

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Атомная физика

Уровень высшего образования

Специалитет

Направление подготовки / специальность

11.05.02 - Специальные радиотехнические системы

Направленность образовательной программы

Радиотехнические системы и комплексы специального назначения

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.22 Атомная физика относится к обязательной части образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен использовать в профессиональной деятельности основные законы естественнонаучных дисциплин, применять методы математического анализа и моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, приобретать новые математические и естественнонаучные знания, используя современные образовательные и информационные технологии	ОПК-1.1: Разбирается в основных разделах математических и естественнонаучных дисциплин ОПК-1.2: Применяет основные законы естественнонаучных дисциплин, методы математического анализа и моделирования, теоретических и экспериментальных исследований	ОПК-1.1: Разбирается в основных законах атомной физики, приводящих к многообразию специализированных проявлений в макром мире: фотоэффект, излучение абсолютно черного тела, квантовое туннелирование, распад ядра, спектральные и магнитооптические явления. ОПК-1.2: Может применять основные законы атомной физики для анализа явлений микромира.	Задачи	Зачёт: Задачи

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	3
Часов по учебному плану	108
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	32
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	0
- КСР	1
самостоятельная работа	75

Промежуточная аттестация	0 Зачёт
---------------------------------	--------------------------

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
Ф	Ф	Ф	Ф	Ф	
О необходимости всестороннего изучения экспериментальных фактов, приводящих к новым закономерностям в атомных явлениях.	5	2		2	3
Квантовая теория фотоэффекта. Понятие фотона.	8	2		2	6
Эффект Комптона. Элементы специальной теории относительности.	12	4		4	8
Равновесное излучение абсолютно черного тела. Элементы статистической физики.	12	4		4	8
Опыт Дэвиссона и Джермера.	6	2		2	4
Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона.	8	2		2	6
Атомная теория Бора.	8	2		2	6
Волновые свойства частиц. Понятие волновой функции. Волна де Бройля.	8	2		2	6
Волновой пакет. Вероятностная интерпретация волновой функции. Принцип суперпозиции.	12	4		4	8
Уравнение Шрёдингера и его применение для расчета простейших моделей атомных систем.	15	5		5	10
Явление квантового туннелирования. Распад атомного ядра.	13	3		3	10
Аттестация	0				
КСР	1			1	
Итого	108	32	0	33	75

Содержание разделов и тем дисциплины

1. Фотоэффект. Опыты Герца и Столетова. Закон Эйнштейна. Соотношение Эйнштейна. Корпускулярно-волновой дуализм.
2. Рассеяние электромагнитного излучения на свободных зарядах. Эффект Комптона. Элементы релятивистской механики.
3. Модель атома Томсона. Опыты Резерфорда. Планетарная модель атома и проблема устойчивости атомов. Сериальные закономерности в спектре атома водорода. Квантование момента импульса. Постулаты Бора. Экспериментальное доказательство дискретной структуры атомных уровней.

4. Равновесное электромагнитное излучение в полости. Законы Релея-Джинса и Вина. Гипотеза Планка. Кванты излучения. Формула Планка. Закон Стефана-Больцмана и закон смещения Вина.
5. Гипотеза де-Бройля. Волновые свойства частиц. опыты Девиссона-Джермера и Томсона, их современные модификации. Волны де-Бройля. Соотношения де-Бройля.
6. Волновая функция и её интерпретация. Волновой пакет. Фазовая и групповая скорость волн де-Бройля. Детерминированность классической физики и вероятностный подход в квантовой механике. Проблема измерений в квантовых системах. Микроскоп Гейзенберга.
7. Квантовая система, ее состояние, измерения и измеряемые параметры. Свойства волновой функции. Принцип суперпозиции. Уравнение Шредингера. Стационарные и нестационарные состояния.
8. Потенциальная яма с бесконечными стенками. Состояния с определенным значением энергии. Уровни энергии частицы. Вероятности измерения энергии в суперпозированном состоянии.
9. Прохождение частицы через потенциальный барьер. Граничные условия. Туннельный эффект. Надбарьерное отражение.
10. Туннельный эффект: α – распад атомных ядер, автоэлектронная эмиссия.
11. Орбитальный механический и магнитный моменты электрона. Магнетон Бора. Экспериментальное определение магнитных моментов. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Собственный магнитный момент электрона. Спиновое гиромангнитное отношение.

