

Приложение 4
к ОПОП ВО 18.03.01 ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ,
профиль Химическая технология новых материалов

Рабочая программа дисциплины

Диффузия и диффузионно-контролируемые процессы

Закреплена за подразделением

Кафедра физической химии

Направление подготовки

18.03.01 ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Профиль

Химическая технология новых материалов

Квалификация

Бакалавр

Форма обучения

очная

Общая трудоемкость

3 ЗЕТ

Часов по учебному плану

108

Формы контроля в семестрах:

в том числе:

зачет с оценкой 5

аудиторные занятия

51

самостоятельная работа

57

Распределение часов дисциплины по семестрам

Семестр (<Курс>.<Семестр на курсе>)	5 (3.1)		Итого	
Неделя	18			
Вид занятий	УП	РП	УП	РП
Лекции	17	17	17	17
Практические	34	34	34	34
Итого ауд.	51	51	51	51
Контактная работа	51	51	51	51
Сам. работа	57	57	57	57
Итого	108	108	108	108

Программу составил(и):

д.ф.-м.н., проф., Бокштейн Борис Самуилович; к.т.н., доц., Похвиснев Юрий Валентинович

Рабочая программа дисциплины

Диффузия и диффузионно-контролируемые процессы

Разработана в соответствии с ОС ВО НИТУ МИСИС

по направлению подготовки 18.03.01 ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ (приказ от 02.04.2021 г. № 119 о.в.)

Составлена на основании учебного плана:

18.03.01 ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, 18.03.01-БХТ-25-1.plx профиль Химическая технология новых материалов, утвержденного Ученым советом НИТУ МИСИС в составе соответствующей ОПОП ВО 30.05.2024, протокол № 4-24

Утверждена в составе ОПОП ВО:

18.03.01 ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ, профиль Химическая технология новых материалов, утвержденной Ученым советом НИТУ МИСИС 30.05.2024, протокол № 4-24

Рабочая программа одобрена на заседании

Кафедра физической химии

Протокол от 14.05.2024 г., №11-23/24

Руководитель подразделения Салимон А.И.

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ	
1.1	Научить применять законы диффузии для анализа диффузионных процессов в материалах, различные способы описания процесса диффузионного перемещения атомов в металлах, методы определения соответствующих коэффициентов, физические основания и механизмы процесса. обучить влиянию полей, особенностям диффузии в многофазных системах, а также роли диффузии в процессах производства, эксплуатации и разрушения металлов.

2. МЕСТО В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ	
Блок ОП:	Б1.В
2.1	Требования к предварительной подготовке обучающегося:
2.1.1	Безопасность жизнедеятельности
2.1.2	Методы математической физики
2.1.3	Информатика и основы искусственного интеллекта
2.1.4	Инженерная и компьютерная графика
2.2	Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:
2.2.1	Научно-исследовательская работа
2.2.2	Подготовка к процедуре защиты и защита выпускной квалификационной работы
2.2.3	Научно-исследовательская работа

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ФОРМИРУЕМЫМИ КОМПЕТЕНЦИЯМИ	
ОПК-5: Способен осуществлять экспериментальные исследования и испытания по заданной методике, проводить наблюдения и измерения с учетом требований техники безопасности, обрабатывать и интерпретировать экспериментальные данные, применять знание экономических, организационных и управленческих вопросов, таких как: управление проектами, рисками и изменениями	
Знать:	
ОПК-5-31 экспериментальные исследования и испытания для получения основных закономерностей диффузии в твердых телах и механизмы диффузии	
Уметь:	
ОПК-5-У1 применять законы диффузии для анализа диффузионных процессов в многокомпонентных и многофазных системах;	
Владеть:	
ОПК-5-В1 - методами анализа параметров диффузии в зависимости от свойств твердых тел; влияния химического состава, температуры и давления на кинетику процессов в твердых телах	

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ								
Код занятия	Наименование разделов и тем /вид занятия/	Семестр / Курс	Часов	Формируемые индикаторы компетенций	Литература и эл. ресурсы	Примечание	КМ	Выполняемые работы
	Раздел 1. Классификация и решение уравнений диффузии							
1.1	Введение. Законы диффузии. Коэффициенты диффузии /Лек/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.3Л2.1 Э1 Э2			
1.2	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	1	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1Л3.1 Э1 Э2			
1.3	Решения 1-го уравнения Фика /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Э1 Э2			
1.4	Решения уравнений диффузии /Лек/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Э1 Э2			
1.5	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	1	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1Л3.1 Э1 Э2			
1.6	Решение уравнения диффузии из исчерпываемого источника /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1Л3.1 Э1 Э2			

