

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кубанский государственный университет»  
Факультет химии и высоких технологий

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе  
и инновациям

Шарафан М.В.

2021 г.



## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Б1.В.03 ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ И ИНТЕНСИФИКАЦИИ МЕМБРАННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Направление подготовки  
**04.06.01 Химические науки**

Направленность (профиль) программы  
**02.00.05 Электрохимия**

Квалификация выпускника:  
**Исследователь. Преподаватель-Исследователь**

Форма обучения  
**очная**

Краснодар 2021

Рабочая программа дисциплины Б1.В.03 «Фундаментальные основы оптимизации и интенсификации мембранных процессов» разработана в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования, утвержденным приказом Минобрнауки России от 30.07.2014 № 869 по направлению подготовки 04.06.01 Химические науки (уровень подготовки кадров высшей квалификации) и учебным планом основной образовательной программы по направлению подготовки 04.06.01 Химические науки, профиль 02.00.05 Электрохимия.

Рабочую программу составил:

профессор кафедры  
физической химии, д-р хим. наук, проф. Никоненко В.В.



---

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры физической химии  
«20» мая 2021 г. протокол № 11.

Заведующий кафедрой физической химии  
д-р хим. наук, профессор Заболоцкий В.И.



---

Утверждена на заседании учебно-методической комиссии факультета  
«24» мая 2021 г. протокол № 7.

Председатель УМК факультета, канд. хим. наук  
Беспалов А.В.



---

Зав. отделом аспирантуры и докторантуры  
Звягинцева Н.Ю.



---

## **1 Цели и задачи освоения дисциплины**

### **1.1 Цель дисциплины:**

Целью дисциплины Б1.В.03 «Фундаментальные основы оптимизации и интенсификации мембранных процессов» является обеспечение профессиональной подготовки аспирантов в области электрохимии и электрохимических производств.

### **1.2 Задачи дисциплины:**

Формирование готовности

- формулировать общие, специфические и частные задачи в области электрохимии и электрохимических производств;
- осуществлять отбор и реализацию содержания учебного материала в области электрохимии и электрохимических производств в соответствии с целями и задачами подготовки специалистов по специальности «Электрохимия»;
- выбирать и реализовывать электрохимические технологии для решения различных научно-технических задач;
- выбирать оптимальный для выполнения конкретной научной или научно-технической задачи метод исследования;
- представлять результаты научных исследований в области электрохимии в научно-популярном виде и транслировать их посредством средств массовой информации;
- использовать современные достижения в области электрохимии и смежных дисциплин для разработки новых методов исследования и новых электрохимических технологий.

### **1.3 Место дисциплины в структуре ООП ВО**

Дисциплина «Фундаментальные основы оптимизации и интенсификации мембранных процессов» входит в вариативную часть блока Б1 "Дисциплины (модули)" ООП ВО направления 04.06.01 «Химические науки», направленность Электрохимия. Предшествующими дисциплинами являются «Электрохимия (кандидатский экзамен)», «Физикохимия ионообменных материалов», «Современные электромембранные процессы и технологии». Полученные в ходе освоения данной дисциплины знания, умения и навыки могут быть полезными при выполнении научных исследований.

### **1.4 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с планируемыми результатами освоения образовательной программы**

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций: ОПК-2, ПК-1.

№ п.п.	Индекс компетенции	Содержание компетенции (или её части)	В результате изучения учебной дисциплины обучающиеся должны		
			знать	уметь	владеть
1.	ОПК-2	Готовностью организовать работу исследовательского коллектива в области химии и смежных наук	актуальные научные проблемы в области электро-мембранных процессов и технологий и пути их решения исходя из современного уровня химии и смежных дисциплин <b>(Шифр: 3 (ОПК-2)-1)</b>	выявлять наиболее актуальные темы научно-исследовательской работы в профессиональной области <b>(Шифр: У (ОПК-2)-1)</b>	навыками выявления и постановки актуальных научных проблем в области химии и смежных наук <b>(Шифр: В (ОПК-2)-1)</b>
	ПК-1	Способностью применять основные принципы, теории и концепции современной электрохимии для решения фундаментальных и прикладных задач	основные этапы разработки современных электро-мембранных технологий и процессов <b>(Шифр: 3 (ПК-1)-1)</b>	определять и обеспечивать условия, необходимые для оптимального протекания электро-мембранных процессов <b>(Шифр: У (ПК-1)-1)</b>	навыками использования современных достижений в области электрохимии, а также смежных дисциплин для разработки новых технологий <b>(Шифр: В (ПК-1)-1);</b> навыками использования теоретических представлений современной электрохимии и смежных дисциплин для решения практических задач <b>(Шифр: В (ПК-1)-2)</b>

## 2. Структура и содержание дисциплины

### 2.1 Распределение трудоёмкости дисциплины по видам работ

Очная форма обучения

Вид учебной работы	Всего часов	Курс (часы)		
		4		

<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	54	54			
В том числе:					
Занятия лекционного типа	18	18			
Занятия семинарского типа (семинары, практические занятия)	18	18			
Лабораторные занятия	18	18			
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	54	54			
В том числе:					
<i>Проработка учебного (теоретического) материала</i>	10	10			
<i>Выполнение индивидуальных заданий (подготовка сообщений, презентаций)</i>	14	14			
<i>Реферат</i>	10	10			
<i>Подготовка к текущему контролю</i>	10	10			
<b>Промежуточная аттестации (зачет)</b>	-	-			
Общая трудоемкость	час	108	108		
	зач. ед.	3	3		

