

УДК 612.382

К.А. Разинкин, В.М. Юдин
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАТНОЙ ПРОМЫВКИ
ПРОДУКТОМ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИХ МЕМБРАН
РУЛОННОГО ТИПА**

Воронежский Институт Высоких Технологий

В статье рассмотрен способ обратной промывки рулонных мембран, который на сегодняшний день считается одним из перспективных. Принцип обратной промывки мембран заключается в снижении рабочего давления установки путем снижения оборотов электродвигателя подающего насоса или его выключения, вследствие чего продукт из резервуара начинает двигаться обратно от центральной части мембраны на ее периферию, смывая накопленные загрязнения изнутри. Приведена математическая модель процесса прямого осмоса продукта из внутренней части мембраны в ее периферийные области. Отдельно описано разбавление потоком продукта на первой стадии слоя с высокой концентрацией солей в приповерхностном слое мембран, а на второй – снижение концентрации солей во всем объеме мембраны при продолжении односторонней осмотической диффузии продукта. Корректность предложенной модели была проверена путем постановки экспериментов над реальной обратноосмотической мембраной рулонного типа. После ряда экспериментов подтверждена справедливость гипотезы о двухэтапном процессе миграции продукта из центра мембраны на ее периферию. Помимо экспериментального подтверждения модели, также изучено влияние концентрации соли в исходной воде во время процесса обратного осмоса на параметры обратной промывки продуктом.

Ключевые слова: обратный осмос, математическая модель обратноосмотических процессов, экспериментальное подтверждение модели, обратная промывка мембранных элементов.

Введение

На сегодняшний день в промышленности широко применяются обратноосмотические аппараты нескольких конструкций: плоскокамерные, трубчатые, рулонные или аппараты с волоконной структурой [1]. Наибольшее распространение получили рулонные мембранные аппараты, представляющие собой фильтрующее полотно, свернутое вокруг дренажной трубки. Внутренние элементы помещаются в напорный сосуд, с каждой из сторон которого предусмотрены крышки с возможностью подключения водопровода.

Во время эксплуатации на поверхности мембраны происходит накопление загрязнений, слои которых по мере своего роста снижают продуктивность мембраны. Во избежание выхода из строя мембран, во время эксплуатации они должны промываться в режиме пониженного давления. В настоящее время разрабатываются перспективные методы промывки, среди которых реверсивная промывка концентратом, приводящая к удалению загрязнений, сконцентрированных у входа в мембрану, а также обратная промывка продуктом, в ходе которой продукт,

проходя изнутри мембраны, вымывает загрязнения. В этой статье речь пойдет о математической модели для второго случая – обратной промывки продуктом.

Обоснование выбора метода обратной промывки продуктом для восстановления мембран и описание процесса

Среди распространенных методов промывки, не требующих извлечения мембран из корпуса, широко используют лишь промывку при пониженном давлении, иногда с применением ПАВ или иных растворителей. Эта промывка требует остановки работы насосного оборудования, подмеса чистящих средств, контроля рН получившегося раствора. Несоблюдение технологии может привести к выходу мембраны из строя.

Один из перспективных методов – обратная промывка продуктом. Суть промывки заключается в прохождении продукта от центра мембраны к ее краям под действием осмотического давления между обессоленным продуктом в центральной части канала и в магистрали продукта, и концентратом на периферии мембраны.

На первом этапе продукт, мигрируя из центра мембраны во внешние ее слои, разбавляет концентрацию соли в приповерхностном слое. На втором этапе происходит проникновение продукта во весь внешний объем мембраны, что приводит к понижению солевой концентрации на ее поверхностях. Это способствует удалению загрязнений с ее поверхности. Математическая модель второго этапа представлена в следующей части статьи.

К плюсам описанного метода можно отнести простоту способа промывки, экономию затрат на ПАВ, отсутствие необходимости демонтажа мембраны, простоту внедрения способа на производство.

Математическая модель процесса обратной промывки продуктом

Под основными свойствами модели принимаем ряд условий.

Во-первых, кривая концентрации примесей C_m имеет линейный характер по всем протяжению мембраны. В действительности значение концентрации может значительно изменяться как из-за структурных особенностей мембраны, так и из-за наличия центров кристаллизации в определенных местах мембраны, но для матмоделирования процесса обратной промывки удобен именно линейный характер концентрации примесей.

