

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОДАВЛЯЮЩЕГО ОБРАТНОГО ОСМОСА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБОРОТНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

¹Н.А. Сальников, ¹Н.Е. Николайкина, ²Л.С. Бобе

¹Московский политехнический университет,

²АО "НИИхиммаш", г. Москва

Рассмотрены возможности применения опыта разработки и апробации химико-технологического процесса обратноосмотической регенерации санитарно-бытовой воды для космической станции для организации оборотного водоснабжения промышленных предприятий и в быту. Экспериментально подтверждена высокая эффективность регенерации санитарно-бытовой воды с селективностью очистки до 99,7 %, степенью замкнутости по воде 97–98 % и соответствием качества очищенной воды требованиям нормативов. Рассмотрены особенности обратноосмотического разделения смесей низкомолекулярных органических веществ при ламинарном режиме течения в аппарате. Предложено рассчитывать производительность обратноосмотической аппаратуры с использованием аналогии между массообменом и теплообменом, применимость которой подтверждена экспериментально. Предложены эмпирическое соотношение и методика расчета производительности обратноосмотической аппаратуры. Полученные данные могут быть масштабированы на промышленные производства и обеспечить повышение степени замкнутости оборотного водоснабжения широкого профиля промышленных предприятий, объектов специального назначения, на транспорте и в быту.

Ключевые слова: оборотное водоснабжение, обратный осмос, многокомпонентные смеси, низкомолекулярные органические вещества

Статья поступила в редакцию 19.11.2020, доработана 25.11.2020, принята к публикации 26.12.2020

The Use of Low-Pressure Reverse Osmosis for the Organization of Recycling Water Supply

¹N.A. Salnikov, ¹N.E. Nikolaykina, ²L.S. Bobe

¹Moscow Polytechnic University, 107023 Moscow, Russia,

²AO "NIIkhimmash", 127015 Moscow, Russia

The possibilities of using the experience in the development and testing of the chemical-technological process of reverse osmosis regeneration of sanitary wastewater for the space station aimed at the organization of circulating water supply to industrial enterprises and in everyday life are considered. The high efficiency of sanitary wastewater regeneration with a purification selectivity of up to 99.7 %, a degree of water isolation of 97–98 % and compliance of the purified water quality with standard requirements has been experimentally confirmed. The features of reverse osmosis separation of mixtures of low-molecular-weight organic substances in a laminar flow regime in the apparatus are considered. It is proposed to calculate the performance of reverse osmosis equipment using the analogy between mass transfer and heat transfer, the applicability of which has been confirmed experimentally. An empirical relationship and a method for calculating the performance of reverse osmosis equipment are proposed. The data obtained can be scaled up to industrial production and provide an increase in the degree of closeness of the circulating water supply for a wide range of industrial enterprises, special-purpose facilities, in transport and in everyday life.

Keywords: circulating water supply, reverse osmosis, multicomponent mixtures, low molecular weight organic substances

Received 19.11.2020, revised 25.11.2020, accepted for publication 26.12.2020

DOI: 10.18412/1816-0395-2021-4-14-20

В настоящее время наблюдается массовое внедрение мембранных методов очистки воды в промышленности, например в технологические процессы предприятий химии и нефтехимии, на полигонах бытовых и промышленных отходов, на автобазах, автомойках [1, 2] и для индивидуального пользования в быту.

При современной экологической обстановке, особенно в за-

сушливых районах, а также в условиях ужесточения экологических требований к количеству и составу сточных вод все большую актуальность приобретает организация максимально возможного возврата и повторного использования воды, обеспечивающая минимизацию сточных вод. В этом плане целесообразно использовать опыт разработки процесса и испытаний системы (установки)

регенерации санитарно-бытовой воды, получаемой после водных процедур экипажа и стирки одежды, для замкнутой эколого-технической среды космической станции, обеспечивающей возврат до 98 % воды для повторного использования.

Для решения этой проблемы использован процесс "низкодавления" обратного осмоса с селективностью по компонентам

общепринятых моющих средств более 99 %, который позволяет осуществлять регенерацию воды с минимальной предварительной и финишной очисткой.

