

На правах рукописи



Лин Маунг Маунг

**Разработка технологии очистки сточ-
НЫХ ВОД ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ
нанофильтрации и ионного обмена**

05.17.18 – Мембраны и мембранная технология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Диссертационная работа выполнена на кафедре мембранной технологии
Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Каграманов Георгий Гайкович, заведующий кафедрой мембранной технологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент
Шайхиев Ильдар Гильманович, заведующий кафедрой инженерной экологии Казанского национального исследовательского технологического университета

доктор химических наук, старший научный сотрудник

Милютин Виталий Витальевич, заведующий лабораторией хроматографии радиоактивных элементов Института физической химии и электрохимии РАН

Ведущая организация:

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Защита состоится « 6 » декабря 2018 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.204.06 при РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте <http://diss.muctr.ru/author/256/>.

Автореферат диссертации разослан « ___ » _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.204.06



В.Т. Новиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: Вода является основным сырьем для различных отраслей промышленности, сельского и коммунального хозяйства. Увеличение объемов загрязненной воды и нехватка чистой воды уже сегодня являются одним из актуальных проблем, а в дальнейшем нехватка данного ресурса будет еще существеннее.

Одной из важнейших экологических задач является очистка сточных вод предприятий различных отраслей промышленности. Главными источниками загрязнения тяжелыми металлами водных объектов являются химические, гальванические производства, металлургические и горнодобывающие предприятия. Технологии очистки сточных вод, содержащих тяжелые металлы, позволяют создать системы водоподготовки и водооборота для многих промышленных объектов.

В настоящее время Республика Союз Мьянма является одной из развивающихся стран в Юго-восточной Азии. Поэтому, в Мьянме появились много промышленных предприятий различных отраслей индустрии. Как следствие, увеличиваются и сбросы сточных вод, причем как количественно, так и качественно. Поэтому технология очистки промышленных сточных вод играет важную роль для Республики Союз Мьянма, как и для других стран.

Для очистки технологических вод традиционно применяется ионный обмен. Другим возможным вариантом решения поставленных задач является применение баромембранных процессов разделения (обратный осмос и ультрафильтрация), которые занимают достойное место как в технологии водоподготовки и водоочистки сточных вод, так и при решении задач водоснабжения и водопотребления в химической технологии и других отраслях промышленности. Однако, еще один баромембранный процесс пока не получил достаточно широкого применения. Это процесс – нанофильтрация, который позволяет эффективно удалять многозарядные ионы из раствора. Нанофильтрационные мембраны отличаются от остальных не только размером пор, но и наличием поверхностного заряда функциональных групп самой мембраны. Такие мембраны имеют менее плотный селективный слой, что несколько снижает селективность по сравнению с обратноосмотическими мембранами, но повышает производительность и снижает рабочие давления (от 3 до 30 бар).

Данная работа, посвященной разработке технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов методами нанофильтрации и ионного обмена, что весьма актуально для Республики Союз Мьянмы.

Целью данной работы является разработка гибридной технологии и определение оптимальных областей применения нанофильтрации и ионного обмена при очистке технологических и сточных вод.

Для достижения представленной цели в работе необходимо было решить следующие **задачи**: 1) определение влияния технологических параметров (величина рН, концентрация раствора, давление, температура) на основные характеристики (удельную производительность и селективность) нанофильтрационных мембран и взаимодействия в системе «мембрана-раствор». 2) определение зависимости полной обменной емкости и динамической обменной емкости ионита (КУ-2-8) от линейной скорости и величины рН при удалении тяжелых металлов из сточных вод. 3) сравнение областей применения двух процессов (НФ и ИО) в водоподготовке и очистке сточных вод.

Научная новизна: 1) впервые исследовано влияние физико-химической природы системы «ион-мембрана» на селективность мембран как в одно-, так и в многокомпонентных растворах. 2) определены точки минимума селективности в зависимости от природы пары «ион-мембрана» для одно- и многокомпонентных растворов. 3) определены значения динамической и полной обменной емкости для наиболее широко применяемой ионообменной смолы российского производства КУ-2-8. Описано влияние линейной скорости на характеристики этих смол.

Практическая значимость: 1) определены значения наблюдаемой селективности нанофильтрационных и обратноосмотических мембран по катионам цинка, марганца и меди в многокомпонентных растворах. 2) найдены значения удельной производительности обратноосмотических и нанофильтрационных мембран при очистке многокомпонентных растворов, моделирующих составы шахтных вод. 3) полученные данные могут использоваться инженерами и исследователями при проектировании систем и установок очистки стоков, содержащих тяжелые металлы.

Основные положения, выносимые на защиту: 1) результаты исследования нанофильтрационной очистки от тяжелых металлов одно- и многокомпонентных мо-

дельных растворов. 2) результаты исследования ионного обмена при удалении ионов тяжелых металлов из водных растворов. 3) технико-экономический анализ очистки сточных вод от тяжелых металлов процессами нанофильтрации, ионного обмена или их совмещении (гибридные методы).

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в постановке основных задач исследования, в обосновании и выборе объектов, в проведении экспериментов, в интерпретации полученных результатов и подготовке публикаций.

Апробация работы: Основные результаты работы представлены на следующих конференциях: XI Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии «МКХТ-2015», Москва. XII Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии «МКХТ-2016», Москва. Международная конференция молодых ученых «Молодежь в науке – 2016», Минск, Беларусь. 8th IWA Specialist Conference on Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment, 2017, Singapore.

Публикации: По теме диссертационной работы опубликовано 4 печатных работ, в том числе 2 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень ВАК.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Общий объем диссертации 117 страниц, включая 45 рисунков, 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и сформулированы задачи, которые необходимо решить для ее достижения, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

1. Обзор литературы

В обзоре литературы рассмотрены различные методы очистки сточных вод от тяжелых металлов и представлены основные достоинства и недостатки каждого из них. Описаны характеристики методов ионного обмена и баромембранных процессов,

особенно нанофильтрации. Показана эффективность процессов НФ и ИО при очистке сточных вод от тяжелых металлов.