1.7	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	1	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
1.8	Решение уравнения диффузии из неисчерпаемого источника /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
1.9	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала. Выполнение ДЗ /Ср/	5	4	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			P1
1.10	Решение уравнения диффузии из образца конечных размеров /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
1.11	Методы определения коэффициента диффузии /Лек/	5	1	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1 Э2			
1.12	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1Л3.1 Э2			
1.13	Методы определения коэффициента диффузии /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1Л3.1 Э2		KM1	
	Раздел 2. Модель случайных блужданий. Механизмы диффузии							
2.1	Модель случайных блужданий. Механизмы диффузии /Лек/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Э1 Э2			
2.2	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
2.3	Случайные блуждания /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л3.1 Э1 Э2			
2.4	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала. Выполнение ДЗ /Ср/	5	3	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Э1 Э2			P2
2.5	Механизмы диффузии /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Э1 Э2			
2.6	Вакансионный механизм диффузии. Методы изучения характеристик вакансий /Лек/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
2.7	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
2.8	Вакансионный механизм диффузии /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л3.1 Э1 Э2			
2.9	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Э2			
2.10	Избыточные вакансии /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1 Э2			
	Раздел 3. Диффузионно-контролируемые процессы							
3.1	Диффузия в многофазных системах /Лек/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л3.1 Э1 Э2			
3.2	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	4	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л3.1 Э1 Э2			
3.3	Диффузия в многофазных системах /Пр/	5	4	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л3.1 Э1 Э2			

3.4	Диффузионный рост фаз. Диффузионная коалесценция /Лек/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
3.5	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
3.6	Диффузионный рост фаз /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
3.7	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
3.8	Диффузионная коалесценция /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
3.9	Эффект Киркендола. Порообразование и аннигиляция пор /Лек/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2Л2.1 Э1 Э2			
3.10	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
3.11	Эффект Киркендола /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			
3.12	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала. Выполнение ДЗ /Ср/	5	7	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1 Э2			Р3
3.13	Порообразование и аннигиляция пор /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1 Э2			
3.14	Диффузионная ползучесть. Диффузионное спекание /Лек/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1Л3.1 Э2			
3.15	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л3.1 Э2			
3.16	Диффузионная ползучесть /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л3.1 Э2			
3.17	Подготовка к практическим занятиям. Изучение лекционного материала /Ср/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1 Э2			
3.18	Диффузионное спекание /Пр/	5	2	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1 Э2			
3.19	Подготовка к зачету. Изучение лекционного материала /Ср/	5	13	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1 Л1.2 Э1 Э2			КМ2
	Раздел 4. Подготовка к контрольным мероприятиям и выполняемым работам							
4.1	/Ср/	5	5	ОПК-5-31 ОПК-5-У1 ОПК-5- В1	Л1.1Л2.1Л3.1 Э1 Э2			

5. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ			
5.1. Контрольные мероприятия (контрольная работа, тест, коллоквиум, экзамен и т.п), вопросы для самостоятельной подготовки			
Код КМ	Контрольное мероприятие	Проверяемые индикаторы компетенций	Вопросы для подготовки
КМ1	Тест-1	ОПК-5-31;ОПК-5-У1;ОПК-5-В1	<p>1. При самодиффузии из «мгновенного» источника расстояния до точки перегиба на концентрационной кривой при температуре 0,8Тпл за 20 часов отжига и неизвестной температуре выше 0,8Тпл за 10 часов отжига равны. Определите эту температуру в долях Тпл. Воспользуйтесь эмпирическими правилами.</p> <p>2. Два полубесконечных образца, соединенных в точке «0», содержащие: левый 5% примеси, а правый – 10% примеси отжигают при температуре 0,9Тпл в течение 9 часов. Определите, на какой глубине концентрация составляет 8%?</p>

			<p>3. Энтальпия образования вакансий в металле с ГЦК решеткой уменьшается на 20%, а энтальпия перемещения вакансий увеличивается на 20%. Как и во сколько раз изменится путь диффузии атомов по вакансионному механизму за 2 часа при 0,7Тпл?</p> <p>4. После отжига медной проволоки диаметром 80 мкм в течение 26 часов доля избыточных вакансий составила 0,6. Определите температуру отжига. Воспользуйтесь эмпирическими правилами. Примите геометрический коэффициент.</p> <p>5. Частота скачков атомов в золоте равна 106 с-1 при Т1. Рассчитайте путь диффузии вакансий за 5 часов при Т2 меньше, чем Т1, на 100о. Воспользуйтесь эмпирическими правилами.</p> <p>6. Пользуясь эмпирическими правилами, определите, какая температура выше и на сколько: та, при которой вакансии в серебре совершают 5000 скачков в секунду, или та, при которой путь диффузии атомов составляет 0,1 мм за 25 часов?</p>
КМ2	Тест-2	ОПК-5-У1;ОПК-5-В1;ОПК-5-31	<p>1. Чему равны высоты вертикальных ступенек на концентрационной зависимости при диффузии в двухкомпонентной системе, у которой на фазовой диаграмме имеется несколько двухфазных областей ниже линии солидус?</p> <p>2. В какую сторону смещаются метки в эффекте Киркендола?</p> <p>3. Где больше мольная доля вакансий: около маленькой поры или около большой? Почему?</p> <p>4. Как время исчезновения поры зависит от температуры?</p> <p>5. Нарисуйте концентрационный профиль $c(x,t)$ для диффузии Ru в системе Fe–Ru в течение некоторого времени t1 при 6000С, если концентрация рутения на поверхности полубесконечного образца $c(0,t)$ равна 40%, а внутри в начальный момент времени $c(x,0)$ 5% (концентрации даны в атомных процентах).</p> <p>6. На поверхность двух сплавов Co–Cr нанесен слой Со и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера). Толщина слоя растущей α-фазы при 1000оС составила 0,8 мкм. Рассчитайте толщину α-фазы при 1200оС, если время отжига уменьшить в 5 раз. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии хрома. Примите $b \ll 1$.</p> <p>7. В системе Co–Cr при 800оС протекает диффузионная коалесценция сферических частиц химического соединения Co_2Cr_3 в пересыщенном твердом растворе (10% ат. Со). Определите средний радиус частиц за 300 часов отжига, если начальный радиус частиц составляет 4 нм. Используйте эмпирические правила для самодиффузии хрома.</p> <p>8. Рассчитайте конечный радиус поры при газоиостатическом прессовании в никеле под действием сил всестороннего сжатия 109 Па при 1200оС за 25 часов, если начальный радиус поры составляет 30 мкм. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии никеля.</p> <p>9. Удлинение монокристаллической серебряной проволоки длиной 30 см и диаметром 0,5 мм под действием груза 13 г при 900оС составило 0,5 мм. Определите время деформации. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии серебра.</p> <p>10. При 1140оС частота скачков атомов в металле составляет 4,5Е5 с-1, а частота скачков вакансий 9Е9 с-1. Определите этот металл и рассчитайте время полного исчезновения пор радиусом 1 мкм при спекании в этих условиях. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.</p>