В составе санитарно-бытовых вод, образующихся после водных процедур и стирки при использовании общепринятых моющих средств, содержится значительное количество органических и минеральных загрязнений, таких как белковые компоненты, механические частицы, крахмал, жирные кислоты, глицерин, воск, углеводороды, другие вещества "жирового характера", соли и другие минеральные составляющие [3]. Значительную долю загрязнений составляют компоненты моющих средств, которые представляют собой преимущественно низкомолекулярные органические вещества, в том числе ПАВ, и при использовании классических методов требуют применения многостадийной очистки для их удаления из воды. Показатели загрязненных санитарно-бытовых вод представлены в табл. 1. В табл. 2 в качестве примера представлено содержание в сточных санитарно-бытовых водах компонентов наиболее распространенных общепринятых жидких моющих средств. Для регенерации санитарно-бытовых вод перспективны баромембранные процессы, при этом удаление низкомолекулярных органических веществ может обеспечить только обратный осмос. Низкомолекулярные органические вещества обладают низким осмотическим давлением, что дает возможность проводить значительное концентрирование загрязнений при рабочем давлении в аппарате до 1 МПа, т.е. применять "низконапорный" обратный осмос. Современные композитные мембраны обладают значительной селективностью к нелетучим органическим веществам и солям, которая превышает 99 %. В настоящем исследовании подтверждена возможность применения обратного осмоса для организации оборотного санитарно-бытового водоснабжения при высоких коэффициентах возврата воды для обеспечения минимизации образования сточных вод, исследованы массообменные процессы в напорных каналах обратноосмотической аппаратуры и выявлены

Таблица 1. Характеристики загрязненных санитарно-бытовых вод (по данным [3, 4] и экспериментальным данным, полученным авторами) и требования к регенерированной воде

Table 1. Characteristics of contaminated sanitary water (according to [3, 4] and experimental data obtained by the authors) and requirements for regenerated water

Показатель	Вода, подлежащая очистке		Норматив ГОСТ Р 50804-95
	в промышленных прачечных	на борту космической станции	
Цвет	мутный, серый	мутный, серый	–
Запах при температуре 20 °С, баллы	0–1	2–3	3
pH, ед.	8–10	6–7	5–9
Прозрачность, см	6,5–8,0	1	30
Взвешенные вещества, мг/л	150–300	150–200	–
ХПК, мгО ₂ /л	1200–2200	900–1700	150
Содержание, мг/л:			
азота аммиака	–	6–23	10
хлоридов	2,5–5,0	80	350
сульфатов	15–40	3	–
Общая жесткость, мг-экв/л	–	0,6–1,0	7,0
Бактерии (количество микробных тел, мл)	–	10 ⁴ –10 ⁵	100 (1000)

особенности обратноосмотического разделения.

Способ и устройство регенерации воды

Предложены способ и устройство обратноосмотической регенерации воды, образующейся в результате водных процедур и стирки, обеспечивающие замкнутость контура по воде до 98 % [5, 6]. Технологическая схема предложенной системы для применения на космической станции, основанная на использовании современной общепромышленной обратноосмотической аппаратуры, представлена на рис. 1.

Загрязненная вода после водных процедур и стирки транспортируется потоком воздуха, отделяется от воздуха в центробежном сепараторе и направляется в емкость для хранения. Отделенный воздух проходит через фильтр Ф2 и отводится в атмосферу гермообъекта. Для обеспечения функционирования системы в условиях микрогравитации для загрязненной и регенерированной воды используются емкости переменного объема, которые представляют собой фторопластовые мешки, помещенные в жесткую силовую оболочку. В циркуляционный контур введена емкость постоянного объема, в которой происходит концентрирование загрязняющих компонентов до предельно допустимой концентрации, после чего эта емкость заменяется на емкость с чистой водой. По мере отбора воды через мем-

брану циркуляционный контур подпитывается исходной очищаемой водой. Перед подачей в обратноосмотический аппарат выполняется предварительная фильтрация воды от взвешенных частиц. Полученный обратноосмотический фильтрат проходит сорбционно-каталитическую доочистку и дезодорирование, консервируется ионным серебром и отправляется на хранение. Перед выдачей на потребление вода проходит финишное обеззараживание ультрафиолетом. По мере концентрирования загрязнений в контуре повышается осмотическое давление разделяемого раствора и снижается движущая сила процесса, поэтому степень концентрирования является определяющей для процесса регенерации. Предложено проводить концентрирование исходного раствора по моющему средству от 2–8

Таблица 2. Содержание компонентов наиболее распространенных жидких моющих средств в сточных санитарно-бытовых водах

Table 2. Content of the components of the most common liquid detergents in sanitary waste water

Компоненты	Содержание, г/л
Лауретсульфат натрия	0,140–0,490
Хлорид натрия	0,016–0,056
Диэтаноламид жирных кислот кокосового масла	0,080–0,280
Бетаин	0,040–0,140
Глицерин	0,030–0,105
Цитрат натрия	0,050–0,175
Лимонная кислота	0,006–0,021
Триклозан	0,004–0,014

периментальных или справочных данных. Коэффициент проницаемости мембраны по воде K_i изменяется со временем по соответствующему закону фильтрования.

