

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе и
образовательным инновациям



О.И. Чуприс

(подпись)

28.07.2018г.
(дата утверждения)

Регистрационный № УД- 5369 /уч.

ТЕРМОДИНАМИКА МАЛЫХ СИСТЕМ

**Учебная программа учреждения высшего образования
по учебной дисциплине для специальности
1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий
Специализация 1-31 04 07 06 Функциональные наноматериалы**

Минск 2018

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 07-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08.2013 г. № 88 и учебного плана специальности 1-31 04 07 Физика наноматериалов и нанотехнологий, утвержденного 30 мая 2013 г., регистрационный номер № G31-143/уч.

СОСТАВИТЕЛИ:

М.С. Тиванов — заведующий кафедрой энергофизики физического факультета Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук;

Е.А. Колесов — младший научный сотрудник НИЛ энергоэффективных материалов и технологий кафедры энергофизики физического факультета Белорусского государственного университета.

РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:

Кафедрой энергофизики Белорусского государственного университета (протокол № 11 от 17 мая 2018 г.);

Советом физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 12 от 28 июня 2018 г.).

Заведующий кафедрой, к.ф.-м.н. доцент



М.С. Тиванов

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа учебной дисциплины «Термодинамика малых систем» разработана для специализации 1-31 04 07 06 «Функциональные наноматериалы» специальности 1-31 04 07 «Физика наноматериалов и нанотехнологий» первой ступени высшего образования.

Цель учебной дисциплины – ознакомление студентов с основами применения термодинамики к описанию свойств малых систем и наноструктур, а также с физико-химическими процессами, протекающими в малых системах. *Основные задачи учебной дисциплины* – овладение понятийно-терминологическими определениями термодинамики и физической химии, формирование представлений об ограничениях классической термодинамики и методах термодинамического описания малых систем.

Классическая термодинамика базируется на предположении о том, что число взаимодействующих частиц в описываемой системе можно считать бесконечным. В том случае, если данный постулат неприменим (система является малой), выражения и методы классической термодинамики требуют уточнений и преобразований. Поскольку в любых устройствах наноэлектроники, накопителей и преобразователей энергии используются элементы микро- и наномасштабов, знание основ термодинамики малых систем является необходимым условием успешной профессиональной деятельности специалиста, имеющего квалификацию «Физик. Инженер» и работающего в области нанотехнологий.

В рамках учебной дисциплины изучаются основные понятия, постулаты, начала термодинамики, основные следствия из них, рассматриваются условия равновесия и устойчивости термодинамических систем, фазовые переходы, типы малых систем, ограничения классической термодинамики, подходы термодинамики к описанию малых систем.

Учебный материал дисциплины основан на знаниях и представлениях, заложенных в следующих дисциплинах: «Молекулярная физика», «Физика атома и атомных явлений», «Термодинамика и статистическая физика». Он является базовым для дисциплин «Тепло- и массообмен в наноструктурированных многофазных средах», «Наноматериалы в энергетике».

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- основные законы термодинамики;
- ограничения классической термодинамики;
- особенности теплофизики малых систем.

уметь:

- решать задачи, связанные с определением термодинамических свойств веществ;
- разрабатывать математические модели тепловых процессов.

владеть:

- навыками применения термодинамических подходов к решению прикладных задач;

– навыками математического моделирования термодинамических свойств наноматериалов.

Освоение учебной дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

академические компетенции:

- уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;
- владеть системным и сравнительным анализом;
- владеть исследовательскими навыками;
- уметь работать самостоятельно;
- иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером;
- обладать навыками устной и письменной коммуникации.

социально-личностные компетенции:

- быть способным к социальному взаимодействию;
- обладать способностью к межличностным коммуникациям;
- быть способным к критике и самокритике.

профессиональные компетенции:

– применять знания теоретических и экспериментальных основ физики наноматериалов и нанотехнологий, методов исследования физических объектов, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы;

– применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической и научно-педагогической работы;

– осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям;

– определять цели инноваций и способы их достижения.

Учебная дисциплина «Термодинамика малых систем» относится к циклу дисциплин специализации.