## 2.2 Структура дисциплины

Распределение видов учебной работы и их трудоемкости по разделам дисциплины для очной формы обучения:

№ раздела	Наименование разделов	Количество часов				
		Всего	Аудиторная работа			Самостоятельная работа
			Л	ПЗ	ЛР	
1	2	3	4	5	6	7
1.	Введение. Обзор механизмов переноса через ионообменные мембраны.	10	2	4		4
2.	Закономерности переноса ионов в допредельном токовом режиме.	10	2	4		4
3.	Механизмы переноса ионов в сверхпредельном токовом режиме.	10	2			8
4.	Влияние свойств поверхности мембран на интенсивность электроконвекции и скорость генерации ионов $H^+$ и $OH^-$ .	10	2			8
5.	Влияние степени гидрофобности и электрической гетерогенности поверхности мембран на параметры массопереноса.	18	2	4	6	6
6.	Влияние геометрической неоднородности поверхности мембран на параметры массопереноса.	14	2		6	6

№ раздела	Наименование разделов	Количество часов				
		Всего	Аудиторная работа			Самостоятельная работа
			Л	ПЗ	ЛР	
7.	Вопросы оптимизации конструкции мембранной ячейки и электрического режима.	12	2	4		6
8.	Ионообменные насадки. Получение сверхчистой воды.	14	2		6	6
9.	Асимметричные токовые режимы.	10	2	2		6
	<i>Всего:</i>	108	18	18	18	54

## 2.3 Содержание разделов дисциплины

### 2.3.1 Занятия лекционного типа

№	Наименование раздела	Содержание раздела	Форма текущего контроля
1	2	3	4
1	Введение. Обзор механизмов переноса через ионообменные мембраны.	Сорбция электролита. Электропроводность и диффузионная проницаемость. Микрогетерогенная модель. Формулировка модели. Решение прямой и обратной задач; нахождение параметров модели из экспериментальных данных.	Решение ситуационных задач.
2	Закономерности переноса ионов в допределительном токовом режиме.	Одномерная модель электродиффузии бинарного электролита в мембранной системе. Ламинарное течение жидкости между двумя параллельными пластинами. Решение уравнения Навье-Стокса и профиль скорости в канале между двумя параллельными пластинами. Конвективно-диффузионная модель. Распределение концентрации и плотности тока. Вольтамперная характеристика. Расчет толщины диффузионного слоя. Сравнение расчета с экспериментальными данными. Недостатки модели. Двумерная конвективно-диффузионная модель. Математическая формулировка задачи.	Решение задач
3	Механизмы переноса ионов в сверхпределительном токовом режиме.	Эффект диссоциации воды, экзальтации, гравитационной и электроконвекции. Анализ экспериментальных данных, их сравнение с результатами теоретических расчетов.	Решение задач
4	Влияние свойств поверхности мембран	Гидродинамические режимы при использовании условий прилипания и проскальзывания у	Устный опрос

	на интенсивность электроконвекции и скорость генерации ионов $H^+$ и $OH^-$ .	стенки. Длина проскальзывания. Влияние гидрофобности и морфологии поверхности на электропроводность и диссоциацию воды. Теоретические и практические аспекты исследования гидрофильно-гидрофобного баланса поверхности путем измерения контактного угла смачивания.	
5	Влияние степени гидрофобности и электрической гетерогенности поверхности мембран на параметры массопереноса.	Взаимовлияние диссоциации воды и электроконвекции. Влияние гидрофобности поверхности на электроконвекцию. Связь гидрофобности поверхности и ее электропроводности. Связь электропроводности поверхности мембраны, локального перенапряжения и интенсивности генерации $H^+$ , $OH^-$ ионов. Понятие выхода по току, его связь с числами переноса ионов через мембрану.	Решение задач
6	Влияние геометрической неоднородности поверхности мембран на параметры массопереноса.	Протекание электрического тока через изогнутые поверхности; распределение линий электрического тока. Распределение линий тока жидкости рядом с препятствием. Влияние локальных перенапряжений на диссоциацию воды. Влияние тангенциального тока жидкости на протекание электроконвекции.	Творческое задание
7	Вопросы оптимизации конструкции мембранной ячейки и электрического режима.	Приложение теории подобия к электромембранным процессам. Числа Рейнольдса, Шмидта, Шервуда, Прандтля. Вид зависимости $Sh-Re$ . Роль сепаратора-турбулизатора. Расчет ЭД аппаратов для обессоливания и концентрирования. Подходы к оптимизации ЭД процесса. Использование конвективно-диффузионной модели: выбор геометрических (межмембранное расстояние, форма сепаратора) и гидродинамических (скорость потока раствора) параметров при минимизации себестоимости продукта.	Самостоятельная работа
8	Ионообменные насадки. Получение сверхчистой воды.	Параметры, определяющие производительность водоочистки при работе в сильно разбавленных растворах. Методы интенсификации массопереноса при получении сверхчистой воды. Профилирование мембран. Внесение ионообменных волокон. Ионитные насадки: монослой и полислой.	Реферат
9	Асимметричные токовые режимы.	Электродиализ на переменном токе. Импульсные токи. Параметры импульсных токов: коэффициент заполнения, длительность импульса; их влияние на поле концентрации в примембранном слое раствора. Применение асимметричных токовых режимов в промышленности.	Реферат

