

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

Физический факультет
Кафедра общей физики



Рабочая программа дисциплины

Статистическая термодинамика неравновесных процессов

направление подготовки: **03.04.02 Физика**
направленность (профиль): **все профили**

Форма обучения
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	144	32	32		58	18	2			2
* Всего 144 часа/4 зачетные единицы, из них: - контактная работа 68 часов										
Компетенции: ОПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

Содержание

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	3
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.	4
5. Перечень учебной литературы	7
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся	8
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «интернет», необходимых для освоения дисциплины.....	8
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	8
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.....	8
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	9

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Статистическая термодинамика неравновесных процессов» предназначена для магистрантов-физиков. В ней рассматриваются базовые знания по отдельным разделам теории неравновесных процессов, а именно: понятие производства и потока энтропии, уравнения баланса энтропии, принципы Онзагера и Кюри – Пригожина, понятие о неравновесных фазовых переходах и диссипативных структурах, о множественности стационарных состояний и гистерезисе, о брюсселяторе и предельном цикле.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося общепрофессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ОПК-1. Способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач, а также владеть основами педагогики, необходимыми для осуществления преподавательской деятельности.	ОПК - 1.1. Применяет фундаментальные знания и новейшие достижения физики для решения научно-исследовательских задач в избранной области. ОПК - 1.2. Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных научно-исследовательских задач.	Знать основы теории термодинамики неравновесных процессов; иметь понятие об основных современных проблемах и новейших достижений физики в области неравновесных процессов. Уметь решать конкретные задачи в области неравновесных процессов; -применять уравнения для описания неравновесных процессов; вычислять избыточное производство энтропии; анализировать устойчивость стационарных состояний; формулировать физические модели, объясняющие то или иное явление.

Всюду, где это допускается уровнем знаний и подготовки студентов, материал лекционного курса увязывается с современными исследованиями в области термодинамики неравновесных процессов. Все практические занятия проводятся в интерактивной форме, на них обсуждаются темы, активно обсуждающийся в текущей профессиональной научной литературе.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Статистическая термодинамика неравновесных процессов» реализуется в осеннем семестре для обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой общей физики. Для успешного освоения курса студенты должны владеть основами термодинамики и молекулярной физики, электродинамики, статистической физики и квантовой механики, математического анализа и линейной алгебры. В свою очередь, дисциплина «Статистическая термодинамика неравновесных процессов» предоставляет студентам теоретические знания и практические навыки в области термодинамики

неравновесных процессов, необходимые для изучения научной литературы и выполнения магистерской диссертации.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)					
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем				
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	144	32	32		58	18	2			10	2
* Всего 144 часа/4 зачетные единицы, из них: - контактная работа 68 часов											
Компетенции: ОПК-1											

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: домашние задания, контрольные работы, задания для самостоятельного решения;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 4 зачетные единицы:

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа обучающегося, не включая период сессии – 58 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 68 часов.

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Всего	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Промежуточная аттестация (в часах)
				Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Равновесные и неравновесные процессы.	1	7	2	2	3	
2	Второе начало термодинамики.	2	7	2	2	3	
3	Линейные неравновесные процессы.	3	7	2	2	3	
4	Явления переноса	4	7	2	2	3	
5	Флуктуации в теории Онзагера.	5	7	2	2	3	
6	Перенос ионов в химических, электрохимических и биологических	6	7	2	2	3	
7	Общий критерий эволюции Гленсдорфа – Пригожина.	7	8	2	2	4	
8	Устойчивость стационарных состояний.	8	8	2	2	4	
9	Слабые магнитные поля как возможная причина нарушения устойчивости в химических системах.	9	8	2	2	4	
10	Множественность стационарных состояний.	10	8	2	2	4	
11	Цепные реакции с вырожденным разветвлением.	11	8	2	2	4	
12	Проблема Рэлея-Бенара.	12	8	2	2	4	
13	Эффект Ганна	13	8	2	2	4	
14	Фотохимические и фотофизические системы под действием света.	14	8	2	2	4	
15	Брюсселятор.	15	8	2	2	4	
16	Реакция Белоусова – Жаботинского,	16	8	2	2	4	
17	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18
18	Консультации в период промежуточной аттестации		2				2
19	Экзамен		2				2
Всего			144	32	32	58	22