Во всех мембранных процессах в той или иной степени наблюдается проявление концентрационной поляризации — явления повышения концентрации растворенных веществ у поверхности мембраны, снижающего движущую силу процесса мембранного разделения [9]. В зависимости от условий проведения процесса и природы растворенных веществ концентрационная поляризация проявляется в большей или меньшей степени. Повышенная концентрация растворенных веществ у поверхности мембраны создает разность осмотических давлений около мембраны и в ядре потока канала ($\pi_{гр}$ — π_{∞}) и приводит к образованию внешнего диффузионного сопротивления массопереносу через мембрану.

Для наших условий физическая модель процесса массопереноса в напорном канале мембранного аппарата представлена на рис. 2. Поток отбираемого через мембрану компонента (j_i) за счет перепада давления (ΔP) за вычетом осмотического давления раствора ($\Delta\pi$) равен поперечному потоку данного компонента в напорном канале к поверхности мембраны (j_{v1}). Отвод растворенных веществ от поверхности мембраны в напорном канале ($j_{2диф}$) и канале фильтрата ($j'_{2диф}$) происходит в результате молекулярно-конвективной диффузии. При наличии органических компонентов в разделяемом растворе на поверхности мембраны образуется слой связанных с мембраной органических веществ, который создает дополнительное сопротивление переносу растворителя (воды) через мембрану и проявляется в виде повышенной концентрации растворенных веществ ($W_{2гр адс}$) по сравнению с концентрацией у поверхности мембраны ($W_{2гр}$), обусловленной концентрационной поляризацией. Штриховая линия на рис. 2 обозначает условную границу диффузионного пограничного слоя; индексами "гр" и "∞" обозначены среды внутри и вне пограничного слоя соответственно; 1 — вода (компонент, проходящий через мембрану); 2 — растворенные ве-

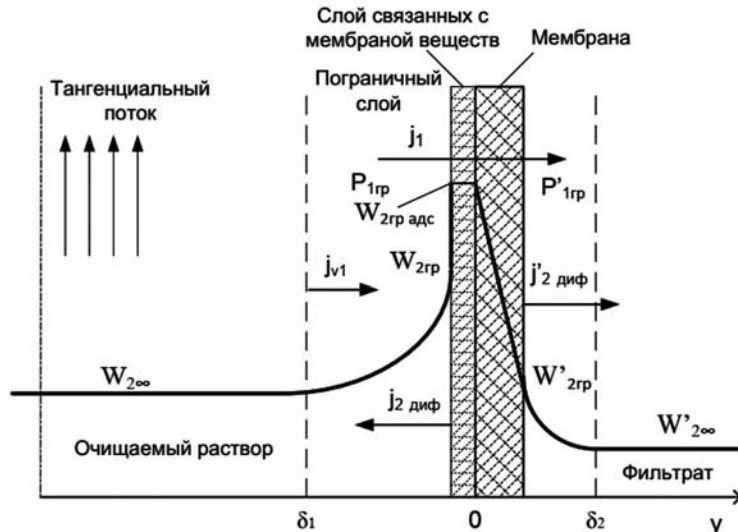


Рис. 2. Физическая картина массопереноса в напорном канале мембранного аппарата:

W_2, W'_2 — массовая доля задерживаемого компонента в разделяемом растворе и фильтрате, соответственно; $P_{1гр}, P'_{1гр}$ — давление в напорном канале и канале фильтрата, соответственно

Fig. 2. Physical picture of mass transfer in the pressure channel of the membrane apparatus:

W_2, W'_2 — mass fraction of the retained component in the separated solution and filtrate, respectively; $P_{1гр}, P'_{1гр}$ — pressure in the pressure channel and filtrate channel, respectively

щества (компонент, не проходящий через мембрану).

Для оценки внешнего диффузионного сопротивления необходимо знать коэффициент массоотдачи растворенных веществ, отводимых от поверхности мембраны в ядро потока. Часто определение данного коэффициента весьма затруднительно. Авторами предложен способ оценки внешнего диффузионного сопротивления массопереносу через мембрану с использованием аналогии между массообменом и теплообменом, который позволяет рассчитывать массообмен по теоретическим или экспериментальным данным для теплообмена [4].