### 2.3.2 Занятия семинарского типа

№	Наименование раздела	Тема семинара	Форма текущего контроля
1.	Введение. Обзор механизмов переноса через ионообменные мембраны.	Программа MGM, реализующая микрогетерогенную модель. Расчет сорбции электролита. Решение одномерных задач электродиффузии электролита через мембрану.	Решение ситуационных задач
2.	Закономерности переноса ионов в допредельном токовом режиме	Решение уравнения Навье-Стокса и профиль скорости в канале между двумя параллельными пластинами.	Решение задач
3.	Влияние степени гидрофобности и электрической гетерогенности поверхности мембран на параметры массопереноса.	Гидрофобность сложных поверхностей. Состояние факира, состояние Кассье. Гистерезис смачивания. Уравнение Кассье-Бакстера, расчет гидрофобности композиционных поверхностей. Связь гидрофобности и электрической неоднородности поверхности мембран.	Решение задач
4.	Вопросы оптимизации конструкции мембранной ячейки и электрического режима.	Пакет программ ELDIAL - «Электродиализ». Конвективно-диффузионная модель. Расчет электродиализаторов для обессоливания и концентрирования. Расчет электродиализаторов с сетчатыми прокладками и с профилированными мембранами. Использование подходов теории подобия и экспериментальных данных.	Самостоятельная работа
5.	Асимметричные токовые режимы	Вид токовых зависимостей для импульсных токов в потенциостатическом и гальваностатическом токе. Кинетические зависимости формы концентрационных профилей в мембране и примембранном растворе. Влияние на форму профилей коэффициентов заполнения импульсов. Коэффициенты заполнения, используемые в мировой литературе.	Реферат
		Итого:	18

### 2.3.3 Лабораторные занятия

№	Наименование раздела	Тема лабораторной работы	Форма текущего контроля
1.	Влияние степени гидрофобности и электрической гетерогенности поверхности мембран на параметры массопереноса.	Получение вольтамперных характеристик мембраны МК-40 и мембраны МК-40 с гомогенизированной поверхности.	Защита ЛР



2.	Влияние геометрической неоднородности поверхности мембран на параметры массопереноса.	Получение вольтамперных характеристик исходной и профилированной мембран МА-41.	Защита ЛР
3.	Ионообменные насадки. Получение сверхчистой воды.	Получение концентрационных зависимостей электропроводности обессоленной воды при использовании «пустого» канала и канала с ионообменной засыпкой.	Защита ЛР
		Итого:	18

### 2.3.4 Примерная тематика курсовых работ (проектов)

Курсовые работы не предусмотрены учебным планом

### 2.4 Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

Самостоятельная работа аспирантов проводится в форме изучения отдельных теоретических вопросов по предлагаемой литературе и самостоятельного решения задач, а также в форме подготовки творческих заданий и рефератов с дальнейшим их разбором или обсуждением на аудиторных занятиях. Во время самостоятельной подготовки обучающиеся обеспечены доступом к системе МУДЛ КубГУ, доступом через Интернет к информационно-аналитическим базам данных РИНЦ и Scopus, а также к библиотечным фондам (электронная библиотека диссертаций РГБ, Электронная библиотека grebennikon.ru, Информационные ресурсы компании «Интегрум-Техно», Научные базы компании «Ист Вью Инфор-мейшн Сервисиз, Инк», ЭБД компании EBSCO, Научные эл. журналы SAGE, Электронная библиотечная система издательства «Лань», Электронная коллекция Оксфордского Российского Фонда и др. )

Обеспечение обучающихся инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья учебно-методическими ресурсами осуществляется в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Успешное освоение дисциплины предполагает активное, творческое участие студента путем планомерной, повседневной работы.

*Общие рекомендации.*

Изучение дисциплины следует начинать с проработки рабочей программы, уделяя целям и задачам, структуре и содержанию курса.

Имеется электронная версия лекций по данной дисциплине.

Основной формой обучения аспирантов является самостоятельная работа над учебным материалом. Процесс изучения дисциплины состоит из следующих этапов:

1. Проработка теоретического материала по рекомендованной литературе и конспектам лекций.
2. Решение задач.

3. Выполнение и защита лабораторных работ.
4. Выполнение творческих заданий, подготовка рефератов.
5. Выполнение самостоятельных работ.
6. Сдача зачёта в устной или письменной форме (по усмотрению преподавателя).

Самостоятельные работы выполняются каждым аспирантом на отдельных листках. Не допускается использование любых средств коммуникации (ноутбуки, мобильные телефоны с выходом в интернет и пр.).

Допускается использование рабочих тетрадей, в которых законспектированы наиболее важные с точки зрения каждого из аспирантов моменты, выделенные при самостоятельной проработке каждой из тем.

Лабораторная работа выполняется индивидуально или в составе группы. Все вычисления, включая оценку точности эксперимента, желательно проводить во время занятия. При недостаточном количестве времени их можно выполнять в часы самостоятельной работы с обязательным представлением результатов преподавателю на последующих занятиях или консультациях.