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Савельев Игорь Владимирович. Курс общей физики : в 5 кн. - М. : Астрель : АСТ, 2005-. Курс общей физики. Кн. 5. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. - М. : Астрель : АСТ, 2007. - 368 с. : ил. - ISBN 5-17-004587-5 (кн. 5) : 169.00.

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1:

1. При поочередном освещении ультрафиолетовым излучением поверхностей двух металлов с работами выхода $\phi_1 = 4.47$ эВ и $\phi_2 = 1.89$ эВ обнаружили, что соответствующие максимальные скорости фотоэлектронов отличаются друг от друга в $n = 1.4$ раза. Найти длину волны излучения.
2. Температура поверхности звезды 61 созвездия Лебедя $T = 5000$ К, а ее звездная постоянная (плотность светового потока энергии звездного излучения у поверхности Земли) равна $E = 1.13 \times 10^{-7}$ эрг/(см²·с). Оцените радиус звезды, если она удалена от Земли на расстояние $r = 1.04 \times 10^{19}$ см.
3. Определить скорость электрона, если его дебройлевская длина волны $\lambda = 21.6$ раз меньше радиуса первой борновской орбиты в атоме водорода.
4. Моноэнергетический пучок нерелятивистских электронов, ускоренных в электрическом поле, падает на поверхность монокристалла LiF, постоянная d кристаллической решетки которого равна $d = 3.8$ Å.

При угле скольжения $\theta = 1^\circ 30'$ наблюдается максимум отражения 2-го порядка. Найти ускоряющую разность потенциалов U .

5. Ион He^{1+} испустил квант света при переходе из возбужденного состояния в основное. Определить номер орбиты, соответствующей данному возбужденному состоянию, если кинетическая энергия фотоэлектрона, вырванного этим квантом из атома водорода, который находился в основном состоянии и покоился, составила $= 27.3$ эВ.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.
не зачтено	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

			объеме	некоторые с недочетами	недочетами	и, выполнены все задания в полном объеме	
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

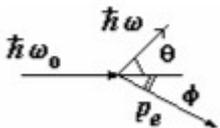
Явление фотоэффекта

1. На металлическую поверхность с работой выхода $A=3.6$ эВ воздействует

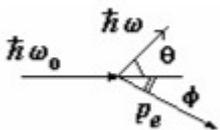
электромагнитное поле $E = E_0(1 + \cos \omega t) \cos \omega_0 t$ (E – напряженность электрического поля волны). Найти энергию фотонов, если $\omega = 4.8 \cdot 10^{15}$ рад/с, $\omega_0 = 6.4 \cdot 10^{15}$ рад/с.

2. Красная граница фотоэффекта для цезия равна $\lambda = 6390 \text{ \AA}$. Чему равна максимальная энергия фотоэлектронов, если падающее на цезиевый фотокатод излучение имеет длину волны $\lambda = 912 \text{ \AA}$.
3. Производится облучение поверхности металла с работой выхода $A_{\text{вых}} = 3 \text{ эВ}$. Спектральный состав излучения источника соответствует равновесному тепловому с температурой $T = 5700 \text{ К}$. Найти среднюю энергию фотоэлектронов, считая, что вероятность вырывания электрона фотоном не зависит от длины волны излучения.
4. Оценить величину фототока с поверхности металла площадью $S = 1 \text{ см}^2$ (работа выхода $A = 4 \text{ эВ}$) под действием излучения Солнца. Спектр излучения Солнца считать близким к спектру излучения черного тела с температурой $T = 5700 \text{ К}$. Считать величину квантового выхода фотоэффекта (вероятности вырывания электрона фотоном) не зависящей от длины волны и равной $\eta = 0.01$.
5. Когда длину волны света, освещающего поверхность некоторого металла, изменили с 0.35 мкм на 0.54 мкм , максимальная скорость фотоэлектронов уменьшилась в два раза. Найти работу выхода с поверхности этого металла.