Во-вторых, максимальная концентрация соли принимается за 5%. Таким образом

$$C_m / \rho_{\text{вода}} = 0,05 \ll 1 \quad (1)$$

В-третьих, концентрация соли на периферийных участках мембраны ($z=L$), $C_o(t)$, в соответствии с законами диффузии связана с концентрацией соли по глубине мембранного элемента.

Таким образом,

$$C_m(z, t) = C_w - \frac{z}{L} [C_w - C_o(t)], \quad (2)$$

где $C_w = \rho - C_p$, C_p – концентрация соли в пространстве внутреннего капилляра, $C_o(0) = CM$ – концентрация соли на поверхности мембраны на стороне подачи исходной воды (очевидно, что данный показатель концентрации максимален).

В-четвертых, покидать центральную область мембраны и двигаться к внешним областям под действием осмотического давления могут только молекулы воды.

В-пятых, принимаем, что вода в процессе как прямого, так и обратного осмоса, не может сжиматься и ее плотность остается постоянной. Объем воды $v(t)$, поступивший в мембрану за время t в пространство δ между двумя слоями мембраны, полностью выходит из нее. Величина $\delta(0)$ для большинства мембран принята за 0,7 мм [2]. $\delta(t)$ – промежуточная величина, с помощью которой можно рассчитать объем воды, поступивший во внешнее пространство мембраны по формуле $[\delta(0) - \delta(t)] \cdot \sigma$. Здесь σ – площадь поверхности мембраны.

Принимая во внимание последние два условия, равенство объемов будет иметь вид

$$\delta_0 \cdot (\rho - C_{b0}) = \delta(t) \cdot [\rho - C_b(t)] \quad (3)$$

где $\delta_0 = \delta(0)$, C_{b0} – средняя начальная концентрация соли во внешнем пространстве мембраны, а $C_{b(t)}$ – концентрация соли в момент времени t . C_{b0} может быть рассчитано из данных, полученных до начала промывки.

$$C_{b0} = \frac{2}{\delta_0} \int_0^{\delta_0} \left[C_w - (CM - C_p) \cdot \exp\left(-Jv \cdot \frac{z}{D_s}\right) \right] dz + (\rho - C_f) \cdot \left(1 - \frac{\delta_0'}{\delta_0}\right) \quad (4)$$

где C_f – концентрация во внешнем объеме мембраны во время процесса обратного осмоса. CM , D_s и δ могут быть высчитаны по уравнениям 5[3], 16[4] и 13[3].

$$D_s = 6.725 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\left(0.1546 \cdot 10^{-3} \cdot C_f - \frac{2513}{273.15 + T}\right) \quad (5)$$

$$k_s = 1.63 \cdot 10^{-3} \cdot Q_f^{0.4053} \quad (6)$$

$$CM = C_p + (C_f - C_p) \cdot \exp\left(Jv \cdot \frac{\delta_0}{D_s}\right) \quad (7)$$

Обратный водяной поток из внутреннего объема мембраны на периферию подчиняется граничному условию

$$-Dm \cdot \frac{dC_m(L, t)}{dz} = h \cdot [C_o(t) - C_b(t)] \quad (8)$$

где Dm – коэффициент диффузии воды в мембране, а h – коэффициент конвективного переноса в примесной воде.

Комбинируя (2)-(8), получим дифференциальное уравнение для $\delta(t)$.

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \frac{Dm \cdot S}{\rho \cdot L \cdot (1+S)} \left[\frac{\delta_0}{\delta(t)} \cdot (\rho - Cb_0) - Cp \right] \quad (9)$$

где число Шервуда $S = h \cdot L / Dm$. Решение этого уравнения дает функцию вида

$$t = \alpha \cdot \left[\alpha \cdot \ln\left(\frac{\alpha - \delta_0}{\alpha - \delta(t)}\right) + \delta_0 - \delta(t) \right] \quad (10)$$