5.2. Перечень работ, выполняемых по дисциплине (Курсовая работа, Курсовой проект, РГР, Реферат, ЛР, ПР и т.п.)

Код работы	Название работы	Проверяемые индикаторы компетенций	Содержание работы
Р1	Расчет диффузионной задачи	ОПК-5-31;ОПК-5-У1;ОПК-5-В1	<p>Для полубесконечного образца по заданной зависимости приведенной концентрации от расстояния от поверхности образца студент должен:</p> <p>1. Построить концентрационную зависимость. Указать на графике точку перегиба и написать ее координаты.</p> <p>2. Определить величину коэффициента диффузии (m^2/c) для Т1. Рассчитать значение коэффициента диффузии для Т2.</p> <p>3. Рассчитать концентрацию диффузанта ($г/см^3$) на поверхности образца после диффузии при Т1.</p> <p>4. Рассчитать количество диффузанта, содержащееся в объеме образца между плоскостями с координатами x_1 и x_2 (мкм).</p> <p>5. Время диффузионного отжига изменилась на t часов, а</p>

			температура изменилась до T2. Вычислить положение плоскости x3 (мкм), если в объеме, ограниченном плоскостями x1 и x3 находится такое же количество диффузанта, как и в п. 4.															
P2	Расчет науглероживания и обезуглероживания	ОПК-5-31;ОПК-5-У1;ОПК-5-В1	<p>Полубесконечный образец из углеродистой стали, содержащей С% (по массе) углерода, отжигают в течение t часов при T в токе водорода с А% СН4 (или СО2) при общем давлении в 1 атм. Определите концентрацию углерода после отжига на глубине x мкм от поверхности образца. Зависимость активности углерода в стали от мольной доли выражается квадратным уравнением (стандартное состояние - чистый компонент). Для реакции [C] + 2Н2 = СН4 или 2СО = [C] + СО2 приведены следующие термодинамические данные в приближении $\Delta_{cp} = 0$:</p> <p>Вещество ΔH_0, кДж/моль S_0, Дж/мольК</p> <table><tr><td>С</td><td>0</td><td>5,74</td></tr><tr><td>СО</td><td>-110,53</td><td>197,549</td></tr><tr><td>СО2</td><td>-393,51</td><td>213,674</td></tr><tr><td>Н2</td><td>0</td><td>130,57</td></tr><tr><td>СН4</td><td>-74,6</td><td>186,259</td></tr></table>	С	0	5,74	СО	-110,53	197,549	СО2	-393,51	213,674	Н2	0	130,57	СН4	-74,6	186,259
С	0	5,74																
СО	-110,53	197,549																
СО2	-393,51	213,674																
Н2	0	130,57																
СН4	-74,6	186,259																
P3	Компьютерное моделирование диффузионного эксперимента	ОПК-5-31;ОПК-5-У1;ОПК-5-В1	<p>Научиться выбирать оптимальные условия и методы определения коэффициентов диффузии в металлах; определить параметры температурной зависимости (энергию активации и предэкспоненциальный множитель) коэффициента диффузии в указанной преподавателем металлической системе.</p> <p>В ходе выполнения домашнего задания студент должен использовать все возможные для выбранной системы методы измерения, но не менее двух. Для проведения экспериментов необходимо перейти в пункт меню «Эксперимент» и выбрать температуру опыта, геометрию образца и его вид, тип печи, в которой проводится отжиг, а затем - время отжига. После отжига образца следует перейти к его анализу, для чего студенту предлагается выбрать метод, и в соответствии с ним, параметры измерений, а также связь измеряемой величины с концентрацией. После измерения необходимо провести обработку результатов, включая выбор решения уравнения диффузии, удаление выбросов, сдвиг границы диффузанта (при необходимости). Полученные значения коэффициента диффузии необходимо записать в лабораторный журнал. После проведения экспериментов при 4-5 температурах необходимо построить температурную зависимость в аррениусовских координатах. Полученные значения энергии активации и предэкспоненциального множителя необходимо занести в лабораторный журнал.</p>															

5.3. Оценочные материалы, используемые для экзамена (билеты, тесты и т.п.)

