

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



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ

направление подготовки: **03.04.01 Прикладные математика и 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
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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, 2025

## **Содержание**

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с установленными в программе индикаторами достижения компетенций .....	3
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы .....	3
3. Трудоемкость дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося .....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	4
5. Перечень учебной литературы .....	6
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся ..	6
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины .....	6
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине .....	6
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине .....	7
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	7
Приложение 1. Аннотация.....	16
Приложение 2 Оценочные средства по дисциплине	

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с установленными в программе индикаторами достижения компетенций

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК-1.</b> Способен применять фундаментальные и прикладные знания в области физико-математических и (или) естественных наук для решения профессиональных задач, в том числе в сфере педагогической деятельности.</p>	<p><b>ОПК - 1.1.</b> Применяет фундаментальные и прикладные знания, новейшие достижения в области физико-математических и естественных наук для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности.</p> <p><b>ОПК - 1.2.</b> Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности.</p>	<p><b>Знать</b> основы теории термодинамики неравновесных процессов; иметь понятие об основных современных проблемах и новейших достижений физики в области неравновесных процессов.</p> <p><b>Уметь</b> 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>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Статистическая термодинамика неравновесных процессов» является одной из дисциплин по выбору по направлению подготовки 03.04.01 Прикладные математика и физика. Курс «Статистическая термодинамика неравновесных процессов» развивает знания, умения и навыки, сформированные у обучающихся по результатам общей базовой подготовки в рамках программ бакалавриата. 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 зачетных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающегося**

Трудоемкость дисциплины – 4 з.е. (144 ч)

Форма промежуточной аттестации: 1 семестр – экзамен

Таблица 3.1

№	Вид деятельности	Семестр
		4
1	Лекции, ч	32
2	Практические занятия, ч	32
3	Лабораторные занятия, ч	
4	Занятия в контактной форме, ч, из них	68
5	из них аудиторных занятий, ч	64
6	в электронной форме, ч	-
7	консультаций, час.	2
8	промежуточная аттестация, ч	2
9	Самостоятельная работа, час.	76
10	Всего, ч	144

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

Лекции (32 ч)

Таблица 4.1

Наименование темы и их содержание	Объем, час
<i>Лекция 1. Равновесные и неравновесные процессы</i>	
Равновесные и неравновесные процессы. Химический потенциал компонентов в разбавленных растворах. Фундаментальное уравнение Гиббса. Сродство химической реакции. Общее условие химического равновесия	2
<i>Лекция 2. Второе начало термодинамики</i>	
Второе начало термодинамики. Производство энтропии и поток энтропии. Принцип локального равновесия. Уравнение баланса энтропии	2
<i>Лекция 3. Линейные неравновесные процессы</i>	
Линейные неравновесные процессы. Принципы Онзагера и Кюри - Пригожина. Стационарные состояния. Теорема Пригожина.	2
<i>Лекция 4. Явления переноса</i>	
Явления переноса. Косвенное взаимодействие необратимых процессов в стационарном состоянии. Диффузия в электролитах. Электрохимический потенциал	2
<i>Лекция 5. Флуктуации в теории Онзагера</i>	
<i>Лекция 6. Перенос ионов в химических, электрохимических и биологических системах.</i>	
Перенос ионов в химических, электрохимических и биологических системах на термодинамическом уровне. Перенос ионов через биологические мембранны. Модель Ходжкина – Хаксли	2
<i>Лекция 7. Общий критерий эволюции Глендорфа – Пригожина.</i>	
<i>Лекция 8. Устойчивость стационарных состояний.</i>	

