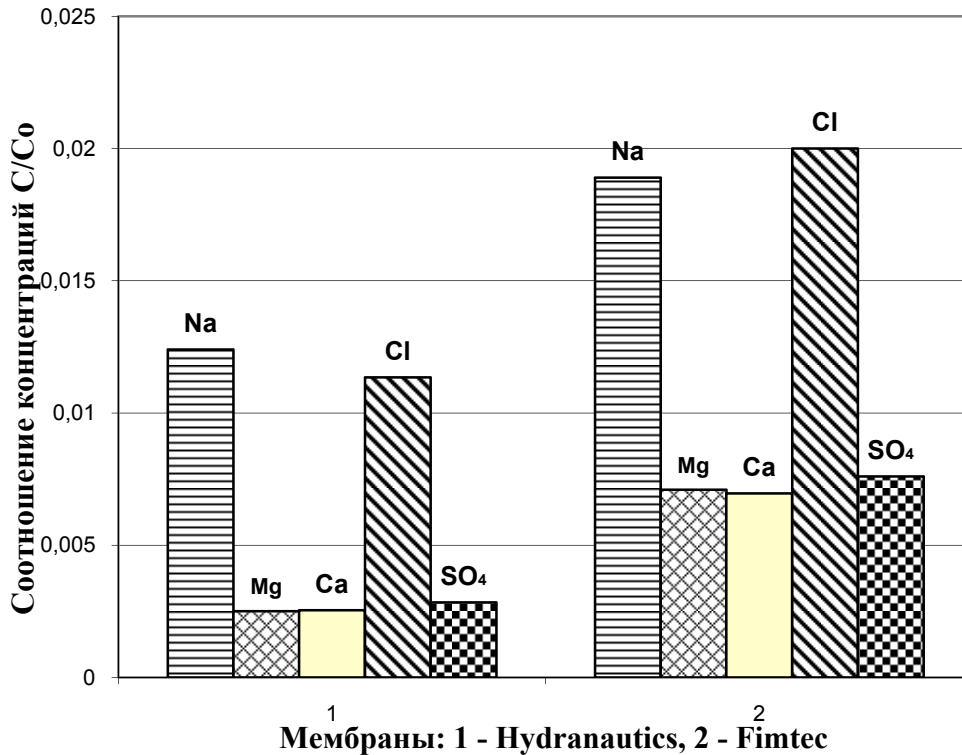


Рис. 5. Сравнение соотношений концентраций солей в пермиате и исходной воде (C/C_0) при использовании мембранных элементов «Hydranautics» и «Filmtec»

Сравнение проточности различных ионов в пермиате при 1-но, 2-х и 3-х ступенчатом включении мембранных аппаратов (с элементами разных производителей) представлено в таблице 1.

Изменение конфигурации подключения корпусов обратноосмотических аппаратов позволяет гибко регулировать производительность оборудования за счет изменения выхода пермиата. При этом при одинаковой производительности можно достичь значительной экономии электрической энергии.

Изменение конфигурации подключения корпусов также дает возможность управлять качеством пермиата. Наиболее целесообразно использовать двухступенчатую схему включения мембранных аппаратов, при которой достигаются наилучшие показатели пермиата по сравнению с другими схемами. Также в результате исследований работы установок (с количеством элементов в корпусе 4, 5 и 6) было выявлено, что оптимальное количество мембранных элементов в корпусе составляет 6 шт.

В приведенных ниже таблицах отражены параметры работы мембранных элементов двух разных производителей: «Hydranautics» и «Filmtec». Таблицы приведены для трех возможных конфигураций подключения обратноосмотических аппаратов с основными показателями расходов, давлений, и соледержания пермиата. Данные приведенные в таблицах свидетельствуют о том, что мембранные элементы фирмы «Hydranautics» заметно отличаются

ся большей производительностью и лучшим качеством пермиата (солесодержание пермиата в 2 раза меньше) при одном и том же давлении исходной воды (14,5 бар). Но при этом наблюдается некоторое увеличение расхода электроэнергии по сравнению с мембранными элементами «Filmtec». У последних наблюдается меньшая производительность при близких значениях удельного потребления электроэнергии, при более низком качестве пермиата (повышенном солесодержании) по сравнению с «Hydranautics».