Защита лабораторных работ осуществляется по мере их выполнения или в специально выделенное для этого время в соответствии со сроками, определенными графиком. Защита проделанной работы осуществляется в индивидуальном порядке. У каждого аспиранта должен быть свой оформленный отчет. При защите лабораторной работы аспирант должен:

- дать необходимые пояснения по теме работы;
- ответить на дополнительные вопросы.

### 3 Образовательные технологии

Для формирования компетенций в процессе освоения курса используется технология профессионально-развивающего обучения, предусматривающая не только передачу теоретического материала, но и стимулирование и развитие продуктивных познавательных действий студентов (на основе психолого-педагогической теории поэтапного формирования умственных действий).

Вид занятия (Л, ПР, ЛР)	Используемые интерактивные образовательные технологии	Количество часов
<i>Л</i>	Лекция-беседа, метод поиска быстрых решений в группе	8
<i>ПР</i>	Проблемный семинар	4
<i>ЛР</i>	Работа в малых группах	12
<i>Итого:</i>		24

Для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья реализуются индивидуальные образовательные технологии, которые позволяют полностью индивидуализировать содержание, методы и темпы учебной деятельности инвалида, вносить вовремя необходимые коррективы как в деятельность студента-инвалида, так и в деятельность преподавателя.

#### 4. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

##### Решение ситуационных задач по теме «Введение. Обзор механизмов переноса через ионообменные мембраны»

Используется компьютерная программа «Микрогетерогенная модель MGM», в которую можно подставлять такие параметры мембраны, как обменная емкость, коэффициенты диффузии противоионов и коионов, константа Доннана, а также электропроводность в изо-точке, параметр Гнусина и параметр упорядоченности мембраны. Предлагается набор экспериментальных данных по диффузии через мембрану, сорбции, концентрационных зависимостей электропроводности. Необходимо предложить параметры микрогетерогенной модели, представляющиеся адекватными с точки зрения представлений о строении и свойствах мембраны, и, варьируя их, получить такие расчетные данные диффузии через мембрану, сорбции и концентрационных зависимостей электропроводности, чтобы они минимально отличались от экспериментальных. В качестве решения ситуационной задачи необходимо указать марку мембраны, для которой производился расчет, а также подставленные значения параметров микрогетерогенной модели.

##### Решение задач по теме «Закономерности переноса ионов в допредельном токовом режиме»

###### *Задача 1. Теплообмен*

Человек оказался за бортом судна  $t(в)=14\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Найдите, на сколько градусов понизится  $t^{\circ}$  его тела за 10 мин, если энергетика дыхания возрастёт в 3,5 раза, при этом в нормальном состоянии скорость превращения энергии 72 ккал/час. Принять коэффициент теплопроводности  $\alpha=0,06\text{ кДж}/(\text{м}^2\cdot\text{К}\cdot\text{с})$ ; теплоемкость тела:  $C=0,86\text{ ккал}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , площадь поверхности тела  $1,8\text{ м}^2$ . Масса тела 70 кг.

###### *Задача 2. Выведение продуктов метаболизма*

Работу почек оценивают по концентрации креатинина в крови. Нормальная концентрация креатинина в крови  $C_{кр}=10\text{ мг/л}$ . Гематокрит крови  $H=0.4$  (объемная доля эритроцитов в крови). Концентрация креатинина в тканевой и внутриклеточной жидкости примерно такая же, как и в плазме крови. Креатинин выводится вместе с мочой,  $V_m=2,4\text{ л/сут}$ . Определить скорость производства креатинина  $G$  (мг/час), общую массу креатинина в организме  $M$  (мг).

##### Задачи по теме «Механизмы переноса ионов в сверхпредельном токовом режиме»

1.1. Определить минимальную длину канала обессоливания электродиализатора, на котором достигается степень обессоливания 50 %, если

- числа переноса = 0,98;

- межмембранное расстояние = 0,45 мм;
- скорость течения раствора 3,2 см/с;

Считать, что в растворе имеется только натрий-хлор.

1.2. Дан электродиализный аппарат, содержащий 100 парных камер.

Межмембранное расстояние = 0,5 мм.

Длина канала 60 см.

Размер мембраны 60 на 40 см.

Определить производительность аппарата, при которой степень обессоливания достигается равной 60 %. Нужно найти скорость работы аппарата.

1.3. Требуется спроектировать электродиализный аппарат, который бы обеспечивал 80% обессоливания раствора хлорида натрия.

Размер мембран 60 на 40.

Расстояние между мембранами = 0,4 мм.

Аппарат должен иметь производительность 2 м<sup>3</sup>/час.

Найти число парных камер в аппарате.

1.4. Требуется спроектировать электродиализный аппарат, который бы обеспечивал 80% обессоливания раствора хлорида натрия. Известно, что при скорости течения жидкости 2 см/с на каждые 10 см длины канала концентрация убывает на 20%.

Ширина мембран 40 см.

Расстояние между мембранами = 0,4 мм.

Аппарат должен иметь производительность 2 м<sup>3</sup>/час.

Найти длину канала обессоливания и число парных камер в аппарате.