где коэффициент α рассчитывается из выражения

$$\alpha = \frac{\rho \cdot L \cdot (1+S)}{Dm \cdot S \cdot Cp} \quad (11)$$

а коэффициент α можно найти из

$$\alpha = \frac{\delta_0 \cdot (\rho - Cb_0)}{Cp} \quad (12)$$

Исходя из приведенных уравнений, можно оценить поток пермеата dv/dt через мембрану:

$$\left(\frac{dv}{dt}\right) = \frac{Dm \cdot S \cdot \sigma}{\rho \cdot L \cdot (1+S)} \left[\frac{\delta_0}{\delta(t)} \cdot (\rho - Cb_0) - Cp \right] \quad (13)$$

Общий объем пермеата, поступающий в систему за конечное время t , найдем из уравнения

$$v(t) = \frac{(\rho - Cb_0) \cdot \sigma \cdot \delta_0}{Cp} \cdot \ln\left(\frac{\alpha - \delta_0}{\alpha - \delta(t)}\right) - \frac{Dm \cdot S \cdot Cp \cdot \sigma}{\rho \cdot L \cdot (1+S)} \cdot t \quad (14)$$

Описание лабораторного стенда для экспериментальной проверки

Целью эксперимента является исследование эффектов таких параметров, как концентрация соли C_f , давление Δp и расход исходной воды Q_f на объем продукта, затраченный на промывку $v(t)$. Полученные данные должны подтвердить или опровергнуть корректность математической модели.

Для изучения процессов был собран лабораторный стенд. Основным его элементом является рулонный мембранный элемент Filmtec SW30 2521-A (рисунок 1), характеристики которой приведены в Таблице 1[5].

Таблица 1 - Характеристики мембраны Filmtec SW30 2521-A

Артикул изделия	Площадь поверхности, кв. м	Рабочее давление, атм.	Выход продукта, куб.м/сут	Селективность по NaCl
80734	1,2	55	1,1	99,4
Общ. расход, куб. м/сут	Размер А, мм	Размер В, мм	Размер С, мм	Размер D, мм
1.4	533	30	19	61
Эффективная толщина мембраны, м [2]	Зазор между мембранными слоями, м [2]	Тип мембраны	Макс. температура, °С	Макс. давление, атм.
$3 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-4}$	Polyamide Thin-Film Composite	45	69

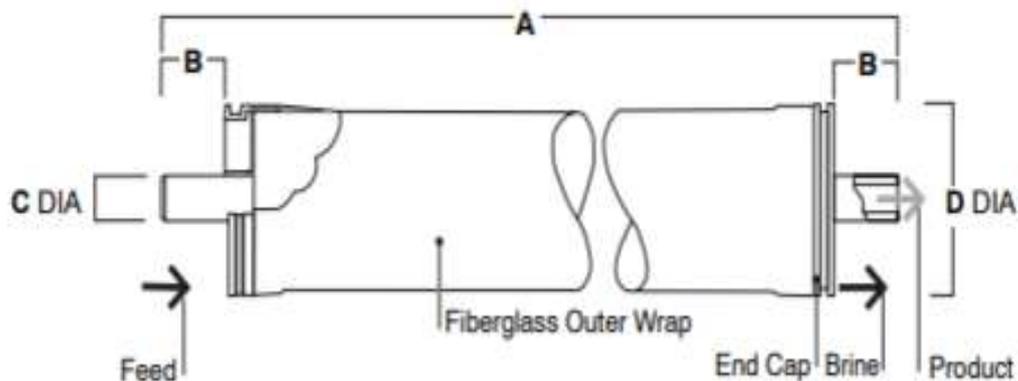


Рисунок 1 - Габаритные размеры мембраны Filmtec SW30 2521-A

Лабораторный стенд представляет собой гидравлическую обвязку мембраны, в состав которой входят насос, общий накопитель воды, резервный накопитель продукта, манометры и набор шаровых кранов для управления потоками. Общая схема приведена на Рисунке 2. Описание основных элементов стенда и их задач приведено в Таблице 2.