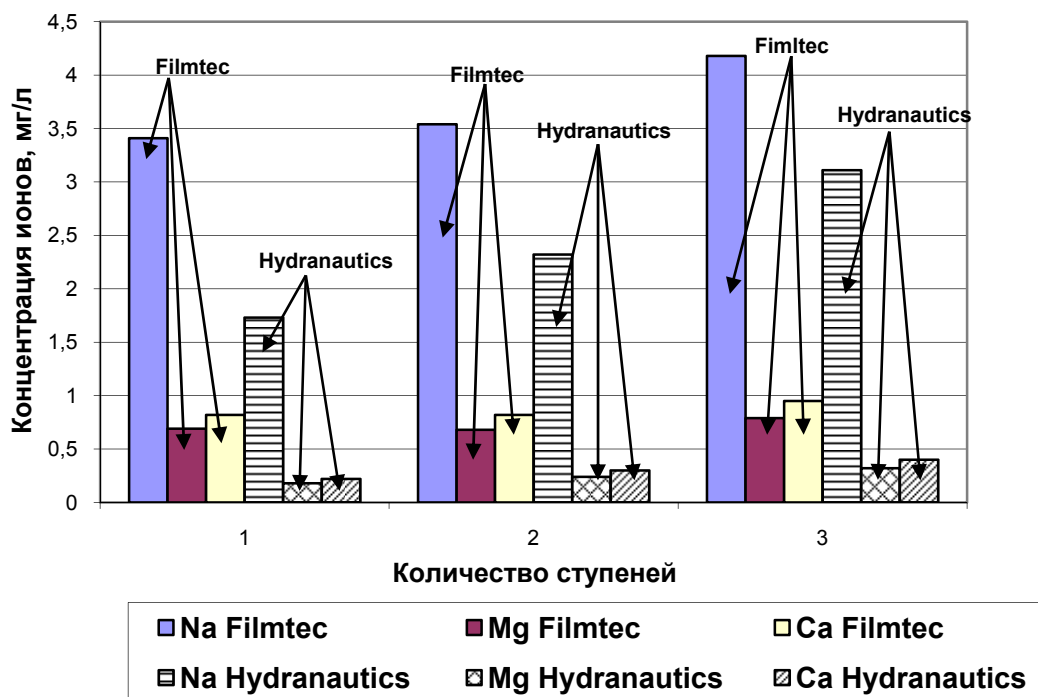


Рис. 6. Влияние конфигурации подключения мембранных аппаратов на катионный состав пермиата для мембран «Hydranautics» и «Filmtec»

Ниже приведены таблицы сравнения показателей работы мембранных элементов «Hydranautics» и «Filmtec». В них показаны расходы и солесодержание пермиата на отдельных элементах, ступенях и установке.

Таблица 2

Сравнение показателей работы мембранных элементов «Hydranautics» и «Filmtec»

Степень	Элемент	Показатели пермиата							
		Filmtec				Hydranautics			
		Расход, м ³ /ч		Солесодержание, мг/л		Расход, м ³ /ч		Солесодержание, мг/л	
		На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени
1	1	1,41	75,26	10,1	12,9	1,7	86,1	2,4	3,2
	2	1,34		11,1		1,6		2,7	
	3	1,28		12,2		1,5		3,0	
	4	1,22		13,5		1,4		3,4	
	5	1,16		15,1		1,3		3,8	
	6	1,11		16,1		1,2		4,2	