2. Методическая часть

В данной части обозначены объекты исследования НФ и ИО, представлены методики проведения экспериментов и анализа, описаны конструкции используемых аппаратов и установок НФ и ИО на их основе.

Для проведения исследований процесса мембранного разделения (НФ и ОО) применяли **НФ модуль** – модель ЭРН-Б-45-350, (ЗАО НТЦ «РМ-Нанотех»), а также **ОО модуль** – модель Desal TFM-75NT, (GE-Osmonics, США). Для проведения исследований процесса ионного обмена применяли сильнокислотные ионообменные смолы российского производства КУ-2-8.

Исследования проводили с использованием модельных водных растворов солей тяжелых (двухвалентных) металлов, концентрацию которых измеряли методом атмо-абсорбционной спектроскопии (выполнены в ЦКП РХТУ им. Д.И. Менделеева) и комплексонометрического титрования.

Эксперименты влияния основных технологических параметров на характеристики процессов НФ и ИО проводили на лабораторных установках.

3. Экспериментальные данные и их обсуждение

3.1. Стадия нанофильтрации

НФ – баромембранный процесс разделения, в котором эффективность определяется как размером пор, так и зарядом селективного слоя мембраны. Первым этапом исследования стадии нанофильтрации является **очистка однокомпонентных растворов**.

Влияние величины рН исходного раствора на рН пермеата – важным фактором, влияющим на процесс разделения НФ, является величина рН исходного раствора. Результаты влияния величины рН исходного раствора на рН пермеата, кроме растворов нитрата меди и свинца, ранее проводились на кафедре мембранной технологии.

Зависимость величины рН пермеата НФ от рН исходного раствора для нитрата меди и свинца представлена на рис. 1.

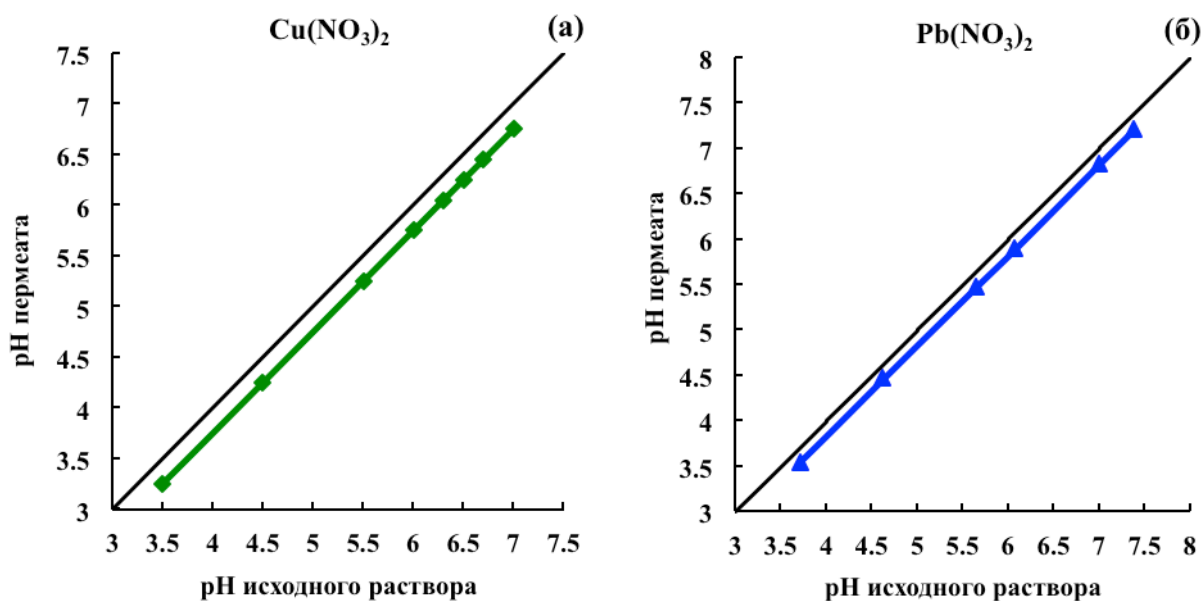


Рис. 1. Зависимость величины pH пермеата НФ от pH исходного раствора (а) $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ и (б) $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$

Как видно из графиков, величина pH пермеата значительно ниже pH исходного раствора (для $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ – $\Delta\text{pH} = 0,25 \pm 0,1$; для $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ – $\Delta\text{pH} = 0,16 \pm 0,1$). Это объясняется тем, что селективность НФ мембраны по относительно крупному и одновалентному NO_3^- - иону, имеющему малую плотность заряда, мала ($\approx 40\text{-}60\%$). В то же время, селективность по двухвалентным катионам (Cu^{2+} , Pb^{2+}) высока ($\approx 93\text{-}98\%$). Нитрат-ион проникает в пермеат в большем количестве, чем катионы металлов. Электронейтральность раствора обеспечивается ионами H^+ , поэтому пермеат «подкисляется».

Влияние величины pH исходного раствора на селективность мембран – при разделении НФ, на электростатический механизм огромную роль оказывает величина pH. Поэтому, исследования влияния величины pH исходного раствора на селективность НФ мембраны также проводились.

На рис. 2 (а) и (б) приведены зависимость селективности мембран от величины pH исходного раствора для солей тяжелых металлов MnSO_4 и $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$. Зависимость селективности НФ мембраны по иону Mn^{2+} от величины pH проходит через минимум при pH равной $5,3 \pm 0,02$ и по иону Cu^{2+} при pH равной $6,5 \pm 0,02$ соответственно.