### **Вопросы для устного опроса по теме «Влияние свойств поверхности мембран на интенсивность электроконвекции и скорость генерации ионов Н<sup>+</sup> и ОН<sup>-</sup>»**

1. Чем ламинарное течение жидкости отличается от турбулентного? По каким параметрам можно определить, является ли течение ламинарным или турбулентным?
2. Что такое диффузионный пограничный слой? Гидродинамический пограничный слой? Как они соотносятся между собой?
3. Понятие о диффузионном слое: слой Нернста, полная толщина диффузионного слоя, гидродинамический погранслой.
4. Чему равна скорость течения жидкости в ядре потока? У стенки трубы или плоской пластинки?
5. Что такое условия прилипания у стенки и условия скольжения у стенки?
6. Какие материалы являются гидрофобными? Гидрофильными? Какова будет гидрофобность мембранных материалов?
7. Чему равна длина скольжения (slip length)?
8. Как увеличение скорости движения жидкости у стенки канала влияет на

- приповерхностную концентрацию?
9. Как можно максимально увеличить турбулентность движения жидкости путем увеличения гидрофобности?
  10. Как гидрофобные области на поверхности мембраны влияют на развитие генерации ионов  $H^+$ ,  $OH^-$ ?

### **Задачи по теме «Влияние степени гидрофобности и электрической гетерогенности поверхности мембран на параметры массопереноса»**

1. Зная, что угол смачивания образца мембраны МА-41 составил  $66^\circ$ , а угол смачивания полиэтилена, входящего в ее состав, составляет  $76^\circ$ , рассчитайте долю поверхности данного образца, занятой полиэтиленом. Находится ли данное значение в диапазоне 50-70%, характерном для данных мембран? Изобразите схемы ВАХ, характерных для данного образца и для типичной МА-41, укажите отличия.
2. Суспензию полиэлектролита наносили на мембраны АМХ и СМХ. На ВАХ модифицированных мембран произошли следующие изменения: предельный ток для СМХ составил 0,8 от исходного, АМХ - 1,5 от исходного. Длина плато для СМХ составила 0,9 от исходного; АМХ - 0,5 от исходного. Определите вероятный состав полиэлектролита, предположите, какие еще изменения, помимо указанных, произошли с вольтамперными характеристиками. С помощью какого метода исследования можно проверить сделанные выводы?

### **Творческое задание по теме "Влияние геометрической неоднородности поверхности мембран на параметры массопереноса"**

*Может выполняться индивидуально или в малых группах*

Основываясь на знаниях о гидродинамическом режиме рядом с препятствием и распределении линий тока рядом с изогнутой поверхностью, требуется определить и изобразить в jpg, png, или ppt файле вихревые области рядом с (группа 1) каверной на поверхности мембраны (группа 2) конусообразным выступом на поверхности мембраны. Принять, что электрическая составляющая поля направлена перпендикулярно мембране, а поток жидкости направлен вдоль поверхности мембраны.

### **Самостоятельная работа по теме "Вопросы оптимизации конструкции мембранной ячейки и электрического режима."**

#### **Вариант 1**

1. Задача. Найти оптимальное напряжение и себестоимость воды, получаемой при ЭД раствора  $NaCl$  с концентрацией 0.01 моль/л. Принять, что скорость течения раствора 1.6 см/с, коэффициент диффузии соли  $D_{NaCl} = 1.6 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. Стоимость мембран 1000 руб./м<sup>2</sup>. Стоимость эл. энергии равна 2 руб. за кВт×час. Затратами электроэнергии на перекачку раствора пренебречь. Число рабочих часов в году 5840, стоимость оборудования без стоимости мембран 200 000 рублей. Производительность установки 1 м<sup>3</sup>/ч по дилуату и 0.2 м<sup>3</sup>/ч

по концентрату. Ширина рабочей части мембраны (=ширина камеры обессоливания) 40 см, расстояние между соседними мембранами  $h=0.5$  мм. Степень обессоливания 0,8. Максимальное число лет эксплуатации 12 лет. Предусмотреть замену мембраны каждые 4 года.

2. Что такое критерии подобия? Какие критерии подобия вы знаете?

3. Вид зависимости Sh-Re.

### Вариант 2

1. Задача. Найти оптимальное напряжение и себестоимость воды, получаемой при ЭД раствора NaCl с концентрацией 0.01 моль/л. Принять, что скорость течения раствора 1.6 см/с, коэффициент диффузии соли  $D_{NaCl}=1.6 \times 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. Стоимость мембран 1000 руб./м<sup>2</sup>. Стоимость эл. энергии равна 2 руб. за кВт×час. Затратами электроэнергии на перекачку раствора пренебречь. Число рабочих часов в году 5840, стоимость оборудования без стоимости мембран 200 000 рублей. Производительность установки 1 м<sup>3</sup>/ч по дилуату и 0.2 м<sup>3</sup>/ч по концентрату. Ширина рабочей части мембраны (=ширина камеры обессоливания) 40 см, расстояние между соседними мембранами  $h=0.5$  мм. Степень обессоливания 0,8. Максимальное число лет эксплуатации 12 лет. Предусмотреть замену мембраны каждые 4 года.

2. Из каких геометрических параметров выводятся числа Рейнольдса, Шмидта, Шервуда, Прандтля? С какими физическими процессами они связаны?