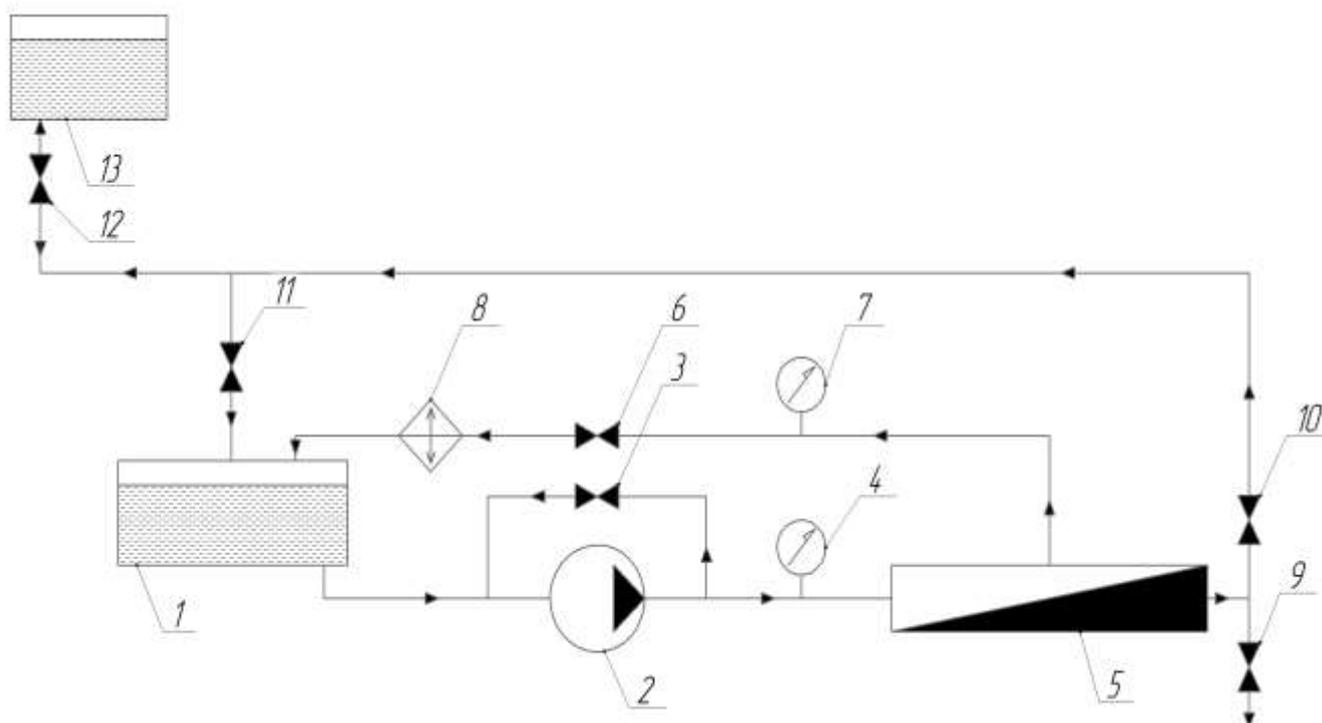


Рисунок 2 - Схема лабораторного стенда

Таблица 2 - Перечень элементов лабораторного стенда

Ном.	Элемент	Задача, выполняемая элементом
1	Общий накопитель	Сбор и хранение воды в режиме циклирования
2	Насос	Нагнетание давления в систему
3	Клапан байпаса	Отбор воды после насоса для регуляции давления в системе
4	Манометр	Измерение давления после насоса
5	Мембрана	Разделение воды
6	Клапан концентрата	Регуляция давления в мембране
7	Манометр	Измерение давления в тракте концентрата мембраны
8	Теплообменник	Отбор тепла от циркулирующего объема воды
9	Клапан слива продукта	Отбор продукта из системы
10	Клапан транспортировки продукта	Возвращение продукта в систему
11	Клапан возврата продукта в накопитель	Возвращение продукта в общий накопитель
12	Клапан отделения продукта	Отбор продукта и накопление его в отдельном резервуаре
13	Накопитель продукта	Хранение продукта

Установка клапанов 9-12 позволяет работать как в режиме полной рециркуляции с возвратом продукта в систему, так и в режиме частичной рециркуляции, когда продукт удаляется из системы и накапливается в собственном резервуаре. Из этого резервуара продукт может быть подан внутрь мембраны для обратной промывки.

Пуско-наладочные мероприятия

Во время пробных запусков поток через мембрану составлял 450-600 л/ч, а давление 60 атмосфер. Производительность по продукту составляла в среднем 50 л/ч.