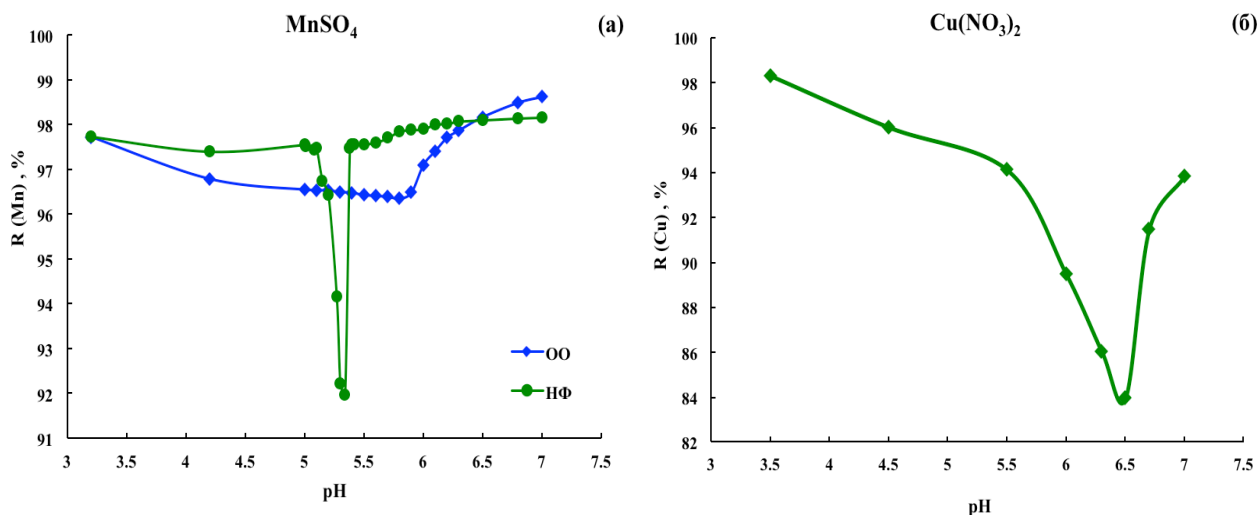


Рис. 2. Зависимость селективности исследуемых мембран от величины pH исходного раствора (а) MnSO₄ и (б) Cu(NO₃)₂ ; ΔP = 4 бар; T = 20 ± 1 °C

(а) с (Mn²⁺) = 10 мг/л; (б) с (Cu²⁺) = 10 мг/л

Очевидно, что величина pH исходного раствора имеет существенное влияние на эффективность разделения НФ. Эти данные можно объяснить уменьшением потенциала поверхности НФ мембраны в изоэлектрической точке – и, при этом, влияние электростатической составляющей на механизм массопереноса ничтожно мал, что и объясняет резкое уменьшение значения селективности мембраны. Ионы легче проникают через мембрану, и данной области процесс разделения определяется капиллярно-фильтрационным механизмом. Следовательно, селективность НФ мембраны в ИЭТ снижается.

Активный слой исследуемой обратноосмотической мембраны (Desal TFM-75NT, GE-Osmonics) является полиамидом. Материал не имеет достаточного количества свободных функциональных групп, диссоциирующих с разделяемым раствором. Поэтому, вклад электростатического взаимодействия в обратном осмосе в задерживающую способность мембраны минимален. Однако, наблюдается небольшое снижение селективности при pH = 5,7 и составляет 96% (рис. 2. а.).

Влияние концентрации исходного раствора на селективность и удельную производительность мембран – концентрация исходного раствора значительно влияет на характеристики мембранного разделения. Поэтому, также было проведено исследова-

ние влияния концентрации катиона меди и марганца на основные характеристики разделения – удельную производительность и селективность НФ и ОО мембран.

Эксперименты проводились с использованием модельных растворов с концентрациями катиона Cu^{2+} до 210 мг/л и катиона Mn^{2+} до 150 мг/л, так как концентрация ионов тяжелых металлов в реальных шахтных и сточных водах находится в широком диапазоне. Зависимость селективности исследуемых мембран от концентрации исходного раствора представлена на рис. 3.

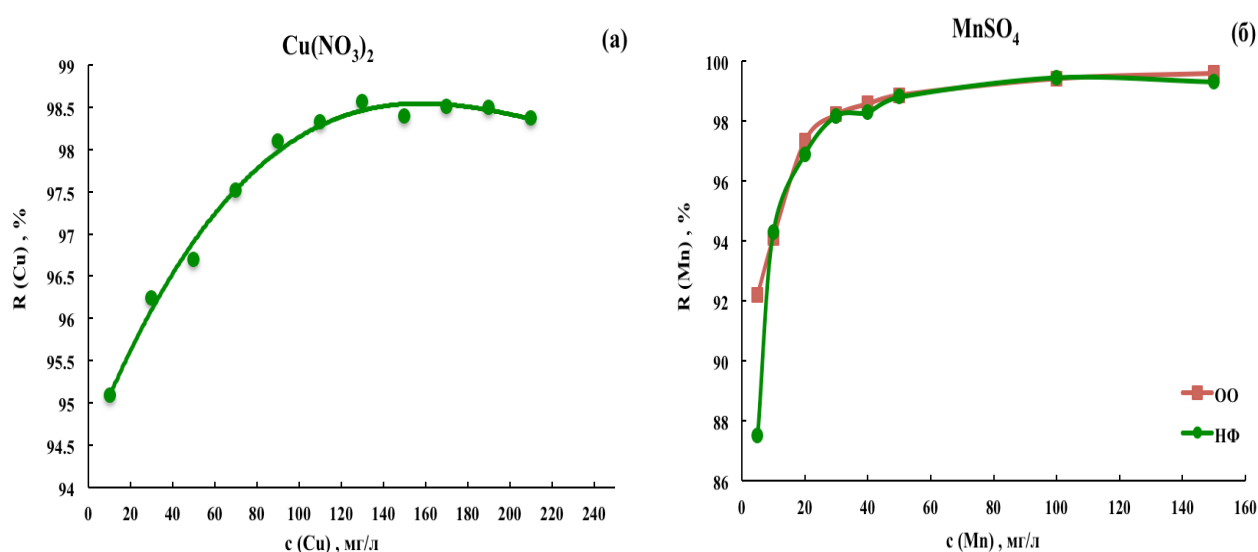


Рис. 3. Зависимость селективности исследуемых мембран от концентрации исходного раствора (а) $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$; (б) MnSO_4

