

# ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный университет им. А.М. Горького»

ИОНЦ «Экология и природопользование»

Физический факультет

Кафедра общей и молекулярной физики

**Физика атмосферных аэрозолей**

---

Программа специальной дисциплины

Подпись руководителя ИОНЦ

\_\_\_\_\_ Т.А. Радченко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Екатеринбург

2008

УТВЕРЖДАЮ  
Руководитель ИОНЦ «Экология и природопользование»  
\_\_\_\_\_ Т.А. Радченко  
(подпись)  
\_\_\_\_\_  
(дата)

Программа дисциплины «Физика атмосферных аэрозолей» составлена в соответствии с требованиями федерального/национально-регионального (вузовского) компонента к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки:

дипломированного специалиста по специальностям Физика 010701, Экология 020801, Химия 020101

бакалавра, магистра по направлениям Физика 010700, Экология 020800, Химия 020100

по циклу СД/ДС дисциплин государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования.

Семестр 8

Общая трудоемкость дисциплины 72 часа, в том числе:

Лекций 32 часа

Практических занятий 4 час

Самостоятельная работа 36 часов

Контрольные мероприятия:

Рефераты – нет

Коллоквиумы – нет

Контрольные работы – 2

Другие – нет

Составитель:

С.А. Береснев, к.ф.-м.н., доцент кафедры общей и молекулярной физики Уральского государственного университета

Рекомендовано к печати протоколом заседания

Экспертно-конкурсной комиссии ИОНЦ «Экология и природопользование»

от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г. № \_\_\_\_.

Согласовано:

Зав. кафедрой общей и молекулярной физики  
(название кафедры, реализующей данную дисциплину)

\_\_\_\_\_ С.Ф. Борисов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

## **I. Введение**

1. Цель специальной дисциплины «Физика атмосферных аэрозолей» - изложение фундаментальных знаний и современных представлений в области образования, эволюции и распада природных и антропогенных аэродисперсных систем. Междисциплинарность курса должна отразить взаимосвязь и необходимость использования физических, химических и экологических методов исследования при анализе сложной многокомпонентной динамической системы – атмосферного аэрозоля.

2. Задачи дисциплины:

- а) выделение общих характеристик и классифицирующих признаков для описания аэродисперсных систем, рассмотрение основных морфологических признаков аэрозолей и закономерностей распределения частиц по размерам;
- б) характеристика общих закономерностей двух основных способов образования аэрозолей – диспергационного и конденсационного;
- в) изложение фундаментальных основ процессов движения и эволюции аэродисперсных систем (элементы механики, электродинамики и оптики атмосферных аэрозолей);
- г) описание и раскрытие роли аэрозолей в атмосферных процессах и современных климатических изменениях.

3. Место дисциплины в системе высшего профессионального образования:

Для усвоения спецкурса «Физика атмосферных аэрозолей» необходимо знание курса общей физики (разделы механика, молекулярная физика, термодинамика, электродинамика и оптика) и общей химии; желательным является знание основ кинетической теории газов, гидрогазодинамики, термодинамики и статистической физики, физической и коллоидной химии. В свою очередь, спецкурс «Физика атмосферных аэрозолей» является базовым для студентов, специализирующихся в области физики аэродисперсных систем и физики атмосферных процессов.

4. Требования к уровню освоения содержания курса (приобретаемые компетенции, знания, умения, навыки):

В ходе изучения курса студенты изучают и осваивают:

- основные понятия и термины физики аэродисперсных систем;
- основные закономерности образования аэрозольных частиц в диспергационном и конденсационном способах, основные закономерности процессов эволюции аэродисперсных систем;
- приобретают навыки постановки, решения и анализа базовых задач физики аэрозолей;
- усваивают и закрепляют взаимосвязи между физическими, химическими и экологическими методами исследования, применяемыми к анализу сложной многокомпонентной динамической системы – атмосферного аэрозоля.

5. Методическая новизна спецкурса состоит в рассмотрении разноплановых и разномасштабных физических процессов в атмосферном аэрозоле с единой точки зрения: комплексное описание «жизненного цикла» цикла динамической аэродисперсной системы (образование, эволюция и разрушение системы).

