

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

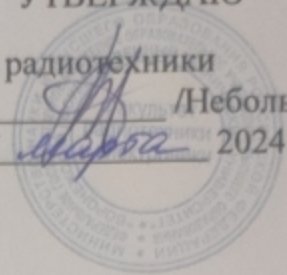
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета радиотехники
и электроники _____

/Небольсин В.А./

07 марта 2024 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Основы нанотехнологий»

Направление подготовки 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов

Профиль Функциональные материалы

Квалификация выпускника бакалавр

Нормативный период обучения 4 года

Форма обучения очная

Год начала подготовки 2024

Автор программы _____

О.В. Артамонова

Заведующий кафедрой
Химии и химической
технологии материалов _____

О.Б. Рудаков

Руководитель ОПОП _____

О.Б. Рудаков

Воронеж 2024

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Целью дисциплины является знакомство студентов с основами нанотехнологий и классификацией, получением и свойствами наноматериалов

1.2. Задачи освоения дисциплины

- изучение основных понятий и современных направлений нанотехнологий;
- приобретение навыков использования теоретических положений для решения практических задач;
- сформировать творческое инженерное мышление студентов.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП

Дисциплина «Основы нанотехнологий» относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений (дисциплина по выбору) блока Б1.

3. ПЕРЕЧЕНЬ ПЛАНИРУЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Процесс изучения дисциплины «Основы нанотехнологий» направлен на формирование следующих компетенций:

ПК-8 - Способен использовать на практике современные представления о влиянии микро- и наноструктуры материала на его свойства, взаимодействие материала с окружающей средой, механическими и физическими нагрузками

ПК-12 - Способен участвовать в разработке технологических процессов производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции
ПК-8	Знать современные представления о влиянии микро- и наноструктуры материала на его свойства, взаимодействие материала с окружающей средой, механическими и физическими нагрузками
	уметь использовать знания о влиянии микро- и наноструктуры материала на его свойства, работу в технологическом цикле для моделирования физико-химических свойств и долговечности наноматериалов
	Владеть практическими навыками в области прогнозирования физико-химических свойств нанодисперсных систем и наноматериалов
ПК-12	знать основы технологических процессов

	производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами
	уметь прогнозировать свойства материалов и механизмы химических процессов при получении нанодисперсных систем и материалов
	владеть практическими навыками в области получения нанодисперсных систем и наноматериалов

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Основы нанотехнологий» составляет 6 з.е.

Распределение трудоемкости дисциплины по видам занятий
очная форма обучения

Виды учебной работы	Всего часов	Семестры
		7
Аудиторные занятия (всего)	68	68
В том числе:		
Лекции	34	34
Практические занятия (ПЗ) в том числе в форме практической подготовки	34 10	34 10
Самостоятельная работа	112	112
Часы на контроль	36	36
Виды промежуточной аттестации – экзамен	+	+
Общая трудоемкость: академические часы	216	216
зач.ед.	6	6

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

5.1 Содержание разделов дисциплины и распределение трудоемкости по видам занятий
очная форма обучения

№	Наименование	Содержание раздела	Лекц	Прак	СРС	Всего,
---	--------------	--------------------	------	------	-----	--------

п/п	темы			зан.		час
1	Особенности наноструктуры	Общая характеристика наноструктур: основные понятия и положения	6	4	18	28
2	Систематика наноматериалов	Классификация наноматериалов по составу, структуре, свойствам и областям применения	6	6	18	30
		<i>практическая подготовка обучающихся</i>	-	2	-	2
3	Физико-химические свойства наноматериалов	Структурная иерархия наноматериалов. Особенности создания наноматериалов на основе диссипативных структур	6	6	18	30
		<i>практическая подготовка обучающихся</i>	-	2	-	2
4	Физико-химические свойства наноматериалов	Наноструктуры, нанокомпозиты и нанореакторы	6	6	18	30
		<i>практическая подготовка обучающихся</i>	-	2	-	2
5	Основы технологии получения наноматериалов	Технология консолидированных, полупроводниковых, полимерных, пористых, трубчатых и биологических наноматериалов	6	6	20	32
		<i>практическая подготовка обучающихся</i>	-	2	-	2
6	Применение наноматериалов	Основные области применения консолидированных, полупроводниковых, полимерных, пористых, трубчатых и биологических наноматериалов	4	6	20	30
		<i>практическая подготовка обучающихся</i>	-	2	-	2
Итого			34	34	112	180

Практическая подготовка при освоении дисциплины (модуля) проводится путем непосредственного выполнения обучающимися отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью, способствующих формированию, закреплению и развитию практических навыков и компетенций по профилю соответствующей образовательной программы на практических занятиях и (или) лабораторных работах:

№ п/п	Перечень выполняемых обучающимися отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью	Формируемые профессиональные компетенции
1	Синтез наноразмерных систем золь-гель методом	ПК-8, ПК-12
2	Определение фазового состава наноразмерных систем	ПК-8, ПК-12
3	Модифицирование гидратационно-синтезных систем твердения наноразмерными добавками	ПК-8, ПК-12
4	Исследование кинетики гидратации наномодифицированных систем	ПК-8, ПК-12

5	Исследование процессов структурообразования наномодифицированных систем	ПК-8, ПК-12
6	Исследование кинетики твердения наномодифицированных систем	ПК-8, ПК-12

5.2 Перечень лабораторных работ

Не предусмотрено учебным планом

6. ПРИМЕРНАЯ ТЕМАТИКА КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ) И КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

В соответствии с учебным планом освоение дисциплины не предусматривает выполнение курсового проекта (работы) или контрольной работы.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