1. Чему равно число вертикальных ступенек на концентрационной зависимости, полученной при диффузии в двухкомпонентной системе с тремя двухфазными и четырьмя однофазными областями ниже линии солидус?
2. Чему равно число вертикальных ступенек на концентрационной зависимости, полученной при диффузии в двухкомпонентной системе с n однофазными областями и n – 1 двухфазными областями ниже линии солидус?
3. На концентрационной кривой в двухкомпонентной системе, полученной ниже линии солидус, имеются три вертикальные ступеньки. Сколько однофазных и двухфазных областей имеется при этой температуре?
4. От каких параметров зависит ширина растущей с поверхности фазы при диффузии в двухкомпонентной системе ниже линии солидус?
5. Чему равны высоты вертикальных ступенек на концентрационной зависимости при диффузии в двухкомпонентной системе, у которой на фазовой диаграмме имеется несколько двухфазных областей ниже линии солидус?
6. Как зависит от температуры средний размер частиц фазы, растущей в пересыщенном твердом растворе при большом пересыщении при диффузии в двухкомпонентной системе ниже линии солидус?
7. От каких параметров зависит средний размер частиц фазы, растущей при постоянной температуре в пересыщенном твердом растворе при большом пересыщении при диффузии в двухкомпонентной системе ниже линии солидус?
8. От чего сильнее зависит скорость роста фазы в двухкомпонентной системе: от ее ширины или от ширины прилегающей двухфазной области?
9. Как зависят от растворимости средний размер частиц и их количество при диффузионной коалесценции при постоянной температуре?
10. Как зависят от времени средний размер частиц, их количество и масса при диффузионной коалесценции при постоянной температуре?
11. Как зависят от температуры средний размер частиц и их количество при диффузионной коалесценции?
12. Как зависит критический размер частицы при диффузионной коалесценции от времени и температуры?
13. Как зависит критический размер частицы при диффузионной коалесценции от пересыщения и растворимости?
14. Протекает диффузионная коалесценция в одинаковых условиях при постоянной температуре в течение 50 и 100 часов. Как меняется масса частиц?
15. Сравнивается диффузионная коалесценция в одинаковых условиях при постоянной температуре при двух временах $t_1 > t_2$. Как меняется масса частиц?