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

Лекция 1. Равновесные и неравновесные процессы (2 часа)

Равновесные и неравновесные процессы. Химический потенциал компонентов в разбавленных растворах. Фундаментальное уравнение Гиббса. Сродство химической реакции. Общее условие химического равновесия

Лекция 2. Второе начало термодинамики (2 часа)

Второе начало термодинамики. Производство энтропии и поток энтропии. Принцип локального равновесия. Уравнение баланса энтропии

Лекция 3. Линейные неравновесные процессы (2 часа)

Линейные неравновесные процессы. Принципы Онзагера и Кюри - Пригожина. Стационарные состояния. Теорема Пригожина.

Лекция 4. Явления переноса (2 часа)

Явления переноса. Косвенное взаимодействие необратимых процессов в стационарном состоянии. Диффузия в электролитах. Электрохимический потенциал

Лекция 5. Флуктуации в теории Онзагера (2 часа)

Лекция 6. Перенос ионов в химических, электрохимических и биологических системах. (2 часа)

Перенос ионов в химических, электрохимических и биологических системах на термодинамическом уровне. Перенос ионов через биологические мембраны. Модель Ходжкина – Хаксли

Лекция 7. Общий критерий эволюции Гленсдорфа – Пригожина. (2 часа)

Лекция 8. Устойчивость стационарных состояний (2 часа)

Лекция 9. Слабые магнитные поля как возможная причина нарушения устойчивости в химических системах. (2 часа)

Лекция 10. Множественность стационарных состояний (2 часа)

Множественность стационарных состояний. Неравновесные фазовые переходы в физике и химии.

Лекция 11. Цепные реакции с вырожденным разветвлением (2 часа)

Цепные реакции с вырожденным разветвлением. Гистерезис.

Лекция 12. Проблема Рэлея-Бенара (2 часа)

Конвективная неустойчивость покоящейся жидкости

Лекция 13. Эффект Ганна (2 часа)

Эффект Ганна в полупроводниковом диоде и его применение

Лекция 14. Фотохимические и фотофизические системы под действием света. (2 часа)

Лекция 15. Брюсселятор (2 часа)

Предельные циклы и связанные с ними колебания. Брюсселятор

Лекция 16. Реакция Белоусова-Жаботинского (2 часа)

Реакция Белоусова – Жаботинского, реакция Бриггса – Раушера. Орегонатор.

Программа практических занятий (32 часа)

Занятие 1. Производство энтропии при термических, диффузионных и химических процессах. (2 часа)

- Занятие 2.* Химический потенциал компонентов в идеальных газах и разбавленных растворах. **(2 часа)**
- Занятие 3.* Производство энтропии при наличии конвекции. **(2 часа)**
- Занятие 4.* Применение законов линейной термодинамики. **(2 часа)**
- Занятие 5.* Теорема Пригожина о минимуме производства энтропии. **(2 часа)**
- Занятие 6.* Косвенное взаимодействие необратимых процессов в стационарном состоянии. **(2 часа)**
- Занятие 7.* Вторая вариация энтропии и следствия. **(2 часа)**
- Занятие 8.* Общий критерий эволюции Гленсдорфа – Пригожина. **(2 часа)**
- Занятие 9.* Кинетический потенциал. Потенциал скоростей химических реакций. **(2 часа)**
- Занятие 10.* Избыточное производство энтропии. Термодинамический критерий устойчивости стационарных состояний. **(2 часа)**
- Занятие 11.* Тепловой взрыв. **(2 часа)**
- Занятие 12.* Пробой диэлектриков. **(2 часа)**
- Занятие 13.* Модель Лотки – Вольтерра. **(2 часа)**
- Занятие 14.* Множественность стационарных состояний. Гистерезис. **(2 часа)**
- Занятие 15.* Брюсселятор. Предельный цикл. **(2 часа)**
- Занятие 16.* Диод Ганна. Конвективная неустойчивость неподвижной жидкости. **(2 часа)**

Самостоятельная работа студентов (76 часов)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям, решение задач	58
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы

5.1. Основная литература.

1. Пуртов П.А. Неравновесная химическая термодинамика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013

5.2. Дополнительная литература.