Для удаления тепла из циркулирующего по кругу объема воды применялся теплообменник с водяным охлаждением [6], поскольку из-за непрерывной циркуляции температура воды нагревалась до 45 °С. В ходе эксперимента поддерживалась температура воды в 28-32 °С.

Стенд был введен на 15 минут в режим полной циркуляции, чтобы система вошла в стабильное состояние, после чего был произведен отбор продукта в отдельный резервуар и произведено измерение уровня воды в общем накопителе.

Методика эксперимента

Измерение концентрации примесей в исходной воде, концентрате и продукте проводили с помощью TDS-метра по принципу кондуктометрии.

Для измерения $v(t)$ пермеата, использовавшегося во время промывки, проводили замер уровня воды в резервуаре 13.

Для введения примесей в исходную воду был использован пересыщенный раствор CaCO_3 с содержанием 0,5% NaCl . Степень пересыщения была подобрана экспериментально для того, чтобы осадок концентрировался на стенках мембраны. Отложение осадков контролировалось по перепадам в производительности продукта. После того, как падение производительности продукта достигало величины в 5%, подающий насос отключался и открывался клапан обратной промывки.

Результаты эксперимента

Из Рисунка 3 видна зависимость проницаемости продукта сквозь мембрану от времени. Во всех экспериментах, кроме первого, удалось путем промывки восстановить производительность мембраны до первоначального значения. Красными линиями отмечены периоды обратной промывки.

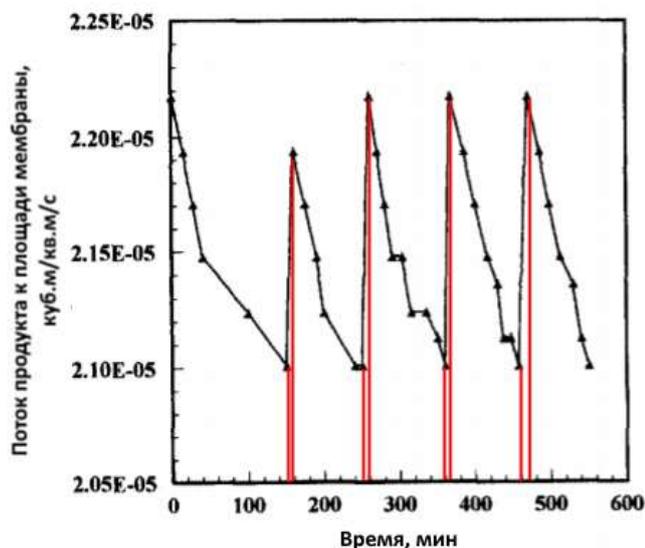


Рисунок 3 - График производительности мембраны в режиме работы

Процесс промывки начинается с того, что поток продукта проникает в пространство между витками мембраны. На первой стадии продукт разбавляет концентрацию приповерхностного слоя воды, а к началу второй стадии весь слой воды достигает равномерной концентрации примесей C_f , характерной для аналогичного показателя исходной воды.

Кривая, рассчитанная из теоретически выведенного уравнения dv/dt , довольно точно согласуется с полученными экспериментально данными как на первой, так и на второй стадии. Первая стадия характеризуется быстрым снижением потока продукта к периферии мембраны, на второй

стадии интенсивность процесса падает и наблюдается медленное снижение потока.

На Рисунке 4а приведена кривая, иллюстрирующая рост объема продукта, прошедшего через мембрану за первые 100 секунд начала промывки. Рисунок 4б иллюстрирует отдельно приращение dv/dt за это же время. Исходя из 4б, можно условно разделить процесс на две стадии, взяв за основу крутизну падения кривой. Точки, соответствующие первой стадии, обозначены желтым, второй – красным.