7.1. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

7.1.1 Этап текущего контроля

Результаты текущего контроля знаний и межсессионной аттестации оцениваются по следующей системе:

«аттестован»;

«не аттестован».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Аттестован	Не аттестован
ПК-8	знать современные представления о влиянии микро- и наноструктуры материала на его свойства, взаимодействие материала с окружающей средой, механическими и физическими нагрузками	Активная работа на практических занятиях	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь использовать знания о влиянии микро- и наноструктуры материала на его свойства, работу в технологическом цикле для моделирования физико-химических свойств и	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

	долговечности наноматериалов			
	владеть практическими навыками в области прогнозирования физико-химических свойств нанодispersных систем и наноматериалов	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
ПК-12	знать основы технологических процессов производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами	Активная работа на практических занятиях	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	уметь прогнозировать свойства материалов и механизмы химических процессов при получении нанодispersных систем и материалов	Решение стандартных практических задач	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах
	владеть практическими навыками в области получения нанодispersных систем и наноматериалов	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Выполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах	Невыполнение работ в срок, предусмотренный в рабочих программах

7.1.2 Этап промежуточного контроля знаний

Результаты промежуточного контроля знаний оцениваются в 7 семестре для очной формы обучения по четырехбалльной системе:

«отлично»;

«хорошо»;

«удовлетворительно»;

«неудовлетворительно».

Компетенция	Результаты обучения, характеризующие сформированность компетенции	Критерии оценивания	Отлично	Хорошо	Удовл.	Неудовл.
ПК-8	знать современные представления о влиянии	Тест	Выполнение теста на	Выполнение теста на	Выполнение	В тесте менее 70%

	микро- и наноструктуры материала на его свойства, взаимодействие материала с окружающей средой, механическими и физическими нагрузками		90- 100%	80- 90%	теста на 70-80%	правильных ответов
	уметь использовать знания о влиянии микро- и наноструктуры материала на его свойства, работу в технологическом цикле для моделирования физико-химических свойств и долговечности наноматериалов	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть практическими навыками в области прогнозирования физико-химических свойств нанодисперсных систем и наноматериалов	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
ПК-12	знать основы технологических процессов производства и обработки покрытий, материалов и изделий из них, систем управления технологическими процессами	Тест	Выполнение теста на 90- 100%	Выполнение теста на 80- 90%	Выполнение теста на 70-80%	В тесте менее 70% правильных ответов
	уметь прогнозировать свойства материалов и механизмы химических процессов при получении нанодисперсных систем и материалов	Решение стандартных практических задач	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены
	владеть практическими навыками в области получения нанодисперсных систем и наноматериалов	Решение прикладных задач в конкретной предметной области	Задачи решены в полном объеме и получены верные ответы	Продемонстрирован верный ход решения всех, но не получен верный ответ во всех задачах	Продемонстрирован верный ход решения в большинстве задач	Задачи не решены

7.2 Примерный перечень оценочных средств (типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности)

7.2.1 Примерный перечень заданий для подготовки к тестированию

1. Амплитуда колебаний атомов выше

- a) ...в объеме частицы
- b) ...на поверхности частицы
- c) ...в объеме и на поверхности частицы одинакова

2. Как изменяется температура плавления свободных наночастиц металлов при уменьшении линейного размера?

- a) Увеличивается
- b) Уменьшается
- c) Не изменяется

3. Для какой формы наночастицы металла характерна самая низкая температура плавления?

- a) Сфера
- b) Куб
- c) Цилиндр

4. Как принято называть нанотехнологический подход к поэтапному формированию наночастиц?

- a) «Снизу—вверх»
- b) «Снизу—вбок»
- c) «Сверху—вниз»

5. Как принято называть нанотехнологический подход к физико-химическому измельчению при формировании наночастиц?

- a) «Снизу—вверх»
- b) «Снизу—вбок»
- c) «Сверху—вниз»

6. Выберите из приведенных вариантов год, когда впервые был получен в лабораторных условиях графен в свободном состоянии.

- a) 2003
- b) 2004
- c) 2005

7. Выберите метод, применение которого позволило впервые получить образцы графена.

- a) Расслаивание интеркалированных соединений графита
- b) Возгонка кремния с подложек SiC
- c) Микромеханическое отслаивание частиц графита скотчем

8. Что такое «кантилевер»?

- a) важная часть АСМ
- b) штатная часть медицинского наноробота
- c) форма существования нитевидных кристаллов

9. Один нанометр равен чему?

- a) 10^{-9} м
- b) 10^{-6} м
- c) 10^{-10} м

10. Наиболее распространенный метод синтеза оксидных наноразмерных кристаллов

- a) золь-гель технология
- b) гидротермальный синтез
- c) термальный синтез

7.2.2 Примерный перечень заданий для решения стандартных задач

Задача 1. При каком минимальном n размер частицы Fe может попасть в нанодиапазон? Радиус атома железа – 132 пм (пико = 10^{-12}).

Решение

Диаметр атома железа в 2 раза превышает радиус $d(\text{Fe}) = 264 \text{ пм} = 0.264 \text{ нм}$.

$1/0.264 = 3.7$, поэтому гипотетическая линейная структура из 4 связанных атомов будет иметь размер больше 1 нм.

Ответ: $n = 4$.

Задача 2. Масса одной углеродной нанотрубки составляет $2,99 \cdot 10^{-19}$ г. Сколько атомов углерода входит в состав этой частицы?

Решение

Молярная масса нанотрубки:

$$M(C_n) = 2,99 \cdot 10^{-19} \text{ г} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 180\,000 \text{ г/моль},$$

$$n = 180\,000 / 12 = 15\,000$$

Ответ: 15 000 частиц.