## **II. Содержание курса**

1. Темы курса, их краткое содержание

### **Тема 1. Введение в физику атмосферных аэрозолей**

1.1. Предмет и основные задачи курса

Предмет и задачи курса, его структура. Место физики атмосферного аэрозоля в комплексе атмосферных наук. Этапы развития науки об аэрозолях. Обзор рекомендуемой литературы по курсу.

1.2. Аэрозольные частицы в атмосфере

Общая характеристика распределения аэрозолей в земной атмосфере. Источники, химический и дисперсный состав атмосферных аэрозолей. Морфологические характеристики атмосферных аэрозолей. Тропосферный, стратосферный и мезосферный аэрозоль.

## Тема 2. Общая характеристика и классификации аэродисперсных систем

### 2.1. Определения и классификации аэродисперсных систем

Традиционные описательные определения аэродисперсных систем. Место аэрозолей среди дисперсных систем с точки зрения коллоидной химии и статистической механики.

Классифицирующие признаки для характеристики аэродисперсных систем (классификация по агрегатному состоянию, по кинетическим свойствам дисперсной фазы, по степени дисперсности, по соотношению внутренних структурных элементов системы, по плотности дисперсной фазы, по способу образования, по основным типам аэрозолей – пыли, дымы, туманы). Незамкнутость системы классифицирующих признаков.

### 2.2. Морфологические свойства аэрозолей

*Форма и структура частиц.* Первичные и вторичные аэрозоли. Форма первичных частиц. Фрактало-подобная структура вторичных частиц, их особые физические свойства. Вторичные аэрозоли как объемные фрактальные кластеры. Основные модели образования и роста фрактало-подобных частиц.

*Размер частиц.* Диапазон характерных размеров аэрозолей, классификация по степени дисперсности, различия в основных физических свойствах. Нижняя граница размеров частиц. Молекулярные кластеры как самые малые аэрозольные частицы. Верхняя граница размеров аэрозолей, ее динамический критерий. Характерные размеры частиц сложной формы и структуры. Совокупность характерных диаметров частиц, принципы введения набора эквивалентных диаметров. Атмосферные аэрозоли: дисперсный состав и возможные классификации.

*Поверхностные свойства аэрозолей.* Поверхностные явления в аэрозолях. Удельная поверхность аэрозолей. Показатель дисперсности частиц.

### 2.3. Закономерности распределения частиц по размерам

*«Жизненный цикл» аэрозолей:* образование, эволюция, разрушение аэродисперсных систем. Аэрозоли как неустойчивая многокомпонентная динамическая

система. О невозможности универсального описания распределения по размерам для различных типов и классов аэродисперсных систем.

*Функция распределения частиц по размерам.* Первичные данные о размерах частиц, получаемые различными типами аэрозольных приборов, табличное представление данных, графическое представление данных (гистограммы), экспериментальные функции распределения.

*Математическое представление функций распределения.* Дифференциальные и интегральные функции распределения. Счетная и массовая функции распределения. Их полезность и необходимость при описании аэродисперсных систем.

*Статистические параметры распределения.* Совокупность характерных средних диаметров (модальные и медианные диаметры), дисперсия распределения, коэффициент асимметрии распределения.

*Теоретически обоснованные (модельные) функции распределения.* Распределение Юнге, физическое обоснование, математический вид, возможные обобщения, особенности распределения.

Нормальное распределение для монодисперсного аэрозоля. Источники частиц монодисперсного аэрозоля. Физический критерий монодисперсности частиц. Математический вид распределения, его параметры.

Логарифмически-нормальное распределение. Физические и математические предпосылки, приводящие к идее ЛНР. Результаты Колмогорова и Левина для аэрозолей диспергационного и конденсационного происхождения. Гамма-распределение, его свойства.

*Полуэмпирические и эмпирические функции распределения.* Формулы Гриффитса для порошковых материалов.