Расчет ведется по ключевому компоненту многокомпонентной смеси. При таком подходе уравнение подобия для определения коэффициента массоотдачи для двухкомпонентной смеси имеет вид:

$$Sh^* = Sh W_{2гр} = (\beta d_s / D) W_{2гр} = Sh_0 f_1(B) f_2(\rho_s / \rho_p) f_3(Le), \quad (2)$$

где $Sh = \beta d_s / D$ — число Шервуда, построенное по общему потоку массы; $Sh_0 = Nu_0 (Sc / Pr)^n$ — число Шервуда при очень малом потоке массы растворенного компонента ($j \rightarrow 0, B \rightarrow 0$); n — показатель степени в уравнениях подобия для теплообмена; Nu_0 — число Нуссельта, определяемое критериальными уравнениями для теплообмена

без массообмена; $Le = Sc / Pr$ — число Льюиса; Sc — число Шмидта; Pr — число Прандтля; d_s — эквивалентный диаметр канала; D — коэффициент диффузии растворенного вещества (ключевого компонента); $f_1(B)$ — функция от фактора проницаемости, определяемая по выражению: $f_1(B) = [(\sqrt{1+B} - 1) / 0,5B]^2$; B — фактор проницаемости, определяемый по выражению $B = (W_{1гр} - W_{1\infty}) / (1 - W_{1гр})$; f_2 — функция, учитывающая свойства разделяемого раствора у поверхности мембраны и в ядре потока, определяемая по выражению

$$f_2(\rho_s / \rho_p) = [2 / (1 + (\rho_s / \rho_p)^{0.5})]^2; \\ f_3(Le) = (Sc / Pr)^{0.33} \text{ — эмпирическая поправка в виде функции от числа Льюиса, работающая в том числе в области постоянных значений числа } Nu \text{ при } Re d_s / l < 12; Re \text{ — число Пекле; } \rho \text{ — плотность.}$$

Принципиальным в соотношении (2) является то, что аналогия справедлива только для молекулярной составляющей потока массы: $Sh^* = \beta d_s W_{2гр} / D$. Эксперименты показали, что в автомоделной ламинарной области необходимо дополнительно учитывать число Льюиса в виде $f_3(Le)$. Поток массы находится из основного уравнения массопереноса, которое в нашем случае имеет вид:

$$j_2 = \beta \rho (W_{2гр} - W_{2\infty}) \quad (3)$$

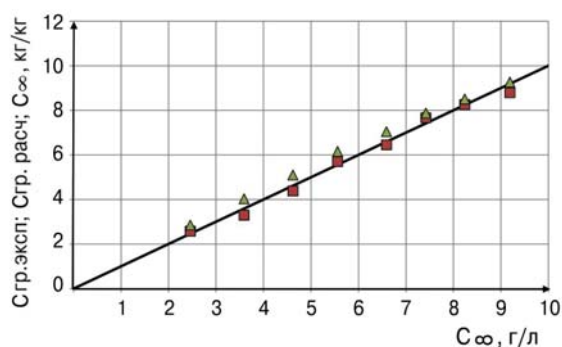


Рис. 3. Концентрация NaCl в разделяемом растворе напорного канала рулонного обратноосмотического модуля типоразмера 2521 при $Re = 60$ и рабочем давлении 0,8 МПа:

— — расчетная концентрация NaCl в ядре потока напорного канала аппарата (C_∞); ■ — экспериментальная концентрация NaCl у поверхности мембраны ($C_{гр.эксп}$); ▲ — расчетная концентрация NaCl у поверхности мембраны, полученная с применением аналогии между массообменом и теплообменом методом последовательных приближений ($C_{гр.расч}$)

Fig. 3. Concentration of NaCl in the separated solution of the pressure channel of the rolled reverse osmosis module of standard size 2521 at $Re = 60$ and operating pressure of 0.8 MPa:
— — the estimated concentration of NaCl in the core of the flow of the pressure channel of the apparatus (C_∞); ■ — experimental concentration of NaCl at the membrane surface ($C_{гр.эксп}$); ▲ — the calculated concentration of NaCl at the membrane surface, obtained using the analogy between mass transfer and heat transfer by the method of successive approximations ($C_{гр.расч}$)

В рулонных модулях высота напорных каналов не превышает 1 мм, причем в данных каналах расположена сепарирующая сетка, которая создает возмущения. Но вследствие малого эквивалентного диаметра турбулентность в каналах не развивается и аппарат работает в ламинарном режиме.