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины – 128, из них количество аудиторных часов – 48. Количество зачетных единиц – 3,5.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций, семинаров и управляемой самостоятельной работы (УСР). На проведение лекционных занятий отводится 28 часов, на проведение семинаров – 10 часов, на проведение УСР – 10 часов.

Занятия проводятся на 4-м курсе в 8-м семестре.

Форма получения высшего образования – очная, дневная.

Форма текущей аттестации по учебной дисциплине – экзамен в 8-м семестре.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. Исходные положения термодинамики.

1.1 Основные понятия термодинамики. Исходные положения (постулаты) термодинамики. Энергия термодинамической системы, работа, теплота. Термические и калорическое уравнения состояния.

2. Первое начало термодинамики.

2.1 Первое начало термодинамики. Вечный двигатель первого рода. Теплоемкость, энтальпия, закон Гесса.

2.2 Уравнения Кирхгофа. Уравнение теплопроводности.

3. Второе начало термодинамики.

3.1 Второе начало термодинамики. Вечный двигатель второго рода. Формулировки второго начала термодинамики Томсона-Планка и Клаузиуса. Обратимые и необратимые процессы. Принцип Каратеодори.

3.2 Энтропия. Абсолютная термодинамическая температура. Второе начало термодинамики для равновесных процессов. Равенство Клаузиуса. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Неравенство Клаузиуса.

3.3 Цикл и теоремы Карно. Физический смысл энтропии. Уравнение Гюй-Стодолы.

4. Термодинамические потенциалы. Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем.

4.1 Общие условия устойчивого равновесия термодинамической системы. Методы термодинамики. Внутренняя энергия. Первое соотношение Максвелла. Энергия Гельмгольца. Второе соотношение Максвелла. Энергия Гиббса. Третье соотношение Максвелла. Энтальпия. Четвертое соотношение Максвелла. Уравнения Гиббса-Гельмгольца.

4.2 Системы с переменным числом частиц. Химический потенциал. Большой термодинамический потенциал. Уравнение Гиббса-Дюгема. Равновесие системы в отсутствие внешнего поля. Равновесие системы во внешнем поле. Условия устойчивости физически однородной системы (термодинамические неравенства). Принцип Ле Шателье-Брауна.

5. Фазовые переходы.

5.1 Гомогенные и гетерогенные системы. Фазы и компоненты. Условия равновесия фаз химически однородной (однокомпонентной) системы. Фазовые переходы. Правило фаз Гиббса. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.

5.2 Фазовые переходы второго рода. Уравнения Эренфеста. Критическая точка. Условия устойчивости критического состояния. Закон соответствующих состояний. Термодинамически подобные вещества.

5.3 Поверхностное натяжение. Условия равновесия фаз химически однородной (однокомпонентной) системы с учетом поверхностного натяжения. Критический радиус зародыша.

6. Третье начало термодинамики.

6.1 Химическое сродство. Третье начало термодинамики. Недостижимость 0 К.

6.2 Поведение термических коэффициентов при $T \rightarrow 0$ К. Вычисление энтропии и поведение теплоемкостей при $T \rightarrow 0$ К. Вычисление химического сродства.

7. Типы малых систем.

7.1 Трех-, двух-, одно- и нульмерные нанообъекты. Кластеры и кластерные кристаллы. Углеродные наноструктуры.

8. Переход от классической термодинамики к термодинамике малых систем.

8.1 Ограничения классической термодинамики. Отмена термодинамического предела. Формальные преобразования термодинамических потенциалов. Нарушение концепции о фазовых состояниях.

8.2 Сравнение подходов термодинамики малых систем: учет вклада поверхностной энергии, нанотермодинамика Хилла, химический подход, статистическая термодинамика малых систем, неэкстенсивная статистическая термодинамика, учет флуктуационных теорем и динамических уравнений, квантовая термодинамика.

9. Термодинамика наночастиц, наноматериалов и наноструктур.

9.1 Поверхностные слои и межфазные границы. Термодинамика прямых и искривленных поверхностей. Давление насыщенного газа малых частиц. Температура плавления малых частиц.

9.2 Физическая и химическая адсорбция. Кинетика мономолекулярной адсорбции и двумерная конденсация. Полимолекулярная адсорбция. Капиллярная конденсация в мезопористых средах.

