

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ОБРАТНОГО ОСМОСА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ В КОТЕЛЬНОЙ

И.В. ЮДАЕВ¹, д.т.н., профессор

С.В. ПАНЧЕНКО¹, к.т.н.

А.Н. ТОКАРЕВА¹, к.т.н., доцент

Н.В. МАЛАЙ², магистр

¹Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 347740, г. Зерноград, ул. Ленина, 21

²ООО «Фрито Лей Мануфактуринг», 346789, г. Азов, ул. Победы, 27

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы подбора оборудования обратноосмотической установки для подготовки питательной воды в котельной заводе филиала ООО «Фрито Лей Мануфактуринг» с использованием низконапорных мембран. Определены зависимости содержания солей в фильтрате и концентрате от жесткости исходной воды. Проведен выбор марки мембраны по условиям селективности. Представлена оценка влияния качества исходной воды на площадь рабочей поверхности мембран. Выполнено секционирование аппаратов. Для полученной схемы проведен гидравлический расчет. На основе расчетов подобрано серийное оборудование для очистки воды. Внедрение предлагаемой установки позволяет получить экономический эффект за счет снижения энергетических затрат при одновременном обеспечении требуемого качества питательной воды.

Ключевые слова: обратный осмос, вода, мембрана, селективность, жесткость, ретант, пермеат.

Установки обратного осмоса (УОО), основанные на технологии мембранного разделения жидкостных сред, в настоящее время широко используются в пищевой и перерабатывающей промышленности [1,2], для очистки сточных и технологических вод предприятий [3], в качестве опреснительных установок [4]. Но наиболее широкое распространение данные устройства получили в промышленной теплоэнергетике.

Мембранные технологии разделения позволяют получать питательную воду для котлов, которая полностью соответствует требованиям [5]. Помимо этого, использование метода обратного осмоса имеет много достоинств по сравнению с традиционной системой обессоливания воды методом ионного обмена. К достоинствам мембранных технологий можно отнести: регулирование производительности путем набора стандартных модулей; отсутствие химических реагентов и известкового хозяйства; сокращение производственных площадей для размещения оборудования, полная автоматизация установок, удаление всех растворенных в воде солей. Также следует отметить высокую экономическую эффективность данного способа водоподготовки, например, экономия от

внедрения мембранного метода химводоочистки на Новочеркасской ГРЭС составила 9,2млн. рублей за год [6].

Разделение на растворы проходит при температуре окружающей среды без фазовых превращений, поэтому затраты энергии значительно меньше, чем в большинстве других методов разделения [7]. Наряду с этим можно отметить, что при использовании мембранных технологий энергия расходуется на преодоление жидкостью осмотического давления при прохождении через мембраны. На крупной тепловой электростанции с большой производительностью в цехах химводоочистки несложно подобрать насосы с соответствующей подачей и напором для осуществления процесса обратного осмоса. Что же касается отопительных или отопительно-производственных котельных, то при относительно небольшой производительности системы водоподготовки для обеспечения требуемого давления необходимо устанавливать насосную группу из нескольких последовательно соединенных агрегатов.

При компоновке установок обратного осмоса отечественным оборудованием долгое время использовались ацетатцеллюлозные

мембраны серии МГА, перепад давления на которых составлял 5-6Мпа [7]. В настоящее время компанией «Мембраниум» [8] выпускаются мембраны из композитного полиамида, перепад давления на которых не превышает 2,5МПа.

Рассмотрим возможность использования установки обратного осмоса с данными мембранами применительно к котельной предприятия по производству чипсов, расположенному на территории Ростовской области. На заводе филиала ООО «Фрито Лей Мануфактуринг» в г. Азове существует 3 режима работы водоподготовки: основной (от городской водопроводной сети), аварийный (от разведочно-эксплуатационных скважин) и комбинированный, сочетающий два первых. Жесткость исходной воды при основном режиме работы составляет 6,0 (мг-экв)/дм³, при аварийном – 18,0 (мг-экв)/дм³. Производительность системы водоподготовки составляет 9,8м³/ч.

