

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Естественнонаучный институт
Кафедра «Физики»

Утверждено на заседании кафедры
«Физики»
«31» августа 2020 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой

 Р.Н.Ростовцев

**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ (ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ) ДЛЯ
ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ И
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

«ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

по направлению подготовки
01.04.03 Механика и математическое моделирование

с направленностью (профилем)
Механика деформируемого твердого тела

Форма обучения: очная

Идентификационный номер образовательной программы: 010403-01-21

Тула 2021 год

1. Описание фонда оценочных средств (оценочных материалов)

Фонд оценочных средств (оценочные материалы) включает в себя контрольные задания и (или) вопросы, которые могут быть предложены обучающемуся в рамках текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю). Указанные контрольные задания и (или) вопросы позволяют оценить достижение обучающимся планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), установленных в соответствующей рабочей программе дисциплины (модуля), а также сформированность компетенций, установленных в соответствующей общей характеристике основной профессиональной образовательной программы.

Полные наименования компетенций и индикаторов их достижения представлены в общей характеристике основной профессиональной образовательной программы.

2. Оценочные средства (оценочные материалы) для проведения текущего контроля успеваемости обучающихся по дисциплине (модулю)

2 семестр

Перечень контрольных заданий и (или) вопросов для оценки сформированности компетенции ОПК-1 (контролируемый индикатор достижения компетенции ОПК-1.1)

1. Контрольное задание. Запишите соотношение неопределённостей для проекции момента импульса на ось z и координаты x : $\Delta_n L_z \cdot \Delta_n y \geq ?$ Объясните, как получить это соотношение.

2. Контрольный вопрос. В поле ядра атома водорода $\varphi = ke/r$ волновая функция электрона записывается в виде $\psi(r, \theta, \varphi) = f(r) \cdot Y_l^m(\theta, \varphi)$, где $Y_l^m(\theta, \varphi)$ - сферические функции. Какой вид имеет радиальная функция $f(r)$? Что произойдёт, если радиальное квантовое число n_r , входящее в это решение перестанет быть целым?

3. Контрольный вопрос. Какой вид имеют волновые функции ψ_1 и ψ_2 электрона в атоме водорода, соответствующие двум нижшим разрешенным уровням энергии $E_1 = -\frac{k^2 m e^4}{2\hbar^2}$ и

$E_2 = -\frac{k^2 m e^4}{8\hbar^2}$? Как эти функции зависят от координат r, θ и φ ?

4. Контрольный вопрос. Можно ли одновременно определить (измерить) энергию и проекцию L_z орбитального момента импульса на ось z для электрона в атоме водорода, учитывая, что электрон – релятивистская частица? Можно ли при этом измерить проекцию на ось z проекции S_z его спина? Проекцию какого вектора на ось z можно определить одновременно с энергией? Ответ обосновать.

5. Контрольный вопрос. Что такое спин-орбитальное взаимодействие и на сколько подуровней оно расщепит каждый уровень энергии в атоме водорода?

6. Контрольный вопрос. Чему равны расстояния между соседними подуровнями, образованными при расщеплении уровня $3d$ в атоме водорода в тонкую структуру?

7. Контрольный вопрос. С помощью подходящих формул объясните, энергия какого атома – парагелия или ортогелия – больше и почему? Каким будет атом гелия в основном состоянии – ортогелием или парагелием? Почему? Ответы обосновать.

8. Контрольный вопрос. Что такое самосогласованное поле Хартри? Как оно связано с кулоновским и обменным интегралом и зачем его вводят? Как это поле связано со свойствами симметрии волновой функции электронов атомных оболочек? Свойства симметрии или антисимметрии какой части волновой функции (спиновой или координатной) важнее для определения свойств поля Хартри? Ответы обосновать.

9. Контрольный вопрос. По какой причине зависимость $E(\vec{p})$ энергии электрона в решетке твердого тела от его импульса на границе зон Бриллюэна отличается от параболической? Чему равна производная $dE/d\vec{p}$ на границе зоны Бриллюэна и почему?