3. Какова роль сепаратора-турбулизатора в мембранной системе? В чем его положительное влияние? Отрицательное? В каких случаях целесообразно применять сепаратор-турбулизатор, а в каких – иное наполнение канала?

### Вопросы для подготовки к защите лабораторных работ

*Влияние степени гидрофобности и электрической гетерогенности поверхности мембран на параметры массопереноса.*

1. Какие виды электроконвекции Вам известны?
2. В какой степени и почему степень гидрофобности поверхности влияет на развитие электроконвекции?
3. Какие факторы определяют степень гидрофобности поверхности ионообменных мембран?
4. Как электрическая неоднородность поверхности влияет на сопряженные эффекты концентрационной поляризации?
5. Как оценивают степень гидрофобности поверхности ионообменных мембран, почему ее лучше измерять на набухших образцах?

*Влияние геометрической неоднородности поверхности мембран на параметры массопереноса.*

1. Какие методы позволяют оценить геометрическую неоднородность поверхности мембран?
2. Как геометрическая неоднородность поверхности влияет на степень гидрофобности мембран?
3. Какие из известных коммерческих мембран обладают геометрической неоднородностью?
4. Как геометрическая неоднородность поверхности влияет на вольтамперные характеристики и хронопотенциограммы ионообменных мембран?
5. Какими методами можно увеличить (уменьшить) геометрическую неоднородность поверхности мембран?

*Ионообменные насадки. Получение сверхчистой воды.*

1. Перечислите типы ионообменных насадок.
2. Какие явления возникают в каналах обессоливания при наличии в них ионообменных насадок?
3. Как на практике реализуется введение в межмембранное пространство каналов обессоливания ионообменных насадок?
4. Какие технические решения лежат в основе непрерывной регенерации ионообменных насадок?
5. Назовите области минерализации исходного раствора для обеспечения оптимальной эффективности монослойных и полислойных ионообменных насадок.

**Темы рефератов по разделу "Ионообменные насадки. Получение сверхчистой воды"**

1. Химические методы получения сверхчистой воды.
2. Физические методы получения сверхчистой воды.
3. Емкостная деионизация: текущее состояние применения процесса и перспективы развития.
4. Аппаратное оформление очистки воды на предприятии [по выбору аспиранта].
5. Электродиализаторы с профилированными мембранами.
6. Электродиализаторы с ионообменной засыпкой.
7. Применение ионообменных волокон для получения сверхчистой воды.
8. Сопряжение электродиализа с ионным обменом: многоступенчатые системы водоочистки.
9. Методы регенерации смешаннослойных ионообменных колонок.

**Темы рефератов по разделу "Асимметричные токовые режимы"**

1. Достоинства и недостатки аппаратов непрерывного действия и аппаратов переключаемой линии.
2. Использование асимметричных токовых режимов при электродиализе пищевых продуктов.
3. Использование асимметричных токовых режимов при электродиализе растворов с высокой жесткостью.

4. Использование асимметричных токовых режимах в новых электродиализных устройствах: устройства дозирования лекарственных препаратов.
5. Асимметричные токовые режимы, используемые в установках, сочетающих емкостную электродеионизацию и электродиализ (проекты групп М. Весслинга и Д. Хана).

#### **4.2 Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации**

Форма контроля для проведения промежуточной аттестации по дисциплине – зачет.

Студенты обязаны сдать зачет в соответствии с расписанием и учебным планом. Зачет является формой контроля усвоения студентом учебной программы по дисциплине, выполнения лабораторных и контрольных работ. Зачет по прослушанному курсу может быть выставлен на основании оценки деятельности студента в семестре, а именно - по посещаемости лекций, результатам выполнения заданий и лабораторных работ. Защита лабораторных работ осуществляется в течение семестра после выполнения экспериментальной части работы на основании проверки письменного отчета и устного и/или письменного опроса обучающихся по теме лабораторной работы. Для получения зачета обучающийся должен дать удовлетворительные ответы на все вопросы.

#### **Критерии оценки:**

- **оценка «зачтено»:** студент владеет теоретическими знаниями по данному разделу, умеет формулировать общие, специфические и частные задачи в области электрохимии и электрохимических производств; знает основные свойства, области применения, методы исследования ионообменных материалов, допускает незначительные ошибки; студент умеет правильно выбирать оптимальный для выполнения конкретной научной или научно-технической задачи метод исследования.

- **оценка «не зачтено»:** материал не усвоен или усвоен частично, студент затрудняется в описании основных задачи в области электрохимии и электрохимических производств, затрудняется привести примеры методов исследования основных свойств ионообменных материалов.

#### **Вопросы для подготовки к зачету по дисциплине:**

1. Структура мембран. Изменение структуры при набухании. Представления Дрейфюса и Гирке. Современные модели структуры мембран (Кройер, Жебель).
2. Микрогетерогенная модель. Электропроводность и диффузионная проницаемость. Решение прямой и обратной задач; нахождение параметров модели из экспериментальных данных.
3. Ламинарное течение жидкости между двумя параллельными пластинами. Решение уравнения Навье-Стокса и профиль скорости в канале между двумя параллельными пластинами.