УОО соответствуют всем требованиям, предъявляемым к качеству питательной воды на данном предприятии, а именно:

- установки работают в автоматическом режиме и не требуют постоянного присутствия обслуживающего персонала для контроля работы и контроля выходных показателей питательной воды;

- не требуют серьезных перенастроек при изменении жесткости сетевой воды в пределах от 6,0 до 18,0 (мг-экв)/дм³, в случае перехода от основного режима работы к комбинированному или аварийному режимам работы;

- выходные значения жесткости питательной воды после УОО не превышают требуемых нормативных значений – 0,8 (мг-экв)/дм³;

- в процессе работы не требуется дополнительных затрат на расходные материалы, в отличие от установок Na-катионирования, где периодически необходимо пополнение соли;

- при эксплуатации УОО оказывается меньшее влияние на показатели сточных вод

в режиме химической мойки, чем при эксплуатации установок Na-катионирования в режиме химической регенерации ионно-обменной смолы.

В результате обработки в УОО получается два раствора. Один – это чистая вода, практически не содержащая солей, называемая фильтратом или пермеатом. Во втором растворе происходит скапливание всех удержанных мембранной солей, и он называется концентратом или ретантом.

1 мг – экв/дм³ жесткости соответствует содержанию 20,04 мг/дм³ иона кальция Ca + или 12,16 мг/дм³ иона магния Mg²⁺. Используя данные физических свойств растворов солей кальция [7], были определены значения массовых концентраций кальция в исходной и очищенной воде. Полученные величины позволяют рассчитать степень концентрирования солей в ретанте по формуле:

$$K = \frac{X_n}{X_k}, \quad (1)$$

где X_n – начальная массовая концентрация солей в исходной воде, %; X_k – конечная массовая концентрация солей в очищенной воде, %.

Графическая интерпретация зависимости массовых концентраций и степени концентрирования ретанта представлена на рисунке 1.

Как видно из анализа графиков (рис 1.), при увеличении жесткости сетевой воды степень концентрирования ретанта возрастает незначительно.

Требуемая жесткость питательной воды по требованиям предприятия составляет 0,8(мг-экв)/дм³, что соответствует массовой концентрации солей хлорида кальция $X_k=0,11\%$.

Среди важнейших технологических показателей полупроницаемых мембран используются следующие: проницаемость (удельная производительность) и селективность (избирательность). Для определения концентрации солей в пермеате необходимо использовать величину селективности, которая представлена в технических характеристиках (табл.1) выпускаемых мембран [8] из композитного полиамида.

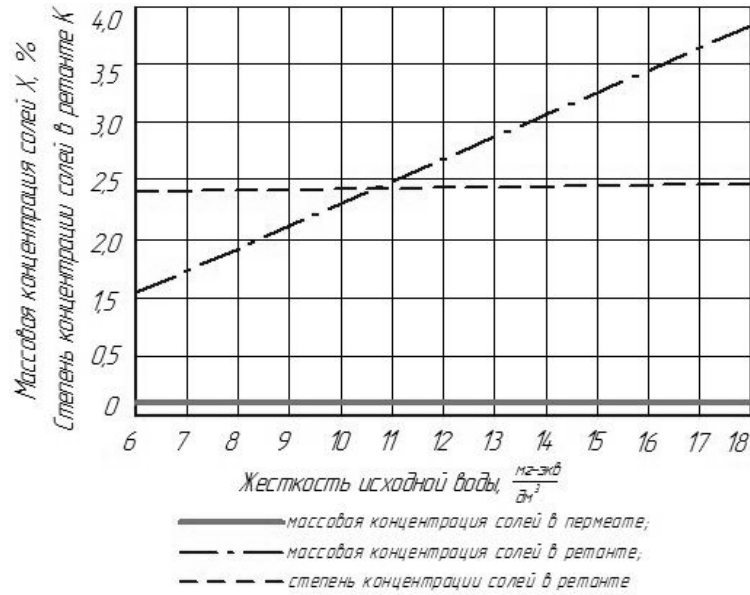


Рис.1. Зависимость изменения массовых концентраций солей и степени концентрирования ретанта от исходной жесткости воды

Таблица 1

Характеристики мембран, выпускаемых компанией «МЕМБРАНИУМ»

Классификация	Модель	Производ-сть, м³/час	Селектив-ность, %	Пло-щадь, м²	Удельная проницае-мость (про-изводитель-ность), кг/м²*с	Макси-мальное рабочее давле-ние, МПа	Макси-мальный перепад давления, МПа
Высокоселективные эле-менты для опреснения со-лоноватых вод. Серия КС	NanoRO КС 8040-С	2,17	99,70/99,50	39	0,0363	4,1	0,1
Низконапорные элемен-ты для опреснения солоно-ватых вод. Серия КН	NanoRO КН 8040-С	2,17	99,20/98,80	39	0,0255	4,1	0,1
Сверхнизконапорные эле-менты для опреснения со-лоноватых вод. Серия КСН	NanoRO КСН 8040-Ф	2,34	99,10/98,30	41	0,0147	4,1	0,07