### **Тема 3. Образование аэрозолей**

#### **3.1. Диспергационный и конденсационный способы образования аэрозолей**

Их общая характеристика и принципиальные различия.

#### **3.2. Диспергационный способ**

*Диспергирование (распыление, атомизация) жидкостей.* Методы распыления жидкостей (пневматическое, гидравлическое, центробежное, ультразвуковое, электростатическое, распыление с помощью пропеллентов). Рэлеевская неустойчивость поверхности жидкости, ее проявления. Образование морского атмосферного аэрозоля.

*Диспергирование твердых тел.* Механическое измельчение твердых тел. Природа и роль адгезионных сил. Распыление порошков. Образование почвенного атмосферного аэрозоля, явление сальтации частиц.

### 3.3. Конденсационный способ

*Гомогенная конденсация пара.* Пересыщение пара как необходимое условие гомогенной конденсации аэрозолей. Степень пересыщения пара. Уравнение Кельвина, границы его применимости. Модификации уравнения Кельвина. Термодинамический барьер при образовании капель-зародышей жидкой фазы, теория Гиббса. Критическое пересыщение, критический размер зародышей. Неустойчивость равновесия между критическими зародышами жидкой фазы и пересыщенным паром.

Классическая феноменологическая теория спонтанной конденсации пересыщенного пара. Предпосылки создания теории: термодинамические результаты Гиббса, термодинамические и статистические результаты Фольмера и Вебера, теория Беккера и Деринга, кинетический подход Сцилларда и Фаркаша, теория гетерофазных флуктуаций Френкеля. Кинетическое уравнение для скорости нуклеации, упрощенная форма уравнения для модели мономолекулярной конденсации. Приближенные решения задачи. Общий вид выражения для скорости нуклеации в классической феноменологической теории. Обсуждение основных результатов теории (предположения при постановке задачи, границы применимости теории). Современное состояние вопроса.

*Гетерогенная конденсация пара.* Роль ядер конденсации, их классификации. Растворимые и нерастворимые, смешанные ядра. Ионы как ядра конденсации. Роль процессов гетерогенной конденсации в цикле воды в атмосфере. Современное состояние вопроса.

## **Тема 4. Процессы движения и эволюции аэродисперсных систем**

### 4.1. Элементы механики аэрозолей

Предмет и задачи механики аэрозолей. Основные теоретические методы механики аэрозолей. Физико-математические модели, применяемые для описания аэродисперсных систем. Приближение одиночной частицы в бесконечном объеме газа. Основные безразмерные критерии подобия при описании процессов с аэродисперсными системами.

#### 4.1.1. Прямолинейное равномерное движение частиц

Задача Стокса, формула для силы сопротивления, основные допущения и предположения при ее выводе. Режимы движения частицы в зависимости от числа Рейнольдса.

#### 4.1.2. Прямолинейное неравномерное движение частиц

Неравномерное движение при малых числах Рейнольдса. Уравнение Буссинеска. Время механической релаксации частицы, его физический смысл. Квазистационарное движение частицы.

#### 4.1.3. Силы, действующие на частицы в неоднородных газах

Классификация сил: внешние и «внутренние», силы взаимодействия между частицами. Физические явления (термо-, фото-, диффузиофорез). Механизмы возникновения термофореза и фотофореза частиц в различных по числу Кнудсена газокинетических режимах. Возможные проявления фотофореза частиц в атмосфере.

### 4.2. Испарение и конденсационный рост капель

Квазистационарное испарение и рост капель. Необходимые термодинамические условия для испарения или конденсационного роста капель. Теория Максвелла (диффузионный режим испарения). Уравнение Ленгмюра для времени испарения капли. Формула Герца-Кнудсена (кинетический режим испарения). Современное состояние вопроса.

### 4.3. Броуновское движение и диффузия частиц

Причины и характер броуновского движения аэрозольных частиц. Законы, описывающие броуновскую диффузию частиц. Теория броуновского движения

Эйнштейна: результаты для среднего квадрата смещения частицы и коэффициента броуновской диффузии. Броуновское вращение частицы. «Барометрическое» распределение аэрозольных частиц. Влияние массы частицы на коэффициент броуновской диффузии. Кажущийся средний свободный пробег аэрозольной частицы.

