

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)



В.Г. Прокошев

« 03 » « 06 » 2015 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«ДИФфуЗИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ»

Направление подготовки 04.06.01 - Химические науки

Направление (профиль) подготовки «Физическая химия»

Уровень высшего образования: Подготовка кадров высшей квалификации

Квалификация выпускника «Исследователь. Преподаватель исследователь»

Форма обучения очная

Год	Трудоемкость зач. ед./ час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРА, час.	Форма промежуточного контроля (экз./зачет)
2	3(108)	36	-	-	72	Зачет
Итого	3(108)	36	-	-	72	Зачет

г. Владимир 2015 г.

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины диффузия в твердых телах является знакомство аспирантов с закономерностями и математическим аппаратом, описывающим рассматриваемые процессы (в зависимости от состава системы её структуры, влияния температуры и внешней среды), а так же с установлением равновесного распределения концентраций (в частном случае при отсутствии внешних силовых полей происходит выравнивание концентраций). Заметим, что в общем случае перенос диффундирующих частиц может вызываться не только неоднородностью распределений концентраций, но и неоднородностью полей других физических величин, например разностью температур.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО

Курс диффузия в твердых телах изучается в вариативной части Блока 1 «Дисциплины (модули)».

Диффузия в твердых телах – прикладная наука, развившаяся в самостоятельную дисциплину из раздела физическая химия. Она тесно связана с такими фундаментальными науками как физическая химия, физика, математика, а также с целым рядом прикладных естественнонаучных дисциплин.

3. КОМПЕТЕНЦИИ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В процессе освоения данной дисциплины аспирант должен обладать следующими универсальными компетенциями:

- готовностью участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);

- способностью планировать и решать задачи собственного профессионального и личного развития (УК-5).

Выпускник должен обладать следующими общепрофессиональными компетенциями:

- способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

- готовностью организовать работу исследовательского коллектива в области химии и смежных наук (ОПК-2);

- готовностью к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования (ОПК-3).

Выпускник должен обладать следующими профессиональными компетенциями:

- владеть теорией и навыками практической работы в избранной области химии (ПК-1);

- владеть базовыми навыками использования современной аппаратуры при проведении научных исследований (ПК-2);

- способностью применять основные естественнонаучные законы и закономерности развития химической науки при анализе полученных результатов (ПК-3).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

1) знать:

основные естественнонаучные законы и закономерности развития химической науки при анализе полученных результатов (ПК-3);
основные образовательные программы высшего образования (ОПК-3).

2) уметь:

участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);

планировать и решать задачи собственного профессионального и личного развития (УК-5);

организовать работу исследовательского коллектива в области химии и смежных наук (ОПК-2);

3) владеть:

способностью самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

владеть теорией и навыками практической работы в избранной области химии (ПК-1);

владеть базовыми навыками использования современной аппаратуры при проведении научных исследований (ПК-2);

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ) ДИФфуЗИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов

п/п	Раздел дисциплины	Год обучения	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости, форма промежуточной аттестации
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	СРА	
1.	Математическое описание диффузии. Законы Фика. Методы его решения.	2	4	-	-	8	Устный опрос

2.	Дифференциальное уравнение диффузии. Методы его решения.	2	6	-	-	12	Устный опрос
3.	Механизмы диффузии примесей внедрения и замещения в твёрдых телах.	2	4	2	-	8	Устный опрос
4.	Метод проницаемости, его этапы. Влияние поверхностных процессов.	2	4	-	-	8	Устный опрос
5.	Обзор феноменологических экспериментальных методов изучения диффузии в твёрдых телах	2	6	-	-	12	Устный опрос
6.	Определение потоков частиц и эффективных параметров растворения и диффузии диффузанта в гетерогенной активной среде известного состава и строения	2	6	2	-	12	Устный опрос
7.	Реализация пространственной организации диффузионной среды, оптимальной с точки зрения требуемых диффузионных характеристик.	2	6	-	-	12	Устный опрос
	Итого:		36		-	72	Зачет

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Диффузионный процесс

«Диффузия – самопроизвольный процесс переноса вещества, приводящий к установлению равновесного распределения концентраций». Более полное определение