Тем не менее эксперименты на модельных растворах NaCl подтвердили (рис. 3), что в диапазоне чисел Рейнольдса от 3 до 130 проявление концентрационной поляризации незначительно и при проведении расчетов ею можно пренебречь. Из рис. 3 видно, что по экспериментальным и расчетным данным концентрации растворенных веществ в ядре потока (C_∞) и у поверхности мембраны ($C_{гр.эксп}$; $C_{гр.расч}$) практически совпадают. Таким образом, даже при ламинарном режиме течения жидкости через аппарат в диапазоне чисел Рейнольдса от 3 до 130 имеет место интенсивный отвод растворенных веществ от поверхности мембраны, а осмотическое давление разделяемого раствора в ядре потока и у поверхности мембраны практически не отличается ($\pi_{гр} - \pi_\infty \rightarrow 0$). Степень концентрирования раствора в контуре ограничена его осмотическим давлением. Сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициента массоотдачи показало необходимость дополнительного учета числа Льюиса при расчетах в виде функции $(Le)^n$, где $n = 0,33$.

Эксперименты по обратноосмотическому разделению водных растворов моющих средств с составом в соответствии с табл. 2 показали некоторую слабую зависимость производительности от числа Рейнольдса

в диапазоне проведения экспериментов ($Re = 3 \div 300$; $C_{мс} = 10 \div 250$ г/л; $P = 0,6 \div 0,8$ МПа), как показано на рис. 4.

Экспериментально найденные значения концентрации растворенных веществ у поверхности мембраны более чем в 2 раза превышают расчетные (рис. 5). Так как адекватность способа расчета концентрации у поверхности мембраны была подтверждена на модельных растворах NaCl, согласно предложенной модели сделано предположение о связывании компонентов моющего средства с материалом мембраны, которое также подтверждается более чем двукратным снижением производительности мембраны по воде без примесей сразу после контакта с моющим средством. При этом слой связанных с мембраной веществ оказывает значительно большее сопротивление массопереносу через мембрану, чем явление концентрационной поляризации. Сопротивление слоя может быть выражено через снижение коэффициента проницаемости мембраны по воде. Таким образом, в диапазоне параметров процесса разделения $Re = 3 \div 300$; $C_{мс} = 10 \div 250$ г/л; $P = 0,6 \div 0,8$ МПа при проведении оценочных расчетов обратноосмотического разделения концентрационную поляризацию можно не учитывать.

Предложено эмпирическое выражение для учета сопротивления массопереносу мембраны и слоя связанных с мембраной компонентов моющего средства в коэффициенте проницаемости мембраны.

$$K_{мс} = K_0 - 0,015C_{вх}, \quad (4)$$

где $K_0 = 5$ — коэффициент проницаемости мембраны по воде после связывания компонентов моющего средства (имеющего состав в соответствии с табл. 2) с материалом мембраны (определяется экспериментально для конкретного моющего средства или вещества и мембраны); $C_{вх}$ — концентрация на входе в аппарат.

В коэффициенте K_0 учтено начальное сопротивление слоя связанных с мембраной органических веществ. Второй член в правой части выражения (4) учитывает влияние концентрации растворенных веществ на формирование связанного с мембраной динамического слоя.

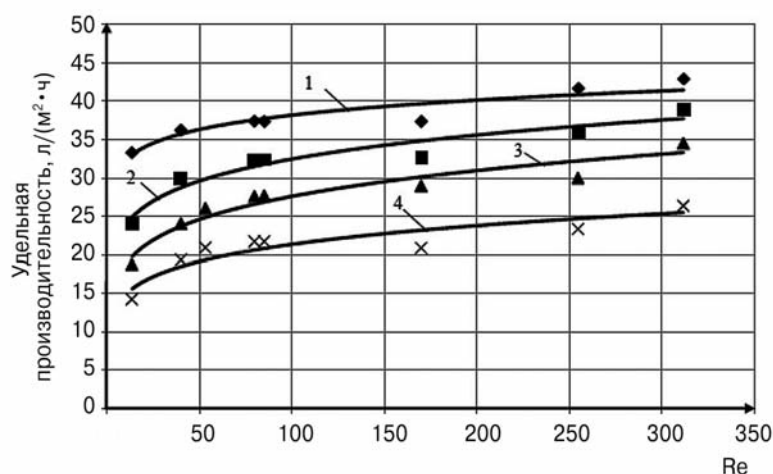


Рис. 4. Зависимость удельной производительности мембраны PM33K для водного раствора моющего средства (МС) от числа Рейнольдса ($u = 0,01 \div 0,24$ м/с) и концентрации очищаемой жидкости на входе в аппарат ($P_{раб} = 0,8$ МПа) $C_{мс}$:

1 — 10 г/л; 2 — 30 г/л; 3 — 40 г/л; 4 — 60 г/л

Fig. 4. Dependence of the specific performance of the PM33K membrane for an aqueous solution of a detergent (D) on the Reynolds number ($u = 0.01 \div 0.24$ m/s) and the concentration of the liquid to be purified at the inlet to the apparatus ($P_{work} = 0.8$ MPa) C_D :
1 — 10 g/l; 2 — 30 g/l; 3 — 40 g/l; 4 — 60 g/l