10. Контрольный вопрос. В чем заключается адиабатический принцип Борна-Оппенгеймера, и как его применить к расчёту уровней энергии в кристаллическом твёрдом теле?

Перечень контрольных заданий и (или) вопросов для оценки сформированности компетенции ОПК-1 (контролируемый индикатор достижения компетенции ОПК-1.2)

1. Контрольное задание. Найти собственные функции и собственные значения оператора $\hat{A} = x \cdot \frac{d}{dx}$. Каким образом это сделать? Будет ли спектр собственных значений такого оператора непрерывным или дискретным?

2. Контрольное задание. Микрочастица совершает одномерное движение вдоль оси x . Найти собственные функции и собственные значения оператора \hat{p}_x проекции импульса на эту ось, если выполнено граничное условие $\psi(x) = \psi(x+a)$. Каким образом это сделать? Будет ли спектр собственных значений такого оператора непрерывным или дискретным?

3. Контрольное задание. Микрочастица совершает одномерное движение вдоль оси x . Найти собственные функции и собственные значения оператора $\hat{E}_{кин}$ кинетической энергии одномерного движения. Каким образом это сделать? Будет ли спектр собственных значений такого оператора непрерывным или дискретным?

4. Контрольный вопрос. Можно ли одновременно измерить квадрат момента импульса микрочастицы и проекцию её момента импульса на ось y ? Для объяснения вычислите коммутатор операторов этих величин $[\hat{L}^2, \hat{L}_y]$.

5. Контрольное задание. Электрон в атоме водорода находится в возбуждённом $3p$ -состоянии. Запишите явную зависимость волновой функции ψ этого электрона от координат r, θ и ϕ . Постройте качественный график зависимости вероятности обнаружения электрона от координаты r . Какому расстоянию r соответствует максимум этого графика?

6. Контрольный вопрос. Состояние микрочастицы с массой m , находящейся в одномерной прямоугольной потенциальной яме ширины a с бесконечными стенками

$U(x) = \begin{cases} \infty & \text{при } x < 0; x > a; \\ 0 & \text{при } 0 \leq x \leq a, \end{cases}$ описывается волновой функцией $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)$. Чему

равна вероятность обнаружения этой частицы в состоянии с наименьшей энергией

$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2}$, в котором частица должна иметь волновую функцию $\psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$? Каким образом можно вычислить такую вероятность?

7. Контрольный вопрос. Состояние микрочастицы с массой m , находящейся в одномерной прямоугольной потенциальной яме ширины a с бесконечными стенками

$U(x) = \begin{cases} \infty & \text{при } x < 0; x > a; \\ 0 & \text{при } 0 \leq x \leq a, \end{cases}$ описывается волновой функцией $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$. Чему равно среднее значение кинетической энергии этой частицы $\langle E_{\text{кин}} \rangle = ?$

8. Контрольное задание. Две волновые функции ψ_i^0 , $i = 1, 2$ соответствуют одному собственному значению энергии $E_0 = 100$ эВ. После включения дополнительного взаимодействия

\hat{V} (оператор возмущения) с матричными элементами $\int \psi_i^{0*} \hat{V} \psi_j^0 d^3r = \begin{vmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{vmatrix}$, где $V_{11} = 16$

эВ, $V_{12} = V_{21} = 8$ эВ, $V_{22} = 4$ эВ, вырождение уровня E_0 было снято. Найти разность ΔE между двумя появившимися на месте E_0 подуровнями энергии.

9. Контрольный вопрос. На сколько подуровней расщепляется уровень энергии $4f$ в атоме водорода, если учесть тонкую структуру? Какими будут значения энергии этих подуровней? Ответ обосновать.

10. Контрольное задание. Сформулируйте правило Хунда. При каком спине системы энергия системы взаимодействующих друг с другом электронов будет минимальной? Чему равен спин атома гелия в основном состоянии, и как это совместить с правилом Хунда? Все ответы обосновать.