выглядит так: **Диффузия** (от лат. diffusio – распространение, растекание), движение частиц среды, приводящее к переносу вещества и выравниванию концентраций или к установлению равновесного распределения концентраций частиц данного сорта в среде. В отсутствие макроскопического движения среды (например, конвекции), диффузия молекул (атомов) определяется их тепловым движением (молекулярная диффузия). Диффузионный поток (поток массы) в отсутствие внешних воздействий пропорционален его концентрации (1-й закон Фика). Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом диффузии. В физике кроме диффузии молекул (атомов) рассматривают диффузию электронов проводимости, дырок и других частиц. Следует отметить, что явление диффузии присуще не только веществу, но и полю.

Диффузионными процессами обычно называют процессы перераспределения вещества в среде путем диссипации или его направленного переноса под действием градиента химического потенциала, а в простейшем случае, градиента концентрации.

Процессы диффузии относятся, с одной стороны, к химической кинетике, с другой – к равновесию сорбции и растворению. Движущей силой диффузионного процесса является стремление природы избавиться от навязанного ей порядка. Обратите внимание, что в приведенных выше определениях нет утверждения, будто диффузия обязательно должна идти от большей концентрации в сторону меньшей и что в результате должно возникнуть равномерное распределение примеси по образцу. Система стремится не к равенству концентраций, а к выравниванию химического потенциала, а равенство химических потенциалов далеко не всегда сопровождается равенством концентраций. В эксперименте так называемая восходящая диффузия часто наблюдается при сильном взаимодействии примеси с веществом и при наличии внешних сил – механических нагрузок, электрических полей и т.п.

Таким образом, движущей силой диффузии, как всякой другой реакции, естественно, является разность термодинамических потенциалов. Путем перераспределения вещества система стремится к выравниванию локальных разностей потенциалов и, следовательно, к приближению к термодинамическому равновесию; это выравнивание и осуществляется посредством диффузии.

Аналогии

Несмотря на господство атомно-молекулярного учения, при описании диффузии, как и в термодинамике, удобно абстрагироваться от дискретности пространства и времени. Процесс диффузии можно рассматривать как движение жидкости в непрерывной среде. Отсюда возникают многочисленные аналогии, которые помогают выяснить ряд особенностей диффузии.

Прежде всего, остановимся на аналогии между диффузией и теплопроводностью. Поскольку эти процессы описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями, то можно воспользоваться уже готовыми решениями из более развитой теории теплопроводности, заменив коэффициент температуропроводности на коэффициент диффузии, а температуру – на концентрацию. Такой подход часто используется на практике.

Капиллярное течение жидкости через систему вертикальных трубок подчиняется аналогичному статистическому и динамическому закону (Рис.1). Здесь уровень воды h_n в трубке E_n является аналогом концентрации (температуры), вместимость вертикальной трубки E_n – аналогом растворимости (удельной теплоемкости), а гидравлическое сопротивление капилляра ρ_n – аналогом диффузионного (термического) сопротивления, т.е. величины, обратной коэффициенту диффузии (здесь длина капилляра t – аналог координаты x).

Моделирование

Основанное на аналогиях (физическое) моделирование хорошо тем, что избавляет нас от необходимости изучать математику. Используя модель, мы можем сразу получить необходимые графические зависимости и, сравнив их с экспериментом, найти искомые параметры диффузии. Преимущество этого метода по сравнению с математическим моделированием особенно наглядно в случае сложных сред.

Пример. Найти распределение концентрации радона по толщине мембраны при его диффузии в полипропилене и сравнить его с данными автордиографии. Как известно, полипропилен имеет частичнокристаллическую структуру. Взвешенные в аморфной фазе кристаллиты имеют форму вытянутых сфероидов и в свою очередь группируются в сферолиты, причем сферолиты в объеме имеют сферически симметричную форму, а в приповерхностной области – вытянуты перпендикулярно поверхности. Коэффициент диффузии в кристаллитах значительно ниже, чем в аморфной фазе. Легко себе представить сколь громоздко будет решение этой задачи в аналитическом виде (если его вообще можно получить).