Задача 3. Сколько наноалмазов радиусом 5 нм теоретически можно получить из 1 г тринитротолуола $C_7H_5(NO_2)_3$? Плотность алмаза $3,5 \text{ г/см}^3$.

Решение

$$\nu(C) = 7\nu(\text{TNT}) = 7/227 = 3,08 \cdot 10^{-2} \text{ моль}$$

$$m(C) = 3,08 \cdot 10^{-2} \cdot 12 = 0,370 \text{ г}$$

$$V(C) = 0,370 / 3,5 = 0,106 \text{ см}^3 = 1,06 \cdot 10^{20} \text{ нм}^3 \quad (1 \text{ см}^3 = (10^7 \text{ нм})^3 = 10^{21} \text{ нм}^3)$$

$$V(\text{наноалм.}) = 1/6 \pi d^3 = 65,4 \text{ нм}^3$$

$$N(\text{наноалм.}) = 1,06 \cdot 10^{20} / 65,4 = 1,62 \cdot 10^{18}.$$

Ответ: $1,62 \cdot 10^{18}$ штук.

Задача 4. Имеются два наноматериала одного и того же химического состава, состоящие из частиц сферической формы. Средний радиус частиц первого материала – 200 нм, а второго – 50 нм. Какой из двух материалов имеет большую удельную поверхность и во сколько раз?

Решение

Пусть в образце содержится N сферических частиц радиуса r и плотности ρ . Удельная поверхность:

$$S_{\text{уд}} = S/m = S/(\rho \cdot V) = N \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 / (\rho \cdot N \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot r^3) = 3/(\rho \cdot r) \sim 1/r.$$

Ответ: Удельная поверхность обратно пропорциональна радиусу. Она больше у второго материала в 4 раза.

Задача 5. В реакции фуллерена C_{60} с избытком монохлорида иода ICl образовалось вещество, молекула которого тяжелее исходного фуллерена на 49.3%. Установите формулу продукта реакции.

Решение

$$M(X) = 720 \cdot 1.493 = 1075 \text{ г/моль}$$

$$M(X) - M(C_{60}) = 355 \text{ г/моль, что соответствует 10 молям Cl.}$$

Формула продукта – $C_{60}Cl_{10}$.

Ответ: $C_{60}Cl_{10}$.

Задача 6. Нанокристалл селенида вольфрама имеет массу $2.84 \cdot 10^{-18}$ г и содержит 53.8% вольфрама по массе. Сколько всего атомов входит в состав нанокристалла?

Решение

$$\text{Массы атомов вольфрама и селена: } m(W) = 184 / 6.02 \cdot 10^{23} = 3.06 \cdot 10^{-22} \text{ г,}$$
$$m(Se) = 79 / 6.02 \cdot 10^{23} = 1.31 \cdot 10^{-22} \text{ г.}$$

Число атомов вольфрама в наночастице:

$$N(W) = 2.84 \cdot 10^{-18} \cdot 0.538 / 3.06 \cdot 10^{-22} = 5000.$$

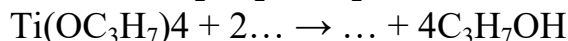
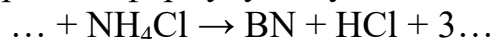
Число атомов селена в наночастице:

$$N(Se) = 2.84 \cdot 10^{-18} \cdot 0.462 / 1.31 \cdot 10^{-22} = 10\ 000.$$

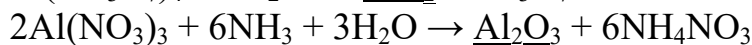
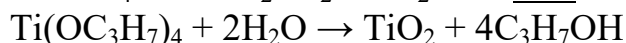
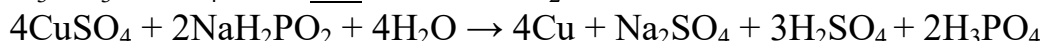
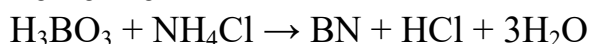
Общее число атомов: $5000 + 10000 = 15\ 000$.

Ответ: 15 000 атомов (5000 атомов W и 10 000 атомов Se).

Задача 7. Ниже приведены уравнения реакций получения различных наночастиц. Все коэффициенты расставлены, для наночастиц приведены простейшие (брутто) формулы. Завершите эти уравнения, заполнив пропуски, подчеркните формулу полученной наночастицы.



Решение



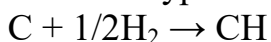
Задача 8. Двумерный наноматериал графан представляет собой полностью гидрированную графитовую плоскость. Определите брутто-формулу графана. Чему равен объём водорода (при 25 ° C и 100 кПа),

который необходим для полного гидрирования 100 мг графена?

Решение

Каждый атом углерода в графене может присоединить один атом водорода, поэтому брутто-формула графана – CH.

Запишем уравнение реакции гидрирования в виде:



$$\nu(\text{C}) = 0.1 / 12 = 8.33 \cdot 10^{-3} \text{ моль,}$$

$$\nu(\text{H}_2) = 8.33 \cdot 10^{-3} / 2 = 4.17 \cdot 10^{-3} \text{ моль,}$$

$$V(\text{H}_2) = \nu RT / p = 4.17 \cdot 10^{-3} \cdot 8.314 \cdot 298 / 100 = 0.103 \text{ л} = 103 \text{ мл.}$$

Ответ: CH; 103 мл H₂.

Задача 9. Сколько атомов углерода входит в состав наноалмаза диаметром 5.0 нм? Какой процент от общего объема алмаза занимают атомы углерода? Необходимая информация: ковалентный радиус атома углерода составляет 0.077 нм (половина длины связи C–C). Плотность алмаза 3.52 г/см³.