Методика расчета производительности аппарата

Разработана методика расчета производительности обратно-осмотического аппарата методом последовательных приближений, основанная на использовании аналогии между массообменом и теплообменом и учитывающая слой связанных с мембраной веществ. Расчеты по данной методике заключаются в следующем. Задают параметры процесса: среднюю концентрацию растворенных веществ в аппарате; интенсивность циркуляции в контуре; значение функции от фактора проницаемости $f(V)$. Определяется движущая сила процесса (ΔP) и производительность мембраны по осмотическому давлению в ядре потока: $j_i = K_i(\Delta P - \pi_c)$. Уточняется скорость движения жидкости в аппарате. По соотношению (2) с учетом (3) и (4) определяется коэффициент массоотдачи и разность концентраций в ядре потока и у поверхности мембраны. Уточняется движущая сила процесса (ΔP) и производительность мембраны по выражению (1). Далее расчет ведется методом последовательных приближений до тех пор, пока разность в значениях производительности мембраны двух последних приближений не будет ниже 5 %.

Экспериментальные исследования обратноосмотического разделения подтвердили закон "фильтрации" через мембрану с образованием осадка, который выражается соотношением.

$$1/j - 1/j_{\text{нач}} = K_{\text{ф}}(V - V_0), \quad (5)$$

где j — удельная производительность мембраны, л/(см²·ч); $j_{\text{нач}}$ — начальная удельная производительность мембраны, л/(см²·ч); $K_{\text{ф}}$ — константа фильтрации, см²·ч/л²; V_0 , V — объем полученного фильтрата в начале эксперимента (при первом измерении) и суммарно, л, соответственно.

В результате экспериментов определены константы фильтрации, которые составили $K_{\text{ф1}} = 1,0 \cdot 10^{-4}$ см²·ч/л² для раствора органических веществ типа моющего средства, имеющего состав в соответствии с табл. 2, и $K_{\text{ф2}} = 2,8 \cdot 10^{-4}$ см²·ч/л² для реальной санитарно-бытовой воды (см. табл. 1), содержащей в своем составе моющее средство (см. табл. 2) и загрязнения. Оценен ресурс

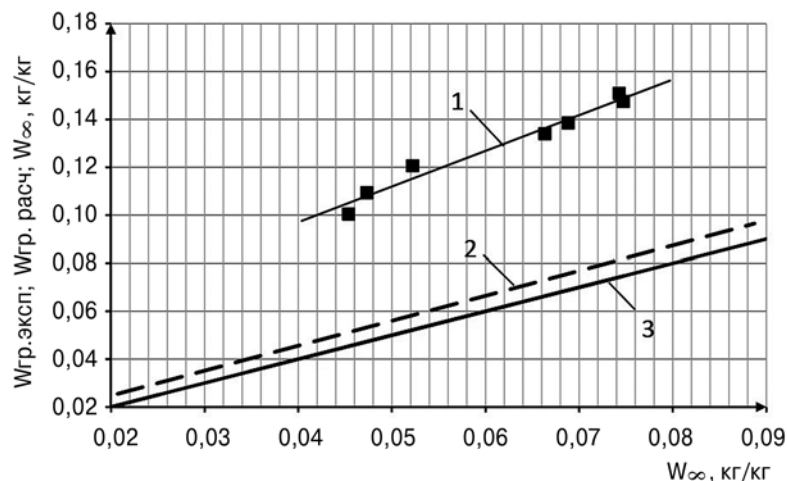


Рис. 5. Концентрация моющего средства (МС) в разделяемом растворе напорного канала рулонного обратноосмотического модуля при разделении растворов МС в воде:

1 — экспериментальная концентрация МС у поверхности мембраны ($W_{\text{гр.эксп}}$); 2 — расчетная концентрация МС у поверхности мембраны, полученная с применением аналогии между массообменом и теплообменом ($W_{\text{гр.расч}}$); 3 — расчетная концентрация МС в ядре потока (W_{∞})

Fig. 5. Concentration of the detergent in the separated solution of the pressure channel of the rolled reverse osmosis module when separating the solutions of the detergent in water:

1 — experimental concentration of detergent (D) at the membrane surface ($W_{\text{gr.exp}}$); 2 — calculated concentration of D at the membrane surface, obtained using the analogy between mass transfer and heat transfer ($W_{\text{gr.calc}}$); 3 — calculated concentration of D in the flow core (W_{∞})