Методом моделирования удастся выявить характерные особенности огибания диффузионным потоком препятствий любого типа. Воспользовавшись аналогией с гидродинамикой и поместив в поток воды вырезанные в форме сферолитов препятствия, и, измерив скорость течения воды в каждой точке, определим такой важный параметр, как фактор извилистости. Меняя размеры препятствий, найдем зависимость коэффициента диффузии от радиуса сферолитов и т.п. С той же целью можно воспользоваться специальной токопроводящей бумагой, вырезая в ней дырки нужной формы и измеряя их распределение электрического потенциала по поверхности бумаги. Третьей возможностью является использование *RC*-цепочек.

Используя переменные сопротивления, можно моделировать диффузию в процессе кристаллизации, фазовых переходах и твердофазных реакциях.

Существенным ограничением аналогий является противоречие между дискретным характером элементарного акта диффузии и непрерывными уравнениями, используемыми для ее описания. Противоречие это имеет глубокие исторические корни: в свое время Лейбниц и Ньютон с треском изгнали атомизм из математики, куда он практически до сих пор не вернулся. Все дифференциальное и интегральное исчисление основано на непрерывной математике. Обычно мы не чувствуем этого кардинального недостатка. Однако по мере приближения к микромиру эти противоречия нарастают и должны учитываться экспериментаторами. Такие случаи встречаются при использовании методов электронной автордиографии, при изучении дефектных сред – везде, где нельзя пользоваться средней скоростью диффузии, а необходимо учитывать наличие бальцмановского распределения диффундирующих атомов по скоростям.

Как это делается в термодинамике, феноменологическая теория сознательно не пытается выяснить сущность атомарных процессов, лежащих в основе диффузионных явлений, т.е. сама ограничивает свои возможности. В последнее время феноменологическая теория диффузии все больше и больше дополняется атомистической теорией, но отнюдь не вытесняется ею. Атомистическая теория ставит перед собой задачу проанализировать элементарные процессы, лежащие в основе диффузии, и затем, зная структурные свойства твердого тела, теоретически рассчитать значения коэффициентов диффузии. Таким образом, решение этой задачи зависит от того, в какой мере удастся по структуре решетки, характеру и степени разупорядоченности кристалла, служащего диффузионной средой, определить элементарный шаг диффундирующего атома или иона.

При использовании феноменологического подхода следует учитывать его важнейший недостаток: теория, которую мы в основном будем использовать в этой части курса лекций, построена на предположении о бесконечной скорости распространения концентрации (бесконечная скорость прохождения сигнала), тогда как реальная скорость,

естественно, конечна. Например, ясно, что при проникновении через мембрану, молекулы газа появятся на выходной стороне спустя некоторое время после подачи газа к входной стороне мембраны. Формальное же решение, полученное нами после изрядных усилий, тем не менее, будет требовать, чтобы концентрация диффузанта на выходной поверхности мембраны была отлична от нуля с начального момента времени.

Методы конечных разностей

Эти методы также избавляют от знания высшей математики. Нам достаточно разбить среду на ряд участков (как мы это делали при моделировании методом электропроводности сложных цепей) и записать элементарные уравнения для локальных токов. Таким образом, путем создания специально подобранной сетки, перейдем от решения дифференциальных уравнений в частных производных к системе обычных уравнений. Такие системы сравнительно просто решаются на ЭВМ обычными методами линейной алгебры.

В связи с развитием электронных вычислительных машин в последние годы широкое распространение получили различные численные методы решения задач нестационарного переноса. Разумеется, получение окончательных количественных (числовых) результатов – главная цель решения задачи. Однако при исследовании проблемы больший интерес представляет вывод общих формул, дающих в явном виде аналитическую зависимость решений от параметров задачи. Это особенно важно при рассмотрении различных предельных случаев. При компьютерном численном решении получают набор решений при различных значениях исходных параметров и строят соответствующие графики или таблицы. Этот путь зачастую не приводит к установлению искомой аналитической зависимости. Поэтому, несмотря на широкое развитие численных методов, аналитические методы решения задач по-прежнему сохраняют свое значение.