$$\Delta P = 4 \text{ бар}; T = 20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}; \text{pH} = 6,1 \pm 0,1$$

Очевидно, что с повышением концентрации исходного раствора, селективность нанофильтрационных и обратноосмотических мембран увеличивается и достигает 98-99 %. Известно, что для образования двойного электрического слоя (ДЭС) необходимо определенное количество ионов. При низких концентрациях ионов тяжелых металлов в растворе, недостаточна для насыщения слоя «связанной» воды на поверхности обратноосмотической мембраны, а также двойной электрический слой не образуется на всей поверхности мембраны, и, следовательно, нанофильтрационная мембрана обладает относительно низкой селективностью, которая обеспечивается капиллярно-фильтрационным механизмом.

Удельная производительность во время эксперимента оставалась практически постоянной и равной $40 \pm 2 \text{ л/м}^2 \cdot \text{час}$ для НФ мембраны при очистке раствора нитрата

меди и 27 ± 1 л/м².час для НФ мембраны и 12 ± 1 л/м².час для ОО мембраны при очистке раствора сульфата марганца соответственно.

При концентрации иона меди более 100 мг/л селективность нанофильтрационной мембраны достигает 98,5% и при концентрации марганца более 40 мг/л селективность достигает 98% и остается равным, как для нанофильтрационной мембраны, так и для обратноосмотической. Однако, удельная производительность обратноосмотических мембран значительно ниже нанофильтрационных, а значит применение процесса нанофильтрации является надежным методом для удаления тяжелых (двухвалентных) металлов из сточных и шахтных вод.

Следующим этапом исследования стадии нанофильтрации является **очистка многокомпонентных растворов**. При проведении экспериментов в качестве исходных данных исследовали очистку двух модельных многокомпонентных растворов, содержащих ионы тяжелых металлов. В табл. 1 показаны химические показатели шахтных сточных вод некоторых горно-обогатительных комбинатов.

Таблица. 1.

Химический состав модельных растворов шахтных сточных вод

Ион	Концентрация, мг/л	
	1 состав	2 состав
Кальций, Ca ²⁺	22,1	175,0
Магний, Mg ²⁺	698,8	304,8
Натрий + Калий, Na ⁺ + K ⁺	21,0	51,6
Марганец, Mn ²⁺	43,1	176,0
Медь, Cu ²⁺	129,3	352,0
Цинк, Zn ²⁺	653,0	220,0
Сульфат, SO ₄ ²⁻	1066,0	237,3

Влияние времени фильтрации на селективность и удельную производительность мембраны – первым этапом исследования по многокомпонентным растворам является зависимость селективности и удельной производительности НФ и ОО мем-

бран от времени фильтрации. Данный эксперимент необходим для нахождения времени выхода системы на стационарный режим.

Зависимость селективности НФ мембраны от времени фильтрации представлена на рис. 4.