Решение

Объем одного наноалмаза составляет: $V(\text{C}) = \pi d^3 / 6 = \pi \cdot 5^3 / 6 = 65 \text{ нм}^3 = 6.5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3$, а его масса равна: $m(\text{C}) = \rho \cdot V = 3.52 \cdot 6.54 \cdot 10^{-20} = 2.3 \cdot 10^{-19} \text{ г}$.

Число атомов найдем через количество вещества углерода:

$$N(\text{C}) = \nu(\text{C}) \cdot N_A = m / (M \cdot N_A) = 2.3 \cdot 10^{-19} / (12 \cdot 6.02 \cdot 10^{23}) \sim 12 \text{ 000.}$$

Зная число атомов, рассчитаем их общий объем: $V_{\text{ат}} = N \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot r^3 = 12000 \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot (0.077)^3 = 23 \text{ нм}^3$.

Процент от общего объема наноалмаза составляет: $23/65 \cdot 100 = 35\%$.

Ответ. 12000; 35%.

Задача 10. Порошок диоксида титана имеет удельную поверхность 110 м²/г. Считая, что порошок состоит из сферических частиц одного и того же размера, рассчитайте их радиус. Сколько атомов титана и кислорода входят в состав одной наночастицы? Плотность TiO₂ равна 3.6 г/см³.

Решение

Возьмем 1 г TiO₂ объемом $1/3.6 = 0.28 \text{ см}^3$. Пусть в этом объеме содержится n частиц радиуса r. Общий объем частиц составляет 0.28 см³, а общая поверхность – 110 м² = 1.1 · 10⁶ см². Решив систему уравнений:

$$S = 4\pi r^2 n = 1.1 \cdot 10^6$$

$$V = 4/3 \cdot \pi r^3 n = 0.28$$

находим: $r = 7.6 \cdot 10^{-7} \text{ см} = 7.6 \text{ нм}$, $n = 1.5 \cdot 10^{17}$. Число формульных единиц TiO₂ (это вещество – немолекулярного строения) в 1 г составляет:

$$1/80 \cdot 6 \cdot 10^{23} = 7.5 \cdot 10^{21}.$$

В составе одной наночастицы содержится $(7.5 \cdot 10^{21} / 1.5 \cdot 10^{17}) = 50 \text{ 000}$ единиц TiO₂, то есть 50 000 атомов Ti и 100 000 атомов O.

Ответ: 7.6 нм; N(Ti) = 50 000, N(O) = 100 000.

7.2.3 Примерный перечень заданий для решения прикладных задач

Задача 1. 1) Оцените число атомов в наночастице золота диаметром 3 нм. Радиус атома Au составляет 0.144 нм. Выберите один из вариантов ответа:

- (а) 10^2
- (б) 10^3
- (в) 10^4
- (г) 10^5

2) Оцените, какая доля (в %) атомов золота находится на поверхности наночастицы золота. Выберите один из вариантов ответа:

- (а) 20-30%
- (б) 40-50%
- (в) 60-70%
- (г) 80-90%

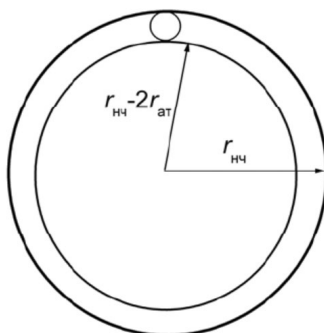
Решение

1) Предлагается дать оценку числа атомов по порядку величины. В таком грубом приближении свободным объемом между атомами в наночастице можно пренебречь, тогда число атомов равно отношению объема наночастицы к объему атома. По условию, предполагается, что обе частицы имеют форму шара:

$$N = V_{\text{нч}} / V_{\text{ат}} = 4/3 \pi r_{\text{нч}}^3 / 4/3 \pi r_{\text{ат}}^3 = (r_{\text{нч}} / r_{\text{ат}})^3 = (1.5 / 0.144)^3 = 1130 \sim 10^3$$

Правильный ответ – (б).

2) Будем считать, что поверхность наночастицы проходит по внешним точкам атомов-шаров.



Для оценки доли атомов в поверхностном слое найдем объем поверхностного слоя $V_{\text{пов}}$ и разделим его на объем наночастицы $V_{\text{нч}}$. Объем поверхностного слоя равен разности объема наночастицы и внутреннего объема – шара радиусом $r_{\text{нч}} - 2r_{\text{ат}}$:

$$V_{\text{пов}} / V_{\text{нч}} = (4/3 \pi r_{\text{нч}}^3 - 4/3 \pi (r_{\text{нч}} - 2 r_{\text{ат}})^3) / 4/3 \pi r_{\text{нч}}^3 = (r_{\text{нч}}^3 - (r_{\text{нч}} - 2 r_{\text{ат}})^3) / r_{\text{нч}}^3 =$$

$$= (1.5^3 - (1.5 - 2 \cdot 0.144)^3) / 1.5^3 = 0.47 = 47 \%$$

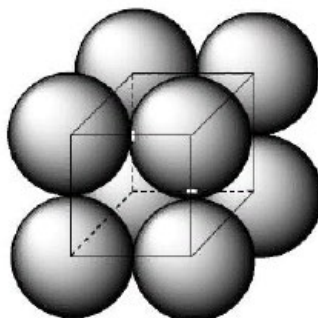
Правильный ответ – (б).

Задача 2. Найдите расстояние между центрами соседних молекул фуллерена в его низкотемпературной модификации (плотность 1.7 г/см^3), которая имеет примитивную кубическую решетку, где молекулы находятся только в вершинах кубической элементарной ячейки.

Решение

В примитивной кубической решетке каждая молекула в вершине куба

принадлежит 8 соседним элементарным ячейкам. На одну ячейку приходится $8 \cdot 1/8 = 1$ молекула C_{60} .