4. Расчет толщины диффузионного слоя. Сравнение расчета с экспериментальными данными. Недостатки модели.
5. Виды процессов сверхпредельного переноса ионов, их практическая значимость.
6. Способы контроля глубины протекания процессов сверхпредельного переноса ионов.
7. Пути влияния свойств поверхности мембраны на степень развития процесса диссоциации воды.
8. Свойства поверхности мембраны, влияющие на развитие электроконвекции в системе.
9. Методы измерения гидрофобности поверхности ионообменных мембран.
10. Влияние гидрофобности поверхности мембран на степень развития электроконвекции. Взаимовлияние электроконвекции и диссоциации воды.
11. Распределение линий электрического тока и линий скоростей потока жидкости рядом с дефектами мембраны.
12. Влияние высоких локальных разностей потенциалов на развитие процессов сверхпредельного переноса ионов.
13. Приложение теории подобия к электромембранным процессам. Числа Рейнольдса, Шмидта, Шервуда, Прандтля. Вид зависимости  $Sh-Re$ .
14. Подходы к оптимизации ЭД процесса. Использование конвективно-диффузионной модели: выбор геометрических (межмембранное расстояние, форма сепаратора) и гидродинамических (скорость потока раствора) параметров при минимизации себестоимости продукта.
15. Методы получения сверхчистой воды.
16. Конструктивные особенности электродиализаторов, используемых для очистки сильно разбавленных растворов.
17. Параметры импульсных токов и их влияние на эффективность обессоливания.
18. Применение асимметричных токовых режимов в промышленности.

## **5. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля) -**

### **5.1. Основная литература**

1. Гумеров, А.М. Математическое моделирование химико-технологических процессов [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.М. Гумеров. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2014. — 176 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/41014>. — Загл. с экрана.
2. Мембраны и мембранные технологии, под ред. А.Б. Ярославцева. М.: Научный мир, 2013. — 611 с. Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_red&id=468334&sr=1](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=468334&sr=1)

### **5.2. Дополнительная литература**

1. Математическое моделирование мембранных процессов с использованием Comsol multiphysics 4.3 [Текст] : учебное пособие для студентов, маги-

странтов / А. М. Узденова, А. В. Коваленко, М. Х. Уртенев, В. В. Нико-  
ненко ; М-во образования и науки Рос. Федерации ; Кубанский гос. ун-т. -  
Краснодар : Кубанский государственный университет, 2013. - 224 с. : ил. -  
Библиогр.: с. 199. - ISBN 9785820908736 : 41.81.

2. Кудинов, И.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплооб-  
мена в движущихся жидкостях [Электронный ресурс] : учебное пособие /  
И.В. Кудинов, В.А. Кудинов, А.В. Еремин, С.В. Колесников ; под ред. Э.М.  
Карташова. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 208 с.  
— Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/56168>. — Загл. с экрана.

### **5.3. Периодические издания**

Журнал «Мембраны и мембранные технологии»

Журнал «Физическая химия»

### **6. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Электронная библиотечная система издательства "Лань".

Nature Publishing Group.

Научная электронная библиотека (НЭБ).

Коллекция журналов издательства Elsevier на портале ScienceDirect.

Российская мембранная сеть Russian membrane network  
[www.rusmembrane.net/](http://www.rusmembrane.net/)

Электронные учебники кафедры Мембранной Технологии Российского  
Химико-Технологического Университета им. Д.И. Менделеева,  
<http://membrane.msk.ru>

Информационно-аналитическая база РИНЦ (<http://elibrary.ru>)

Информационно-аналитическая база Scopus (<http://scopus.com>)

### **7 Методические указания и материалы по видам занятий**

Успешное освоение дисциплины предполагает активное, творческое участие аспиранта путем планомерной, повседневной работы.

Общие рекомендации

Изучение дисциплины следует начинать с проработки рабочей программы, особое внимание, уделяя целям и задачам, структуре и содержанию курса.

Имеется электронная версия лекций по данной дисциплине.

Основной формой обучения студентов является самостоятельная работа над учебным материалом. Процесс изучения дисциплины “Фундаментальные основы оптимизации и интенсификации мембранных процессов” состоит из следующих этапов:

1. Проработка теоретического материала по рекомендованному литературным источникам и конспектам лекций.

2. Выполнение самостоятельных работ.

3. Подготовка и представление перед однокурсниками презентаций и рефератов на заданную тему.

4. Выполнение лабораторных работ.

5. Решение задач.

6. Сдачи зачета в устной или письменной форме (по усмотрению преподавателя).

Презентации на заданную тему выполняются в программе Power Point. Она должна состоять из 5-8 слайдов и содержать основные определения, фактический иллюстрированный материал, выводы и список использованных источников.

Материал для сообщения необходимо искать в книгах, журналах и интернет-источниках, опубликованных в последние 3 года.

Доклад, сопровождающий презентацию, должен занимать 7-10 минут.

Доклады и презентации предварительно присылаются преподавателю по электронной почте на проверку.

Самостоятельные работы выполняются каждым аспирантом на отдельных листках. Не допускается использование любых средств коммуникации (ноутбуки, мобильные телефоны с выходом в интернет и пр.

Допускается использование рабочих тетрадей, в которых законспектированы наиболее важные с точки зрения каждого из студентов моменты, выделенные при самостоятельной проработке каждой из тем.