1. Кайзер Дж. Статистическая термодинамика неравновесных процессов. М.: Мир, 1990
2. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика. М.: Наука, 1982
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика т.6. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2006

4. Стратонович Р.Л. Нелинейная неравновесная термодинамика. М.: Наука, 1985

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся

1. Базаров И.П., Геворкян Э.В., Николаев П.Н. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. М.: МГУ, 1997

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

7.1 Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Статистическая термодинамика неравновесных процессов» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется на практических занятиях преподавателем при решении задач (обсуждаются идеи и способы решения задач) и проведении контрольных самостоятельных и домашних работ.

Промежуточная аттестация.

Окончательная оценка работы студента происходит на экзамене. Экзамен проводится в экзаменационную сессию в письменной форме. Итоги промежуточной аттестации (экзамена) оцениваются по пятибалльной шкале

Вопросы в письменной экзаменационной работе подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ОПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня.

Для получения оценки **«отлично»** необходимо развёрнуто ответить на три вопроса и решить без ошибок задачу (продвинутый уровень освоения компетенций).

Для получения оценки **«хорошо»** нужно развернуто ответить на два вопроса из трех и решить задачу. Допускается несколько несущественных ошибок (базовый уровень освоения компетенций).

Для получения оценки **«удовлетворительно»** за ответы на вопросы, содержащиеся в билете, необходимо:

- ответить хотя бы на один вопрос в билете по теории и решить задачу, при решении задачи допускаются ошибки, не влияющие на общий способ предлагаемого решения (пороговый уровень освоения компетенций).

Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ОПК - 1.1. Применяет фундаментальные знания и новейшие достижения физики для решения научно-исследовательских задач в избранной области.	Знать основы теории термодинамики неравновесных процессов; иметь понятие об основных современных проблемах и новейших достижениях физики в области неравновесных процессов.	Проведение контрольных работ, проверка домашних заданий, экзамен.

<p>ОПК - 1.2. Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных научно-исследовательских задач.</p>	<p>Уметь решать конкретные задачи в области неравновесных процессов; -применять уравнения для описания неравновесных процессов; вычислять избыточное производство энтропии; анализировать устойчивость стационарных состояний; формулировать физические модели, объясняющие то или иное явление.</p>	<p>Проведение контрольных работ, проверка домашних заданий, экзамен.</p>
---	---	--

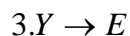
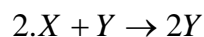
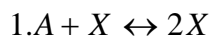
10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Статистическая термодинамика неравновесных процессов».

Таблица 10.2

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
ОПК-1.1	Полнота знаний	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/ несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
ОПК 1.2	Наличие умений	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.

10.3 Примеры задач для практических занятий и домашних заданий.

Задача. Рассмотреть модель Лотка - Вольтера, считая, что первая реакция в этой модели является обратимой, а вторая и третья необратимыми. Константы всех реакций известны (k_1, k_{-1}, k_2, k_3). Концентрации A и E , а также температура поддерживаются постоянными.



Найти стационарные концентрации X и Y . Считая, что обратная реакция является медленным процессом, найти частоту колебаний, характерное время перехода системы к стационарному состоянию (время релаксации) и оценить число колебаний. Сформулировать условие отсутствия колебаний. Вычислить производство энтропии $d_X P$ и дать ему интерпретацию. Вычислить избыточное производство энтропии. Сравнить результаты с полностью необратимой моделью.

Задача. Для твердого тела в электрическом поле при постоянной температуре доказать соотношение $\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\delta^2 S) = \delta_X P$.

Задача. Найти условие пробоя диэлектрика, проводимость которого растет с температурой по линейному закону: $\sigma = \sigma_0(1 + \beta(T - T_0))$, $\beta > 0$. T – температура диэлектрика, T_0 – температура окружающей среды. Перенос тепла от диэлектрика характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , т. е. плотность потока тепла равна $j_q = \alpha(T - T_0)$. Объем диэлектрика V , площадь поверхности S .

Задача. В некотором полупроводнике имеется две зоны проводимости с разными подвижностями электронов μ_1 и μ_2 . Под действием электрического поля электроны могут переходить из первой зоны во вторую. Концентрация электронов в первой зоне зависит от напряженности электрического поля по закону $n_1 = n_0 \frac{1}{1 + \alpha E^2}$, где n_0 – полная концентрация электронов. Используя представление об избыточном производстве энтропии найти условие устойчивости стационарного тока. При каком минимальном отношении μ_1 / μ_2 возможно нарушение устойчивости? Температуру считать постоянной.