16. Как зависит критический размер частицы при диффузионной коалесценции от времени, пересыщения и температуры?
17. Протекает диффузионная коалесценция в одинаковых условиях при постоянной температуре в течение 50 и 100 часов. Как меняется пересыщение и критический размер частиц?
18. Сравнивается диффузионная коалесценция в одинаковых условиях при постоянной температуре при двух временах $t_1 > t_2$. Как меняется пересыщение и критический размер частиц?
19. Куда направлен поток вещества при диффузионной коалесценции: от маленькой частицы к большой или наоборот и почему?
20. При диффузионной коалесценции температура увеличивается. Как изменится критический размер, отделяющий растворяющиеся частицы от растущих?
21. Чем компенсируется разница атомных потоков в эффекте Киркендола по разным версиям?
22. С какой стороны образуются поры в эффекте Киркендола?
23. В какую сторону смещаются метки в эффекте Киркендола?
24. Каким механизмам диффузии не противоречит эффект Киркендола?
25. В какую сторону направлен поток вакансий в эффекте Киркендола?
26. Что больше поток взаимной диффузии или парциальные потоки атомов?
27. Что больше коэффициент взаимной диффузии или парциальные коэффициенты диффузии?
28. Почему образуются поры в эффекте Киркендола?
29. От каких параметров зависит скорость сдвига меток в эффекте Киркендола?
30. От каких параметров зависит поток вакансий в эффекте Киркендола?
31. Исследуется эффект Киркендола в системе медь-латунь при 400 С. Можно ли использовать метки из никеля? Ответ обоснуйте.
32. Чем определяется объем пор в эффекте Френкеля?
33. Куда направлен поток вакансий: от поры или к поре, если действуют обе силы – всестороннего сжатия и поверхностного натяжения?
34. Как зависит равновесная концентрация вакансий у поверхности сферической поры от поверхностного натяжения и размера поры?
35. Какая сила оказывает большее влияние на залечивание пор: давление всестороннего сжатия или поверхностное натяжение?
36. От каких параметров зависит время аннигиляции пор?
37. Какие силы обеспечивают залечивание пор?
38. Как меняется концентрация вакансий под действием силы всестороннего сжатия и силы поверхностного натяжения?
39. Как зависит концентрация вакансий у поверхности поры от температуры?
40. От чего и как зависит время перехода от стадии аннигиляции пор под действием напряжений к стадии действия капиллярных сил?
41. Куда направлен поток вакансий под действием растягивающих напряжений?
42. Почему возникает поток вакансий при удлинении проволоки под действием растягивающих напряжений?
43. Напишите размерность пуаза? Каков порядок величины вязкости в кристаллах?
44. Как вязкость зависит от температуры?
45. Дайте определение «установившейся» ползучести.
46. Напишите уравнение Гиббса-Томсона для капиллярной силы, действующей на вакансию
47. Какая связь между скоростью диффузионной ползучести и потоком вакансий?
48. Почему можно пользоваться уравнением Гиббса-Томсона в условиях действия напряжений и капиллярных сил?
49. Как скорость установившейся ползучести зависит от температуры?
50. Какая связь между диффузионной ползучестью и спеканием?
51. Как радиус поры при спекании зависит от времени (по Пинесу)?
52. Как радиус поры при спекании зависит от времени (по Френкелю)?
53. Дайте определение спекания.
54. Где больше мольная доля вакансий: около маленькой поры или около большой? Почему?
55. Как время исчезновения поры при спекании зависит от температуры?
56. Как мольная доля вакансий вблизи поры зависит от поверхностного натяжения?
57. Как объяснить, почему в модели Пинеса время исчезновения пор не зависит от размера кристалла?
58. Почему процесс спекания связан с исчезновением пор?
59. По какой модели пора исчезает быстрее: по Френкелю или по Пинесу?
60. Как отличается напряжение в случае пластического и вязкого течения?
61. На поверхность двух сплавов Fe-Ru нанесен слой Ru и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера). Толщина слоя растущей β -фазы при 1200 С составила 12 мкм. Рассчитайте толщину β -фазы при 1400 С, если время отжига уменьшить в 5 раз. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии железа. Примите $b \ll 1$.
62. На поверхность двух сплавов Fe-Ta (ат. % Ta > 50) нанесен слой Ta и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера). Толщина слоя растущей β -фазы при 1500 С составила 10 мкм. Рассчитайте толщину β -фазы при 1300 С, если время отжига увеличить в 10 раз. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии железа. Примите $b \ll 1$.
63. На поверхность двух сплавов Fe-Be (ат. % Be < 70) нанесен слой Fe и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера). Толщина слоя растущей α -фазы при 900 С составила 5 мкм. Рассчитайте толщину α -фазы при 1100 С, если время отжига уменьшить в 5 раз. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии бериллия. Примите $b \ll 1$.
64. В пересыщенном твердом растворе Fe-Mo (90 ат. % Mo) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 1000 С средний радиус частиц составил 0,2 мкм. Рассчитайте радиус частиц при 1200 С, если уменьшить время отжига в пять раз. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии молибдена.
65. В пересыщенном твердом растворе Cu-Mg (90 ат. % Cu) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 500 С средний радиус частиц составил 0,5 мкм. Рассчитайте радиус частиц при 700 С, если увеличить время отжига в три раза. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии меди.
66. В пересыщенном твердом растворе Al-Ni (20 ат. % Al) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 1200 С средний радиус частиц составил 3 мкм. Рассчитайте радиус частиц при 1000 С, если увеличить время отжига в

пять раз. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии никеля.

67. На поверхность двух сплавов Fe-Mo (ат. % Mo > 50) нанесен молибден и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера). При 1300 С толщина слоя растущей β -фазы за 24 часа отжига составила 40 мкм, а при 1500 С за 12 часов – 200 мкм. Рассчитайте энергию активации диффузии молибдена в β -фазе. Примите $b \ll 1$.

68. На поверхность образца из сплава AgZr₂ (нестехиометрическое химическое соединение) нанесен чистый цирконий (первая задача Вагнера). После отжигов в течение 40 часов при 900 С и 30 часов при 1100 С толщины слоя растущей β -фазы отличаются в 10 раз. Рассчитайте энергию активации диффузии циркония в β -фазе. Примите $b \ll 1$.

69. На поверхность двух сплавов Fe-Ti (ат. % Fe > 70) нанесено железо и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера). При 900 С толщина слоя растущей α -фазы за 50 часов отжига составила 4 мкм, а при 1200 С за 20 часов – 60 мкм. Рассчитайте энергию активации диффузии титана в α -фазе. Примите $b \ll 1$.

70. При изменении температуры с 400 С до 500 С масса сферической частицы химического соединения Al₂Cu при распаде пересыщенного твердого раствора меди в алюминии за 10 часов возрастает в 100 раз. Определите энергию активации диффузии. Зависимостью концентраций на межфазной границе от температуры пренебречь.