Среднюю концентрацию растворенного вещества в пермеате определяют по формуле:

$$X_2 = X_n \frac{1 - K^{-\frac{1-\phi}{\phi}}}{1 - K^{-\frac{1}{\phi}}} \quad (2)$$

Величину селективности ϕ принимают равной минимальному значению селективности, представленному в таблице 1 для каждого типа мембран.

Расход исходного раствора определяется по формуле:

$$L_n = \frac{Q_0 \cdot \rho_c}{3600}, \quad (3)$$

где Q_0 – производительность системы водоподготовки, м³/ч; ρ_c – плотность исходной

воды, которая принимается по данным физических свойств водных растворов, кг/м³ [7].

Расход пермеата находится по формуле:

$$L_n = L_n \cdot \left(1 - K^{-\frac{1}{\phi}}\right). \quad (4)$$

Расход соли с исходным раствором рассчитывается по формуле:

$$L_c = L_n \cdot X_n. \quad (5)$$

Потери соли в пермеате будут равны:

$$\Delta L_c = L_n \cdot X_2. \quad (6)$$

Потери соли в пермеате в процентах можно определить следующим образом:

$$\Delta L_{c\%} = \frac{\Delta L_c \cdot 100}{L_n}. \quad (7)$$

Потери соли в пермеате в процентах численно равны массовой концентрации соли в

отфильтрованной воде. Результаты расчетов по содержанию соли в пермеате при

различной жесткости исходной воды представлены на рисунке 2.

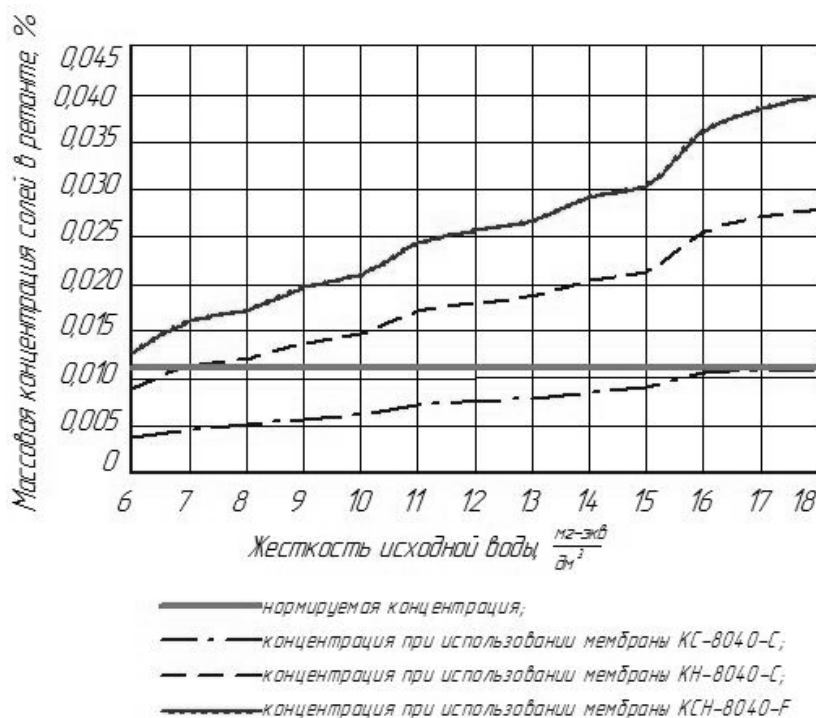


Рис.2. Зависимость концентрации солей в пермеате от исходной жесткости воды при использовании различных марок обратноосмотических мембран марки NanoRO

Как видно из анализа зависимостей рисунка 2 эксплуатация мембран марки NanoRO KH 8040-C и марки NanoRO KCH 8040-F в данных условиях не обеспечит требуемой степени очистки питательной воды. И только мембрана марки NanoRO KC 8040-C полностью удовлетворяет требованиям очистки при любом значении исходной жесткости воды в рассматриваемом диапазоне.