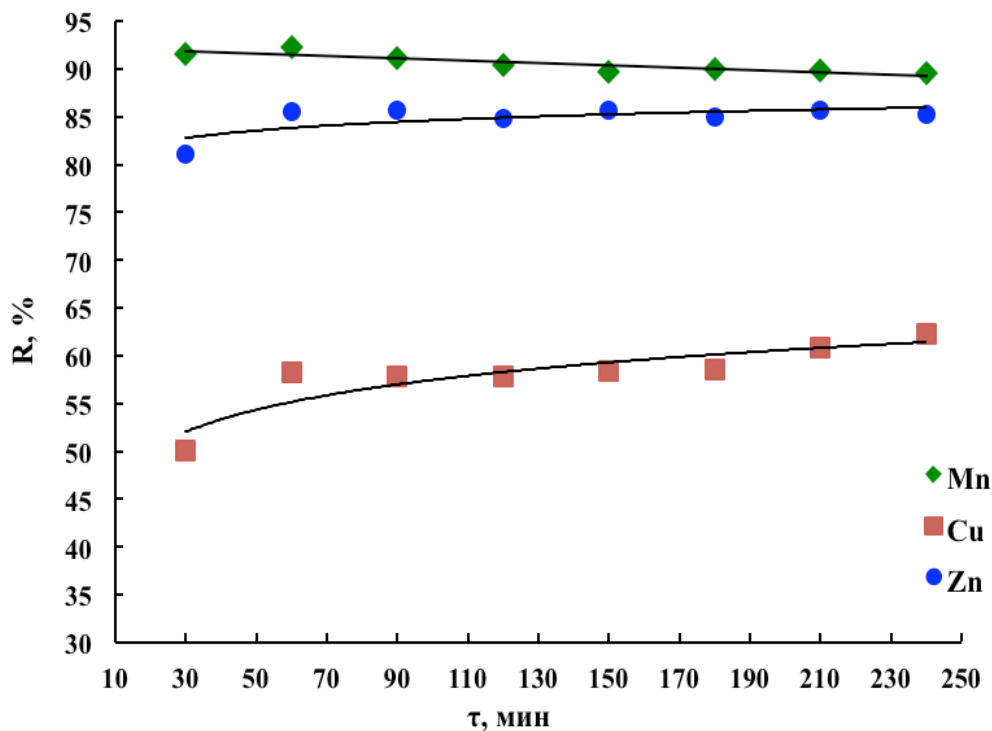


Рис. 4. Зависимость селективности НФ мембраны от времени фильтрации

Установлено, что селективность по солям меди (Cu^{2+}) меньше, чем марганца (Mn^{2+}) и цинка (Zn^{2+}). Это объясняется тем, что двухвалентный катион меди (Cu^{2+}) реагирует с солью Na_2SO_3 в растворе и восстанавливается до одновалентного катиона меди (Cu^+). Селективность нанофильтрационных мембран при этом составляет 60%, как и по одновалентным металлам. Основываясь на предыдущих опытах, проведенных на кафедре мембранной технологии, селективность нанофильтрационных мембран в однокомпонентном растворе, содержащий Cu^{2+} достигает значений 98%.

На рис. 5 приведена зависимость селективности ОО мембраны от времени фильтрации.

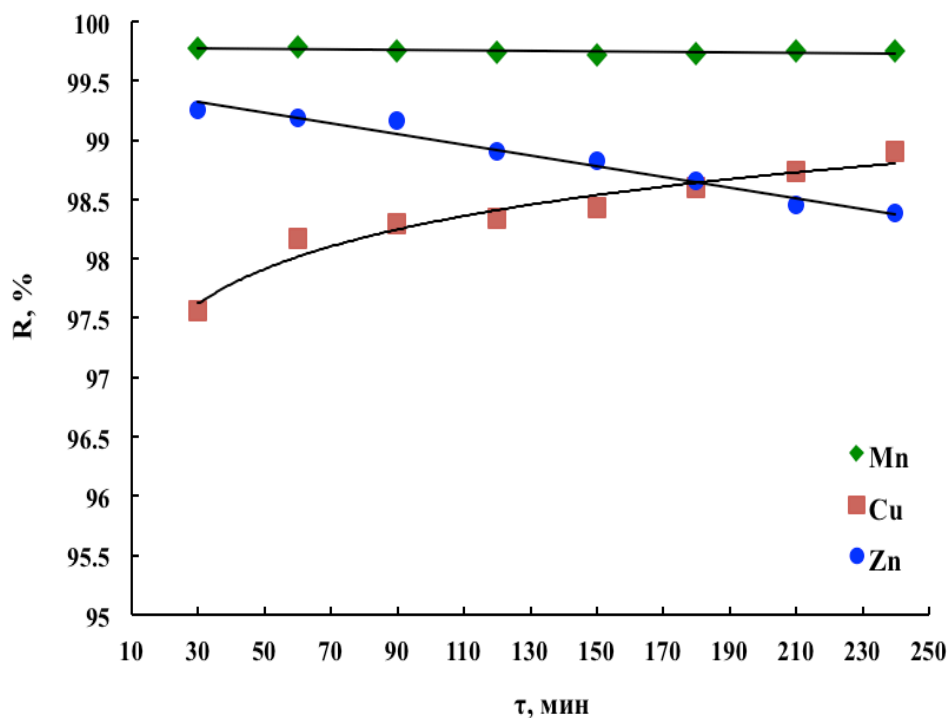


Рис. 5. Зависимость селективности ОО мембраны от времени фильтрации

Как видно, что селективность ОО мембраны по марганцу выше (>99,5%), чем по цинку и меди. Это можно объяснить тем, что при удалении тяжелых металлов из сточных вод баромембранными методами, физико-химические свойства ионов играют существенную роль как для процесса обратного осмоса, так и нанофильтрации. Радиус иона марганца ($r_i \text{ Mn}^{2+} = 0,91 \text{ \AA}$) больше, чем радиус иона цинка ($r_i \text{ Zn}^{2+} = 0,83 \text{ \AA}$) и радиус иона меди ($r_i \text{ Cu}^{2+} = 0,72 \text{ \AA}$). Чем меньше радиус ионов, тем легче они проникают через мембрану. Поэтому с ростом радиуса иона увеличивается задерживающая способность мембран (селективность возрастает).

Значение удельной производительности практически не изменяется и остается постоянным. Но при этом удельная производительность НФ мембран ($G = 17 \pm 1 \text{ л/м}^2 \cdot \text{час}$) значительно выше, чем у ОО мембран ($G = 6 \pm 1 \text{ л/м}^2 \cdot \text{час}$), при постоянных рабочих условиях.

Влияние температуры на селективность НФ мембраны – при повышении температуры уменьшается вязкость и плотность раствора и одновременно возрастает его осмотическое давление. Поэтому с уменьшением вязкости и плотности увеличивается проницаемость. Но следует отметить, что увеличение осмотического давления может

приводить к снижению движущей силы и уменьшению удельной производительности, а также повышается скорость гидролиза, сокращая срок службы мембран.

Зависимость селективности НФ мембраны от температуры раствора приведена на рис. 6. Как видно из графиков, при увеличении температуры селективность НФ мембраны незначительно уменьшается.