<i>Лекция 9. Слабые магнитные поля как возможная причина нарушения устойчивости в химических системах.</i>	2
<i>Лекция 10. Множественность стационарных состояний</i>	
Множественность стационарных состояний. Неравновесные фазовые переходы в физике и химии.	2
<i>Лекция 11. Цепные реакции с вырожденным разветвлением</i>	
Цепные реакции с вырожденным разветвлением. Гистерезис.	2
<i>Лекция 12. Проблема Рэлея-Бенара.</i>	
Конвективная неустойчивость покоящейся жидкости	2
<i>Лекция 13. Эффект Ганна.</i>	
Эффект Ганна в полупроводниковом диоде и его применение	2
<i>Лекция 14. Фотохимические и фотофизические системы под действием света.</i>	2
<i>Лекция 15. Брюсселятор</i>	
Предельные циклы и связанные с ними колебания. Брюсселятор	2
<i>Лекция 16. Реакция Белоусова-Жаботинского.</i>	
Реакция Белоусова – Жаботинского, реакция Бриггса – Раушера. Оргонатор.	2

Практические занятия (32 ч)

Таблица 4.2

Содержание практического занятия	Объем, час
<i>Занятие 1.</i> Производство энтропии при термических, диффузионных и химических процессах.	2
<i>Занятие 2.</i> Химический потенциал компонентов в идеальных газах и разбавленных растворах.	2
<i>Занятие 3.</i> Производство энтропии при наличии конвекции.	2
<i>Занятие 4.</i> Применение законов линейной термодинамики.	2
<i>Занятие 5.</i> Теорема Пригожина о минимуме производства энтропии.	2
<i>Занятие 6.</i> Косвенное взаимодействие необратимых процессов в стационарном состоянии.	2
<i>Занятие 7.</i> Вторая вариация энтропии и следствия.	2
<i>Занятие 8.</i> Общий критерий эволюции Гленсдорфа – Пригожина.	2
<i>Занятие 9.</i> Кинетический потенциал. Потенциал скоростей химических реакций.	2
<i>Занятие 10.</i> Избыточное производство энтропии. Термодинамический критерий устойчивости стационарных состояний.	2
<i>Занятие 11.</i> Тепловой взрыв.	2
<i>Занятие 12.</i> Пробой диэлектриков.	2
<i>Занятие 13.</i> Модель Лотки – Вольтерра.	2
<i>Занятие 14.</i> Множественность стационарных состояний. Гистерезис.	2
<i>Занятие 15.</i> Брюсселятор. Предельный цикл.	2
<i>Занятие 16.</i> Диод Ганна. Конвективная неустойчивость неподвижной жидкости.	2

Самостоятельная работа студентов (38 ч)

Таблица 4.4

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

## **5. Перечень учебной литературы**

1. Пуртов П.А. Неравновесная химическая термодинамика [Текст: электронный ресурс]: учебное пособие: [для студентов физических факультетов университетов] / П.А. Пуртов; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. хим. и биол. Физики Электрон. дан. (1 файл) (Новосибирск : РИЦ НГУ, 2016) Загл. с экрана Библиогр.: с.150-151 Цифровая копия издания: Пуртов П.А. Неравновесная химическая термодинамика: учебное пособие. - Новосибирск: РИЦ НГУ, 2013. - 153 с.: ил.; 20 см.- Фондодержатель: НБ НГУ Текстовые электрон. данные Режим доступа: <http://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-930/page001.pdf>

## **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся**

2. Кайзер Дж. Статистическая термодинамика неравновесных процессов = Statistical Thermodynamics of Nonequilibrium Processes / Дж. Кайзер; пер. с англ. Ю. А. ДаниловаМ.: Мир, 1990607 с.: табл.; 22 см. Библиогр. в конце глав. ISBN 5-03-001436-5 (2 экз)
3. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика: учебное пособие для студентов физических специальностей высших учебных заведений / Ю.Л. Климонтович Москва: Наука, 1982608 с.: ил.; 22 см. Библиогр.: с.604-606Предм. указ.: с.607-608 (7 экз)
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика т.6. Гидродинамика. М.: Физматлит, 2006 (3 экз)
5. Стратонович Р.Л. Нелинейная неравновесная термодинамика / Р.Л. Стратонович Москва: Наука, 1985477, [2] с.: ил.; 22 см. Библиогр.: с.475-478 (87 назв.) Предм. указ.: с.479.Текст (визуальный): непосредственный (2 экз)
6. 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**

### ***7.1 Ресурсы сети Интернет***

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
  - образовательные интернет-порталы;
  - информационно-телекоммуникационная сеть Интернет;
  - «Российская национальная платформа открытого образования» (<http://openedu.ru/>), edX ([www.edx.org](http://www.edx.org));
  - Веб-страницы ведущих международных центров СИ.
- Взаимодействие обучающегося с преподавателем (синхронное и (или) асинхронное) осуществляется через личный кабинет студента в ЭИОС, электронную почту.