9.3 Движущие силы процесса кристаллизации и зародышеобразования. Кинетика процесса зародышеобразования.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Исходные положения термодинамики.	2							
1.1	Основные понятия термодинамики. Исходные положения (постулаты) термодинамики. Энергия термодинамической системы, работа, теплота. Термические и калорическое уравнения состояния.	2						[1-4], [1д], [2д]	
2.	Первое начало термодинамики.	4							
2.1.	Первое начало термодинамики. Вечный двигатель первого рода. Теплоемкость, энтальпия, закон Гесса.	2						[1-4], [1д], [2д]	
2.2	Уравнения Кирхгофа. Уравнение теплопроводности.	2						[1-4], [1д], [2д]	
3.	Второе начало термодинамики.	6					2		
3.1	Второе начало термодинамики. Вечный двигатель второго рода. Формулировки второго начала термодинамики Томсона-Планка и Клаузиуса. Обратимые и необратимые процессы. Принцип Каратеодори.	2						[1-4], [1д-4д]	
3.2	Энтропия. Абсолютная термодинамическая температура. Второе начало термодинамики для равновесных процессов. Равенство Клаузиуса. Второе начало термодинамики для неравновесных процессов. Неравенство Клаузиуса.	2						[1-4], [1д], [2д], [4д]	
3.3	Цикл и теоремы Карно. Физический смысл энтропии. Уравнение Гюй-Стодола.	2						[1-4], [1д-4д]	
	Текущий контроль знаний студентов по разделам «Исходные положения термодинамики», «Первое начало термодинамики» и «Второе начало термодинамики».						2		Контрольная работа

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.	Термодинамические потенциалы. Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем.	4							
4.1.	Общие условия устойчивого равновесия термодинамической системы. Методы термодинамики. Внутренняя энергия. Первое соотношение Максвелла. Энергия Гельмгольца. Второе соотношение Максвелла. Энергия Гиббса. Третье соотношение Максвелла. Энтальпия. Четвертое соотношение Максвелла. Уравнения Гиббса-Гельмгольца.	2						[1-4], [1 д-3 д]	
4.2.	Системы с переменным числом частиц. Химический потенциал. Большой термодинамический потенциал. Уравнение Гиббса-Дюгема. Равновесие системы в отсутствие внешнего поля. Равновесие системы во внешнем поле. Условия устойчивости физически однородной системы (термодинамические неравенства). Принцип Ле Шателье-Брауна.	2						[1-4], [1 д-3 д]	
5.	Фазовые переходы.	6							
5.1.	Гомогенные и гетерогенные системы. Фазы и компоненты. Условия равновесия фаз химически однородной (однокомпонентной) системы. Фазовые переходы. Правило фаз Гиббса. Фазовые переходы первого рода. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.	2						[1-4], [2 д], [3 д]	
5.2.	Фазовые переходы второго рода. Уравнения Эренфеста. Критическая точка. Условия устойчивости критического состояния. Закон соответствующих состояний. Термодинамически подобные вещества.	2						[1-4], [2 д], [3 д]	
5.3.	Поверхностное натяжение. Условия равновесия фаз химически однородной (однокомпонентной) системы с учетом поверхностного натяжения. Критический радиус зародыша.	2						[1-4], [2 д]	
6.	Третье начало термодинамики.	4					2		
6.1.	Химическое сродство. Третье начало термодинамики. Недостижимость 0 К.	4						[2], [3], [5 д]	
6.2	Поведение термических коэффициентов при $T \rightarrow 0$ К. Вычисление энтропии и поведение теплоемкостей при $T \rightarrow 0$ К. Вычисление химического сродства.							[2], [3], [5 д]	
	Текущий контроль знаний студентов по разделам «Термодинамические потенциалы. Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем», «Фазовые переходы» и «Третье начало термодинамики».						2		Контрольная работа

ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рекомендуемая литература

Основная

1. Кричевский И.Р. Понятия и основы термодинамики. М.: Химия, 1970. - 440 с.
2. Базаров И.П. Термодинамика. СПб: Изд-во «Лань», 2010. – 384 с.
3. Байков В.И. Теплофизика: в 2 т. Т.1: Термодинамика, статистическая физика, физическая кинетика / В.И.Байков, Н.В.Павлюкевич; под ред. О.Г.Пенязькова; НАН Беларуси, Ин-т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова. - Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова, 2013. - 399 с.
4. Микрюков В.Е. Курс термодинамики. М.: Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1960. - 236 с.
5. Литвин А.М. Техническая термодинамика. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 312 с.
6. Родунер Э. Размерные эффекты в наноматериалах. М.: Техносфера, 2010. – 352 с.
7. Барыбин А.А. Физико-химия наночастиц, наноматериалов и наноструктур. / А.А. Барыбин, В.А. Бахтина, В.И. Томилин, Н.П. Томилина. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. — 236 с.