#### 4.4. Коагуляция аэрозолей

Классификация типов коагуляции. Кинетика броуновской коагуляции. Теория Смолуховского для моно- и полидисперсного аэрозоля. Скорость и константа коагуляции. Быстрая и медленная коагуляция. Ограничения теории Смолуховского. Самосохраняющееся распределение аэрозольных частиц по размерам с учетом действия броуновской коагуляции. Факторы, влияющие на скорость броуновской коагуляции. Вынужденная коагуляция: кинематическая и ортокINETическая коагуляция. Физические механизмы гравитационной, градиентной и турбулентной коагуляции. Акустическая коагуляция: физические механизмы, зависимость скорости коагуляции от частоты колебаний и величины звукового давления. Электрическая коагуляция: физические механизмы, зависимость скорости коагуляции от величины заряда частицы и напряженности внешнего электрического поля.

#### 4.5. Электрические свойства аэрозолей

Механизмы электризации аэрозолей. Прямая ионизация частиц, статическая электризация, электролитические эффекты, контактная электризация, электризация при распылении жидкостей, электризация трением, ионизация в пламени, столкновения с ионами или ионными кластерами. Механизм униполярной диффузионной зарядки частиц. Отсутствие предельного заряда частицы по теории Уайта. Зарядка частиц в электрическом поле (полевая зарядка). Механизмы и физические закономерности полевой зарядки частиц. Образование ионов в зоне коронного разряда, электрофилтры.

#### 4.6. Оптические свойства аэрозолей

Основные оптические характеристики аэродисперсных систем. Взаимодействие электромагнитного излучения с одиночной частицей: теория Ми, ее основные результаты. Коллективные оптические свойства аэрозолей.

## **Тема 5. Роль аэрозолей в современных климатических изменениях**

5.1. Модель аэрозольно-газовой атмосферы

5.2. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие

5.3. Аэрозольные геоинженерные проекты стабилизации современного климата

2. Темы практических занятий:

1. Закономерности распределения частиц по размерам (2 часа).

2. Использование программы AEROCALC в инженерных расчетах по механике аэрозолей (2 часа).

3. Примеры контрольных вопросов для самостоятельной работы:

### **Лекция 1**

1. Что является объектом исследования в физике атмосферных аэрозолей? Почему данный раздел физики аэрозолей можно выделить в самостоятельное научное направление?

2. По какой причине земная атмосфера не может рассматриваться как чисто газовая система? Насколько принципиальным является вопрос о включении в ее состав атмосферных аэрозолей?

3. По какой причине облачные частицы (капли воды и ледяные кристаллы) и частицы различных типов атмосферного аэрозоля трактуются в физике аэрозолей как различные физические подсистемы? Существует ли принципиальное физико-химическое различие между ними?

4. Какую важнейшую роль атмосферные ядра конденсации и кристаллизации играют в протекании атмосферных процессов?

5. Каково, на ваш взгляд, соотношение между массой газовых компонент и массой аэрозолей в земной атмосфере?

## **Лекция 2**

1. Какие цели преследуют известные классификации дисперсных систем в целом и аэрозолей в частности?
2. Как можно охарактеризовать аэрозоли с точки зрения классификации дисперсных систем, принятой в коллоидной химии?
3. В чем принципиальная разница и сходство с точки зрения данной классификации между аэрозолями и пористыми телами?
4. Какую цель преследует построение системы классифицирующих признаков для аэродисперсных систем? Является ли такая система замкнутой?
5. Аэрозоли и аэрозвеси: для какой дисперсной системы легче формулировать физико-математические модели, описывающие их свойства? В чем разница между этими системами?