Статистический подход к описанию диффузии

С точки зрения элементарного акта – диффузия – случайное блуждание. Классическим примером задачи такого рода является задача о броуновском движении небольших частиц, взвешенных в жидкости. Движение этих частиц происходит под действием ударов молекул жидкости. Случайный перевес с одной стороны определяет направление и скорость перемещения частицы. Эту задачу можно решать методами теории вероятности или методом статистических испытаний (методом Монте-Карло). Последний метод замечателен тем, что с его помощью многие задачи решаются «сами собой» без участия математика, роль которой сводится только к тому, чтобы следить за естественным ходом событий и фиксировать результаты.

Броуновское движение

Броуновское движение – беспорядочное движение мельчайших частиц, взвешенных в жидкости или газе, под влиянием ударов молекул окружающей среды; открыто Р. Броуном.

Рассмотрим маленькую частицу, вовлеченную в броуновское движение. Далеко ли отойдет частица от первоначального положения за заданный промежуток времени? Подобная задача решена Эйнштейном и Смолуховским. Все столкновения случайны, так что каждый последующий «шаг» частицы совершенно не зависит от предыдущего шага.

Метод Монте-Карло

Метод Монте-Карло – способ решения различных задач с использованием процедур случайного розыгрыша тех или иных величин. Численные методы Монте-Карло – численные методы решения математических задач при помощи моделирования случайных величин и статистической оценки их характеристик".

Метод Монте Карло (ММК) был изобретен выдающимися учеными 20 века математиком Дж. фон Нейманом и физиком Энрико Ферми в Лос-Аламосе (США) в процессе работ по урановой тематике. В 1951 и 56 г.г. состоялись два симпозиума по методам ММК, которые продемонстрировали широкие перспективы его применения в различных областях физики, математики и техники (вычислительная математика, теория переноса, теория массового обслуживания, теория надежности и т.д.)

Возьмем круг, разобьем его на 100 секторов так, что, скажем, 0 – север, 25 – восток, 50 – юг и т.п. В центре круга поместим ось с насаженной на нее стрелкой. Это – «рулетка». Вращаем стрелку и смотрим, на каком секторе она остановилась. Если она остановилась на 25, то идем на восток. Берем чертеж и отмечаем на нем точку 1, снова толкаем стрелку, ставим точку 2 (в данном случае расстояние между точками всегда одинаково) и т.п., пока не пройдем весь путь. На практике рулеткой никто не пользуется – для этого есть таблица случайных чисел.

Молекула или атом в произвольной среде вследствие теплового движения перемещается по механизму случайных блужданий. Для описания такого процесса используются вероятностные представления, из которых следует, что вероятность осуществления диффундирующей частицей элементарного акта перемещения на определенное расстояние определяется подвижностью этой частицы и временем прохождения этой частицы от одного столкновения до другого в газовой фазе или от одной потенциальной ямы до другой в конденсированной фазе. Если при перемещении частицы в среде не возникают условия для предпочтительного направления, т.е. если направление перемещения диффундирующей частицы в элементарном акте не зависит от направления предыдущего перемещения, то средний квадрат полного смещения частицы не зависимо от избранного направления в изотропной среде складывается из суммы квадратов смещений по трем пространственным координатам. Смещение частицы в наперед заданном направлении, или точнее средний квадрат смещения $\langle x^2 \rangle$ определяется уравнением Эйнштейна:

$$\langle x^2 \rangle = 2kTbt/N_0$$

Подвижность V характеризует как свойства перемещающегося частицы, так и свойства среды. Естественно, что в качестве среды могут рассматриваться газ, жидкость, твердое тело, плазма. В частности для классического случая движения шарообразной частицы радиуса r в жидкости подвижность вычисляется по уравнению Стокса:

Таким образом, из броуновского движения, измерив расстояние пройденное капелькой, можно определить число Авогадро, постоянную Больцмана, а из коэффициента диффузии – размер молекул и их число.

Метод Монте-Карло позволяет решать довольно сложные задачи в области диффузии. Задавшись исходным состоянием и меняя вероятность скачка, число скачков с данным шагом или величину скачка, получим решения для гетерогенной среды. Легко учесть гибель или рождение частиц, наличие отражающих стенок и т.п. Такими методами решены многие задачи в области диффузии нейтронов в атомном реакторе.