71. В пересыщенном твердом растворе Fe-C возникают и растут частицы цементита. При отжиге 600 С в течение 37 часов средний размер частиц в девять раз меньше, чем при отжиге при 700 С в течение 29 часов. Определите энергию активации диффузии. Зависимостью концентраций на межфазной границе от температуры пренебречь.

72. При изменении температуры с 1000 С до 1200 С поверхность сферической частицы химического соединения при распаде пересыщенного твердого раствора алюминия в никеле (20 ат. % Al) за 20 часов возрастает в 30 раз. Определите энергию активации диффузии. Зависимостью концентраций на межфазной границе от температуры пренебречь.

73. На поверхность двух сплавов Al-Cu (ат. % Cu > 70) нанесен слой Cu и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера): при 600 С в течение 200 часов и при 900 С. Определите время отжига при 900 С, если толщины растущих фаз совпадают. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии алюминия. Примите $b \ll 1$.

74. На поверхность двух сплавов Al-Cu (ат. % Al > 60) нанесен слой Al и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера): при 400 С в течение 20 суток и при 500С. Определите время отжига при 500 С, если толщина слоя растущей фазы при этой температуре в пять раз больше, чем при 400 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии меди. Примите $b \ll 1$.

75. На поверхность двух сплавов Fe-Ti (ат. % Fe > 70) нанесен слой Fe и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера): при 1000 С в течение 120 часов и при 1200 С. Определите время отжига при 1200 С, если толщина слоя растущей фазы при 1000 С в десять раз меньше, чем при 1200 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии титана. Примите $b \ll 1$.

76. На поверхность двух сплавов Fe-Ru нанесен слой Fe и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера): при 1000 С в течение 30 часов и при 1200 С. Определите время отжига при 1200 С, если толщина слоя растущей фазы при этой температуре в десять раз больше, чем при 1000 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии рутения. Примите $b \ll 1$.

77. На поверхность двух сплавов Fe-Be (ат. % Be > 70) нанесен слой Be и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера): при 900 С в течение 100 часов и при 1100 С. Определите время отжига при 1100 С, если толщина слоя растущей фазы при этой температуре в пять раз больше, чем при 900 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии железа. Примите $b \ll 1$.

78. На поверхность двух сплавов Fe-Zr (ат. % Fe > 35) нанесен слой Fe и проводится отжиг при двух температурах (первая задача Вагнера): при 1300 С в течение 32 часов и при 1100 С. Определите время отжига при 1100 С, если толщина слоя растущей фазы при этой температуре в пять раз меньше, чем при 1300 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии циркония. Примите $b \ll 1$.

79. В пересыщенном твердом растворе Ag-Zr (10 ат. % Ag) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 900 С за 200 часов отжига средний радиус частиц составил 0,14 мкм. Рассчитайте энергию активации диффузии, если при 1000 С за 100 часов отжига средний радиус частиц составил 0,28 мкм.

80. В пересыщенном твердом растворе Al-Cu (5 ат. % Cu) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 400 С за 20 суток отжига средний радиус частиц составил 30 нм. Рассчитайте энергию активации диффузии, если при 500 С за 10 суток отжига средний радиус частиц составил 0,2 мкм.

81. В пересыщенном твердом растворе Al-Ni (15 ат. % Al) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 600 С за 10 суток отжига средний радиус частиц составил 30 нм. Рассчитайте энергию активации диффузии, если при 800 С за 8 суток отжига средний радиус частиц составил 1,1 мкм.

82. В пересыщенном твердом растворе Fe-Be (20 ат. % Be) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 700 С за 200 часов отжига средний радиус частиц составил 60 нм. Рассчитайте энергию активации диффузии, если при 800 С за 150 часов отжига средний радиус частиц составил 180 нм.

83. В пересыщенном твердом растворе Fe-Ti (20 ат. % Fe) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 800С за 30 суток отжига средний радиус частиц составил 20 нм. Рассчитайте энергию активации диффузии, если при 900 С за 10 суток отжига средний радиус частиц составил 50 нм.

84. В пересыщенном твердом растворе Al-U (10 ат. % Al) при отжиге возникают и растут частицы химического соединения. При 1000 С за время 5 часов отжига средний радиус частиц составил 6,6 мкм. Рассчитайте энергию активации диффузии, если при 800 С за 20 часов отжига средний радиус частиц составил 2,1 мкм.

85. Время полного растворения пор при газоиостатическом прессовании под действием сил поверхностного натяжения при температуре 600 С в три раза меньше, чем при температуре 500 С. Определите энергию активации диффузии, если начальный радиус поры при 600 С в два раза больше, чем при температуре 500 С.

86. Время полного растворения пор при газоиостатическом прессовании под действием сил поверхностного натяжения для поры 40 нм при 1400 С составляет 30 с, а для поры 30 нм при 1300 С – 40 с. Определите температуру плавления материала. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.

87. Уменьшение радиуса поры в металле при газоиостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия с 0,5 мкм до 0,4 мкм при 1200 С проходит за 100 часов, а с 0,5 мкм до 0,3 мкм при 1300 С – за 50 часов. Определите температуру плавления металла. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.