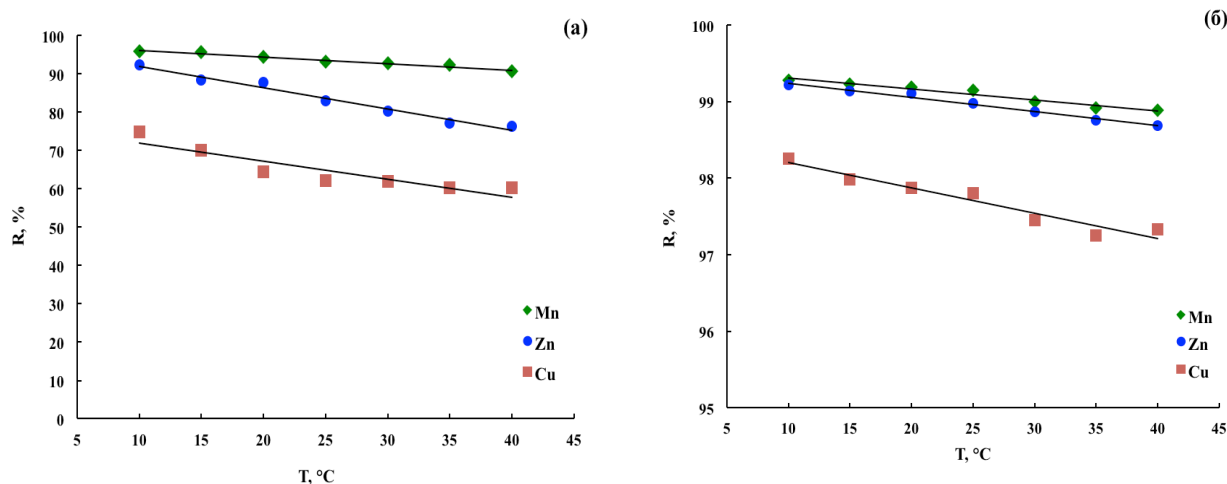


Рис. 6. Зависимость селективности НФ мембраны от температуры раствора (а) состав №1 и (б) состав №2 ; $\Delta P = 4$ бар ; $pH = 6,6 \pm 0,1$

С увеличением температуры происходит уменьшение толщины слоя «связанной» воды на поверхности мембраны, нарушается упорядоченность молекул воды в данном слое, что приводит к уменьшению селективности мембраны. Коэффициент диффузии увеличивается. Как следствие, проницаемость катионов через мембрану возрастает.

Влияние рабочего давления на селективность НФ мембраны – рабочее давление является основным фактором и ключевым параметром для баромембранных процессов разделения. С увеличением рабочего давления повышается движущая сила процесса (НФ и ОО) и, соответственно, возрастает величина проницаемости мембраны. Известно, что в процессе НФ, рабочее давление меньше чем в процессе ОО, и, поэтому НФ является более энергосберегающим процессом.

При увеличении рабочего давления происходит концентрационная поляризация на поверхности мембраны, что приводит к уменьшению селективности и загрязнению мембран. Таким образом, целью данного исследования является определение оптималь-

ного рабочего давления. На рис. 7 приведена зависимость селективности НФ мембраны от рабочего давления при очистке многокомпонентных растворов.

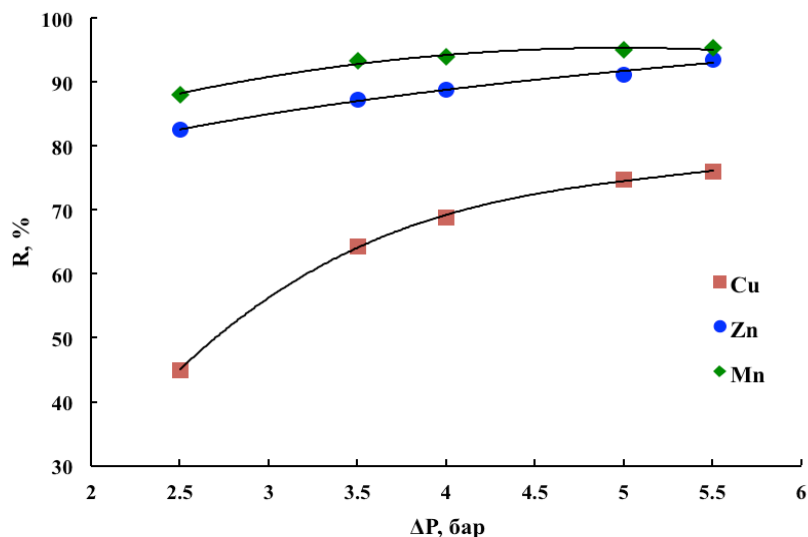


Рис. 7. Зависимость селективности НФ мембраны от рабочего давления

$T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$; $\text{pH} = 6,5 \pm 0,1$; состав №1

Очевидно, что селективность НФ мембраны увеличивается с повышением рабочего давления. С увеличением давления происходит уплотнение мембраны, растет движущая сила процесса, как следствие из этого – селективность увеличивается.

Влияние величины pH на селективность НФ мембраны – как уже говорилось, величина pH исходного раствора значительно влияет на баромембранные процессы разделения, особенно нанофильтрацию при водоподготовке и очистке сточных и шахтных вод. Величина pH оказывает значительное влияние на электроповерхностные характеристики и селективности НФ мембран. Величина pH исходного раствора может изменять зарядовые эффекты на поверхности и внутри пор НФ мембран и как следствие из этого, задерживающая способность мембраны приводит к снижению или повышению селективности мембран при очистке сточных вод от ТМ. Поэтому, следующим этапом работы стало исследование зависимости селективности НФ мембраны от величины pH исходного раствора при очистке многокомпонентных растворов. Зависимость селективности НФ мембраны от величины pH исходного раствора представлена на рис. 8.