Объем одного моля фуллерена составляет:

$$V_m = M/\rho = 720.6 / 1.7 = 424 \text{ см}^3/\text{моль}.$$

Объем одной элементарной ячейки:

$$V_{\text{яч}} = V_m / N_A = 424 / (6.02 \cdot 10^{23}) = 7.04 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3 = 0.704 \text{ нм}^3.$$

Расстояние между центрами соседних молекул равно ребру элементарной ячейки:

$$a = V_{\text{яч}}^{1/3} = 0.89 \text{ нм}.$$

Ответ: 0.89 нм.

Задача 3. Оксид цинка, выращенный в виде цилиндрических наностержней диаметром 20 – 150 нм, способен выступать в роли миниатюрного полупроводникового источника лазерного излучения. Эффективность работы такого устройства в целом зависит от формы и взаимного расположения стержней друг относительно друга. Форма и размеры нанокристаллов оксида цинка зависят от скорости испарения вещества и положения подложки – основы, на которой происходит рост кристаллов. Добиться параллельного расположения наностержней оксида цинка удастся, используя метод газофазного химического транспорта паров оксида цинка на подложку из нитрида галлия, покрытую тонким слоем золота.

1. Оцените, сколько атомов цинка входит в состав наностержня диаметром 20 нм и длиной 1 мм, если известно, что плотность оксида цинка равна 5.75 г/см^3 .

2. Предложите не менее 4 методов получения оксида цинка.

3. Оксид цинка – очень тугоплавкий ($t_{\text{пл}} \sim 2000 \text{ }^\circ \text{C}$). Как можно получить пары этого вещества? Предложите два способа.

4. Какие применения может найти нанолазер?

Решение

1 Наностержень можно представить в виде цилиндра. Его объем:

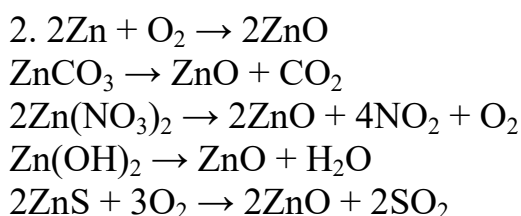
$$V = \pi r^2 h = 3.14 \cdot (10^{-6} \text{ см})^2 \cdot 0.1 \text{ см} = 3.14 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3.$$

Масса цилиндра:

$$m = \rho V = 5.75 \cdot 3.14 \cdot 10^{-13} = 1.806 \cdot 10^{-12} \text{ г}.$$

$$v(\text{ZnO}) = m/M = 1.806 \cdot 10^{-12} / 81 = 2.23 \cdot 10^{-14} \text{ моль},$$

$$v(\text{Zn}) = v(\text{ZnO}), N(\text{Zn}) = v \cdot N = 2.23 \cdot 10^{-14} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} = 1.34 \cdot 10^{10}.$$



3. Небольшие количества паров оксида цинка можно получить лазерным разогревом поверхности ZnO. Другой способ – испарение цинка ($t_{\text{кип}} \sim 900^\circ \text{C}$) и окисление паров цинка кислородом.

4. Нанолазеры – это высокоэффективные миниатюрные источники света. Они могут найти применение в микроанализе, медицине, системах хранения данных, дисплеях компьютеров. Подсчитано, что замена использующихся сегодня для записи на CD красных лазеров на нанолазеры приведет к возрастанию плотности записи более, чем в тысячу раз.

Задача 4. Что такое энтальпия образования ΔH°_f (ОТ) одностенной углеродной нанотрубки? Напишите уравнение реакции, энтальпия которой равна ΔH°_f (ОТ). В каких единицах можно измерить ΔH°_f (ОТ)? Какой знак имеет эта величина? Предложите по возможности наиболее простой экспериментальный метод определения ΔH°_f (ОТ) углеродной нанотрубки.

Решение

Энтальпия образования равна энтальпии реакции образования соединения из простых веществ. В нашем случае это реакция



При любом способе получения образующиеся нанотрубки неоднородны по размерам, поэтому (как и для полимеров) они характеризуются разбросом значений n . Из-за этого определить моль нанотрубок нельзя и энтальпию образования приходится выражать в единицах энергии на единицу массы, например кДж/г. Общая масса трубок легко измерима.

Образование нанотрубки из графита можно представить следующим образом:

- 1) При переходе графита в газовую фазу разрываются связи между отдельными слоями графита;
- 2) внутри отдельного слоя графита (его называют графеном) происходит разрыв некоторых связей и выделяется прямоугольный кусок;
- 3) прямоугольник закручивается в пространстве;
- 4) противоположные края прямоугольника замыкаются друг на друга путем образования связей между шестиугольниками.

Первые три из этих процессов требуют затраты энергии, на последней стадии она выделяется, однако ее недостаточно, чтобы компенсировать даже испарение графита. Поэтому при образовании любой нанотрубки из графита теплота поглощается: ΔH°_f (ОТ) – положительная величина, нанотрубки – эндотермические объекты. Именно положительная энтальпия делает нанотрубки термодинамически неустойчивыми относительно графита – именно поэтому они отсутствуют на фазовой диаграмме углерода, где

указаны области существования термодинамически наиболее устойчивых фаз.