Усредненные параметры серии экспериментов:

$$\begin{aligned} \Delta p &= 40 \text{ атм.}, C_f = 10,5 \text{ кг/куб. м}, \\ C_p &= 0.06 \text{ кг/куб. м}, Q_f = 400 \text{ л/ч}, \\ CM &= 21,9 \text{ кг/куб. м}. \end{aligned}$$

Значения переменных:

$$\begin{aligned} D_s &= 1.47 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}, \\ D_m &= 1 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}, \delta = 3.62 \cdot 10^{-5} \text{ м}, S = 5,1. \end{aligned}$$

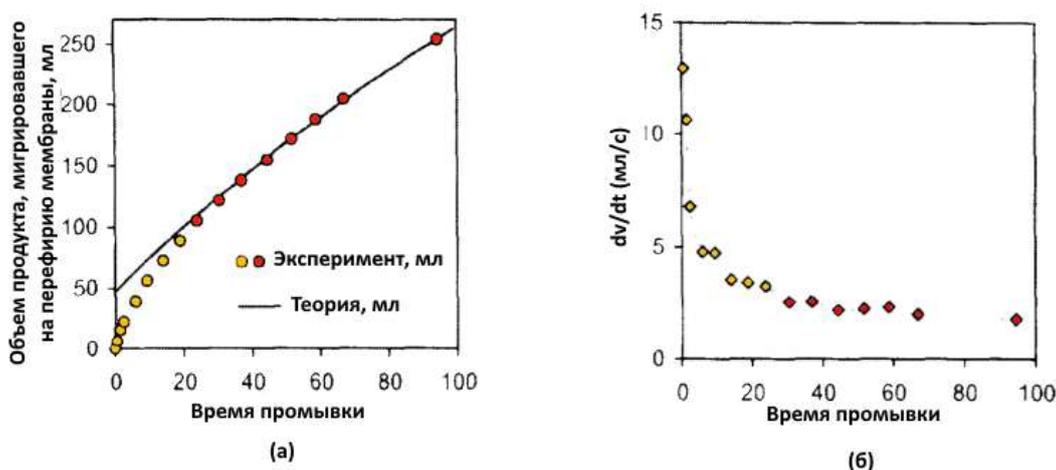


Рисунок 4 - Кривые объема продукта и потока по времени при обратной промывке продуктом.

Уточним также, что параметры процесса промывки всецело сводятся к трем переменным: концентрации соли в исходной воде C_f , рабочему давлению Δp и потоку воды через мембрану Q_f . Интересным будет рассмотреть влияние параметра C_f на эффективность последующей промывки.

Влияние C_f на обратную промывку показано на Рисунке 5. Параметры процесса: $\Delta p = 40$ атм., $Q_f = 400$ л/ч. Из графика видно, что с

падением примесной концентрации увеличивается и время, требуемое для промывки.

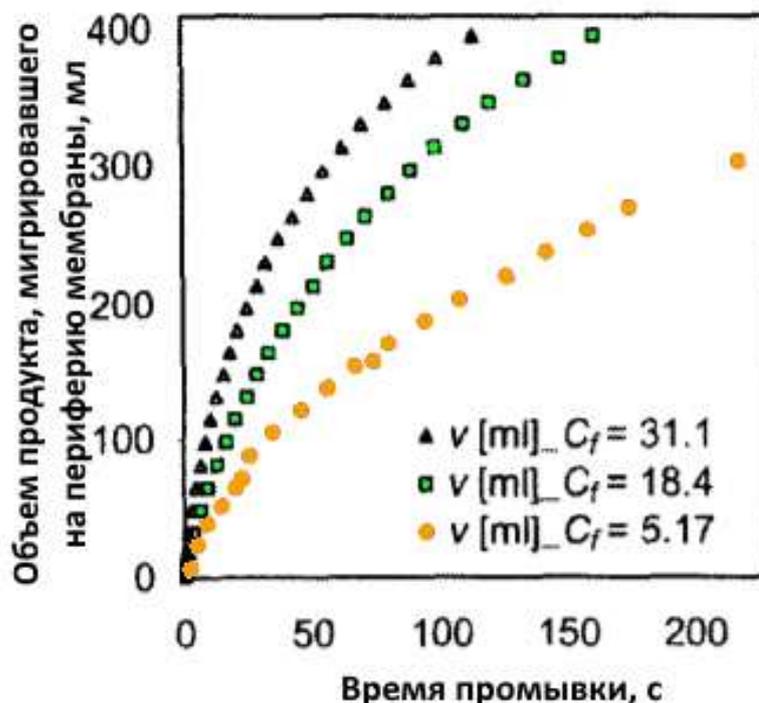


Рисунок 5 - Зависимость объема продукта, мигрировавшего из центра мембраны от концентрации соли в исходной воде при обратной промывке

Выводы

Были проведены эксперименты по промывке мембраны от отложений соли CaCO_3 с различными комбинациями основного параметра C_f .