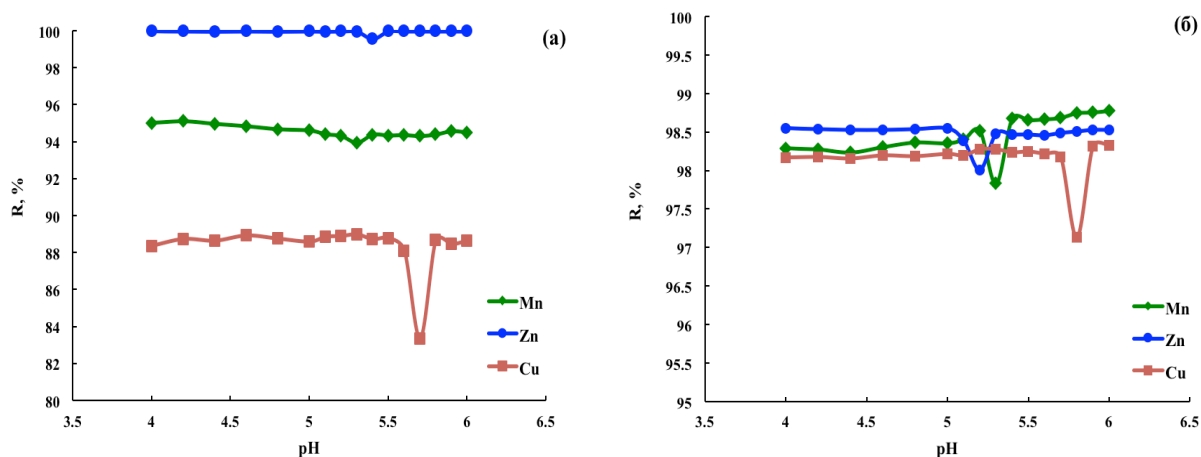


Рис. 8. Зависимость селективности НФ мембраны от величины рН исходного раствора $\Delta P = 4$ бар; $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$; (а) состав №1 и (б) состав №2

Очевидно, что зависимости селективности от величины рН проходят через минимум, соответствующий $\text{pH} = 5,3$ для марганца, $\text{pH} = 5,2-5,4$ для цинка и $\text{pH} = 5,7-5,8$ для меди. В ИЭТ положительные и отрицательные заряды селективного слоя скомпенсированы, в результате чего поверхность мембраны становится нейтральной. В данной области отсутствует электростатическое взаимодействие между мембраной и ионами растворенных веществ за счет снижения потенциала поверхности мембраны. Вклад электростатического механизма в общую задерживающую способность нанофильтрации снижается. В ИЭТ разделение осуществляется преимущественно за счет капиллярно-фильтрационного механизма. Следует обратить внимание, что селективность меди ниже чем селективность марганца и цинка при любых технологических параметров (величина рН, давление, температура). Это можно объяснить тем, что физико-химические характеристики ионов значительно влияют на эффективность очистки многокомпонентных растворов при разделении НФ и ОО.

3.2. Стадия ионного обмена

Целью работы данной стадии является определение основных характеристик процесса ионного обмена.

Влияние времени фильтрации на изменение концентрации фильтрата – ионообменная очистка изменяет во времени, т.е. имеет различную скорость при различных условиях. Время контактирования раствора с ионитом является важным аспектом

в процессе ионного обмена. Поэтому на рис. 9. представлена зависимость изменения выходной концентрации фильтрата от времени фильтрации.

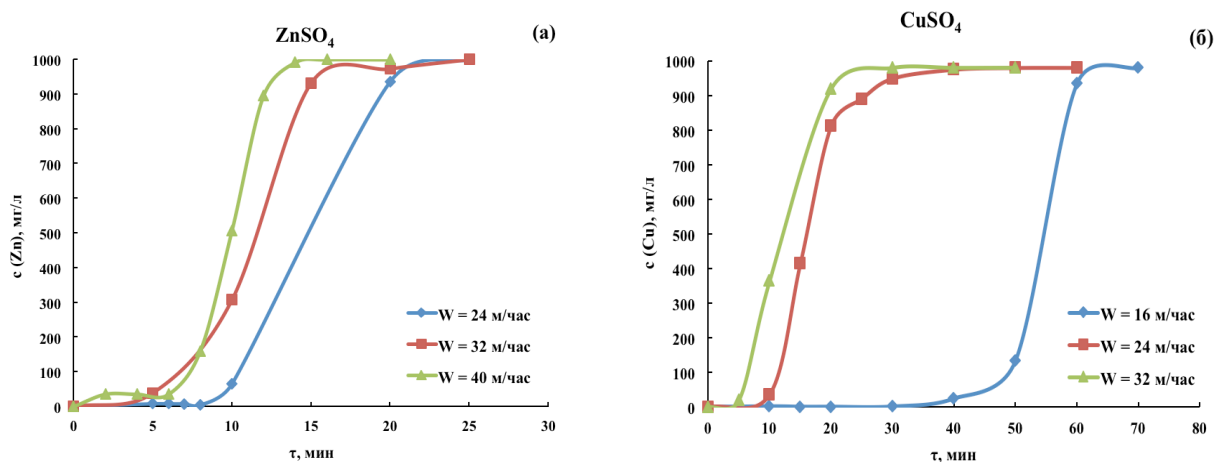


Рис. 9. Выходные концентрации ионов во времени фильтрации

(а) ZnSO₄ и (б) CuSO₄ ; T = 22 ± 1°C ; c (исх) = 1000 мг/л

Очевидно, что при увеличении линейной скорости потока, «проскок» ионов наблюдается быстрее. Это явление вызвано различными значениями энергии адсорбции твердой фазой ионов, которое обусловлены величинами радиусов ионов и их зарядов – при уменьшении радиуса иона энергия адсорбции увеличивается. Однако необходимо учитывать, что ионы, взаимодействующие с ионообменными смолами, находятся в растворе в гидратированном состоянии. Поэтому лимитирующей стадией процесса ионного обмена является внешняя диффузия. Величины ПОЕ смолы КУ-2-8 для ZnSO₄ = 425 г-экв/м³ и для CuSO₄ = 510 г-экв/м³. ДОЕ для ZnSO₄ = 305 г-экв/м³ и для CuSO₄ = 342 г-экв/м³ соответственно.