Перечень контрольных заданий и (или) вопросов для оценки сформированности компетенции ОПК-1 (контролируемый индикатор достижения компетенции ОПК-1.3)

1. Контрольное задание. Микрочастица находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме ширины a с бесконечными стенками $U(x) = \begin{cases} \infty & \text{при } x < 0; x > a; \\ 0 & \text{при } 0 \leq x \leq a. \end{cases}$ Её состояние с

наименьшей энергией описывается волновой функцией $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$. Вычислите

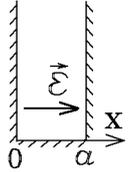
среднюю величину квадрата проекции импульса на ось x в этом состоянии: $\langle p_x^2 \rangle = ?$ Вычислите неопределенность этой проекции импульса: $\Delta_n p_x = ?$

2. Контрольное задание. Электрон в атоме водорода находится в возбужденном $2s$ – состоянии. Запишите явную зависимость волновой функции ψ этого электрона от координат r, θ и ϕ . Постройте качественный график зависимости вероятности обнаружения электрона от координаты r . Какому расстоянию r соответствует максимум этого графика?

3. Контрольное задание. Какой вид имеют волновые функции ψ_1 и ψ_2 электрона в атоме водорода, соответствующие двум низшим разрешенным уровням энергии $E_1 = -\frac{k^2 m e^4}{2\hbar^2}$ и

$E_2 = -\frac{k^2 m e^4}{8\hbar^2}$? Как эти функции зависят от координат r, θ и φ ?

4. Контрольное задание. Микрочастица с массой m и с зарядом q находилась в одномерной прямоугольной потенциальной яме ширины a с бесконечно высокими стенками (волновая функция такого состояния $\psi = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$). Внутри ямы



включают **слабое** электрическое поле с напряжённостью $\vec{\mathcal{E}}$ и с потенциалом φ ($V = q\varphi$ – энергия частицы в таком поле). Определите, на какую величину и в какую сторону сместится при этом уровень энергии $E_0 = \pi^2 \hbar^2 / 2ma^2$ основного состояния? Учтите, что $\int \xi \sin^2 \xi d\xi = (\xi^2 - \xi \sin(2\xi) - \cos(2\xi)) / 4$.

5. Контрольное задание. Известно, что \vec{r}_i – это радиус-вектор i – го электрона в атоме из $i = 1, 2, \dots, N$ электронов. Что такое самосогласованное поле Хартри в этом атоме? Каков его физический смысл? Как его вычислить, если известны только волновые функции $\psi_i^{(0)}(\vec{r}_i)$ одноэлектронных водородоподобных атомов с зарядом ядра $+Ze$? Запишите выражение поля Хартри и опишите процедуру вычисления его **точного** значения. Ответы обосновать.

6. Контрольное задание. Рассматривается одномерный квантовый гармонический осциллятор с частотой ω . Волновая функция ψ соответствует энергии E . В состоянии с волновой функцией ψ' энергия осциллятора увеличена на $\hbar\omega$: $E' = E + \hbar\omega$. Найдите оператор \hat{A} , связывающий эти функции: $\psi' = \hat{A}\psi$ и объясните его физический смысл.

7. Контрольный вопрос. Каким образом из уравнения Клейна-Гордона-Фока, описывающего состояние релятивистской свободной заряженной частицы со спином 0 получить уравнение для определения волновой функции этой частицы, находящейся в электрическом поле атомного ядра?

8. Контрольное задание. Считая, что самосогласованное поле Хартри для i – го электрона из оболочки с главным квантовым числом $n=3$ атома с зарядовым числом $Z=22$ равно

$\hat{\phi}_i(\vec{r}_i) = \frac{2ke^2}{r_i}$, где $k = 9 \cdot 10^9$; e – заряд электрона; r_i – его удаление от ядра, найти энергию этого электрона E_i (в эВ). Указание: сравните уравнения Шредингера для одноэлектронного атома с уравнением Шредингера для указанного многоэлектронного атома.