Задание для самостоятельного решения

1. Термодинамическая система состоит из двух подсистем, представляющих собой бесконечные параллельные пластины одинаковой толщины h , разделенные теплопроводящей плоскостью. Теплообмен между подсистемами характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , т.е. плотность потока тепла равна $I_q = \alpha(T_1 - T_2)$, где T_1 – температура первой подсистемы, T_2 – температура второй подсистемы. Теплообмен между подсистемами и окружающей средой характеризуется таким же коэффициентом теплоотдачи α . Теплоемкость единицы объема каждой подсистемы одинакова и равна c . Найти производство энтропии на единицу площади и плотность потока энтропии в произвольный момент времени. Найти изменение энтропии (на единицу площади) при переходе системы к равновесию. Начальные температуры подсистем T_1^0 и T_2^0 , а температура окружающей среды поддерживается равной $T^0 = (T_1^0 + T_2^0) / 2$.
2. Для обратимого процесса переноса энергии электронного возбуждения между частицами M и N в почти идеальном газе вычислить производство энтропии. Система находится в термостате при температуре T . Уравнение процесса имеет вид:



где M и N - основное состояние частиц, а M^* и N^* - возбужденное состояние. Константа скорости прямого процесса равна $k_+(T)$, а обратного - $k_-(T)$. В начальный момент времени все частицы M находятся в возбужденном состоянии, а их количество равно половине моля, напротив все частицы N находятся в основном состоянии, а их количество также равно половине моля. Чему равно полное производство энтропии при переходе системы в состояние равновесия? Вычислить изменение энтропии при переходе системы в состояние равновесия.

3. В некотором твердом теле имеется два вида носителей заряда: электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Выразить полные значения проводимости σ , коэффициента Зеебека α и коэффициента теплопроводности κ через соответствующие индивидуальные характеристики электронов и дырок: $\sigma_i, \alpha_i, \kappa_i$ ($i = 1, 2$). Локальная температура равна T . Градиенты электрохимических потенциалов для электронов и дырок считать по абсолютной величине одинаковыми.

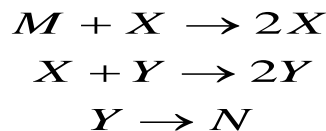
4. Показать, что второй дифференциал энтропии для открытой термодинамической системы можно записать так

$$d^2S = -\frac{1}{T} \left(\frac{c_v}{T} (dT)^2 + \frac{1}{\chi V} (dV)_{N_i}^2 + \sum_{i,j} \mu_{ij} dN_i dN_j \right)$$

где c_v - теплоемкость при постоянном объеме, χ - изотермическая сжимаемость,

$$\mu_{ij} = \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial N_j} \right)_{p,T,(N_j)}, \quad (dV)_{N_i} = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_{p,N_i} dT + \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_{T,N_i} dp.$$

5. Показать, что в рамках необратимой модели Лотка-Вольтерра



среднее производство энтропии за период равно производству энтропии в стационарном состоянии.

6. Найти напряженность электрического поля, при котором происходит пробой цилиндрического диэлектрика радиуса r . Проводимость диэлектрика растет с температурой по закону $\sigma = \sigma_0 \exp(\beta(T - T_0))$, где β - некоторая константа, а σ_0 - проводимость при температуре окружающей среды. Коэффициент теплопроводности вещества k .

7. В некотором полупроводнике имеется две зоны проводимости с разными подвижностями электронов μ_1 и μ_2 . Под действием электрического поля электроны могут переходить из первой зоны во вторую. Концентрация электронов в первой зоне зависит от напряженности электрического поля по закону $n_1 = n_0 \frac{1}{1 + \alpha E^k}$, где n_0 - полная концентрация электронов, $k > 0$. Используя представление об избыточном производстве энтропии найти условие устойчивости стационарного тока. При каком значении k возможно нарушение устойчивости? При каком минимальном отношении μ_1 / μ_2 возможно нарушение устойчивости? Температуру считать постоянной.