### ***7.2 Современные профессиональные базы данных:***

Не используются.

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

### ***8.1 Перечень программного обеспечения***

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий приложения для работы с документами и презентациями.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

## **8.2 Информационные справочные системы**

Не используются.

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

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, занятий семинарского типа, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой 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**

Перечень результатов обучения по дисциплине и индикаторов их достижения представлен в разделе 1.

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### **Текущий контроль успеваемости:**

Текущий контроль успеваемости осуществляется контролем посещения занятий обучающимся и выполнения запланированных работ, в том числе: 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 развёрнуто 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.

**Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине**

Таблица 10.1

Код компетенции	Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочное средство
ОПК- 1	<b>ОПК - 1.1.</b> Применяет фундаментальные и прикладные знания, новейшие достижения в области физико-математических и естественных наук для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности.	<b>Знать</b> основы теории термодинамики неравновесных процессов; иметь понятие об основных современных проблемах и новейших достижений физики в области неравновесных процессов.	Контрольная работа, домашнее задание, экзамен.
	<b>ОПК - 1.2.</b> Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности.	<b>Уметь</b> 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.	Контрольная работа, домашнее задание, экзамен.

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Шкала оценивания
<p><b>Решение заданий:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– задание решено правильно,</li> <li>– работа оформлена аккуратно, четкие рисунки и чертежи,</li> <li>– осмыслинность, логичность и аргументированность изложения материала,</li> <li>– точность и корректность применения терминов и понятий.</li> </ul> <p>«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы. В ответах на</p>	<i>Отлично</i>

вопросы преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.

**Письменная контрольная (тестовая) работа:**

- не менее 95% ответов должны быть правильными.

**Экзамен:**

- самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, отсутствие затруднений в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,
- точность и корректность применения терминов и понятий,
- наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы.

При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.

*Хорошо*

**Решение заданий:**

- задание решено правильно,
- работа оформлена аккуратно, четкие рисунки и чертежи,
- осмысленность, логичность и аргументированность изложения материала, наличие затруднений в формулировке собственных суждений,
- точность и корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок.

«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. Отвечает на дополнительные вопросы.

В ответах на вопросы преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.

**Письменная контрольная (тестовая) работа:**

- не менее 80% ответов должны быть правильными.

**Экзамен:**

- самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, наличие затруднений в объяснении отдельных процессов и явления, а также при формулировке собственных суждений,
- точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок,
- наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок.

*Удовлетворительно*

**Решение заданий:**

- задание решено правильно,
- работа оформлена неаккуратно
- неосознанность и неосновательность выбранных методов анализа,
- нет осмысленности в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации,
- корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок.

«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. При ответах на вопросы допускает ошибки

**Письменная контрольная (тестовая) работа:**

- не менее 50% ответов должны быть правильными.

**Экзамен:**

- теоретический и фактический материал в слабой степени подкреплен ссылками на научную литературу и источники,
- частичное понимание и неполное изложение причинно-следственных связей,
- самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, в объяснении процессов и явлений, а также затруднений при формулировке собственных суждений,
- корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок,
- наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы.

**Решение задач:**

- задание решено неправильно,
- компилитивное, неосмысленное, нелогичное и неаргументированное изложение материала,
- грубые ошибки в применении терминов и понятий,  
«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. На дополнительные вопросы не отвечает.

*Неудовлетво  
-рительно*

**Письменная контрольная (тестовая) работа:**

- присутствие многочисленных ошибок (более 70% ответов содержат ошибки).