обратноосмотического модуля при регенерации воды исследованной загрязненности, который составил 10 тыс. л для раствора моющего средства и 3,6 тыс. л для реальных санитарно-бытовых вод при достижении коэффициента возврата воды 97–98 %. Для определения ресурса мембраны необходимо проведение эксперимента по фильтрованию воды заданной загрязненности. Расчетные значения ресурса мембраны соответствуют ресурсу, заявленному производителем, который составляет 4–7 тыс. л [8] при степени отбора фильтрата за один проход раствора до 50 %. Важную роль играет предварительное фильтрование регенерируемой жидкости от твердых взвешенных частиц, которое напрямую определяет ресурс обратноосмотической мембраны.

Области применения мембранного концентрирования

Результаты проведенных исследований уточнили некоторые закономерности обратноосмотического концентрирования низкомолекулярных органических веществ, что дает возможность повышения степени замкнутости производственных циклов на предприятиях химической, фар-

мацевтической, пищевой промышленности, где необходимы концентрирование и очистка органических компонентов (разделение продуктов химического синтеза и азеотропных смесей) и возврат воды в систему оборотного водоснабжения с обеспечением минимизации образующихся сточных вод. Полученные данные по массопереносу в напорных каналах мембранной аппаратуры при работе в автомодельном ламинарном режиме концентрирования могут быть масштабированы на промышленные производства. При расчете производительности аппаратуры необходимо учитывать влияние числа Льюиса и проводить оценку остаточного ресурса мембран.

Появляется возможность организации оборотного водоснабжения с высокой степенью замкнутости в частных домовладениях, где имеется острая нехватка воды, в индивидуальных бункерах и бомбоубежищах, на транспорте, например в вагонах поездов дальнего следования и на борту самолетов.

Выводы

1. Предложены и экспериментально обоснованы способ и устройство обратноосмотической

очистки сточной санитарно-бытовой воды, обеспечивающие степень возврата 97–98 % воды для повторного использования и минимизацию сточных вод. Результаты натурных испытаний подтвердили высокую эффективность регенерации реальных санитарно-бытовых вод с селективностью очистки до 99,7 % и соответствием качества очищенной воды требованиям нормативов при соответствующей предварительной и финишной очистке.

2. Разработана и подтверждена расчетами и экспериментами физическая модель процесса переноса растворенных веществ от поверхности мембраны в напорном канале обратноосмотического аппарата. В диапазоне проведения экспериментов при значениях числа Рейнольдса от 3 до 130 и давлении процесса до 1 МПа про-

явление концентрационной поляризации в каналах рулонного модуля при движущемся потоке жидкости незначительно вследствие интенсивного молекулярно-конвективного отвода растворенных веществ от поверхности мембраны. При проведении оценочных расчетов концентрационную поляризацию можно не учитывать.

3. Обнаружено, что слой связанных с мембраной компонентов моющего средства, определяющий осмотическое давление раствора и концентрацию моющего средства у поверхности мембраны, оказывает основное сопротивление транспорту воды через мембрану. Для определения и учета данного слоя получены расчетные соотношения.

4. Подтверждена возможность применения аналогии между мас-

сообменом и теплообменом для расчета внешнего массопереноса в каналах мембранной аппаратуры при использовании дополнительной поправки в виде функции от числа Льюиса.

5. Полученные данные по работе обратноосмотических модулей при высокой степени циркуляционного концентрирования низкомолекулярных органических веществ и 97–98 %-ном извлечении воды могут быть масштабированы на промышленные производства и обеспечить повышение степени замкнутости оборотного водоснабжения широкого профиля промышленных предприятий, объектов специального назначения, на транспорте и в быту, обеспечивая экономии ресурсов и снижая негативное воздействие на окружающую среду.