## **Лекция 3**

1. Почему для изучения свойств аэрозольных частиц конструктивно использовать модель объемного физического кластера (ОФК)? В чем проявляется принципиальная ограниченность стандартного подхода, основанного на идее эквивалентных диаметров вторичных частиц?
2. Каков физический смысл корреляционной функции для фрактальных частиц? Как оценить требуемые морфологические и теплофизические характеристики вторичных аэрозольных частиц при ее использовании?
3. В чем различие в определениях аэродинамического и стоксовского диаметров частиц? Какой из диаметров чаще используется в аэрозольных измерениях и почему?
4. Попробуйте рационально обосновать границы диапазонов размеров в классификации аэрозольных частиц по степени дисперсности.
5. В чем состоит методическое различие классификаций частиц атмосферного аэрозоля по степени дисперсности и по схеме Уитби?

#### **Лекция 4**

1. Почему до сих пор не существуют универсальные аэрозольные приборы, которые позволяли бы проводить дисперсный анализ для всего диапазона размеров аэрозольных частиц?
2. Каковы размерности различных видов функций распределения? Как они согласуются с общепринятыми обозначениями (см., например, рис. 4.3)?
3. Что является физическим обоснованием для введения в практику распределения Юнге?
4. Для какого вида функций распределения логарифмически-нормальное распределение представимо в виде прямой линии в соответствующих координатах?
5. По каким причинам чисто математическое  $\Gamma$ -распределение так удачно аппроксимирует данные измерений для частиц конденсационного происхождения? Каково соотношение этого распределения и распределения Левина?

#### **Лекции 5-6**

1. Согласуется ли общепринятое утверждение о двух принципиально различных способах образования аэрозолей (конденсационном и диспергационном) с известными данными для атмосферного аэрозоля (в частности, с классификационной схемой Уитби)?
2. В чем заключается универсальность представлений о физических механизмах диспергации жидкости при различных формах ее проявления?
3. Каковы физические причины возникновения неустойчивой формы жидкости на первоначальной стадии развития процесса?
4. Какой физический механизм действует на заключительной стадии образования капельного аэрозоля при диспергации жидкости?
5. Какой из способов распыления жидкостей – пневматический или гидравлический – энергетически более выгоден и почему?
6. Какой физический механизм лежит в основе метода распыления жидкости ультразвуком? В каких еще методах распыления жидкости также проявляется данный механизм?

7. Что такое спрэй? Каково место данного типа аэрозоля в классификационных схемах (это новый тип аэрозоля или его можно отнести к уже известным)?
8. Какова роль пропеллента в диспергации жидкостей в аэрозольных баллончиках? Какие вещества и с какими теплофизическими характеристиками для этого используются?
9. Что означает повсеместно используемое предупреждение «Ozone friendly» на корпусе аэрозольного баллончика?
10. Каковы основные физические механизмы образования частиц морского (океанического) аэрозоля? Какова генетическая взаимосвязь данных частиц и атмосферных ядер конденсации?

### **Лекции 7-8**

1. В чем принципиальная разница образования аэрозолей диспергационным и конденсационным способами?
2. Какова функциональная зависимость давления насыщенного пара над плоской границей раздела фаз от температуры?
3. В чем принципиальная разница между термодинамическими уравнениями Кельвина и Клапейрона–Клаузиуса?
4. Какова область применимости термодинамического уравнения Кельвина? Какие его обобщения вам известны? Для чего необходимы такие обобщения?
5. Каковы основные результаты термодинамической теории Гиббса в задаче гомогенной конденсации? На какой принципиальный вопрос она не в состоянии дать ответ?
6. Используя формализм метода Гиббса, получите уравнение Кельвина.
7. Почему в методе Гиббса используется условие изотермичности процесса? К каким неточностям в описании процесса гомогенной конденсации может привести такой подход?
8. Что такое гомофазные и гетерофазные флуктуации плотности? Какую принципиальную возможность открывает использование концепции гетерофазных флуктуаций в теории гомогенной нуклеации?

9. Кто из исследователей внес существенный и принципиальный вклад в классическую феноменологическую теорию гомогенной нуклеации? Перечислите основные идеи и концепции авторов в этом вопросе.

10. Каковы основные результаты классической феноменологической теории гомогенной нуклеации? Почему она так называется?