Дополнительная

1. Гельфер Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики. М.: «Высшая школа», 1981. – 536 с.
2. Кубо Р. Термодинамика. М.: Мир, 1970. - 304 с.
3. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1964. - 456 с.
4. Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. М.: Едиториал УРСС, 2002. - В 3-х томах.
5. Салем Р.Р. Физическая химия. Термодинамика. М.: Физматлит, 2004. - 352 с.
6. Hill T.L. Thermodynamics of Small Systems. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1965 (ed. 2013) – 210 p.
7. Rusanov A.I. Thermodynamics of graphene. / A.I. Rusanov // Surface Science Reports. – 2014. – Vol. 69. – P. 296–324.

Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности

В качестве средств диагностики и контроля знаний рекомендуется использовать:

1. Выборочный устный контроль на лекциях;
2. Проверка конспектов лекций обучающихся;
3. Проверка домашних заданий;
4. Проверка контрольных работ;
5. Написание и защита реферативных работ.

Примерный перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине

Рекомендуемые разделы для проведения контрольных работ

1. Исходные положения термодинамики.
2. Первое начало термодинамики.
3. Второе начало термодинамики.
4. Термодинамические потенциалы. Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем.
5. Фазовые переходы.
6. Третье начало термодинамики.
7. Типы малых систем.
8. Переход от классической термодинамики к термодинамике малых систем.
9. Термодинамика наночастиц, наноматериалов и наноструктур.

Примерная тематика реферативных работ

1. Классическая термодинамика с учетом вклада поверхностной энергии.
2. Расширение классической термодинамики с учетом «разделительной энергии» – нанотермодинамика Хилла.
3. Химический подход в термодинамике наносистем.
4. Статистическая термодинамика малых систем.
5. Неэкстенсивная статистическая термодинамика с использованием энтропии Цалиса.
6. Неравновесная термодинамика с учетом флуктуационных теорем и динамических уравнений.
7. Квантовая термодинамика.
8. Термодинамика двумерных материалов на примере графена.

Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации

Для текущего контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине рекомендуется использовать контрольные работы по разделам учебной дисциплины, защиту реферативных работ, устные опросы на лекциях. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой учебной дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Контрольные работы проводятся в письменной форме. Каждая из контрольных работ включает в себя 3-5 вопросов. На выполнение контрольной работы отводится 90 минут. По согласованию с преподавателем при подготовке ответа разрешается использовать справочные и учебные издания. Оценка каждой из контрольных работ проводится по десятибалльной шкале.

Защита реферативных работ проводится в форме индивидуальных выступлений-презентаций длительностью до 20 минут с последующей дискуссией. Оценка рефератов проводится по десятибалльной шкале.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждую контрольную работу и оценок за защиту рефератов. При оценке текущей успеваемости 4 балла и более студенты допускаются к экзамену. При оценке ниже 4 баллов решением кафедры студенты не допускаются к экзамену, и им назначается срок выполнения контрольных работ и/или защиты реферативных работ.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена. Экзаменационная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по учебной дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Весовой коэффициент для оценки текущей успеваемости — 0,3; для экзаменационной оценки — 0,7. При всех расчетах округление производится по общепринятым правилам.

ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УВО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Тепло- и массообмен в наноструктурированных многофазных средах	Кафедра энергофизики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Протокол № 11 от 17 мая 2018 г.
Нanomатериалы в энергетике	Кафедра энергофизики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Протокол № 11 от 17 мая 2018 г.

Учебная программа пересмотрена и одобрена на заседании кафедры
(протокол № _____ от _____ 20__ г.)

М.С. ТИВАНОВ

В.М. АНИЩИК