9. Контрольный вопрос. Объясните, почему обменный интеграл, соответствующий связующей молекулярной орбитали имеет отрицательный знак. Почему энергия взаимодействия соседних атомов в решетке имеет минимум?

10. Контрольный вопрос. Как рассчитать положение и ширину энергетической зоны для электронной подсистемы в методе Вигнера-Зейтца?

3. Оценочные средства (оценочные материалы) для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)

2 семестр

Перечень контрольных заданий и (или) вопросов для оценки сформированности компетенции ОПК-1 (контролируемый индикатор достижения компетенции ОПК-1.1)

1. Контрольный вопрос. Угол φ (переменная в сферической системе координат) не определён и может меняться в пределах $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Чему равна неопределённость проекции момента импульса L_z на ось z ? Каким образом можно вычислить эту неопределённость?
2. Контрольный вопрос. В поле центральных сил с потенциальной энергией $U(r)$ решение уравнения Шредингера $\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0$ записывается в виде $\psi(r, \theta, \varphi) = f(r) \cdot Y_l^m(\theta, \varphi)$, где $Y_l^m(\theta, \varphi)$ - сферические функции. Какой вид имеет уравнение Шредингера для радиальной функции $f(r)$? Какой вид имеет добавок к потенциальной энергии (центробежная энергия)?
3. Контрольное задание. Одномерный квантовый гармонический осциллятор ($U = m\omega^2 x^2/2$) имеет два низших разрешенных значения энергии $E_0 = \hbar\omega/2$ и $E_1 = 3\hbar\omega/2$. Запишите явную зависимость от координаты x отношения собственных волновых функций осциллятора, соответствующих этим уровням энергии: $\psi_1(x)/\psi_0(x) = ?$
4. Контрольный вопрос. Диагональные матричные элементы оператора возмущений равны $V_{nn} = 0$. Как включение возмущения влияет на **основной** (низший) уровень энергии: увеличивает? уменьшает? не изменяет? Объяснить ответ с помощью формул, учитывая несколько порядков теории возмущений.
5. Контрольный вопрос. На сколько подуровней расщепляется уровень энергии $4f$ в атоме водорода, если учесть тонкую структуру? Какими будут значения энергии этих подуровней? Ответ обосновать.
6. Контрольный вопрос. Состояние электрона в атоме водорода описывается термом $3d_{5/2}$. Во внешнем магнитном поле \vec{B} энергия такого электрона изменяется на величину $\frac{e\hbar B}{2m} g m_j$. Чему равна величина фактора Ланде g в этом случае? Какие значения может принимать квантовое число m_j ?
7. Контрольный вопрос. Сформулируйте правило Хунда. При каком спине системы энергия системы взаимодействующих друг с другом электронов будет минимальной? Чему равен спин атома гелия в основном состоянии, и как это совместить с правилом Хунда? Все ответы обосновать.

8. Контрольное задание. С помощью подходящих формул объясните, энергия какого атома – парагелия или ортогелия – больше и почему? Каким будет атом гелия в основном состоянии – ортогелием или парагелием? Почему? Ответы обосновать.

9. Контрольный вопрос. В чём суть метода линейной комбинации атомных орбиталей и каким образом находят связующие орбитали в кристаллическом твёрдом теле?

10. Контрольный вопрос. Что такое зоны Бриллюэна и почему электрон с импульсом из первой зоны Бриллюэна может иметь несколько значений энергии?

Перечень контрольных заданий и (или) вопросов для оценки сформированности компетенции ОПК-1 (контролируемый индикатор достижения компетенции ОПК-1.2)

1. Контрольное задание. Микрочастица совершает одномерное движение вдоль оси x . Найти собственные функции и собственные значения оператора $\hat{A} = \hat{x} + \hat{p}_x$. Каким образом это сделать? Будет ли спектр собственных значений такого оператора непрерывным или дискретным?