### **Лекции 9-10**

1. Какие из этапов «жизненного цикла» аэрозолей целесообразно анализировать методами механики аэрозолей?

2. Какова возможная методология построения феноменологических моделей аэродисперсных систем?

3. В чем могут проявляться недостатки и опасности такого подхода?

4. Какие феноменологические модели дисперсионной среды используются в механике аэрозолей? В чем их сходство и коренное различие?

5. Какие феноменологические модели дисперсной среды наиболее часто используются в механике аэрозолей?

6. Какова, на ваш взгляд, общая процедура использования континуальной модели дисперсной среды в механике аэрозолей? Каково ее соответствие с соответствующей процедурой для модели одиночной частицы в бесконечном объеме газа?

7. Какую цель преследует введение модели «гидрогазодинамики со скольжением» в механике аэрозолей? Почему недостаточно модели на основе классической навье-стоксовской гидрогазодинамики?

8. Какую самостоятельную роль играют безразмерные критерии подобия в задачах механики аэрозолей?

9. В чем заключается сходство и различие числа Рейнольдса и числа Стокса в механике аэрозолей?

10. Являются ли независимыми три основных «газовых» критерия подобия: число Рейнольдса, число Маха и число Кнудсена?

### **Лекция 11**

1. Приведите примеры атмосферных и технологических приложений для проблем испарения и конденсационного роста капель.
2. Как следует понимать термин «квазистационарный режим испарения»? Какие трудности в описании проблемы снимает использование данного приближения?
3. Какие термодинамические условия необходимы для реализации процессов испарения и конденсационного роста капель?
4. Почему капля жидкости может испаряться даже в среде собственного насыщенного пара?
5. Учитывается ли в теории Максвелла структурность (молекулярность) газовой среды? Если учитывается, то на каком уровне описания?

### **Лекция 12**

1. Какие процессы в механике аэрозолей принято называть диффузионными? Участвуют ли в процессе диффузии частиц внешние силы?
2. Что является первопричиной броуновского движения аэрозольных частиц?
3. Каков смысл коэффициента броуновской диффузии частиц в феноменологических законах Фика? Какой подход необходим для расшифровки его структуры?
4. Почему среднее смещение частиц при броуновской диффузии равно нулю?
5. Почему при трехмерном движении среднеквадратичное смещение частиц меньше, чем при одномерном?

### **Лекция 13**

1. В чем различие процессов броуновской и вынужденной коагуляции аэрозольных частиц?
2. Каковы основные предположения теории Смолуховского для кинетики броуновской коагуляции?
3. Как вводится понятие «поглощающей сферы» в теории Смолуховского? Каков ее радиус по сравнению с размером реальной частицы?

4. На каком этапе процесса коагуляции монодисперсного аэрозоля теория Смолуховского обладает максимальной погрешностью?

5. Как зависит от времени числовая концентрация частиц при броуновской коагуляции?

#### **Лекция 14**

1. Перечислите и кратко охарактеризуйте основные механизмы униполярной зарядки аэрозольных частиц.

2. Какие из механизмов зарядки являются наиболее значимыми? Какой критерий можно использовать для данной оценки?

3. Почему наличие в пламени мелких частиц вещества значительно увеличивает концентрацию свободных электрических зарядов?

4. Почему возникает двойной электрический слой вблизи поверхности жидкости? Какую роль он играет в зарядке частиц, образующихся при диспергации жидкости?

5. Почему в теории Уайта для диффузионной зарядки формально отсутствует предел насыщения частицы зарядом? Устраняет ли это свойство более совершенная теория Фукса – Брикарда?

#### **Лекция 15**

1. Что понимается под термином «задача Ми» в оптике аэрозолей?

2. Что является аргументом, а что параметрами в математическом формализме задачи Ми?

3. Что определяют дисперсионные соотношения Крамерса– Кронига?

4. Какая физическая микроскопическая модель лежит в основе теории Ми? Что с этой точки зрения означает суммирование все больших слагаемых в рядах Ми?