Уравнение Фоккера-Планка (Эйнштейна-Фоккера)

Это уравнение является одним из основных в физико-химической кинетике. Оно может быть выведено из броуновского движения, если учесть корреляцию между последовательными событиями и воспользоваться интегральным уравнением Смолуховского. Рассмотрим упрощенный вывод уравнения Фоккера-Планка.

Марковский процесс – важный специальный вид случайных процессов. Примером может служить распад радиоактивного вещества, где вероятность распада данного атома за малый промежуток времени не зависит от течения процесса в предыдущий период.

Теория Марковских процессов возникла на основе исследований А.А.Маркова (старшего) по теории вероятности.

Законы Фика

Основной задачей аналитической теории диффузии является определение и изучение пространственно-временного изменения основной физической величины, характеризующей процесс диффузии, - концентрации $C=f(x,y,z,t)$, где x, y, z - пространственные прямоугольные координаты; t - время.

Концентрационным полем называется совокупность значений температуры для всех точек пространства в данный момент времени t . Концентрационное поле является скаляром, так как сама концентрация - скаляр. Если концентрация является функцией одних только пространственных координат (x, y, z), то поле называется установившимся или стационарным. Если концентрация изменяется также во времени, то поле называется неустойчивым или нестационарным.

Законы, управляющие пространственно-временным развитием концентрационного поля называются законами Фика.

Фика законы - законы диффузии в идеальных растворах при отсутствии внешних воздействий. 1-й Фика закон устанавливает пропорциональность диффузионного потока частиц градиенту их концентрации; 2-й Фика закон описывает изменение концентрации, обусловленное диффузией.

Первый закон Фика

Диффузионная теория стремится при известных экспериментально обоснованных предположениях о диффузионном процессе по заданному начальному ходу концентрации рассчитать концентрацию диффундирующего вещества в любой точке образца в любой момент времени. Это можно сделать, составив для концентрации дифференциальное уравнение с частными производными и интегрируя его. Пусть далее диффузия концентрационно зависима и не осложнена наличием особых, энергетически более выгодных областей концентрации. Температуру предполагаем постоянной. Тогда концентрация будет функцией места и времени: $C=C(x,t)$. Представим себе теперь, что в какой-то точке x через образец проведено сечение, перпендикулярное к направлению диффузии, и определим плотность потока диффузанта, проходящего через это сечение. Значение вектора плотности потока (моль.см⁻².сек⁻¹) равно числу единиц массы, диффундирующих в единицу времени через единицу поверхности нашей плоскости. Тогда, как показал опыт, для не слишком больших перепадов концентрации применим так называемый первый закон Фика.

Простейшее выражение для **первого закона Фика** (одномерный случай) имеет вид:

$$j = -D \frac{dC}{dx} \quad (7)$$

Величину j называют плотностью потока диффундирующего вещества (либо плотностью потока диффузанта, либо плотностью диффузионного потока).

Градиент концентрации направлен по нормали к изоконцентрационной поверхности, причем за положительное направление этого вектора принимается направление в сторону возрастания концентрации. В частном случае одномерной диффузии, величина $\frac{dC}{dx}$ представляет собой повышение концентрации в направлении оси x . Если D положительно и если положительное направление вектора j совпадает с положительным направлением оси x , то в правой части формулы (5) должен стоять знак минус: хотя $\frac{dC}{dx} > 0$, но чтобы выровнять разницу концентраций, атомы диффузанта движутся справа налево, т.е. в этом случае j отрицательно.

Перенос диффузанта может происходить только при условии, что в различных точках тела концентрационное поле неоднородно, т.е. для того, чтобы внутри тела возникал поток частиц, необходимо наличие градиента концентрации, отличного от нуля. Поток диффузанта в отличие от температуры (скалярной величины) имеет определенное направление от точек тела с более высокой концентрацией к точкам с более низкой концентрацией диффузанта.