4. Техничко-экономический анализ процесса очистки сточных вод на основе нанофильтрации и ионного обмена

Техничко-экономический анализ проводили на примере очистки сточных шахтных вод Челябинского угольного бассейна. Целью данного анализа является минимизация затрат на очистку сточных вод с помощью гибридной технологии НФ и ИО.

Исходные данные для расчетов: график работы – 24 ч/сут. ; расход сточных вод – 10 м³/ч ; состав сточных вод (мг/л) – Cu = 129,3; Zn = 653; Mn = 43,1; SO₄ = 1066.

Принципиальная технологическая схема очистки сточных шахтных вод представлена на рис. 10.

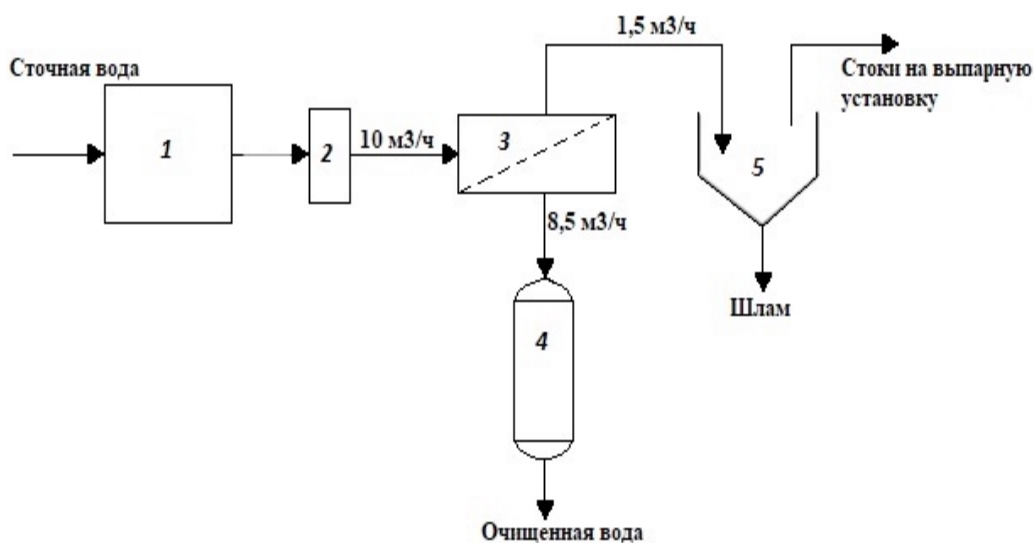


Рис. 38. Принципиальная схема очистки сточных шахтных вод методами нанофильтрации и ионного обмена

1 – приемная емкость сточных вод; 2 – блок механического фильтрования; 3 – стадия нанофильтрации; 4 – стадия ионного обмена; 5 – промежуточная емкость (отстойник) концентрата НФ.

Исходная вода из промежуточной емкости 1 подается на стадию механического фильтрования 2 для удаления крупнодисперсных загрязнений. После механической очистки вода поступает на стадию нанофильтрации 3, пермеат НФ подается на ионообменный фильтр 4 для доочистки до требуемых параметров, а концентрат НФ через промежуточную емкость 5 на выпарную установку (на схеме не представлена).

Себестоимость очищенной воды методом НФ = 2,15 руб/м³, себестоимость очищенной воды методом ИО = 75 руб/м³.

Общие капитальные затраты очистки сточных шахтных вод методами НФ и ИО составляют около 1,5 млн. руб.

Таким образом, данные технико-экономического анализа показали перспективность и экономическую эффективность применения гибридной технологии (НФ и ИО) очистки сточных вод от тяжелых металлов.

ВЫВОДЫ

1. Определены характеристики эффективности НФ очистки растворов сточных вод от ТМ – селективность мембраны, удельная производительность и изоэлектрическая точка.
2. Определены, что НФ мембраны обладают высокой селективностью ($\approx 98\%$) при концентрациях более 100 мг/л.
3. Обнаружено, что селективность исследованной мембраны по катиону меди Cu^{2+} в многокомпонентных растворах значительно ниже ($R = 60\%$), чем по катионам марганца Mn^{2+} ($R = 99,7\%$) и цинка Zn^{2+} ($R = 97,5\%$), что связано с механизмом разделения.
4. Определены величины ДОЕ и ПОЕ для ряда физико-химических систем «катион металла - смола» (Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} - КУ 2-8) при различных линейных скоростях очищаемой жидкости.
5. Проведен оценочный технико-экономический анализ для очистки сточных вод от тяжелых металлов на основе гибридной технологии НФ и ИО.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

- 1) Садреева Д.Р., **Лин Маунг Маунг**, Фарносова Е.Н. Очистка сточных вод от тяжелых металлов методом нанофильтрации // Успехи в химии и химической технологии. Т. 29. 2015. №2. С. 116 – 118.
- 2) **Лин Маунг Маунг**, Шитова В.О., Каграманов Г.Г. Очистка сточных вод от тяжелых металлов методом ионного обмена // Успехи в химии и химической технологии. Т. 30. 2016. №2. С. 109 – 110.
- 3) **Лин Маунг Маунг**, Фарносова Е.Н., Каграманов Г.Г. Очистка сточных вод от тяжелых металлов методами нанофильтрации и ионного обмена // Химическая промышленность сегодня – 2017, № 8. С.30 – 35.
- 4) Каграманов Г.Г., Фарносова Е.Н., **Лин Маунг Маунг**, Бланко-Педрехон А.М. Удаление тяжелых металлов из шахтных сточных вод // Химическая промышленность сегодня – 2018, № 1. С.44 – 49.

Заказ № _____ Объем _____ п.л. _____ Тираж 100 экз.
Издательский центр РХТУ им. Д.И. Менделеева