Поэтому из представленных компанией «МЕМБРАНИУМ» марок мембран единственным приемлемым вариантом является применение мембраны марки NanoRO KC 8040-C для работы в обратноосмотических установках для подготовки питательной воды в котельной предприятия.

Производительность мембраны определяется по формуле:

$$G = G_0 \cdot \left(1 - \frac{\pi_1}{\Delta P}\right), \quad (8)$$

где G_0 - удельная производительность выбранной мембраны, кг/м²*с (таблица 1); ΔP - перепад давления на мембране, МПа; π_1 -

осмотическое давление, которое зависит от концентрации раствора и определяется по данным физических свойств водных растворов, МПа [7].

Средняя удельная проницаемость мембран может быть выражена следующим образом:

$$G = \frac{G_n + G_k}{2}. \quad (9)$$

Тогда рабочая поверхность мембран составит:

$$F = \frac{L_n}{G}. \quad (10)$$

Зависимость изменения площади рабочей поверхности от жесткости исходной вода показано на рисунке 3. Анализ характера ее изменения показывает, что площадь рабочей поверхности мембран F возрастает при увеличении исходной жесткости воды. При этом следует отметить, что при достижении исходной жесткости $Ж = 15$ интенсивность возрастания резко изменяется в большую сторону.

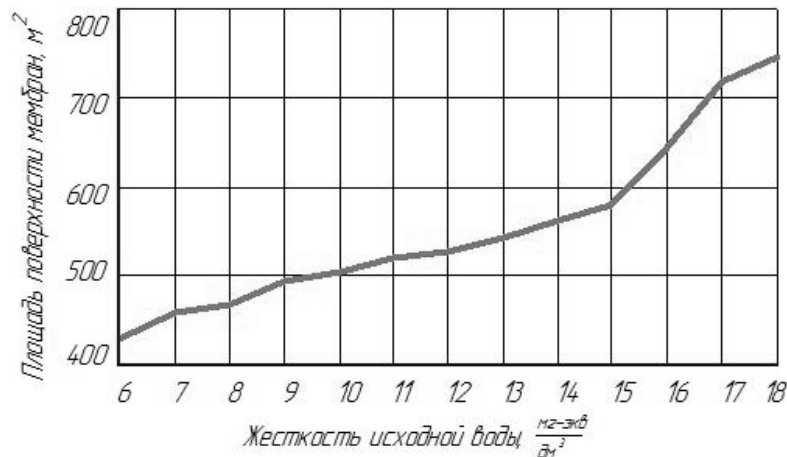


Рис.3. Изменение рабочей поверхности мембран от жесткости исходной воды

Для системы водоподготовки котельной были выбраны аппараты отечественного производства рулонного типа Ареттум «ЭКО-240» [8]. Конструктивное исполнение аппарата рассчитано на размещение трех мембранных элементов. Тогда рабочая поверхность мембран в аппарате равна:

$$F_a = F_m n_s = 39 \text{ м}^2 \cdot 3 = 117 \text{ м}^2.$$

Общее число аппаратов в мембранной установке определяется следующим образом:

$$n = \frac{F}{F_a}. \quad (11)$$

Расчетные значения количества аппаратов в УОО при различной жесткости исходной воды приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета количества аппаратов в УОО

Исходная жесткость, мг - экв/дм³	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$n_{расч}$	3,69	3,93	3,99	4,23	4,30	4,45	4,52	4,66	4,81	4,97	5,51	6,14	6,38
$n_{прин}$	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	6	7	7

С целью снижения гидравлического сопротивления при прохождении жидкости через обратноосмотическую установку, необходимо осуществить секционирование мембранных аппаратов, т.е. определить число последовательно соединенных секций, в каждой из которых разделяемый раствор подается одновременно во все аппараты. Расчеты по секционированию выполнены для наиболее неблагоприятного варианта обработки воды при максимальной исходной жесткости $J=18$ мг - экв/дм³.

Число аппаратов в первой секции можно найти, разделив расход исходного раствора L_H на значение оптимального расхода для каждого аппарата $L_{опт}$. Оптимальный расход для мембранного модуля NanoRO KC 8040-C составляет: $2,17$ м³/ч [8].

$$n_1 = \frac{L_H}{L_{опт}}. \quad (12)$$

Число аппаратов в остальных секциях определяется следующим образом:

$$n_i = \frac{n_1}{q^{i-1}}, \quad (13)$$

где q - допустимое снижение расхода по длине аппарата, которое рассчитывается следующим образом:

$$q = \frac{1}{1 - \frac{n_1 S_c F_a}{L_H}}, \quad (14)$$

где S_c - сечение аппарата, по которому проходит разделяемый раствор, для рассматриваемых мембран $S_c=4,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ [8].