Лабораторные работы выполняются индивидуально или в группе. Предварительно идет ознакомление с лабораторным оборудованием, используемым в экспериментах, а также с техникой безопасности при выполнении экспериментальных работ. Результаты измерений регистрируются в цифровом виде с использованием компьютеров. Обработка данных осуществляется с применением программы Excel по алгоритму и шаблонам, предоставленным преподавателем. Полученные результаты представляются в виде таблиц и графиков.

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю) (при необходимости)**

### **8.1 Перечень необходимого программного обеспечения**

1. Microsoft Windows 8, 10
2. Microsoft Office Professional Plus
3. Comsol multiphysics

Авторские программные продукты «Микрогетерогенная модель MGM», «Эл-Диал» (выполнены в среде Excel, предоставляются преподавателем).

**8.2 Перечень необходимых информационных справочных систем**  
Справочно-правовая система «Консультант Плюс» (<http://www.consultant.ru>)

## 9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Аудитория для проведения лекционных и практических занятий, оснащенный персональными компьютерами с предустановленным программным обеспечением, указанным в п.8.1. Также необходима мультимедийная система, включающая стационарный или мобильный экран, цифровой проектор, подключаемый к компьютеру и лазерную указку.

Учебно-научные лаборатории (326С, 330с) для выполнения лабораторных работ, в которой находится электрохимический комплекс Autolab-100 с программным обеспечением Nova; электрохимические установки, в которые входят перистальтические насосы, рН метры и кондуктометры, а также набор электродиализных ячеек для получения вольтамперных характеристик, хронопотенциограмм и измерения массообменных характеристик отдельных мембран и каналов обессоливания; установки для измерения углов смачивания поверхности мембран, оптический микроскоп для визуализации поверхности и срезов мембран; весы аналитические, установка для получения дистиллированной воды для приготовления растворов; компьютеры для регистрации и обработки экспериментальных данных.

№	Вид работ	Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля) и оснащенность
1.	Лекционные занятия	Лекционная аудитория (ауд. 322с, 328с, 343с), оснащенная учебной мебелью, стационарной или переносной презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) и соответствующим программным обеспечением для демонстрации мультимедийных презентаций.
2.	Семинарские занятия	Аудитория (ауд. 322с, 328с, 343с), оснащенная учебной мебелью, компьютером с соответствующим программным обеспечением (Windows, Microsoft Office), переносным проектором, меловой доской.
3.	Лабораторные занятия	Лаборатория электромембранных явлений 326с, , укомплектованная специализированной мебелью, вытяжной системой вентиляции, меловой доской, средствами пожарной безопасности и оказания первой медицинской помощи, лабораторным оборудованием: Потенциостат Autolab PGSTAT 100 N; источник тока-вольтметр Keithley 2200-60-2 ; источник тока-вольтметр Keithley 2100/E ; нановольтметр Keithley 6221/2182 A; вольтметр универсальный В7-71/1; насос шприцевой Dixon Instillar 1428; рН метр – иономер Эксперт-001; кондуктометр Эксперт-002; насос перистальтический многоканальный Heidolph Pumpdrive 5001; рН метр FER20-ATC Kit pH; кондуктометр FER30-KIT; весы аналитические Ohaus PA 214С; анализатор влагосодержания Ohaus MB-25; термостат Isotemp 6200 H7; сушильный шкаф BINDER FD 1150; сушильный шкаф Binder FD 53; шейкер эконоприбор; мешалка Heidolph; мешалка ЛАБ-ПУ-01; термостат

		<p>ТЖ-ТС-01; программатор ПР-8; потенциостат ПИ-50-1.1; плитка электрическая ШЛФ С-MAG HS 7; насос перистальтический одноканальный; рабочая станция.</p> <p>Лаборатория электромембранного синтеза № 330с, укомплектованная специализированной мебелью, вытяжной системой вентиляции, средствами пожарной безопасности и оказания первой медицинской помощи, лабораторным оборудованием: потенциостат-гальваностат Р-30I, импедансметр Z-1000P, измеритель-анализатор импеданса, вольтамперных и переходных характеристик мембран, потенциостат-гальваностат Autolab PGSTAT 100N, рН-метр иономер ЭКСПЕРТ-001, титратор автоматический TitroLine 6000, иономер И-130, кондуктометр ЭКСПЕРТ-002, фотометр фотоэлектрический КФК-3, вольтметр универсальный В7-78/1, вольтметр универсальный В7-34А, генератор сигналов специальной формы Г6-33, источник питания постоянного тока Б5-50, весы электронные лабораторные НР-120, насос перистальтический ЛАБ-НП-1, термостат жидкостной ЛАБ-ТЖ-ТС-01, перемешивающее устройство ЛАБ-ПУ-01.</p>
4.	Групповые (индивидуальные) консультации	Учебная аудитория, укомплектованная учебной мебелью (ауд. 343С, № 328С, № 334С)
5.	Текущий контроль, промежуточная аттестация	Учебная аудитория для проведения практических занятий (ауд. № 343С, № 328С, № 334С), оснащенная учебной мебелью
6.	Самостоятельная работа	Аудитории, оснащенные учебной мебелью и компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет», программой экранного увеличения и обеспеченный доступом в электронную информационно-образовательную среду университета (№ 140, № 341С, № 329С)