2. Контрольное задание. Найти собственные функции и собственные значения оператора \hat{L}_z^2 квадрата проекции момента импульса на ось z . Каким образом это сделать? Будет ли спектр собственных значений такого оператора непрерывным или дискретным при условии, что $\psi(\varphi) = \psi(\varphi + 2\pi)$?

3. Контрольное задание. Запишите соотношение неопределённостей для проекции момента импульса на ось z и координаты x : $\Delta_H L_z \cdot \Delta_H x \geq ?$ Объясните, как получить это соотношение.

4. Контрольный вопрос. Можно ли одновременно измерить координату y микрочастицы и проекцию её момента импульса на ось x ? Для объяснения вычислите коммутатор операторов этих величин $[\hat{y}, \hat{L}_x]$.

5. Контрольное задание. Состояние микрочастицы с массой m , находящейся в одномерной прямоугольной потенциальной яме ширины a с бесконечными стенками

$U(x) = \begin{cases} \infty & \text{при } x < 0; x > a; \\ 0 & \text{при } 0 \leq x \leq a, \end{cases}$ описывается волновой функцией $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$. Определите

вероятность обнаружения этой частицы в состоянии с энергией $E_2 = \frac{4\pi^2 \hbar^2}{2ma^2}$, в котором

частица должна иметь волновую функцию $\psi_2(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right)$? Каким образом можно вычислить такую вероятность?

6. Контрольное задание. Микрочастица находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме ширины a с бесконечными стенками $U(x) = \begin{cases} \infty & \text{при } x < 0; x > a; \\ 0 & \text{при } 0 \leq x \leq a. \end{cases}$ Её состояние с

наименьшей энергией описывается волновой функцией $\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$. Вычислите

среднюю величину квадрата проекции импульса на ось x в этом состоянии: $\langle p_x^2 \rangle = ?$ Вычислите неопределенность этой проекции импульса: $\Delta_H p_x = ?$

7. Контрольное задание. В некоторой потенциальной яме для микрочастицы с массой m существуют только три разрешенных уровня энергии $E_1 = 1$ эВ, $E_2 = 4$ эВ и $E_3 = 9$ эВ. Включают дополнительное **малое** возмущение. Определите на какую величину и в какую сторону сместится основной уровень энергии E_1 , если матричные элементы оператора возмущения

$$\int \psi_i^{0*} \hat{V} \psi_j^0 d^3r = \begin{vmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{vmatrix}, \text{ где } V_{11} = V_{22} = 0, V_{33} = V_{12} = V_{21} = 0,3 \text{ эВ}, V_{13} = V_{31} = 0,2 \text{ эВ}, V_{23} =$$

$V_{32} = -0,1$ эВ. Учтеть два порядка теории возмущений.

8. Контрольное задание. Запишите терм основного состояния атома азота N_7^{14} . С помощью каких правил можно определить этот терм? Какова его мультиплетность? Зачем вводят термы?

9. Контрольное задание. Определите расстояния между соседними подуровнями, образованными при расщеплении уровня $3d$ в атоме водорода в тонкую структуру?

10. Контрольное задание. С помощью связующих орбиталей объясните, почему кристаллические диэлектрики обладают большой твёрдостью и хрупкостью, а металлы – пластичны.

Перечень контрольных заданий и (или) вопросов для оценки сформированности компетенции ОПК-1 (контролируемый индикатор достижения компетенции ОПК-1.3)

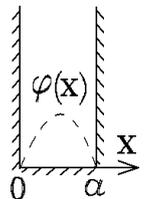
1. Контрольное задание. Микрочастица совершает одномерное движение вдоль оси x . Найти собственные функции и собственные значения оператора \hat{p}_x проекции импульса на эту ось, если выполнено граничное условие $\psi(x) = \psi(x+a)$. Каким образом это сделать? Будет ли спектр собственных значений такого оператора непрерывным или дискретным?