Самый простой способ измерения теплоты образования нанотрубок – измерить энтальпию сгорания грамма трубок с образованием CO_2 . Согласно одному из следствий закона Гесса, энтальпия реакции равна разности энтальпий сгорания реагентов и продуктов реакции:

$$\Delta H_f^\circ(\text{ОТ}) = \Delta H_{\text{сгорания}}^\circ(\text{графит}) - \Delta H_{\text{сгорания}}^\circ(\text{ОТ}).$$

Свойства наноматериалов существенно зависят от формы и размера частиц. Зависимость термодинамических свойств от размера объясняется наличием дополнительного – поверхностного – давления, которое испытывает вещество в частицах малого размера. Для сферических частиц радиуса r поверхностное давление описывается формулой:

$$P_{\text{пов}} = 2\sigma/r$$

где σ – поверхностное натяжение на границе раздела «наночастица – окружающая среда».

Благодаря дополнительному давлению внутри наночастицы давление насыщенного пара над ней выше, чем над макрофазой, образованной тем же самым веществом. В равновесии молярные энергии Гиббса конденсированной фазы – жидкости или твердого вещества ($G_{\text{конд}}$) – и газа, насыщенного пара ($G_{\text{газ}}$) равны:

$$G_{\text{конд}} = G_{\text{газ}}.$$

Зависимость энергии Гиббса газа от его давления имеет вид:

$$G_{\text{газ}} = G_{\text{газ}}^\circ + RT \ln p,$$

где $G_{\text{газ}}^\circ$ есть стандартная молярная энергия Гиббса газа при стандартном давлении $p = 1$ бар. Увеличение внутреннего давления приводит к увеличению молярной энергии Гиббса вещества, $G_{\text{сф}}^*$, в сферическом образце по сравнению с макрофазой, $G_{\text{конд}}$, на величину $P_{\text{пов}} V_m$:

$$G_{\text{сф}}^* = G_{\text{конд}} + P_{\text{пов}} V_m = G_{\text{конд}} + 2\sigma V/r,$$

где V_m – молярный объем вещества в конденсированном состоянии. Давление насыщенного пара над сферической частицей, p^* , определяется равенством энергий Гиббса частицы и газа:

$$G_{\text{сф}}^* = G_{\text{газ}} = G_{\text{газ}}^\circ + RT \ln p^*$$

где p^* – давление насыщенного пара над сферическим образцом радиуса r .

Задача 5. Дисперсность частиц коллоидного золота равна 10^8 м^{-1} . Принимая частицы золота в виде кубиков, определите, какую поверхность $S_{\text{общ}}$ они могут покрыть, если их плотно уложить в один слой. Масса коллоидных частиц золота 1 г. Плотность золота равна $19.6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Решение

1 Поскольку $S_{\text{уд}}^V = S_{1,2}/V$, то общая поверхность частиц коллоидного золота равна $S_{1,2} = S_{\text{уд}}^V V$.

2 Удельная поверхность кубических частиц: $S_{\text{уд}}^V = 6/D$.

3 Объем золь золота связан с массой золь: $V = m/\rho$.

Тогда $S_{1,2} = 6 \cdot D \cdot m/\rho = 6 \cdot 10^8 \cdot 1 \cdot 10^{-3} / (19.6 \cdot 10^3) = 30.61 \text{ м}^2$.

Ответ: $30,61\text{ м}^2$.

Задача 6. Известно, что повышение температуры тела (гипертермия) человека на $1 - 2$ °С является защитной функцией организма, состоящее к оказанию противодействия чужеродным микроорганизмам. Дальнейшее повышение температуры может привести к нежелательным последствиям для организма человека. Для термодинамической терапии готовят водную суспензию серебряных наночастиц. Какой максимальной концентрации (в г/л) может быть раствор, чтобы нагретые на 5 °С наночастицы не привели к нагреву воды более чем на 0.1 °С? Необходимые для решения справочные данные найдите самостоятельно.

Решение

Из уравнения теплового баланса

$$c_{\text{Ag}} \cdot m_{\text{Ag}} \cdot \Delta T_{\text{Ag}} = c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta T_{\text{H}_2\text{O}}$$

Суммарный объем складывается из объема воды и объема, занимаемого наночастицами:

$$(m_{\text{Ag}}/\rho_{\text{Ag}}) + (m_{\text{H}_2\text{O}}/\rho_{\text{H}_2\text{O}}) = V$$

$$m_{\text{Ag}}/V = (\rho_{\text{Ag}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta T_{\text{H}_2\text{O}}) / (c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta T_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{Ag}} \cdot \rho_{\text{Ag}} \cdot \Delta T_{\text{Ag}})$$

$$m_{\text{Ag}}/V = (10^4 \cdot 4.2 \cdot 10^3 \cdot 0.1) / (4.2 \cdot 10^3 \cdot 0.1 + 0.24 \cdot 10^3 \cdot 10^4 \cdot 5) \sim 340 \text{ кг/м}^3.$$

$$340 \text{ кг/м}^3 = 340 \text{ г/л.}$$

Ответ: 340 г/л.

Задача 7. Свойства макрофазы и нанофазы, образованных одним и тем же веществом А, различаются. Какие из приведенных величин будут уменьшаться при переходе от макро- к нанофазе?

- 1) температура кипения А при атмосферном давлении;
- 2) давление насыщенного пара А над нанофазой;
- 3) константа равновесия реакции, в которой А является реагентом;
- 4) константа равновесия реакции, в которой А является продуктом.

Решение

Энергия Гиббса вещества А в нанофазе из-за дополнительного поверхностного давления отличается от энергии жидкости А в макрофазе. Переход к нанофазе увеличивает энергию Гиббса вещества. Увеличение энергии Гиббса приводит к увеличению давления пара и, как следствие, к уменьшению температуры кипения при атмосферном давлении.