Каждому циклу промывки предшествовало осаждение на мембране слоя карбоната кальция, который приводил к 5%-ому снижению конверсии продукта в установившемся режиме работы испытательного стенда.

Эксперимент подтвердил двухэтапную природу процесса обратной промывки продуктом. На первом этапе происходит интенсивная миграция продукта под действием осмотического давления из центра мембраны на ее периферию, однако к началу второго этапа эта интенсивность значительно падает. Второй этап характеризуется уменьшенной интенсивностью потока продукта.

Это может быть объяснено первоначальным быстрым разбавлением слоя с высокой концентрацией примесей на поверхности мембраны. Разработанная математическая модель в целом была подтверждена испытаниями.

ЛИТЕРАТУРА

1. http://studbooks.net/651748/ekologiya/obratnoosmoticheskie_membrany
2. K. Fukunaga, M. Matsukata, K. Ueyama and S. Kimura, Reduction of boron concentration in water produced by a reverse osmosis sea water desalination unit, *Membrane*, 22(4) (1997)
3. M. Taniguchi, M. Kurihara and S. Kimura, Boron reduction performance of reverse osmosis seawater desalination process, *J. Membr. Sci.*, 183 (2001)
4. M. Taniguchi, M. Kurihara and S. Kimura, Behavior of reverse osmosis plant adopting a brine conversion two-stage process and its computer simulation, 83 (2001)
5. FILMTEC™ SW30-2521 Membranes, Product Specifications, LennTech, 2011
6. Major Reverse Osmosis System Components for Water Treatment: The Global Market: [BBC Research] 2011
7. Prof. Dr.-Ing. Martin Jekel. Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Auslegung von Ultrafiltrationsverfahren. Berlin, 2012

K.A. Razinkin, V.M. Yudin

MODELING OF BACKWASHING PROCESS IN SPIRAL RO MEMBRANES

Voronezh Institute of High Technologies

A promising way of back washing of spiral membranes is considered in the article. The principle of backwashing the membranes is to reduce the working pressure of the installation by reducing the speed of the electric motor of the feed pump or turning it off. The product from the reservoir starts to move back from the central part of the membrane to its periphery, washing away the accumulated pollution from the inside. A mathematical model of the process of direct osmosis of the product from the inside of the membrane to its peripheral regions is given. In the first stage, the product dilutes the layer with a high concentration of salts in the near-surface layer of the membranes, while the second reduces the concentration of salts throughout the entire volume of the membrane. The correctness of the proposed model was verified by setting up experiments on a real reverse osmosis membrane of a roll type. After a number of experiments, the hypothesis of a two-stage process of migration of the product from the center of the membrane to its periphery was confirmed. In addition to experimental confirmation of the model, the influence of salt concentration in the initial water during the reverse osmosis process on the parameters of backwashing with the product was also studied.

Keywords: reverse osmosis, mathematical model of RO processes, experimental confirmation of the mathematical model, backwash of membrane elements.

REFERENCES

1. http://studbooks.net/651748/ekologiya/obratnoosmoticheskie_membrany
2. K. Fukunaga, M. Matsukata, K. Ueyama and S. Kimura, Reduction of boron concentration in water produced by a reverse osmosis sea water desalination unit, Membrane, 22(4) (1997)
3. M. Taniguchi, M. Kurihara and S. Kimura, Boron reduction performance of reverse osmosis seawater desalination process, J. Membr. Sci., 183 (2001)
4. M. Taniguchi, M. Kurihara and S. Kimura, Behavior of reverse osmosis plant adopting a brine conversion two-stage process and its computer simulation, 83 (2001)
5. FILMTEC™ SW30-2521 Membranes, Product Specifications, LennTech, 2011
6. Major Reverse Osmosis System Components for Water Treatment: The Global Market: [BBC Research] 2011
7. Prof. Dr.-Ing. Martin Jekel. Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Auslegung von Ultrafiltrationsverfahren. Berlin, 2012