Степень	Элемент	Показатели пермиата							
		Filmtec				Hydranautics			
		Расход, м ³ /ч		Солесодержание, мг/л		Расход, м ³ /ч		Солесодержание, мг/л	
		На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени
2	1	1,03	43,38	19,1	26,1	1,1	45,9	4,7	6,1
	2	0,98		21,4		1,1		5,2	
	3	0,93		24,2		1,0		5,8	
	4	0,88		27,5		0,9		6,5	
	5	0,83		31,5		0,9		7,3	
	6	0,78		36,4		0,8		8,2	
3	1	0,70	13,32	40,9	55,9	0,7	12,1	8,8	10,3
	2	0,64		46,4		0,6		9,5	
	3	0,58		52,8		0,5		10,2	
	4	0,52		60,3		0,5		10,9	
	5	0,47		69,2		0,4		11,7	
	6	0,42		79,6		0,3		12,5	
Общее по установке		131,96		21,6		144,0		12,4	

Таблица 3

Сравнение показателей работы мембранных элементов «Hydranautics» и «Filmtec»

Степень	Элемент	Показатели пермиата							
		Filmtec				Hydranautics			
		Расход, м ³ /ч		Солесодержание, мг/л		Расход, м ³ /ч		Солесодержание, мг/л	
		На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени
1	1	1,42	108,11	10,3	13,9	1,7	124,7	2,5	3,3
	2	1,36		11,4		1,6		2,8	
	3	1,31		12,7		1,5		3,1	
	4	1,26		14,4		1,4		3,5	
	5	1,21		16,5		1,4		4,0	
	6	1,17		19,4		1,3		4,6	
2	1	1,09	45,86	21,5	30,6	1,2	49,3	5,1	6,8
	2	1,03		24,4		1,1		5,7	
	3	0,98		27,9		1,1		6,3	
	4	0,93		32,2		1,0		7,1	
	5	0,88		37,5		0,9		8,1	
	6	0,82		44,4		0,9		9,3	
Общее по установке		153,98		18,8		174,0		9,3	

Таблица 4

Сравнение показателей работы мембранных элементов «Hydranautics» и «Filmtec»

Степень	Элемент	Показатели пермиата							
		Filmtec				Hydranautics			
		Расход, м ³ /ч		Солесодержание, мг/л		Расход, м ³ /ч		Солесодержание, мг/л	
		На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени	На отдельном элементе	На всей ступени
1	1	1,42	170,9	10,7	18,6	1,7	200,0	2,5	6,9
	2	1,38		12,4		1,6		2,9	
	3	1,33		14,7		1,6		3,4	
	4	1,29		18,2		1,5		4,1	
	5	1,22		24,1		1,4		5,1	
	6	1,13		35,2		1,3		6,9	
Общее по установке		170,9		18,6		200,0		6,9	

Выводы

1. Разные схемы подключения обратноосмотических аппаратов (изменение количества ступеней, а также переключение с последовательной схемы на параллельную по концентрации) позволяют регулировать производительность установки без увеличения давления исходной воды и тем самым предотвращать «крип» мембран.

2. Анализ параметров работы 2-х ступенчатой установки показал, что применение элементов Hydranautics при неизменном давлении поступающей воды повышает выход пермиата до 14 %.

3. Качество воды (пермиата) очень важно для дальнейшей очистки в ФСД и поэтому предпочтительно использование элементов фирмы «Hydranautics».

4. В результате исследования разных конфигураций (по количеству элементов в аппарате) было выявлено, что оптимальное количество составляет 6 элементов в корпусе.

Список литературы

1. Graeme Pearce. Water and wastewater — RO pre-treatment // Filtration + Separation. — 2007. — №9. — P. 28-31.
2. Frans Knops, Stefan van Hoof. Economic evaluation for RO // Desalination. — 2007. — №9. — P. 23-25.
3. Высоцкий С.П., Фаткулина А.В., Коновальчик М.В. Совершенствование технологий очистки воды // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. — Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2006. — № 67(90). — С. 81-94.
4. Высоцкий С.П. Мембранная и ионитная технологии водоподготовки в энергетике. — К: Техника, 1989. — 176 с.

Стаття надійшла до редакції 08.11.07
© Висоцький С.П., Коновальчик М.В., 2007