

«

»

“ ”

“ ”

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Квантовая механика

: 11.03.04

, :

: 3, : 5

| | | |
|-----------|---------|----------|
| | | |
| | | 5 |
| 1 | () | 5 |
| 2 | | 180 |
| 3 | , . | 117 |
| 4 | , . | 72 |
| 5 | , . | 36 |
| 6 | , . | 0 |
| 7 | , . | 18 |
| 8 | , . | 2 |
| 9 | , . | 7 |
| 10 | , . | 63 |
| 11 | (, ,) | . |
| 12 | | |

(): 11.03.04

218 12.03.2015 ., : 07.04.2015 .

: 1,

(): 11.03.04

, 5 20.06.2017

, 6 21.06.2017

:

,

:

. . . ., . -

:

. . . .

1.

1.1

| | |
|--|---|
| Компетенция ФГОС: ОПК.1 способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики; в части следующих результатов обучения: | |
| 2. | , |
| 1. | |
| Компетенция ФГОС: ОПК.2 способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат; в части следующих результатов обучения: | |
| 3. | |
| 2. | |
| Компетенция ФГОС: ПК.1 способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования; в части следующих результатов обучения: | |
| 4. | , |

2.

2.1

| | | |
|--|---|---|
| | (| |
| | , |) |

| | |
|--|-----|
| .1. 2 | , |
| 1. Основные положения квантовой механики и статистической физики | ; ; |
| .1. 1 | |
| 2. Решать уравнение Шредингера | ; ; |
| .2. 3 | |
| 3. Математическое моделирование физических явлений | ; ; |
| .2. 2 | |
| 4. Описывать процессы в газах и твердых телах | ; ; |
| .1. 4 | , |
| 5. Создания моделей физических процессов | ; ; |

3.

3.1

| | | | | |
|-----|---|---|--|--|
| | , | . | | |
| : 5 | | | | |
| : | | | | |

| | | | | | |
|----|---|---|----|------|--|
| 1. | | 0 | 4 | 1 | |
| : | | | | | |
| 2. | | 0 | 6 | 1, 3 | |
| : | | | | | |
| 3. | | 0 | 12 | 2, 3 | |
| : | | | | | |
| 4. | - | 0 | 8 | 2, 3 | |
| : | | | | | |
| 5. | | 0 | 10 | 2, 3 | |
| : | | | | | |
| 6. | | 0 | 32 | 4 | |

3.2

| | | | | | |
|-----|---|---|----|------------|--|
| | | , | . | | |
| : 5 | | | | | |
| : | | | | | |
| 1. | | 2 | 2 | 1 | |
| : | | | | | |
| 2. | | 4 | 4 | 2 | |
| : | | | | | |
| 3. | | 8 | 8 | 2, 3 | |
| : | | | | | |
| 4. | - | 2 | 6 | 2, 3 | |
| : | | | | | |
| 5. | | 0 | 4 | 2, 3, 4, 5 | |
| : | | | | | |
| 6. | | 2 | 12 | 1, 3, 4, 5 | |

4.

| | | | | |
|---|--|---------|----|---|
| | | | | |
| : 5 | | | | |
| 1 | | 2, 3, 4 | 15 | 2 |
| : | | | | |
| http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2005/2005dubrovsk.pdf | | | | |

| | | | | |
|--|--|---------|----|---|
| 2 | | 1, 2, 4 | 15 | 3 |
| <p>2005. - 487 : .. - : http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2005/2005dubrovsk.pdf</p> | | | | |
| 3 | | 1, 2, 3 | 10 | 0 |
| <p>2005. - 487 : .. - : http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2005/2005dubrovsk.pdf</p> | | | | |
| 4 | | 1, 2, 4 | 23 | 2 |
| <p>2005. - 487 : .. - : http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2005/2005dubrovsk.pdf</p> | | | | |

5.

(.5.1).

5.1

| | |
|--|--|
| | |
| | |

6.

(),

- 15-

ECTS.

. 6.1.

6.1

| | | |
|--|----|----|
| | | |
| : 5 | | |
| <i>Лекция:</i> | 5 | 10 |
| <i>Практические занятия:</i> | 5 | 10 |
| <i>Контрольные работы:</i> | 10 | 20 |
| 2005. - 487 : .. - : http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2005/2005dubrovsk.pdf | | |
| <i>РГЗ:</i> | 10 | 20 |
| 2005. - 487 : .. - : http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2005/2005dubrovsk.pdf | | |
| <i>Экзамен:</i> | 20 | 40 |
| 2005. - 487 : .. - : http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2005/2005dubrovsk.pdf | | |

| | | | | |
|-----------|----|---|---|---|
| | | | | |
| .1 | 2. | + | + | + |
| | 1. | + | + | + |
| .2 | 3. | + | + | + |
| | 2. | + | + | + |
| .1 | 4. | + | | + |

1

7.

1. Краснопецев Е. А. Спецглавы физики. Статистическая физика равновесных систем : [учебное пособие] / Е. А. Краснопецев. - Новосибирск, 2014. - 385, [1] с. - Режим доступа: http://elibrary.nstu.ru/source?bib_id=vtls000213264
2. Краснопецев Е. А. Квантовая механика в приложениях к физике твердого тела : [учебное пособие] / Е. А. Краснопецев. - Новосибирск, 2010. - 354 с. : ил. - Режим доступа: <http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2010/krasnopev.pdf>
3. Краснопецев Е. А. Статистическая физика равновесных систем (в приложении к микро- и наносистемам) : учебное пособие / Е. А. Краснопецев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2007. - 274, [1] с. : графики. - Режим доступа: <http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2007/krasnopevcev.pdf>. - Инновационная образовательная программа НГТУ "Высокие технологии".
1. Гридчин В. А. Спецглавы физики: задачи с примерами решений : учебное пособие / В. А. Гридчин, Р. П. Дикарева, Е. А. Краснопецев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск, 2004. - 103 с. : ил. - Режим доступа: http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2004/2004_gridchin.rar
1. ЭБС НГТУ : <http://elibrary.nstu.ru/>
2. ЭБС «Издательство Лань» : <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС IPRbooks : <http://www.iprbookshop.ru/>
4. ЭБС "Znanium.com" : <http://znanium.com/>
5. :

8.

8.1

1. Дубровский В. Г. Введение в квантовую и статистическую физику : учебник / В. Г. Дубровский. - Новосибирск, 2005. - 487 с. : ил. - Режим доступа: <http://www.ciu.nstu.ru/fulltext/textbooks/2005/2005dubrovsk.pdf>

8.2

1 Microsoft Office

2 Microsoft Windows

9.

-

| | | |
|---|-----------|--|
| | | |
| 1 | (-) , , | |

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

Кафедра полупроводниковых приборов и микроэлектроники

“УТВЕРЖДАЮ”
ДЕКАН РЭФ
д.т.н., профессор В.А. Хрусталеv
“ ____ ” _____ г.

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Квантовая механика

Образовательная программа: 11.03.04 Электроника и микроэлектроника, профиль:
Микроэлектроника и микроэлектроника

1. Обобщенная структура фонда оценочных средств учебной дисциплины

Обобщенная структура фонда оценочных средств по дисциплине **Квантовая механика** приведена в Таблице.

Таблица

| Формируемые компетенции | Показатели сформированности компетенций (знания, умения, навыки) | Темы | Этапы оценки компетенций | |
|---|--|---|---|---|
| | | | Мероприятия текущего контроля (курсовой проект, РГЗ(Р) и др.) | Промежуточная аттестация (экзамен, зачет) |
| ОПК.1 способность представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики | з2. знать базовые знания фундаментальных разделов физики в объеме, необходимом для освоения физических основ в области профессиональной деятельности | Математические основы Полуклассическая теория | Контрольные работы, РГЗ | Экзамен, вопросы 1-2 |
| ОПК.1 | у1. умеет работать с системными естественнонаучными моделями объектов профессиональной деятельности | Одномерные стационарные задачи Теория возмущений и спин | Контрольные работы, РГЗ | Экзамен, вопросы 3-5 |
| ОПК.2 способность выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат | з3. знает универсальность математических методов в познании окружающего мира | Распределения квантового газа Теория возмущений и спин | Контрольные работы, РГЗ | Экзамен, вопросы 6-7 |
| ОПК.2 | у2. умеет выбирать простейшие модели физических объектов и процессов | Распределения квантового газа | Контрольные работы, РГЗ | Экзамен, вопросы 8-10 |
| ПК.1 способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и нанoeлектроники различного функционального назначения, а также | з4. особенности проявления квантовых эффектов в базовых элементах нанoeлектроники, их классификацию; | Распределения квантового газа Теория возмущений и спин | Контрольные работы, разделы 5-10 | |

| | | | | |
|--|--|--|--|--|
| использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования | | | | |
|--|--|--|--|--|

2. Методика оценки этапов формирования компетенций в рамках дисциплины.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в 5 семестре - в форме экзамена, который направлен на оценку сформированности компетенций ОПК.1, ОПК.2, ПК.1.

Экзамен проводится в устной форме.

Кроме того, сформированность компетенций проверяется при проведении мероприятий текущего контроля, указанных в таблице раздела 1.

В 5 семестре обязательным этапом текущей аттестации являются расчетно-графическое задание (работа) (РГЗ(Р)), контрольная работа. Требования к выполнению РГЗ(Р), контрольной работы, состав и правила оценки сформулированы в паспорте РГЗ(Р), контрольной работы.

Общие правила выставления оценки по дисциплине определяются балльно-рейтинговой системой, приведенной в рабочей программе учебной дисциплины.

На основании приведенных далее критериев можно сделать общий вывод о сформированности компетенций ОПК.1, ОПК.2, ПК.1, за которые отвечает дисциплина, на разных уровнях.

Общая характеристика уровней освоения компетенций.

Ниже порогового. Уровень выполнения работ не отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, пробелы могут носить существенный характер, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы не достаточно, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнены или выполнены с существенными ошибками.

Пороговый. Уровень выполнения работ отвечает большинству основных требований, теоретическое содержание курса освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

Базовый. Уровень выполнения работ отвечает всем основным требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

Продвинутый. Уровень выполнения работ отвечает всем требованиям, теоретическое содержание курса освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

Паспорт экзамена

по дисциплине «Квантовая механика», 5 семестр

1. Методика оценки

Экзамен проводится в устной форме, по билетам. Билет формируется по следующему правилу: первый вопрос выбирается из диапазона вопросов 1, второй вопрос из диапазона вопросов 2 (список вопросов приведен ниже). В ходе экзамена преподаватель вправе задавать студенту дополнительные вопросы из общего перечня (п. 4).

Форма экзаменационного билета

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Факультет РЭФ

Билет № 1

к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Вопрос. Уравнение Шредингера для стационарного и нестационарного состояния. Краевые условия для прямоугольных потенциалов. Пример применения.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 2

к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Квазиклассическое квантование ВКБ. Туннельный эффект.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 3

к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Модель Кронига–Пенни кристаллической решетки.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 4
к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Уравнение Шредингера в сферической и цилиндрической системах координат.
Примеры применения.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 5
к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Заряд в однородном магнитном поле. Уровни Ландау.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 6
к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Теория возмущений стационарных состояний невырожденного спектра.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 7
к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Теория зависящих от времени возмущений. Периодические возмущения

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 8
к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Электронный газ в металле и полупроводнике. Химический потенциал, внутренняя энергия.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 9
к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Фононный газ. Теплоемкость кристалла.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

Билет № 10

к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Конденсация Бозе–Эйнштейна.

Утверждаю: зав. кафедрой _____ должность, ФИО
(подпись) (дата)

2. Критерии оценки

- Ответ на экзаменационный билет считается **неудовлетворительным**, если студент при ответе на вопросы не дает определений основных понятий, не способен показать причинно-следственные связи явлений, при решении задачи допускает принципиальные ошибки, оценка составляет менее 20 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **пороговом** уровне, если студент при ответе на вопросы дает определение основных понятий, может показать причинно-следственные связи явлений, при решении задачи допускает непринципиальные ошибки, например, вычислительные, оценка составляет 20-29 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **базовом** уровне, если студент при ответе на вопросы формулирует основные понятия, законы, дает характеристику процессов, явлений, проводит анализ причин, условий, может представить качественные характеристики процессов, не допускает ошибок при решении задачи, оценка составляет 30-35 баллов.
- Ответ на экзаменационный билет засчитывается на **продвинутом** уровне, если студент при ответе на вопросы проводит сравнительный анализ подходов, проводит комплексный анализ, выявляет проблемы, предлагает механизмы решения, способен представить количественные характеристики определенных процессов, приводит конкретные примеры из практики, не допускает ошибок и способен обосновать выбор метода решения задачи, оценка составляет 36-40 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине экзаменационные баллы учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Вопросы к экзамену по дисциплине «Квантовая механика»

1. Уравнение Шредингера для стационарного и нестационарного состояния. Краевые условия для прямоугольных потенциалов. Пример применения.
2. Квазиклассическое квантование ВКБ. Туннельный эффект.
3. Модель Кронига–Пенни кристаллической решетки.
4. Уравнение Шредингера в сферической и цилиндрической системах координат. Примеры применения.
5. Заряд в однородном магнитном поле. Уровни Ландау.
6. Теория возмущений стационарных состояний невырожденного спектра.
7. Теория зависящих от времени возмущений. Периодические возмущения.
8. Электронный газ в металле и полупроводнике. Химический потенциал, внутренняя энергия.
9. Фононный газ. Теплоемкость кристалла.
10. Конденсация Бозе–Эйнштейна.

Паспорт контрольной работы

по дисциплине «Квантовая механика», 5 семестр

1. Методика оценки

Контрольная работа проводится по темам: 1. Одномерные стационарные системы; 2. Трехмерные системы, спин; 3. Статическая физика фермионов и бозонов, включает 9 заданий. Выполняется письменно.

2. Критерии оценки

Каждое задание контрольной работы оценивается в соответствии с приведенными ниже критериями.

Контрольная работа считается **невыполненной**, если задача не решена. Оценка составляет менее 10 баллов.

Работа выполнена на **пороговом** уровне, если решение не осмысленно. Оценка составляет 10-12 баллов.

Работа выполнена на **базовом** уровне, если решение правильно и осмысленно. Оценка составляет 13-17 баллов.

Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если проведен анализ решений. Оценка составляет 18-20 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за контрольную работу учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Пример варианта контрольной работы

1. Найти собственные функции и собственные значения оператора $\hat{A} = \frac{\hbar}{i} \frac{d}{dx} + 2\beta\hbar x$.
2. Доказать, что если $\hat{A}\psi_a = a\psi_a$, то $(\hat{A})^n\psi_a = a^n\psi_a$ и $f(\hat{A})\psi_a = f(a)\psi_a$, где $f(a)$ разлагается в ряд Маклорена.
3. Доказать, что для оператора радиального импульса $\hat{p}_r = \frac{\hbar}{i} \left(\frac{d}{dr} + \frac{1}{r} \right)$ собственные функции $\psi_{\pm p}(r) = \frac{c}{r} \exp\left(\pm \frac{i}{\hbar} pr\right)$.
4. Исследовать формы оператора кинетической энергии с переменной массой $\mu = \mu(x)$. Доказать неэрмитовость $\hat{A} = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{d^2}{dx^2}$ и эрмитовость

$$\hat{K} = -\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{\mu} \frac{d}{dx} \right) \quad \text{и} \quad \hat{K}_1 = -\frac{\hbar^2}{4} \left\{ \mu^\alpha \frac{d}{dx} \mu^\beta \frac{d}{dx} \mu^\gamma + \mu^\gamma \frac{d}{dx} \mu^\beta \frac{d}{dx} \mu^\alpha \right\}, \quad \text{где}$$

$$\alpha + \beta + \gamma = -1.$$

5. Доказать эрмитовость оператора проекции момента импульса $\hat{L}_z = \frac{\hbar}{i} \frac{d}{d\varphi}$ в пространстве периодических функций $\psi_k(\varphi + 2\pi) = \psi_k(\varphi)$.

6. Доказать $\left(\frac{d}{dx} + \frac{a}{x} \right)^+ = \left(-\frac{d}{dx} + \frac{a^*}{x} \right)$, $\left(\frac{d}{dx} + \frac{a}{x} \right) \left(\frac{d}{dx} - \frac{a}{x} \right) = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{a(1-a)}{x^2}$.

7. Доказать, что если $[\hat{n}_-, \hat{n}_+] = 1$, то $[\hat{n}_-, (\hat{n}_+)^m] = m(\hat{n}_+)^{m-1}$, $[(\hat{n}_-)^m, \hat{n}_+] = m(\hat{n}_-)^{m-1}$.

8. Доказать $\hat{p}_x x = x \hat{p}_x + \frac{\hbar}{i}$, $[\hat{p}_x, x^n] = \frac{\hbar}{i} n x^{n-1}$, $[\hat{p}_x^n, x] = \frac{\hbar}{i} n \hat{p}_x^{n-1}$,

$$[\hat{H}, x] = \frac{\hbar}{i\mu} \hat{p}_x.$$

9. Доказать $\left[\frac{d^2}{dx^2}, \frac{d}{dx} x \right] = 2 \frac{d^2}{dx^2}$, $\left[\frac{d^2}{dx^2}, x \frac{d}{dx} \right] = 2 \frac{d^2}{dx^2}$,

$$\left(\frac{1}{x} \frac{d}{dx} x \right)^2 = \frac{2}{x} \frac{d}{dx} + \frac{d^2}{dx^2}.$$

Паспорт расчетно-графического задания (работы)

по дисциплине «Квантовая механика», 5 семестр

1. Методика оценки

В рамках расчетно-графического задания (работы) по дисциплине студенты должны рассчитать параметры модели в соответствии с исходными данными.

При выполнении расчетно-графического задания (работы) студенты должны провести анализ объекта, выбрать параметры, обосновать метод решения, провести вычисления, понять физический смысл результата, оценить погрешность.

Обязательные структурные части РГЗ: Введение, расчетная часть, заключение.

Оцениваемые позиции: правильность выбора основных характеристик объекта, количественных вычислений, физических выводов.

2. Критерии оценки

- Работа считается **не выполненной**, если выполнены не все части РГЗ(Р), отсутствует анализ объекта, диагностические признаки не обоснованы, аппаратные средства не выбраны или не соответствуют современным требованиям, оценка составляет менее 10 баллов.
- Работа считается выполненной **на пороговом** уровне, если части РГЗ(Р) выполнены формально: анализ объекта выполнен без декомпозиции, диагностические признаки недостаточно обоснованы, аппаратные средства не соответствуют современным требованиям, оценка составляет 10-12 баллов.
- Работа считается выполненной **на базовом** уровне, если анализ объекта выполнен в полном объеме, признаки и параметры диагностирования обоснованы, алгоритмы разработаны, но не оптимизированы, аппаратные средства выбраны без достаточного обоснования, оценка составляет 13-17 баллов.
- Работа считается выполненной **на продвинутом** уровне, если анализ объекта выполнен в полном объеме, признаки и параметры диагностирования обоснованы, алгоритмы разработаны и оптимизированы, выбор аппаратных средств обоснован, оценка составляет 18-20 баллов.

3. Шкала оценки

В общей оценке по дисциплине баллы за РГЗ(Р) учитываются в соответствии с правилами балльно-рейтинговой системы, приведенными в рабочей программе дисциплины.

4. Примерный перечень тем РГЗ(Р)

1. Доказать, что для одномерной частицы с энергией $\varepsilon = a |p|^n$ на отрезке длиной L

плотность состояний $g(\varepsilon, n) = \frac{N_S}{h} \frac{2L}{na^{1/n}} \varepsilon^{(1-n)/n}$.

2. Доказать, что для двухмерной частицы с энергией $\varepsilon = a |p|^n$ на площади S плотность состояний $g(\varepsilon, n) = \frac{N_S}{h^2} \frac{2\pi S}{na^{2/n}} \varepsilon^{(2-n)/n}$.

3. Доказать, что для трехмерной частицы с энергией $\varepsilon = a |p|^n$ в объеме V плотность состояний $g(\varepsilon, n) = \frac{N_S}{h^3} \frac{4\pi V}{na^{3/n}} \varepsilon^{(3-n)/n}$.

4. Доказать, что для двухмерной частицы с энергией $\varepsilon = p^2 / 2m + u(\mathbf{r})$, где $u(\mathbf{r}) = q_1 |x|^a + q_2 |y|^b$, плотность состояний

$$g(\varepsilon, a, b) = \frac{8\pi N_S m}{h^2 q_1^{1/a} q_2^{1/b}} \frac{\Gamma(1/a) \Gamma(1/b)}{ab \Gamma(1+\eta)} \varepsilon^\eta, \text{ где } \eta = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}.$$

5. В одномерной цепочке из N атомов, находящихся на расстоянии d друг от друга, энергия, частота и импульс фонона связаны соотношением $\varepsilon = \hbar\omega = v p$, где v – скорость продольной акустической волны. Доказать, что частотная плотность состояний $g = Nd / (\pi v)$ и частота Дебая $\omega_D = \pi v / d$.

6. В двухмерной решетке площадью S , содержащей N атомов, энергия, частота и импульс фонона связаны соотношением $\varepsilon = \hbar\omega = v_i p_i$, где $i = 1, 2$ – продольная, поперечная поляризации. Доказать, что плотность состояний $g(\omega) = S\omega / (\pi v^2)$, где $v^{-2} \equiv (v_1^{-2} + v_2^{-2}) / 2$, и частота Дебая $\omega_D = 2v\sqrt{\pi N / S}$.

7. Газ состоит из линейных гармонических осцилляторов с частотой ω при температуре T . Используя каноническое распределение доказать, что среднее число квантов энергии $\bar{n} \equiv \sum_n n w_n = \frac{1}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$. Учтеть $\varepsilon_n = \hbar\omega(n + 1/2)$, $g_n = 1$, $n = 0, 1, 2, \dots$

8. Газ состоит из линейных гармонических осцилляторов с частотой ω при температуре T . Используя каноническое распределение, для среднего квадратичного импульса доказать

$$\overline{p^2} \equiv \sum_n \overline{(p^2)_n} w_n = \frac{1}{2} \hbar\omega m \frac{e^a + 1}{e^a - 1}, \text{ где } a = \frac{\hbar\omega}{kT}. \text{ Учтеть } \overline{(p^2)_n} = \hbar\omega m(n + 1/2),$$

$$\varepsilon_n = \hbar\omega(n + 1/2), g_n = 1, n = 0, 1, 2, \dots$$

9. Газ состоит из линейных гармонических осцилляторов с частотой ω при температуре T . Используя каноническое распределение, для среднего квадратичного смещения осциллятора доказать

$$\overline{x^2} \equiv \sum_n \overline{(x^2)_n} w_n = \frac{1}{2} x_0^2 \frac{e^a + 1}{e^a - 1}, \text{ где } x_0^2 = \frac{\hbar}{m\omega}, a = \frac{\hbar\omega}{kT}. \text{ Учтеть}$$

$$\overline{(x^2)_n} = x_0^2(n + 1/2), \varepsilon_n = \hbar\omega(n + 1/2), g_n = 1, n = 0, 1, 2, \dots$$