88. Уменьшение в два раза поры радиусом 0,8 мкм при газоиостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия при 1500 С проходит за 50 часов, а уменьшение в два раза поры радиусом 0,4 мкм при 1300 С – за 100 часов.

- Определите энергию активации диффузии.
89. Радиус пор при газостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия в титане при 1500 С за 100 часов уменьшился с 10 мкм до 1 мкм. Рассчитайте критический радиус поры. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии титана.
90. Радиус пор при газостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия в свинце при 250 С за 11 часов уменьшился с 20 мкм в два раза. Рассчитайте критический радиус поры. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии свинца.
91. Радиус пор при газостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия в индии при 100 С за 20 часов уменьшился с 30 мкм до 20 мкм. Рассчитайте критический радиус поры. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии индия.
92. Радиус пор при газостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия в вольфраме при 3000 С за двое суток уменьшился с 50 мкм до 40 мкм. Рассчитайте критический радиус поры. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии вольфрама.
93. Протекает газостатическое прессование алюминия при 400 С под действием сил всестороннего сжатия 1Е8 Па. Рассчитайте время полного растворения поры критического радиуса под действием сил поверхностного натяжения. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии алюминия.
94. Протекает газостатическое прессование меди при 800 С под действием сил всестороннего сжатия 1Е8 Па. Рассчитайте время полного растворения поры критического радиуса под действием сил поверхностного натяжения. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии меди.
95. (15) Протекает газостатическое прессование молибдена при 1800оС под действием сил всестороннего сжатия 3·108 Па. Рассчитайте время полного растворения поры критического радиуса под действием сил поверхностного натяжения. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии молибдена.
96. Отношение пути диффузии вакансий к пути диффузии атомов в металле при 700 С за одно и то же время отличаются в 570 раз. Определите этот металл и рассчитайте время исчезновения в нем пор радиусом 10 мкм при газостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия 1Е10 Па при 700 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
97. Отношение коэффициента диффузии вакансий к коэффициенту диффузии атомов в металле при 943 С отличаются в 6Е4 раз. Определите этот металл и рассчитайте, на сколько уменьшится в нем пора радиусом 20 мкм при газостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия 1Е8 Па в течение 15 часов при 943 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
98. Отношение частоты скачков вакансий к частоте скачков атомов в металле при 537 С отличаются в 1Е5 раз. Определите этот металл и рассчитайте время уменьшения радиуса поры в нем с 20 мкм до 10 мкм при газостатическом прессовании под действием сил всестороннего сжатия 1Е8 Па при 537 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
99. Коэффициенты диффузии вакансий в металле при температурах 2100 С и 2290 С отличаются в 2 раза. Определите этот металл и рассчитайте критический радиус поры в нем при газостатическом прессовании под действием сил поверхностного натяжения при 2000 С, если время полного исчезновения поры составило 0,9 с. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
100. Коэффициенты диффузии атомов в монокристаллической металлической проволоке диаметром 0,5 мм при температурах 2110 С и 2300 С отличаются в 5 раз. Определите этот металл и рассчитайте скорость диффузионной ползучести в нем при 2300 С, если растягивающее напряжение составляет 1Е8 Па. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
101. Частоты скачков атомов в монокристаллической металлической проволоке диаметром 1 мм при температурах 544 С и 590 С отличаются в 3 раза. Определите этот металл и рассчитайте скорость диффузионной ползучести в нем при 590 С, если растягивающее напряжение составляет 5Е9 Па. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.
102. Пути диффузии атомов в металле при температурах 1410 С и 1600 С за одно и то же время отличаются в 3 раза. Определите этот металл и рассчитайте, на сколько уменьшится в нем пора радиусом 3 мкм при спекании в течение 25 часов при 1600 С. Воспользуйтесь эмпирическими правилами для самодиффузии.

5.4. Методика оценки освоения дисциплины (модуля, практики. НИР)

Оценка на контрольных мероприятиях выставляется обучающимся на основе критериев уровней освоения компетенций (соотносится с уровнями: «пороговый» – оценка «3», «продвинутый» – оценка «4» и «высокий» – оценка «5»).

Оценка «отлично» или «хорошо» ставится, если студент полно излагает изученный материал, обнаруживает понимание специфики вопроса, дает правильное определение основных понятий речевой коммуникации; обнаруживает понимание материала, может обосновать свои суждения, применить знания на практике, привести необходимые примеры, самостоятельно составленные; излагает материал последовательно и правильно с точки зрения норм литературного языка; владеет навыками языкового анализа. Ответ не содержит фактические ошибки.

Оценка «удовлетворительно» ставится, если студент дает ответ, удовлетворяющий тем же требованиям, т.е. обнаруживает понимание специфики вопроса, но при ответе не демонстрирует достаточной обоснованности суждений, и/или отчасти подменяет рассуждения пересказом текста, и/или допускает одну фактическую ошибку.