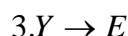
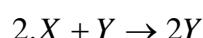
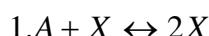
**Экзамен:**

- фрагментарное и недостаточное представление теоретического и фактического материала, не подкрепленное ссылками на научную литературу и источники,
- непонимание причинно-следственных связей,
- отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала,
- грубые ошибки в применении терминов и понятий,
- отсутствие ответов на дополнительные вопросы.

***Типовые контрольные задания и иные материалы, необходимые для оценки  
результатов обучения***

**Примеры задач для практических занятий**

Задача. Рассмотреть модель Лотка - Вольтерра, 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

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\delta^2 S) = \delta_x P$$

соотношение .

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  $\alpha$ , 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  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . 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  $\mu_1 / \mu_2$  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  $\alpha$ , 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  $\alpha$ . 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.

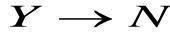
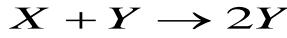
3. В некотором твердом теле имеется два вида носителей заряда: электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Выразить полные значения проводимости  $\sigma$ , коэффициента Зеебека  $\alpha$  и коэффициента теплопроводности  $\kappa$  через соответствующие индивидуальные характеристики электронов 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,  $\chi$  – 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  $\beta$  – некоторая константа, а  $\sigma_0$  – проводимость при температуре окружающей среды. Коэффициент теплопроводности вещества  $k$ .
7. В некотором полупроводнике имеется две зоны проводимости с разными подвижностями электронов  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . 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  $\mu_1 / \mu_2$  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  $\beta$  – постоянные. Поверхность шара поддерживается при постоянной температуре  $T_0$ . При каком условии возможно установление стационарного распределения температуры в шаре? Коэффициент теплопроводности вещества  $\chi$ .

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  $\beta$ . ( $\alpha$  – температурный коэффициент расширения вещества,  $\chi = \frac{k}{\rho}$  – температуропроводность,  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$  – 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  $w = w_0(1 + \beta(T - T_0)^2)$ ,  $\beta$  – 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  $\alpha$ , 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 ФГОС ВО, хранятся на кафедре-разработчике РПД в электронном виде.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации (приложение 2), предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям ФГОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

## Лист актуализации рабочей программы дисциплины «Статистическая термодинамика неравновесных процессов»

## Аннотация

**к рабочей программе дисциплины**  
**«Статистическая термодинамика неравновесных процессов»**  
**Направление подготовки: 03.04.01 Прикладные математика и физика**  
**направленность (профиль): все профили**

Программа дисциплины «Статистическая термодинамика неравновесных процессов» составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО к уровню магистратуры по направлению подготовки **03.04.01 Прикладные математика и физика**, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ) кафедрой общей физики в осеннем семестре для студентов 1 курса магистратуры.

Цель курса- познакомить магистрантов-физиков с базовыми знаниями по отдельным разделам теории неравновесных процессов, а именно: понятием производства и потока энтропии, уравнения баланса энтропии, принципами Онзагера и Кюри – Пригожина, понятием 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
<b>ОПК-1.</b> Способен применять фундаментальные и прикладные знания в области физико-математических и (или) естественных наук для решения профессиональных задач, в том числе в сфере педагогической деятельности.	<p><b>ОПК - 1.1.</b> Применяет фундаментальные и прикладные знания, новейшие достижения в области физико-математических и естественных наук для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности.</p> <p><b>ОПК - 1.2.</b> Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности.</p>	<p><b>Знать</b> основы теории термодинамики неравновесных процессов; иметь понятие об основных современных проблемах и новейших достижений физики в области неравновесных процессов.</p> <p><b>Уметь</b> решать конкретные задачи в области неравновесных процессов;</p> <p>-применять уравнения для описания неравновесных процессов; вычислять избыточное производство энтропии; анализировать устойчивость стационарных состояний; формулировать физические модели, объясняющие то или иное явление.</p>

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины 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 / **144** академических часа.