Константа равновесия реакции К связана со стандартной энергией Гиббса реакции $\Delta_r G^\circ$:

$$RT \ln K = - \Delta_r G^\circ = - (G^\circ_{\text{прод}} - G^\circ_{\text{реаг}}),$$

где $G^\circ_{\text{прод}}$, $G^\circ_{\text{реаг}}$ – стандартные молярные энергии Гиббса продуктов и реагентов, соответственно. Если растет $G^\circ_{\text{прод}}$, то константа равновесия К уменьшается, то есть равновесие смещается в сторону исходных веществ.

Ответ: 1), 4).

Задача 8. При конденсации тумана, состоящего из капель кадмия, образовалось $12.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ жидкого кадмия. Поверхностное натяжение при температуре конденсации равно 570 мДж/м^2 . Свободная поверхностная

энергия всех капель составляла 53 Дж. Вычислите дисперсность и диаметр капель жидкого кадмия.

Решение

Энергия Гиббса поверхности определяется по уравнению:

$$\Delta G = \sigma \cdot S.$$

Связь между удельной поверхностью $S_{уд}$, поверхностью S , объемом V и дисперсностью D выражается соотношением:

$$S_{уд}^V = S/V = 6D,$$

тогда поверхность капель тумана $S = 6D \cdot V$.

Таким образом $\Delta G = \sigma \cdot S = \sigma \cdot 6D \cdot V$, тогда дисперсность капель

$$D = \Delta G / (6\sigma \cdot V) = 53 / (6 \cdot 570 \cdot 10^3 \cdot 12.5 \cdot 10^{-6}) = 1.24 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}.$$

$$\text{Диаметр капель } d = 1/D = 1 / (1.24 \cdot 10^6) = 8.1 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Ответ: $8.1 \cdot 10^{-7} \text{ м}$

Задача 9. Определите радиус частиц гидрозоля золота, если после установления диффузионно-седиментационного равновесия при 293 К на высоте $H = 8.56 \text{ см}$ концентрация частиц изменяется в e раз. Плотность золота $\rho = 19.3 \text{ г/см}^3$, плотность воды $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$.

Решение

Распределение частиц по высоте при установлении диффузионно-седиментационного равновесия описывается гипсометрическим уравнением. Согласно условию задачи, $v = v_0/e$ и $\ln(v/v_0) = -1$.

С учетом этого выражение для радиуса частиц принимает вид

$$r = \sqrt[3]{\frac{3kT}{4\pi g H (\rho - \rho_0)}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{4 \cdot 3.14 \cdot 9.81 \cdot 8.56 \cdot 10^{-2} (19.3 - 1) \cdot 10^3}} = 3.98 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 3.68 \text{ нм}.$$

Ответ: 3.68 нм.

Задача 10. Удельная поверхность открытых одностенных углеродных нанотрубок равна $1000 \text{ м}^2/\text{г}$, а плотность составляет 1.3 г/см^3 . Считая, что у всего материала отношение объема к поверхности – такое же, как и у одной трубки, оцените диаметр нанотрубки.

Решение

Возьмем 1 г материала, его объем равен $1/1.3 = 0.77 \text{ см}^3 = 7.7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$, а площадь поверхности, по условию, составляет 1000 м^2 . Отношение объема к поверхности:

$$V/S = 7.7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 / 1000 \text{ м}^2 = 7.7 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Открытые одностенные нанотрубки можно представить в виде цилиндра диаметром d и длиной l . Для цилиндра отношение объема к поверхности равно:

$$V/S = ((\pi d^2/4) \cdot l) / (\pi d l) = d/4$$

$$\text{Отсюда } d = 4 \cdot 7.7 \cdot 10^{-10} = 3.1 \cdot 10^{-9} \text{ м} \sim 3 \text{ нм}.$$

На самом деле, у материала отношение V/S больше, чем у одной трубки, так как трубки не могут плотно заполнить весь объем, и между ними

существует свободное пространство. Поэтому реальный диаметр таких нанотрубок – меньше, чем 3 нм.

Ответ: 3 нм.

7.2.4 Примерный перечень вопросов для подготовки к зачету Не предусмотрено учебным планом

7.2.5 Примерный перечень заданий для подготовки к экзамену

1. Систематика и дизайн наноматериалов. Классификация функциональных неорганических наноматериалов по составу, структуре, свойствам и областям применения. Структурная иерархия наноматериалов.

2. Физико-химические принципы конструирования новых материалов. Особенности создания наноматериалов на основе диссипативных структур.

3. Наноструктуры, нанокомпозиты и нанореакторы.

4. Основные технологии получения наноматериалов.

5. Технология консолидированных наноматериалов. Основные области их применения.

6. Технология полупроводниковых наноматериалов и области их применения.

7. Технология полимерных наноматериалов и области их применения.

8. Технология пористых и трубчатых наноматериалов и области их применения.

9. Технология биологических наноматериалов и области их применения.

10. Использование кластерных и ультрадисперсных материалов и нанокомпозитов.

7.2.6. Методика выставления оценки при проведении промежуточной аттестации

(Например: Экзамен проводится по тест-билетам, каждый из которых содержит 10 вопросов и задачу. Каждый правильный ответ на вопрос в тесте оценивается 1 баллом, задача оценивается в 10 баллов (5 баллов верное решение и 5 баллов за верный ответ). Максимальное количество набранных баллов – 20.

1. Оценка «Неудовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал менее 6 баллов.

2. Оценка «Удовлетворительно» ставится в случае, если студент набрал от 6 до 10 баллов

3. Оценка «Хорошо» ставится в случае, если студент набрал от 11 до 15 баллов.

4. Оценка «Отлично» ставится, если студент набрал от 16 до 20 баллов.)

7.2.7 Паспорт оценочных материалов

№ п/п	Контролируемые разделы (темы) дисциплины	Код контролируемой компетенции	Наименование оценочного средства
1	Особенности наноструктуры	ПК-8, ПК-12	Тест, защита реферата
2	Систематика наноматериалов	ПК-8, ПК-12	Тест, защита реферата, защита практического задания
3	Физико-химические принципы конструирования наноматериалов	ПК-8, ПК-12	Тест, защита реферата, защита практического задания
4	Физико-химические свойства наноматериалов	ПК-8, ПК-12	Тест, защита реферата, защита практического задания
5	Основы технологии получения наноматериалов	ПК-8, ПК-12	Тест, защита реферата, защита практического задания
6	Применение наноматериалов	ПК-8, ПК-12	Тест, защита реферата, защита практического задания

7.3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Тестирование осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных тест-заданий на бумажном носителе. Время тестирования 30 мин. Затем осуществляется проверка теста экзаменатором и выставляется оценка согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение стандартных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

Решение прикладных задач осуществляется, либо при помощи компьютерной системы тестирования, либо с использованием выданных задач на бумажном носителе. Время решения задач 30 мин. Затем осуществляется проверка решения задач экзаменатором и выставляется оценка, согласно методики выставления оценки при проведении промежуточной аттестации.

8 УЧЕБНО МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ)

8.1 Перечень учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

1. Кабаяси Н.И. Введение в нанотехнологию/ пер. с яп. А. В. Хачояна; под ред. Л. Н. Патрикеева. -М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005 (Вологда : "Полиграфист", 2005). -134 с.
2. Пул Чарльз П. (мл.), Ф. Оуэнс. Нанотехнологии: учеб. пособие для вузов – М.: Техносфера, 2007. – 375 с.
3. Ковшов А.Н. Основы нанотехнологий в технике: учеб. пособие – М.: Академия, 2011. – 536 с.
4. Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы: учеб. пособие для вузов – М.: Физматлит, 2010. – 452 с.
5. Нанотехнологии: химические, физические, биологические и экологические аспекты : монография / М.Н. Тимофеева, В.Н. Панченко, В.В. Ларичкин, Е.В. Каштанова, Д.А. Немущенко; Новосибирский государственный технический университет. - Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2019. - 283 с.
6. Нанотехнологии и специальные материалы : учебное пособие для вузов / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин, С. А. Вологжанина, А. П. Петкова; под редакцией Ю. П. Солнцева. - Нанотехнологии и специальные материалы ; 2023-07-26. - Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2020. - 336 с.
7. Артамонова О.В. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2016. 100 с.
8. Артамонова О.В. Наномодифицированные структуры неорганических систем твердения строительных композитов: монография [Текст] / О.В. Артамонова, Е.М. Чернышов – Воронеж : Издательство «Научная книга», 2022. – 248 с.

8.2 Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень лицензионного программного обеспечения, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем:

1. Chemnet - официальное электронное издание Химического факультета МГУ <http://www.chem.msu.ru/rus>
2. Справочно-информационный сайт по химии <http://www.alhimikov.net>
3. Артамонова О.В. Химия твердого тела : учебное пособие / Артамонова О.В.. — Москва : Ай Пи Ар Медиа, 2021. — 168 с. — ISBN 978-5-4497-1125-0. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/108355.html> (дата обращения: 03.01.2022). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: <https://doi.org/10.23682/108355>

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА, НЕОБХОДИМАЯ ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Весы технические, весы аналитические, химреактивы, химическая посуда, аквадистиллятор, хроматограф 111, автоматические титраторы, магнитная мешалка, колориметр фотоэлектрический кфк-3, сканирующие зондовые микроскопы "nanoeeducator" (бизнес-инкубатор), сушильный шкаф, электропечь SNOL, иономер И-160, стенды, кино- и видеофильмы, диапроекторы, видеопроектор, компьютер с 2-х или 4-х ядерным процессором, пакет программ HyperChem 6.0, дифрактометр рентгеновский ДРОН-4-07, дериватограф Paulik-Paulik-Erdey Q-1500С, прибор для определения удельной поверхности ПСХ-8.

10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

По дисциплине «Основы нанотехнологий» читаются лекции, проводятся практические занятия.

Основой изучения дисциплины являются лекции, на которых излагаются наиболее существенные и трудные вопросы, а также вопросы, не нашедшие отражения в учебной литературе.

Практические занятия направлены на приобретение практических навыков расчета физико-химических свойств нанодисперсных систем и наноматериалов. Занятия проводятся путем решения конкретных задач в аудитории.

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	Написание конспекта лекций: кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины. Проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь. Обозначение вопросов, терминов, материала, которые вызывают трудности, поиск ответов в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на лекции или на практическом занятии.
Практическое занятие	Конспектирование рекомендуемых источников. Работа с конспектом лекций, подготовка ответов к контрольным вопросам, просмотр рекомендуемой литературы. Прослушивание аудио- и видеозаписей по заданной теме, выполнение расчетно-графических заданий, решение задач по алгоритму.
Самостоятельная работа	Самостоятельная работа студентов способствует

	<p>глубокому усвоения учебного материала и развитию навыков самообразования. Самостоятельная работа предполагает следующие составляющие:</p> <ul style="list-style-type: none"> - работа с текстами: учебниками, справочниками, дополнительной литературой, а также проработка конспектов лекций; - выполнение домашних заданий и расчетов; - работа над темами для самостоятельного изучения; - участие в работе студенческих научных конференций, олимпиад; - подготовка к промежуточной аттестации.
<p>Подготовка к промежуточной аттестации</p>	<p>Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до промежуточной аттестации. Данные перед зачетом с оценкой три дня эффективнее всего использовать для повторения и систематизации материала.</p>

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ п/п	Перечень вносимых изменений	Дата внесения изменений	Подпись заведующего кафедрой, ответственной за реализацию ОПОП