8. В шаре радиуса R распределены источники тепла с объемной интенсивностью, равной $Q = Q_0(1 + \beta(T - T_0))$, где Q_0 и β – постоянные. Поверхность шара поддерживается при постоянной температуре T_0 . При каком условии возможно установление стационарного распределения температуры в шаре? Коэффициент теплопроводности вещества χ .

9. Найти критическое число Рэлея $R = \frac{\alpha\beta gr^4}{\chi\nu}$ для возникновения конвекции в жидкости в бесконечной вертикальной цилиндрической трубе, вдоль которой поддерживается постоянный градиент температуры, равный β . (α – температурный коэффициент расширения вещества, $\chi = \frac{k}{\rho}$ – теплопроводность, $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ – кинематическая вязкость, g – ускорение свободного падения, r – радиус трубы). Стенки трубы идеально проводят тепло.

Пример вариантов письменной экзаменационной работы

Экзаменационная работа предполагает несколько вариантов. Каждый вариант состоит из 3 теоретических вопросов и задачи. Везде необходим подробный вывод формул.

Вариант 1

1. Теорема Пригожина о минимуме производства энтропии.
2. Модель Лотки – Вольтерра. Затухающие колебания.
3. Производство энтропии при наличии конвекции.
4. В шаре радиусом R идет химическая реакция, объемная скорость которой зависит от температуры по закону $w = w_0(1 + \beta(T - T_0)^2)$, β – положительная постоянная, T – температура шара, которую считать одинаковой во всех точках шара, T_0 – температура окружающей среды. Сродство реакции равно A , считать, что оно остается постоянным. Считать, что теплообмен с окружающей средой осуществляется только через поверхность шара и характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , т.е. плотность потока тепла равна $j_q = \alpha(T - T_0)$. Используя представление об избыточном производстве энтропии, найти условие теплового взрыва.

Вариант 2.

1. Диод Ганна.
2. Общий критерий эволюции Гленсдорфа – Пригожина.
3. Диффузия в растворах электролитов.
4. Система состоит из двух проводников, соединенных последовательно. Длина первого l , площадь сечения S . второго - $2l$, площадь сечения $2S$. В первом проводнике связь между плотностью тока и напряженностью электрического поля линейна, $j = \sigma E$, а во втором – нелинейна, $j = \sigma E - \alpha E^2$. Исходя из представления об избыточном производстве энтропии,

найти, при каком внешнем напряжении стационарный ток неустойчив? Температура постоянна.

Теоретические вопросы к экзамену

1. Производство энтропии и поток энтропии. Уравнение баланса энтропии.
2. Производство энтропии при термических, диффузионных и химических процессах
3. Химический потенциал компонентов в идеальных газах и разбавленных растворах.
4. Производство энтропии при наличии конвекции
5. Линейная неравновесная термодинамика. Принципы Онзагера и Кюри - Пригожина.
6. Применение законов линейной термодинамики (электропроводность, теплопроводность, диффузия, эффект Зеебека, термо-ЭДС, термодиффузия, бародиффузия и др.).
7. Диффузия в растворах электролитов
8. Теорема Пригожина о минимуме производства энтропии.
9. Косвенное взаимодействие необратимых процессов в стационарном состоянии
10. Вторая вариация энтропии и следствия.
11. Флуктуации в теории Онзагера. Обоснование принципа Онзагера.
12. Общий критерий эволюции Гленсдорфа – Пригожина
13. Кинетический потенциал. Потенциал скоростей химических реакций.
14. Избыточное производство энтропии. Термодинамический критерий устойчивости стационарных состояний
15. Тепловой взрыв.
16. Пробой диэлектриков
17. Неравновесные фазовые переходы. Диссипативные структуры.
18. Модель Лотки – Вольтерра. Затухающие колебания
19. Множественность стационарных состояний в цепных реакциях. Гистерезис
20. Брюсселятор. Предельный цикл. Реакция Белоусова – Жаботинского.
21. Диод Ганна
22. Бьющееся ртутное «сердце»
23. Проблема Бенара. Конвективная неустойчивость неподвижной жидкости. Обобщение критерия устойчивости стационарных состояний.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы по дисциплине
«Статистическая термодинамика неравновесных процессов»
по направлению подготовки 03.04.02 Физика
направленность (профиль): все профили подготовки**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного