Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Тульский государственный университет”

Кафедра физики

Методические указания
к практическим (семинарским) занятиям
по дисциплине
“Теоретическая физика”

Направление подготовки: *01.04.03 Механика и математическое моделирование*
Профиль подготовки: *Механика деформируемого твердого тела*
(магистерская программа)

Форма обучения (очная)

Тула 2015

Методические указания к практическим (семинарским) занятиям по дисциплине “Теоретическая физика” для студентов специальности 01.04.03 “Механика и математическое моделирование” профиль подготовки “Механика деформируемого твердого тела” составлены профессором кафедры физики ТулГУ Ю.Н.Колмаковым и обсуждены на заседании кафедры физики естественно-научного института ТулГУ,

протокол № 9 от " 04 " июня 2015 г.

Зав. кафедрой физики Р.Н.Ростовцев

Методические указания к практическим (семинарским) занятиям по дисциплине “Теоретическая физика” для студентов специальности 01.04.03 “Механика и математическое моделирование” профиль подготовки “Механика деформируемого твердого тела” пересмотрены и утверждены на заседании кафедры физики естественно-научного института ТулГУ

протокол № ____от «____»___________20 г.

Зав. кафедрой физики

Введение:

Методические указания для проведения практических занятий по курсу “Теоретическая физика” предназначено для студентов специальности 01.04.03 “Механика и математическое моделирование” профиль подготовки “Механика деформируемого твердого тела” (магистерская программа).

Практические занятия по дисциплине “Теоретическая физика” проводятся в течение 2-го семестра обучения в рамках магистерской программы в соответствии с разделом 4.5 рабочей программы.

Практические занятия

№ ПЗ	**№№ разделов дисциплины (модуля)**	**Тема практического занятия**	**Кол-во академических часов**
1	2: 2.4;	Квантовомеханические операторы и уравнения квантования. Спектр собственных значений	2
2	2: 2.5, 2.6;	Свойства квантовомеханических операторов. Вычисление коммутаторов	2
3	2: 2.7;	Операторы физических величин и их коммутационные соотношения	2
4	3: 3.3, 3.4;	Вывод и использование правил квантования Бора-Зоммерфельда	2
5	3: 3.5, 3.6;	Движение микрочастицы в одномерной потенциальной яме и прохождение через потенциальный барьер (квазиклассическое приближение)	2
6	3: 3.7: 3.7.1, 3.7.2;	Стационарное уравнение Шредингера: микрочастица в потенциальных ямах и барьерах прямоугольной формы (точные решения)	2
7	3: 3.7: 3.7.3;	Стационарное уравнение Шредингера: микрочастица в потенциальных ямах произвольной формы. Одномерный квантовый гармонический осциллятор. Методы решения	2
8	4: 4.3, 4.4;	Микрочастица в центрально-	2

№ ПЗ	№№ разделов дисциплины (модуля)	Тема практического занятия	Кол-во академических часов
		симметричном поле. Трехмерный квантовый гармонический осциллятор.	
9	5: 5.1, 5.2, 5.3;	Использование теории возмущений при решении квантовомеханических задач. Невырожденный спектр энергии	2
10	5: 5.3, 5.4;	Использование теории возмущений при решении квантовомеханических задач. Вырожденный спектр энергии	2
11	6: 6.1 – 6.3;	Релятивистская микрочастица без спина и квантование её движения в поле кулоновского потенциала	2
12		Контрольная работа №1 по темам занятий 1-11	2
13	6: 6.4 – 6.9;	Релятивистская микрочастица со спином 1/2 и квантование её движения в поле кулоновского потенциала. Оператор спина и спин-орбитального взаимодействия	2
14	7: 7.1- 7.3;	Многоэлектронная система. Использование диаграмм Юнга	2
15	9: 9.3- 9.4;	Электрон в многоцентровой системе ионов кристаллической решетки. Типы межатомных связей	2
16	10: 10.1-10.6;	Образование зон Бриллюэна для кристаллической среды и заполнение их электронами	2
17	11: 11.1-11.4;	Электрон в поле периодического потенциала. Особенности заполнения энергетических зон	2
18	13: 13.1-13.3;	Фононы в кристаллической решетке твердого тела и вычисление спектра их энергии	2
19	13: 13.4-13.6;	Электрон-фононное взаимодействие в кристаллической среде	2
20	14:	Связь электронной структуры кри-	2

№ ПЗ	№№ разделов дисциплины (модуля)	Тема практического занятия	Кол-во академических часов
	14.1, 14.2;	сталлической решетки с механическими свойствами металлов	
21		Контрольная работа №2 по темам занятий 13-20	2

Во время практических занятий со студентами проводится решение обязательного набора задач, условия которых перечислены в Приложении 1. Подробные решения этих задач можно найти в литературе, ссылки на которую приведены в Приложении 1 после условия каждой задачи. Библиографический список используемой литературы, достаточной для подготовки и самостоятельного решения задач приведен в Приложении 2. Обращение к учебной литературе – необходимый фактор развития навыков самостоятельного поиска информации, требующийся для успешной научно-исследовательской работы в дальнейшем.

Контроль усвоения полученных практических навыков решения задач теоретической физики проводится во время двух текущих аттестаций и собеседований, когда студентам предлагается решить значительно более простые модельные задачи, демонстрирующие основные идеи задач, рассмотренных во время аудиторных занятий.

Приложение 1.

Условия задач по курсу “Теоретическая физика”, обязательных для решения на практических занятиях

ПЗ №1. Квантовомеханические операторы и уравнения квантования. Свойства операторов

1.1. Найти квантовомеханический оператор, сопоставляемый классическому произведению xp_x.

Решение см.: [4, т.1, стр.26-27]

1.2. Найти коммутатор операторов $\left(x\frac{d}{dx}\right)^2$ и $\left(\frac{d}{dx}x\right)^2$.

Решение см.: [6, стр.174]

1.3. Найти оператор, эрмитово-сопряженный оператору $\frac{d}{dx}$.

Решение см.: [3, ч.1, стр.18-20]; [6, стр.175]

1.4. Определить квадрат оператора $i\hbar\vec{\nabla} + \vec{A}(\vec{r})$.

Решение см.: [6, стр.174]

1.5. Найти собственные функции и собственные значения оператора $x + \frac{d}{dx}$.

Решение см.: [3, ч.1, стр.15]

ПЗ №2, №3. Операторы квантовой механики и их свойства. Стационарное уравнение Шредингера

2.1. Вычислить коммутаторы проекций операторов радиус-вектора и импульса: $[\hat{r}_i, \hat{r}_j]$, $[\hat{r}_i, \hat{p}_j]$ и $[\hat{p}_i, \hat{p}_j]$.

Решение см.: [2, стр.31-32]

2.2. Найти собственные функции $\psi(x)$ и собственные значения оператора $\hat{p}_x$ в случае компактификации координаты $(\psi(x+a) = \psi(x))$.

Решение см.: [6, стр.178]

2.3. Найти оператор, эрмитово-сопряженный произведению операторов $\hat{A}$ и $\hat{B}$.

Решение см.: [6, стр.177]

2.4. Из выражения оператора момента импульса в декартовой системе координат $\hat{\vec{L}} = \hat{\vec{r}} \times \hat{\vec{p}}$, получить выражения для операторов $\hat{L}_x, \hat{L}_y, \hat{L}_z$ и $\hat{L}^2$ в сферической системе координат.

Решение см.: [2, стр.37-38; 674-675]; [4, т.1, стр.139-140]; [5, стр.116-117]

2.5. Доказать следующие коммутационные соотношения для проекций операторов координаты, импульса и момента импульса:

а) $\left[\hat{L}_i\,,\ \hat{x}_j\right] = i\varepsilon_{ijk}\hat{x}_k$; $\left[\hat{L}_i\,,\ \hat{p}_j\right] = i\varepsilon_{ijk}\hat{p}_k$, где ε_{ijk} - антисимметричный единичный тензор 3-го ранга, для которого $\varepsilon_{ijk} = -\varepsilon_{ikj}$, $\varepsilon_{123} = 1$ (1,2,3 - соответствуют индексам *x*, *y*, *z*);

б) $\left[\hat{x}_i\,, \hat{\vec{L}}^2\right] = i\hbar\varepsilon_{ijk}\hat{L}_j\hat{x}_k - i\hbar\varepsilon_{ijk}\hat{x}_j\hat{L}_k$; $\left[\hat{p}_i\,, \hat{\vec{L}}^2\right] = i\hbar\varepsilon_{ijk}\hat{L}_j\hat{p}_k - i\hbar\varepsilon_{ijk}\hat{p}_j\hat{L}_k$;

в) $\left[\hat{\vec{L}}, \left(\hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2 + \hat{p}_z^2\right)\right] = 0$, $\left[\hat{\vec{L}}, \left(x^2 + y^2 + z^2\right)\right] = 0$; $\left[\hat{p}^2\,, \hat{L}^2\right] = \left[\hat{r}^2\,, \hat{L}^2\right] = 0$;

г) $\left[\hat{L}_i\,, \hat{L}_j\right] = i\hbar\varepsilon_{ijk}\hat{L}_k$, $\left[\hat{L}_i\,, \hat{L}^2\right] = 0$;

д) показать, что в состоянии ψ с определенным значением $\hat{L}_z$, (для которого $\hat{L}_z\psi = \hbar m\psi$) средние значения $\hat{L}_x$ и $\hat{L}_y$ равны нулю.

Решение см.: [2, стр.32]; [4, т.1, стр.142-143]; [6, стр.181-182]

2.6. Для операторов $\hat{L}$ и $\hat{M}$, удовлетворяющих коммутационному условию $\hat{L}\hat{M} - \hat{M}\hat{L} = 1$, найти: а) $\hat{L}^2\hat{M} - \hat{M}\hat{L}^2$; б). $f\left(\hat{L}\right)\hat{M} - \hat{M}f\left(\hat{L}\right)$.

Решение см.: [6, стр.177-178]

2.7. Волновая функция в произвольный момент времени определяется через волновую функцию в начальный момент времени с помощью некоторого оператора $\hat{S}(t)$, зависящего от времени: $\Psi(t) = \hat{S}(t)\Psi(0)$. Показать, что оператор $\hat{S}(t)$ подчиняется дифференциальному уравнению $i\hbar\dfrac{d\hat{S}}{dt} = \hat{H}\hat{S}(t)$, где $\hat{H}$ - оператор Гамильтона, а в том случае, когда $\hat{H}$ не зависит от времени, то оператор $\hat{S}(t)$ имеет вид $\hat{S}(t) = e^{-\frac{i\hat{H}t}{\hbar}}$.

Решение см.: [2, стр.145-146]

ПЗ №4. Квазиклассическое приближение. Метод Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна. Правила квантования Бора-Зоммерфельда

3.1. Получить квазиклассические решения уравнения Шредингера, разлагая их в ряд по малому параметру $\hbar$.

Решение см.: [1, стр.198-201]; [2, стр.93-96]

3.2. Вывести условие квантового постулата Бора-Зоммерфельда, пользуясь условием квазиклассичности решений уравнения Шредингера

Решение см.: [1, стр.202-206]; [2, стр.96-99]

3.3. Пользуясь постулатом Бора-Зоммерфельда, проквантовать движение одномерного квантового гармонического осциллятора с потенциальной энергией $U(x)=\dfrac{m\omega^2 x^2}{2}$.

Решение см.: [5, стр.66]; [6, стр.171-172]

3.4. Частица массы m вертикально падает на горизонтальную пластину и упруго от нее отражается. Используя постулат Бора-Зоммерфельда, проквантовать движение частицы, определить разрешенные высоты h_n и вычислить уровни энергии.

Решение см.: [6, стр.174]

3.5. Определить в квазиклассическом приближении спектр энергии частицы в одномерном потенциальном поле $U(x)=-\dfrac{U_0}{ch^2(x/a)}$.

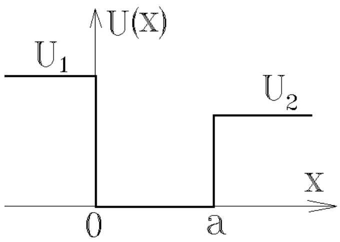
Решение см.: [5, стр.65-66]

ПЗ №5, №6. Движение микрочастицы в потенциальных ямах и барьерах прямоугольной формы

(на практическом занятии №5 задачи решаются в квазиклассическом приближении, а на занятии №6 определяются точные решения стационарного уравнения Шредингера)

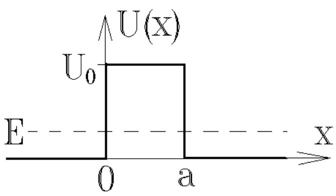
4.1. Вычислить в квазиклассическом приближении коэффициенты прохождения D и отражения R частицы с массой m и с энергией E, падающей на одномерный прямоугольный потенциальный барьер ширины a и высоты $U_0 > E$.

Решение см.: [2, стр.101-106]



4.2. Определить уровни энергии и волновые функции частицы, находящейся в несимметричной потенциальной прямоугольной одномерной яме, изображенной на рисунке. В частности, рассмотреть случай $U_1 = U_2$.

Решение см.: [2, стр.108-116]; [4, т.1, стр.62-66]; [5, стр.51-53]; [6, стр.186-188]



4.3. Определить коэффициент прохождения частицы с энергией $E < U_0$ через прямоугольный потенциальный барьер высоты U_0, изображенный на рисунке, а также коэффициент надбарьерного отражения от барьера в случае $E > U_0$.

Решение см.: [2, стр.117-118]; [3, ч.1, стр. 47]; [4, т.1, стр.58-60]; [5, стр.72-73]

4.4. Состояние частицы в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме, стенки которой расположены при $x=0$ и $x=a$, описывается волновой функцией $\psi(x)=Ax(a-x)$. Найти для нее распределение по энергиям, среднюю энергию $\langle E\rangle$ и $\langle \Delta E^2\rangle$.

ПЗ №7. Решение уравнения Шредингера в случае произвольных потенциальных кривых. Квантовый гармонический осциллятор

5.1. Гамильтониан одномерного осциллятора равен $\hat{H} = \frac{\hat{p}_x{}^2}{2m} + \frac{m\omega^2 \hat{x}^2}{2}$, где $\hat{p}_x$ и $\hat{x}$ удовлетворяют перестановочному соотношению $\hat{p}_x \hat{x} - \hat{x}\hat{p}_x = -i\hbar$. Определить нормированные волновые функции и уровни энергии осциллятора.

Решение см.: [2, стр.119-123]; [4, т.1, стр.81-84]; [5, стр.53-55]; [6, стр.188-190]

5.2. Найти уровни энергии и волновые функции одномерного гармонического осциллятора, помещенного в постоянное электрическое поле $\vec{\mathcal{E}}$. Заряд частицы q.

Решение см.: [3, ч.1, стр. 31]; [6, стр.190-191]

5.3. Найти уровни энергии и волновые функции частицы в одномерной кулоновской потенциальной яме, задаваемой потенциальной энергией $U(x) = -\frac{kq^2}{r}$.

Решение см.: [2, стр. 176-180]; [5, стр.129-131]; [6, стр.198-199]

ПЗ №8. Микрочастица в центрально-симметричном поле. Трехмерный квантовый гармонический осциллятор

6.1. Показать, что в основном состоянии атома водорода следующие средние значения равны: а) $\left\langle 1/r \right\rangle = 1/r_0$; б) $\left\langle 1/r^2 \right\rangle = 2/r_0{}^2$, где r_0 – наиболее вероятное значение радиуса электронной орбиты.

Решение см.: [2, стр. 180]; [3, ч.1, стр. 88-89]; [6, стр.199-200]

6.2. Решить уравнение Шредингера для сферически симметричного трехмерного осциллятора с потенциальной энергией $U(x, y, z) = \frac{m\omega^2}{2} r^2$. Сравнить с результатами решения задачи 5.1.

Решение см.: [2, стр. 171-175]; [3, ч.1, стр. 87-88]; [4, т.1, стр.175-177]; [5, стр. 131-133]; [6, стр.195-196]

ПЗ №9. Теория возмущений. Невырожденный случай. Поправки в первом и втором порядках теории возмущений.

7-1. Получить поправки к разрешенным значениям энергии частицы в случае появления малого внешнего возмущения с потенциалом *V* в первом и втором порядке теории возмущений.

Решение см.: [1, стр.163-165]; [2, стр.211-213]

7-2. Найти матричные элементы координаты и импульса одномерного гармонического осциллятора.

Решение см.: [1, стр.90-92]

7-3. Найти разрешенные уровни энергии одномерного ангармонического осциллятора с потенциальной энергией $U(x)=\frac{m\omega^2 x^2}{2}+\alpha x^3$, где $\alpha-$малая константа.

Решение см.: [1, стр.166-167]; [2, стр.215-216]

ПЗ №10. Теория возмущений в случае вырождения уровней энергии. Линейный эффект Штарка

8-1. Атом водорода в первом возбужденном состоянии $(n=2)$ помещают во внешнее однородное электрическое поле с напряженностью $\vec{\mathcal{E}}$. Определить расщепление уровней энергии под действием этого поля (линейный эффект Штарка).

Решение см.: [1, стр.329-332]; [4, т.1, стр.121-123; 215-217]; [3, ч.1, стр.71-72]

ПЗ №11, №13. Релятивистская микрочастица без спина и со спином 1/2 и квантование её движения в поле кулоновского потенциала. Оператор спина и спин-орбитального взаимодействия

9.1. Получить уравнение, описывающее в квантовой теории движение свободной релятивистской частицы с целым спином и вывести его общее решение.

Решение см.: [2, стр. 237-239]

9.2. Получить уравнение, описывающее в квантовой теории движение свободной релятивистской частицы со спином 1/2 и вывести его общее решение.

Решение см.: [2, стр.262-269]; [3, ч.2, стр. 281-282]; [4, т.2, стр.188-190]

9.3. Релятивистский $\pi^- -$мезон с массой m и зарядом $-e$ движется в поле тяжелого кулоновского центра с зарядом $+Ze$. Вычислить разрешенные уровни энергии такого “атома”.

Решение см.: [2, стр.291-295]; [5, стр. 180-182]

9.4. Найти собственные функции и собственные значения операторов проекции спина $\frac{\hbar}{2}\hat{\sigma}_x=\frac{\hbar}{2}\cdot\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix}$ и $\frac{\hbar}{2}\hat{\sigma}_y=\frac{\hbar}{2}\cdot\begin{pmatrix}0&-i\\i&0\end{pmatrix}$ (спиновые матрицы Паули).

Решение см.: [4, т.2, стр.11-14]; [6, стр.242-243]

ПЗ № 14. Особенности квантования многоэлектронной системы. Диаграммы Юнга.

10.1. Построить нормированную волновую функцию системы из N невзаимодействующих частиц с полуцелым спином (определитель Слэтера).

Решение см.: [2, стр.332-333]

10.2. Построить и объяснить метод построения диаграмм Юнга для координатной и спиновой частей системы из N=4 и N=6 невзаимодействующих друг с другом электронов.

Решение см.: [1, стр.274-278]; [2, стр.335-337]

10.3. Какие состояния (термы) могут осуществляться для двух электронов: а) $nsn's$; б) $nsn'p$; в) $nsn'd$; г) $npn'p$.

Решение см.: [5, стр.183]

10.4. Указать возможные термы следующих конфигураций: а) $(np)^3$; б) $(nd)^2$; в) $ns(n'p)^4$.

Решение см.: [5, стр.183]

<u>ПЗ №15. Электрон в многоцентровой системе ионов кристаллической решетки. Типы межатомных связей</u>

11.1. Получить энергию электрона в двухцентровой системе (в поле двух ионов).

11.2. Объяснить различия в знаках обменного интеграла, полученного для системы из нескольких электронов в поле одного атомного ядра и для системы электронов в поле кристаллической решётки. Объяснить соответствие этого знака со статистикой.

Решение см.: [8, стр.21-25]; [9, стр.107-110]

11.3. Объяснить различие ковалентной и металлической связи с точки зрения метода линейной комбинации атомных орбиталей.

Решение см.: [7, т.1, стр.182-184]; [9, стр.110-114]

11.4. Объяснить образование ионной связи в кристалле NaCl и величину постоянной Маделунга в этом кристалле.

Решение см.: [7, т.2, стр.15-16]; [9, стр.101-104]

<u>ПЗ №16. Образование зон Бриллюэна и методы расчета энергетических зон</u>

12.1. Получить выражение для энергии сцепления кристаллической решетки в методе ячеек Вигнера-Зейтца и с её помощью рассчитать сжимаемость среды и скорость распространения волн электронной плотности в ней.

Решение см.: [7, т.1, стр.199-203]; [8, стр.94-101; 213-216; 221-222]

12.2. Вычислить выражение для волновой функции валентного электрона в 1s-состоянии в виде ортогонализованной плоской волны. Сравнить с выражением волновой функции электрона, остающегося в атоме.

Решение см.: [8, стр.112-113]

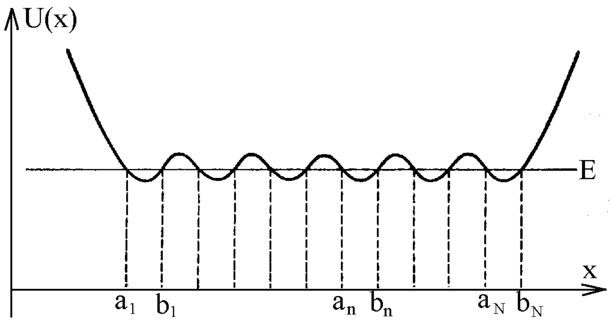
12.3. Используя метод ортогонализованной плоской волны вычислить дисперсию энергии валентных электронов в решетке металла.

Решение см.: [7, т.1, стр.209-211]; [8, стр.108-115]

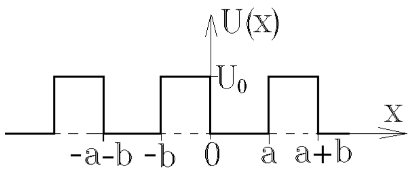
12.4 Исходя из выражения для эффективного потенциала взаимодействия валентных электронов с ионами решетки, получить формулу для псевдопотенциала. Объяснить его зависимость от координаты.

Решение см.: [7, т.1, стр.211-213]; [8, стр.118-122]

ПЗ №17. Электрон в поле периодического потенциала. Волновая функция Блоха для электрона в поле периодического потенциала. Вычисление спектра энергии электрона в поле периодического потенциала решетки



13.1. Потенциальное поле $U(x)$ для некоторой частицы имеет вид N одинаковых потенциальных ям, разделенных одинаковыми потенциальными барьерами (см. рисунок). Считая выполненным условие квазиклассичности, определить уровни энергии в поле $U(x)$.
Решение см.: [4, т.1, стр.75-77]



13.2. Определить зоны разрешенной энергии для частицы, движущейся в периодическом одномерном потенциальном поле, изображенном на рисунке. Исследовать предельный случай $U_0 \to \infty$, $b \to 0$ при условии, что $U_0 b = const$.
Решение см.: [4, т.1, стр.78-80]; [9, стр.273-277]

13.3. Получить решение одноэлектронного уравнения Шредингера в случае периодического потенциала в виде функции Блоха.
Решение см.: [7, т.1, стр.140-142]; [9, стр. 260-262]

13.4. Объяснить размер и положение энергетической зоны для электронов в металле в приближении эффективной массы.
Решение см.: [7, т.1, стр.152-156]; [9, стр.283-287]

ПЗ №18, №19. Фононы в кристаллической решетке твердого тела

14.1. Вычислить спектр энергии фононов в случае одномерной решетки с базисом (два разных иона в одной элементарной ячейке). Объяснить различие в спектре энергии акустических и оптических фононов.
Решение см.: [2, стр.383-385]; [7, т.2, стр.62-66]; [9, стр.188-192]

14.2. Используя результаты задачи 11.1., найти связь между амплитудами и фазами колебаний соседних ионов для длинноволновых оптических и акустических фононов.
Решение см.: [7, т.2, стр.62-66]; [9, стр.193-194]

14.3. Определить скорость звука в кристаллической решетке твердого тела (использовать закон дисперсии акустических фононов).
Решение см.: [7, т.2, стр.66-69]; [9, стр.190-192]

14.4. Объяснить различие во временах релаксации энергии и импульса в решетках металлов и полупроводников.
Решение см.: [7, т.1, стр.246-247; 315-316]

ПЗ №20. Связь электронной структуры кристаллической решетки с механическими свойствами металлов

15.1. С помощью вычисленного закона дисперсии энергии валентных электронов в решетке металла вычислить энергию сцепления.

Решение см.: [8, стр.213-216]

15.2. Используя результаты задачи 13.1, вычислить сжимаемость металла.

Решение см.: [8, стр.213-214]

15.3. Вычислить скорость распространения волн электронной плотности в решетке металлов. Сравнить с результатом вычисления скорости звука в металлах.

Решение см.: [7, т.2, стр.66-69]; [8, стр.213-216]

Приложение 2.

Библиографический список

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. – 6-е изд., стер. – М.: Физматлит, 2004. – 800с.
2. Давыдов А.С. Квантовая механика. – 3-е изд., стер. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011.– 704 с. (– М.: Наука, 1973.– 704 с)
3. Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике в 2 частях. М.: Едиториал УРСС, 2001. – ч.1 – 304с; ч.2 – 304с.
4. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. в 2-х томах – М.: Мир, 1974.– т.1 – 341с; т.2 – 315с.
5. Гольдман И.И., Кривченков В.Д. Сборник задач по квантовой механике. – М.: УНЦ ДО, 2001. – 276с.
6. Гречко Л.Г.,Сугаков В.И., Томасевич О.Ф., Федорченко А.М. Сборник задач по теоретической физике, . – М.: Высшая школа, 1972. . – 336 с.
7. Ашкрофт Н., Мермин Н. “Физика твердого тела”.-М:“Мир”, 1979, тт.1,2. – т.1 – 399с; т.2 – 422с.
8. Журавлев В.М. Лекции по квантовой теории металлов. – М. ИКИ, 2002.– 240 с.
9. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. - М:“Высшая школа”, 2000. – 494 с.