5. Как понимать термины «рэлеевское рассеяние» и «рассеяние Ми»? Какому случаю соответствует рассеяние излучения на реальных аэрозольных частицах?

#### **Лекция 16**

1. Попробуйте оценить соотношение масс атмосферного аэрозоля и атмосферных газов.

2. Каков характер термодинамической устойчивости воздушных масс в тропосфере и стратосфере?
3. Какую температуру в действительности покажет стандартный термометр в термосфере?
4. Какой из атмосферных компонентов является основным радиационно-активным газом?
5. Какими основными причинами обусловлено понижение температуры с высотой в тропосфере и возрастание в стратосфере?

4. Примеры вопросов к зачету:

**Билет 1.**

1. Общая характеристика и классификации аэродисперсных систем.
2. Броуновское движение и диффузия аэрозольных частиц.

**Билет 2.**

1. Морфологические свойства аэрозолей.
2. Диспергационный способ образования аэрозолей.

**Билет 3.**

1. Распределение аэрозольных частиц по размерам.
2. Коагуляция аэрозольных частиц: броуновская (тепловая) коагуляция.

**Билет 4.**

1. Теоретически обоснованные функции распределения аэрозольных частиц по размерам.
2. Гетерогенная конденсация пара.

**Билет 5.**

1. Способы образования аэрозолей: конденсационный способ.
2. Предмет и задачи механики аэрозолей.

**Билет 6.**

1. Основные методы механики аэрозолей.
2. Логарифмически-нормальное распределение частиц аэрозоля по размерам.

**Билет 7.**

1. Вынужденная коагуляция аэрозольных частиц.
2. Способы образования аэрозолей: конденсационный способ.

**Билет 8.**

1. Аэрозольные частицы в атмосфере.
2. Система классифицирующих признаков для аэродисперсных систем.

**Билет 9.**

1. Место аэрозолей среди дисперсных систем с точки зрения коллоидной химии и статистической механики.
2. Вторичные частицы как объемные фрактальные кластеры.

**Билет 10.**

1. Атмосферные аэрозоли: дисперсный состав и классификация Уитби.
2. Теоретически обоснованные функции распределения частиц аэрозоля по размерам.

**Билет 11.**

1. Математическое представление функций распределения частиц по размерам.
2. Диспергационный и конденсационный способы образования аэрозолей.

**Билет 12.**

1. Статистические параметры распределения частиц по размерам.
2. Диспергирование (распыление) жидкостей.

**Билет 13.**

1. Полуэмпирические и эмпирические функции распределения частиц по размерам.
2. Диспергирование твердых тел.

**Билет 14.**

1. Условия, необходимые для гомогенной конденсации пара.
2. Силы, действующие на частицы в неоднородных газах. Термофорез аэрозолей.

**Билет 15.**

1. Термодинамическая теория Гиббса гомогенной конденсации в пересыщенном паре.

2. Этапы развития науки об аэрозолях.

**Билет 16.**

1. Классическая феноменологическая теория спонтанной конденсации в пересыщенном паре.

2. Место аэрозолей среди дисперсных систем с точки зрения коллоидной химии и статистической механики

**Билет 17.**

1. Гетерогенная конденсация пара.

2. Система классифицирующих признаков для аэродисперсных систем.

**Билет 18.**

1. Прямолинейное равномерное движение частиц.

2. Форма и структура частиц.

**Билет 19.**

1. Прямолинейное неравномерное движение частиц.

2. Поверхностные свойства аэрозолей.

**Билет 20.**

1. Режимы движения частицы в зависимости от числа Рейнольдса.

2. Функция распределения частиц по размерам.

**Билет 21.**

1. Общая характеристика проблемы испарения и конденсационного роста капель.

2. Классификация типов коагуляции

**Билет 22.**

1. Теория Максвелла для диффузионного режима испарения.

2. Теория броуновской коагуляции Смолуховского для монодисперсного аэрозоля.

**Билет 23.**

1. Уравнение Ленгмюра для времени испарения капли.

2. Коагуляция полидисперсного аэрозоля.