Результаты расчетов по секционированию аппаратов представлены в таблице 3.

Таблица 3
Расчетное число секций и аппаратов обратноосмотической установки

Секция	1	2	3
Число аппаратов в секции	1	1	1

По полученным результатам расчетов видно, что для стабильной работы УОО необходимо 3 мембранных аппарата.

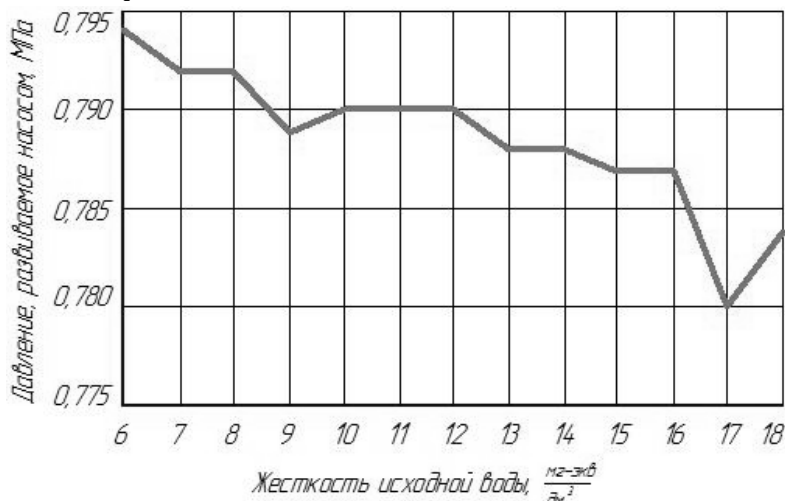


Рис.4. Зависимость изменения давления насоса обратноосмотической установки от жесткости исходной воды

Используя полученные данные, из модельного ряда УОО «Научно-производственной компании Аргентум ЭКО» была подобрана модель установки, отвечающая требованиям предприятия – «Аргентум ЭКО-240».

Использование низконапорных мембран позволило снизить потребляемую мощность на 3кВт. Модернизация водоподготовительной установки позволяет получить чистый дисконтированный доход в размере 2,3млн. рублей.

В августе 2019г. проведено интегрирование УОО «ЭКО-240» в систему водоподготовки питательной воды для водогрейных котлов котельной завода и внесены изменения в схему теплоснабжения котельной. На настоящий момент УОО «ЭКО-240» работает в автоматическом режиме. По результатам проведенных исследований показатели жесткости подпиточной воды для водогрейных котлов удовлетворяют нормативным требованиям.

Заключение. Проведенные расчеты позволили выбрать элементы обратноосмотической установки, которые обеспечивают

Далее по традиционной методике гидравлического расчета [8] определяется необходимое давление, которое должен развивать насос при прохождении через мембранные аппараты установки обратного осмоса. Графическая зависимость изменения давления приведена на рисунке 4.

необходимую жесткость подпиточной воды для котлов при наименьших энергетических затратах. Внедрение установки с низконапорными фильтрующими элементами позволяет получить экономический эффект и окупить ее применение за 2,9 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалева, О.А. Обратноосмотическое разделение растворов при производстве кукурузного крахмала. Эффективный способ снижения себестоимости плавленых сырных продуктов/ О.А. Ковалева, С.И. Лазарев, К.К. Полянский// Сыроделие и маслоделие. – 2016.–№ 5.– С. 46-47.
2. Тимкин, В.А. Гидродинамика в над мембранной и внутри мембранной области при обратноосмотическом концентрировании плодовоовощных соков/ В.А. Тимкин. // Агропродовольственная политика России. – 2018.– № 4 (76). – С. 46-49.
3. Йенс, Л. Опыт применения обратного осмоса в качестве четвертой стадии очистки/ Л. Йенс, О. Жюльен, Л. Штефан// Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2018.–№ 8 (128). –С. 30-35.
4. Высоцкий, С.П. Совершенствование технологий обессоливания воды в обратноосмотических установках/ Высоцкий С.П., Коновальчик М.В., Гулько С.Е. // Теплоэнергетика. – 2017. –№ 7.– С. 91-98.
5. СТО 70238424.27.100.013-2009 «Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС.