Литература

1. Свитцов А.А. Мембранные технологии в России. Химический журнал. 2010. № 10. С. 22–26.
2. Баландина А.Г., Хангильдин Р.И., Ибрагимов И.Г., Мартышева В.А. Развитие мембранных технологий и возможность их применения для очистки сточных вод предприятий химии и нефтехимии. Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2015. № 5. С. 336–375.
3. Стариков С.Е., Синяк Ю.Е., Стариков Е.Н. Об изменении качества пермеата после длительных простоев мембранных аппаратов в замкнутых системах оборотного водоснабжения. Критические технологии. Мембраны. 2008. № 4 (40). С. 20–24.
4. Бобе Л.С., Сальников Н.А. Анализ и расчет процесса низконапорного обратного осмоса при регенерации санитарно-гигиенической воды. Космическая техника и технологии. 2019. № 2 (25). С. 28–36.
5. Пат. 2625247 РФ, МПК C02F 1/44. Способ обратноосмотической очистки санитарно-гигиенической воды в замкнутом контуре в условиях невесомости. Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, Н.В. Рыжлов, Н.А. Сальников, А.Е. Коробков, А.С. Цыганков, Х.Ш. Халилуллина, С.Н. Рукавицын. Заявитель и патентообладатель АО "НИИХиммаш". № 2015137625; заявл. 04.09.2015; приоритет 04.09.2015; опубл. 12.07.2017.
6. Пат. 174887 РФ, МПК C02F 9/02, 1/44, 1/32, 1/38, 1/50. Устройство обратноосмотической очистки санитарно-гигиенической воды в замкнутом контуре в условиях невесомости. Л.С. Бобе, А.А. Кочетков, Н.В. Рыжлов, Н.А. Сальников, А.Е. Коробков, А.С. Цыганков, Х.Ш. Халилуллина, С.Н. Рукавицын. Заявитель и патентообладатель АО "НИИХиммаш". № 2016134638; заявл. 25.08.2016; приоритет 25.08.2016; опубл. 09.11.2017.
7. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Элементы мембранные обратноосмотические серии NanoRO: нормативно-технический материал. Владимир, 2014. 13 с.
8. Обратный осмос. АО "РМ-Нанотех". [Электронный ресурс]. URL: <https://www.membranium.com/ru/about-us/articles/obratnyj-osmos/> (дата обращения: 12.12.2020).
9. Свитцов А.А. Введение в мембранную технологию. М., ДеЛи принт, 2008. 208 с.

References

1. Svittsov A.A. Membrannye tekhnologii v Rossii. Khimicheskii zhurnal. 2010. № 10. S. 22–26.
2. Balandina A.G., Khangil'din R.I., Ibragimov I.G., Martyasheva V.A. Razvitie membrannykh tekhnologii i vozmozhnost' ikh primeneniya dlya ochistki stochnykh vod predpriyatii khimii i neftekhimii. Elektronnyi nauchnyi zhurnal "Neftegazovoe delo". 2015. № 5. S. 336–375.
3. Starikov S.E., Sinyak Yu.E., Starikov E.N. Ob izmenenii kachestva permeata posle dlitel'nykh prostoev membrannykh apparatov v zamknytykh sistemakh oborotnogo vododnabzheniya. Kriticheskie tekhnologii. Membrany. 2008. № 4 (40). S. 20–24.
4. Bobe L.S., Sal'nikov N.A. Analiz i raschet protsessa nizkonapornogo obratnogo osmosa pri regeneratsii sanitarnogigienicheskoi vody. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. 2019. № 2 (25). S. 28–36.
5. Pat. 2625247 RF, MPK S02F 1/44. Sposob obratnoosmoticheskoi ochistki sanitarno-gigienicheskoi vody v zamknutom konture v usloviyakh nevesomosti. L.S. Bobe, A.A. Kochetkov, N.V. Rykhlov, N.A. Sal'nikov, A.E. Korobkov, A.S. Tsygankov, Kh.Sh. Khalilullina, S.N. Rukavitsin. Zayavitel' i patentoobladatel' AO "NIikhimmash". № 2015137625; zayavl. 04.09.2015; prioritet 04.09.2015; opubl. 12.07.2017.
6. Pat. 174887 RF, MPK S02F 9/02, 1/44, 1/32, 1/38, 1/50. Ustroistvo obratnoosmoticheskoi ochistki sanitarnogigienicheskoi vody v zamknutom konture v usloviyakh nevesomosti. L.S. Bobe, A.A. Kochetkov, N.V. Rykhlov, N.A. Sal'nikov, A.E. Korobkov, A.S. Tsygankov, Kh.Sh. Khalilullina, S.N. Rukavitsin. Zayavitel' i patentoobladatel' AO "NIikhimmash". № 2016134638; zayavl. 25.08.2016; prioritet 25.08.2016; opubl. 09.11.2017.
7. Tekhnicheskoe opisanie i instruksiya po ekspluatatsii. Elementy membrannye obratnoosmoticheskie serii NanoRO: normativno-tekhnicheskii material. Vladimir, 2014. 13 s.
8. Obratnyi osmos. AO "RM-Nanotekh". [Elektronnyi resurs]. URL: <https://www.membranium.com/ru/about-us/articles/obratnyj-osmos/> (data obrashcheniya: 12.12.2020).
9. Svittsov A.A. Vvedenie v membrannuyu tekhnologiyu. M., DeLi print, 2008. 208 s.