**Билет 24.**

1. Формула Герца–Кнудсена для кинетического режима испарения.
2. Механизмы зарядки аэрозольных частиц.

### Билет 25.

1. Причины и характер броуновского движения аэрозольных частиц.
2. Диффузионная зарядка частиц.

### III. Распределение часов курса по темам и видам работ

№ п/п	Наименование разделов и тем	ВСЕГО (часы)	Аудиторные занятия (часы)		Самостоятельная работа
			в том числе		
			Лекции	Практические занятия	
1	1. Введение в физику атмосферных аэрозолей 1.1. Предмет и основные задачи курса 1.2. Аэрозольные частицы в атмосфере	4	2	0	2
2	2. Общая характеристика и классификации аэродисперсных систем 2.1. Определения и классификации аэродисперсных систем 2.2. Морфологические свойства аэрозолей 2.3. Закономерности распределения частиц по размерам	16	2 2 2	0 0 2	2 2 4
3	3. Образование аэрозолей 3.1. Диспергационный и конденсационный способы образования аэрозолей 3.2. Диспергационный способ 3.3. Конденсационный способ	16	1 3 4	0 0 0	1 3 4
4	4. Процессы движения и эволюции аэродисперсных систем 4.1. Элементы механики аэрозолей 4.2. Испарение и конденсационный рост капель 4.3. Броуновское движение и диффузия частиц 4.4. Коагуляция аэрозолей	28	4 2 2 2	2 0 0 0	6 2 2 2

	4.5.Электрические свойства аэрозолей		1	0	1
	4.6.Оптические свойства аэрозолей		1	0	1
5	5.Роль аэрозолей в современных климатических изменениях	8			
	5.1.Модель аэрозольно-газовой атмосферы		1	0	1
	5.2.Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие		2	0	2
	5.3.Аэрозольные геоинженерные проекты стабилизации климата		1	0	1
	ИТОГО:	72	32	4	36

#### **IV. Форма итогового контроля**

Зачет в конце 8-го семестра

#### **V. Учебно-методическое обеспечение курса**

1. Рекомендуемая литература (основная):

*Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955.

*Фукс Н.А.* Испарение и рост капель в газообразной среде.

М.: Изд-во АН СССР, 1958.

*Грин Х., Лейн В.* Аэрозоли – дымы, пыли и туманы. Л.: Химия, 1972.

*Райст П.* Аэрозоли: введение в теорию. М.: Мир, 1987.

*Белюсов В.В.* Теоретические основы процессов газоочистки.

М: Металлургия, 1988.

*Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г., Швыдкий Д.В.* Теоретические основы очистки газов. М.: Машиностроение-1, 2001.

*Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей.

Л.: Изд. ЛГУ, 1982.

*Ивлев Л.С., Андреев С.Д.* Оптические свойства атмосферных аэрозолей.

Л.: Изд-во ЛГУ, 1986.

*Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А.* Физика атмосферных аэрозольных систем.

СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999.

*Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В.* Атмосферный аэрозоль.

Л.: Гидрометеиздат, 1983.

*Аэрозоль и климат* / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1991.

*Петрянов-Соколов И.В., Сутугин А.Г.* Аэрозоли. М.: Наука, 1989.

## 2. Рекомендуемая литература (дополнительная):

*Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1989.

*Смирнов Б.М.* Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991.

*Амелин А.Г.* Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. М.: Химия, 1972.

*Щёкин А.К., Куни Ф.М., Татьянаенко Д.В.* Термодинамика нуклеации на нерастворимых макроскопических ядрах. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002.

*Алоян А.Е.* Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Курс лекций. М.: ИВМ РАН, 2002.

*Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.

*Бретшнайдер Б., Курфюрст И.* Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль. Л.: Химия, 1989.

*Атмосфера.* Справочник (справочные данные, модели) / Под ред. Ю.С. Седунова и др. Л.: Гидрометеиздат, 1991.

*Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003.

3. Перечень обучающих, контролирующих компьютерных программ, кино- и телефильмов, мультимедиа и т.п.:

компьютерные презентации в формате PowerPoint по каждой лекции.