Условия создания. Нормы и требования» [Электронный ресурс]. Режим доступа – <http://meganorm.ru>

6. Никитенко, А.В. О повышении эффективности водоподготовки и энергосбережении на ТЭС/А.В. Никитенко//Энергосбережение и водоподготовка. – 2009.– № 5 (61).– С. 12-15.

7. Основные процессы и аппараты химической технологии/Под ред. Ю.И. Дытнерского– М.: Химия, 1991. - 496 с.

8. Мембраниум–[Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.membranium.com>

9. Промышленная очистка воды– [Электронный ресурс]. Режим доступа [https:// аргентум-эко.рф](https://аргентум-эко.рф)

SUBSTANTIATION OF REVERSE OSMOSIS INSTALLATION PARAMETERS FOR PREPARATION OF NUTRIENT WATER IN THE BOILER HOUSE

I.V. YUDAEV¹, D. Sc. (tech.)

S.V. PANCHENKO¹, Ph. D. (tech.)

A.N. TOKAREVA¹, Ph. D. (tech.)

N.V. MALAY², Master

¹*Azov-Black Sea Engineering Institute FSBEI HE Donskoy GAU, 21, Lenina str., Zernograd, 347740, Russia*

²*LLC Frito Ley manufacturing, 27, Pobedy str., Azov, 346789, Russia*

Abstract. *This paper discusses the selection of equipment for the reverse osmosis plant for the preparation of feed water in the boiler plant of the Frito Ley manufacturing branch using low-pressure membranes. The dependence of the salt content in the filtrate and concentrate on the hardness of the source water is determined. The choice of the membrane brand according to the selectivity conditions was carried out. The assessment of the influence of the source water quality on the working surface area of the membranes is presented. The devices were partitioned. For the resulting scheme, a hydraulic calculation was performed. Based on calculations, serial equipment for water treatment was selected. The implementation of the proposed installation allows you to get an economic effect by reducing energy costs while ensuring the required quality of feed water.*

Key words: *reverse osmosis, water, membrane, selectivity, rigidity, retant, permeate.*

REFERENCES

1. Kovaleva, O.A. Obratnoosmoticheskoye razdeleniye rastvorov pri proizvodstve kukuruznogo krakhmala. Effektivnyy sposob snizheniya sebestoimosti plavlenykh syrnykh produktov/ O.A. Kovaleva, S.I. Lazarev, K.K. Polyanskiy//Syrodelye i maslodeliye. –2016.–№ 5.– S. 46-47.
2. Timkin, V.A. Gidrodinamika v nad membrannoy i vnutri membrannoy oblasti pri obratnoosmoticheskom kontsentrirovanii plodoovoshchnykh sokov/V.A. Timkin. //Agroproduktovostvennaya politika Rossii. – 2018.– № 4 (76). – S. 46-49.
3. Yyens, L. Opyt primeneniya obratnogo osmosa v kachestve chetvertoy stadii ochistki/ L. Yyens, O. Zhyul'yen, L. Shtefan// Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzheniye. – 2018.–№ 8 (128). –S. 30-35.
4. Vysotskiy, S.P. Sovershenstvovaniye tekhnologiy obessolivaniya vody v obratnoosmoticheskikh ustanovkakh/ Vyotskiy S.P., Konoval'chik M.V., Gul'ko S.Ye. //Teploenergetika. – 2017. –№ 7.– S. 91-98.
5. STO 70238424.27.100.013-2009 «Vodopodgotovitel'nyye ustanovki i vodno-khimicheskiiy rezhim TES. Usloviya sozdaniya. Normy i trebovaniya» [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa – <http://meganorm.ru>
6. Nikitenko, A.V. O povyshenii effektivnosti vodopodgotovki i energosberezhenii na TES/A.V. Nikitenko//Energoberezheniye i vodopodgotovka. – 2009.– № 5 (61).– S. 12-15.
7. Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii/ Pod red. YU.I. Dytner'skogo– М.: Khimiya, 1991. - 496 s.
8. Membranium–[Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa <https://www.membranium.com>
9. Promyshlennaya ochistka vody– [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa [https:// аргентум-эко.рф](https://аргентум-эко.рф)