Второй закон Фика

Аналитическая теория диффузии основана на дифференциальном уравнении Фика. Физический смысл его заключается в том, что им связывается пространственное распределение концентрации с изменением ее во времени. Второй закон Фика может быть получен из первого, при использовании законов сохранения. Вывод уравнения второго закона диффузии возможен различными путями. Это уравнение получается на основе представления о случайных блужданиях атомов в кристаллической решетке или частиц в смесях зернистых материалов или при рассмотрении вероятности нахождения частицы в том или ином объеме при ее статистическом перемещении.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Изложение лекционного курса осуществляется в виде устных лекций с применением электронных средств обучения.

В качестве демонстрационного материала используются рисунки и таблицы по излагаемому материалу.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ АСПИРАНТОВ

Для текущего контроля успеваемости используются устный опрос аспирантов. Промежуточной аттестацией по итогам освоения дисциплины является зачет.

Примеры для устного опроса:

Вопросы для устного опроса, СРА и зачета

1. Основные феноменологические законы диффузии газов в твердых телах
2. Основные аналитические методы решения диффузионных уравнений
3. Основные численные методы решения диффузионных уравнений
4. Основные экспериментальные методы изучения диффузионных процессов

Вопросы для самостоятельной работы аспиранта

1. Каким образом пользоваться основными уравнениями диффузии и как проводить соответствующие вычисления.
2. Методы расчета кинетических и равновесных характеристик диффузионных процессов.
3. Методы расчета скорости диффузии в данных конкретных условиях.

4. Основные методы расчёта диффузионных процессов.
5. Охарактеризовать методы расчёта коэффициентов растворимости и коэффициентов диффузии.
6. Основными кинетическими уравнениями.

Вопросы для подготовки к зачету

1. Математическое описание диффузии.
2. Законы Фика.
3. Дифференциальное уравнение диффузии.
4. Методы его решения.
5. Метод проницаемости.
6. Механизмы диффузии примесей внедрения и замещения в твёрдых телах.
7. Метод проницаемости, его этапы.
8. Влияние поверхностных процессов.
9. Экспериментальные методы изучения диффузии.
10. Обзор феноменологических экспериментальных методов изучения диффузии в твёрдых телах.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

а) основная литература:

1. Crank J. The Mathematics of Diffusion. Oxford: Clarendon Press. 2015.
2. Райченко А.И. Математическая теория диффузии в приложениях. Киев: Наукова думка. 2012.
3. Зайт В. Диффузия в металлах. Процессы обмена мест. М.: Изд. иностр. лит. 2014.
4. Шьюмон П. Диффузия в твердых телах. М.: Metallurgia. 2013.

б) дополнительная литература:

1. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М.: Metallurgia. 2005.
2. Кунин Л.Л., Головин А.М., Суровой Ю.Н., Хохрин В.М. Проблемы дегазации металлов. (Феноменологическая теория). М.: Наука. 2007.
3. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир. 2006

в) периодические издания:

1. Химическая кинетика и катализ.
2. Сорбционные и хроматографические процессы.
3. Environ Technol.
4. Восточно – Европейский журнал передовых технологий

г) интернет - ресурсы:

1. <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
2. <http://www.chemport.ru/>
3. <http://www.xumuk.ru/>
4. <http://elibrary.ru/>
5. <http://sci-hub.org/>

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

В качестве материально – технического обеспечения дисциплины используются мультимедийные средства, набор слайдов, демонстрационные приборы.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению 04.06.01 – Химические науки и направленности «Физическая химия»

Рабочую программу составил  Кухтин Б.А.

Рецензент: ООО «БМТ», к.х.н., науч. сотрудник  Третьяков А.В.

Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры химии

протокол № 10 от 03.06 2015 года.

Заведующий кафедрой  Кухтин Б.А.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании учебно-методической комиссии направления 04.06.01 – Химические науки

Протокол № 11 от 03.06 2015 года

Председатель комиссии  Кухтин Б.А.

ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ

РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

Рабочая программа одобрена на _____ учебный год.

Протокол заседания кафедры № _____ от _____ года.

Заведующий кафедрой _____

Рабочая программа одобрена на _____ учебный год.

Протокол заседания кафедры № _____ от _____ года.

Заведующий кафедрой _____