2. Контрольное задание. Электрон в атоме водорода находится в возбуждённом $3p$ -состоянии. Запишите явную зависимость волновой функции ψ этого электрона от координат r, θ и φ . Постройте качественный график зависимости вероятности обнаружения электрона от координаты r . Какому расстоянию r соответствует максимум этого графика?

3. Контрольное задание. В одномерной прямоугольной потенциальной яме ширины a с бесконечно высокими стенками в основном состоянии с энергией $E_0 = \pi^2 \hbar^2 / 2ma^2$ находилась частица с массой m и с зарядом q (волновая

функция такого состояния $\psi = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)$). Внутри ямы включили **слабое**

электрическое поле с потенциалом $\varphi = \varphi_0 \sin(\pi x/a)$. Определите на какую величину и в какую сторону сместится при этом уровень энергии E_0 ? Указание: при вычислении сделать замену переменной $\xi = \cos(\pi x/a)$.



4. Контрольное задание. Предложите способ определения собственной функции оператора \hat{S}_x проекции спина на ось x ? Как нормировать такую функцию?

5. Контрольный вопрос. Вариационный метод Хартри-Фока позволяет получить для N – электронного атома систему уравнений

$$\left(\hat{H}_i^{(0)} + \hat{Y}_{ii} - E_i \right) \psi_i \pm \sum_{j \neq i}^N \hat{Y}_{ij} \psi_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \text{ где } \hat{H}_i^{(0)} \text{ – оператор Гамильтона } i \text{ – го}$$

электрона с радиус-вектором \vec{r}_i , взаимодействующего только с ядром. Запишите явное выражение для полей Хартри Y такой квантовомеханической системы с помощью оператора взаимодействия i – го и j – го электронов. Чем являются поля Хартри – кулоновскими или обменными интегралами? Каков их физический смысл?

6. Контрольное задание. Имеется многоэлектронная система (атом). $\hat{H}_i^{(0)}$ – оператор Гамильтона i – го электрона, взаимодействующего с ядром атома и не взаимодействующего с остальными электронами атома. Чтобы определить разрешенное значение энергии E_i i – го электрона и его волновую функцию ψ_i вариационным методом Хартри, надо вычислить вариацию некоторого функционала. Запишите выражение этого функционала. В чем совпадают и чем различаются метод Хартри и метод Ритца? Какие уравнения для определения E_i и ψ_i получатся после вычисления вариаций?

7. Контрольный вопрос. Объясните, почему обменный интеграл, соответствующий связующей молекулярной орбитали имеет отрицательный знак. Почему энергия взаимодействия соседних атомов в решетке имеет минимум?

8. Контрольное задание. Энергия электрона в водородоподобном ионе некоторого атома (один электрон в атоме) в основном состоянии равна $-218,0$ эВ. Энергии электронной оболочки гелиеподобного иона того же атома (два электрона в атоме на той же подоболочке) в пара- и орто-состояниях равны, соответственно, $-916,8$ эВ и $-916,4$ эВ. Найти отношение $|Q/A|$ величин кулоновского и обменного интегралов для гелиеподобного иона.

9. Контрольный вопрос. По какой причине зависимость $E(\vec{p})$ энергии электрона в решетке твердого тела от его импульса на границе зон Бриллюэна отличается от параболической? Чему равна производная $\partial E / \partial \vec{p}$ на границе зоны Бриллюэна и почему?

10. Контрольный вопрос. Как по вычисленной зависимости энергии сцепления решётки металла от межатомного расстояния вычислить коэффициент сжимаемости металла?

4. Оценочные средства (оценочные материалы) для проведения промежуточной аттестации обучающихся (защиты курсовой работы (проекта)) по дисциплине (модулю)

Занятия указанного типа не предусмотрены основной профессиональной образовательной программой.