Оценка «неудовлетворительно» ставится, если студент обнаруживает незнание большей части материала, неверно отвечает на вопрос, даёт ответ, который содержательно не соотносится с поставленной задачей, допускает ошибки в формулировке определений и правил, искажающие их смысл, беспорядочно излагает материал.

Текущий контроль проводится с целью обеспечения своевременной обратной связи, для коррекции обучения, активизации самостоятельной работы студентов. Объектом текущего контроля являются конкретизированные результаты обучения (учебные достижения) по дисциплине.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

6.1. Рекомендуемая литература

6.1.1. Основная литература

	Авторы, составители	Заглавие	Библиотека	Издательство, год

Л1.1	Бокштейн Б. С.	Диффузия в металлах: учеб. пособие для студ. вузов по спец.- Физика металлов	Библиотека МИСиС	М.: Metallurgia, 1978
Л1.2	Бокштейн Б. С., Менделев М. И., Похвиснев Ю. В.	Физическая химия: термодинамика и кинетика: учебник	Электронная библиотека	М.: Изд-во МИСиС, 2012
Л1.3	Островский Анатолий Сергеевич, Бокштейн Борис Самуилович	Физическая химия.Разд.: Диффузия в металлах: Метод.указания для самостоят. работы студ. спец. 0708, 0709 и 510400	Библиотека МИСиС	М.: Учеба, 2001
6.1.2. Дополнительная литература				
	Авторы, составители	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л2.1	Бокштейн Б. С., Ярославцев А. Б.	Диффузия атомов и ионов в твердых телах	Библиотека МИСиС	М.: Изд-во МИСиС, 2005
6.1.3. Методические разработки				
	Авторы, составители	Заглавие	Библиотека	Издательство, год
Л3.1	Островский Анатолий Сергеевич, Бокштейн Борис Самуилович	Физическая химия.Разд.: Диффузия в металлах: Метод.указания для самостоят. работы студ. спец. 0708, 0709 и 510400	Электронная библиотека	М.: Учеба, 2001
6.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»				
Э1	Диффузия и диффузионно-контролируемые процессы		https://lms.misis.ru/ebooks/physical-chemistry/index.html	
Э2	Диффузия и диффузионно-контролируемые процессы		https://lms.misis.ru/courses/2157/modules/items/131381	
6.3 Перечень программного обеспечения				
П.1	Физическая химия			
П.2	Лицензии ПО Windows Server CAL ALNG LicSAPk MVL DvcCAL, ПО WinEDUA3 ALNG SubsVL MVL PerUsr и PerUsr			
П.3	ESET NOD32 Antivirus			
П.4	Microsoft Office			
П.5	MS Teams			
П.6	Консультант Плюс			
П.7	Moodle			
6.4. Перечень информационных справочных систем и профессиональных баз данных				
И.1	Каталог Российской государственной библиотеки (РГБ) [Электронный ресурс]. – http://www.aleph.rsl.ru			

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ		
Ауд.	Назначение	Оснащение
Б-734	Лекционная аудитория	комплект учебной мебели на 140 мест для обучающихся, рабочее место преподавателя, мультимедийное оборудование, ноутбук с доступом к ИТС «Интернет», ЭИОС университета через личный кабинет на платформе LMS Moodle, лицензионные программы MS Office, MS Teams, ESET Antivirus и технические средства обучения, служащие для предоставления информации большой аудитории.
Б-825	Компьютерный класс	16 рабочих мест для обучающихся, рабочее место для преподавателя, моноблоки HP EliteOne 800 G5 23.8 Product No. 5NW34AV, 1 маркерная доска, комплект учебной мебели
Читальный зал электронных изданий	Аудитория для самостоятельной работы	комплект учебной мебели на 55 мест для обучающихся, 50 ПК с доступом к ИТС «Интернет», ЭИОС университета через личный кабинет на платформе LMS Moodle
Читальный зал № 3 (Б)	Аудитория для самостоятельной работы	комплект учебной мебели на 44 места для обучающихся, МФУ Xerox VersaLink B7025 с функцией масштабирования текстов и изображений, 8 ПК с доступом к ИТС «Интернет», ЭИОС университета через личный кабинет на платформе LMS Moodle

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Лекционные занятия нацелены на изучение студентами законов диффузии и их применения. Практические занятия нацелены на умение решать уравнения диффузии и кинетические уравнения процессов, контролируемых диффузией.

Предусматриваются расчетные домашние задания по различным разделам курса «Диффузия и диффузионно-контролируемые процессы». Проведение аудиторных занятий предусматривает использование в учебном курсе активных и интерактивных технологий:

- проведение лекций с использованием интерактивных и мультимедийных технологий (презентация в формате MS PowerPoint);

- при выполнении домашних заданий предусмотрено использование специализированной компьютерной лаборатории.

Дисциплина относится к точным наукам и требует значительного объема самостоятельной работы. Отдельные учебные вопросы выносятся на самостоятельную проработку и контролируются посредством текущей аттестации. При этом организуются групповые и индивидуальные консультации. Качественное освоение дисциплины возможно только при систематической самостоятельной работе, что поддерживается системой текущей и рубежной аттестации.