Эффект Комптона

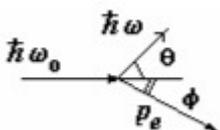


6. При рассеянии кванта с энергией 1.022 МэВ на свободном покоящемся электроме угол вылета электрона ϕ (см. рисунок) оказался таким, что $\text{tg } \phi = 1/3$. Найти угол рассеяния кванта θ .



7. При рассеянии кванта на свободном покоящемся электроме угол рассеяния кванта θ и угол вылета электрона ϕ (см. рисунок) оказались равны, причем $\theta = \phi = \pi/4$. Найти энергии квантов до и после рассеяния.

8. Излучение CO_2 - лазера ($\lambda_0 \approx 10 \text{ мкм}$) рассеивается на релятивистском электронном пучке с энергией $E = 5 \text{ ГэВ}$, движущемся навстречу. Какова длина волны излучения, рассеиваемого назад?



9. При рассеянии кванта на свободном покоящемся электроме угол вылета электрона ϕ (см. рисунок) оказался таким, что $\text{tg } \phi = 1/2$, а угол рассеяния кванта $\theta = \pi/2$. Найти энергию кванта.

10. Определить величину комптоновского смещения, если начальная длина волны фотона λ_0

= 0,0242 Å, а скорость электрона отдачи определяется соотношением $v/c = 0.6$. Считать, что до столкновения электрон покоился.

Излучение абсолютно черного тела

11. Радиус Солнца $R = 7 \cdot 10^{10}$ см, а температура его поверхности $T = 5770$ К. Оценить, используя закон Стефана-Больцмана, величину энергии, излучаемую Солнцем за 1 с.
12. На сколько градусов изменилась температура равновесного теплового излучения, если длина волны, соответствующая максимуму в спектре λ_{max} увеличилась на $\Delta\lambda = 260$ нм. (воспользоваться законом смещения Вина)

Атомная теория Бора

13. Используя теорию Бора, вычислить радиус второй орбиты в атоме водорода и скорость движения электрона на ней.
14. Используя теорию Бора, определить орбитальный магнитный момент электрона, движущегося по второй орбите атома водорода.
15. На какой орбите электрон атома водорода имеет скорость, приблизительно равную 734 км/с?
16. Определить частоту света, излучаемого атомом водорода, при переходе электрона на уровень с главным квантовым числом $n = 2$, если радиус орбиты электрона уменьшился в 9 раз.
17. Определить частоту света, излучаемого атомом водорода, при переходе электрона на уровень с квантовым числом $n = 2$, если радиус орбиты электрона уменьшился в 9 раз.
18. Используя теорию Бора, определить изменение орбитального механического момента электрона при переходе его из возбужденного состояния ($n = 2$) в основное с испусканием фотона с длиной волны $\lambda = 1,212 \cdot 10^{-7}$ м.
19. При переходе электрона в атоме водорода из возбужденного состояния в основное радиус орбиты электрона уменьшился в 16 раз. Определить длину волны излученного

фотона.

20. На сколько изменилась кинетическая энергия электрона в атоме водорода при излучении атомом фотона с длиной волны $\lambda = 486 \text{ нм}$?

Волновые свойства частиц. Волна де Бройля. Волновая функция.

21. Протон движется в магнитном поле с индукцией 15 мТл по окружности радиусом $1,4 \text{ м}$. Определите длину волны де Бройля для протона.
22. Параллельный пучок электронов, разогнанных в электрическом поле с разностью потенциалов 15 В , падает на узкую прямоугольную диафрагму шириной $0,08 \text{ мм}$. Найти ширину главного дифракционного максимума на экране, расположенном на расстоянии 60 см от диафрагмы.
23. Рассмотреть дифракцию пучка электронов на щели. Под каким углом обнаружатся первые дифракционные минимум и максимум, если энергия электронов, нормально падающих на щель шириной $b = 6 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, равна $W = 40 \text{ кэВ}$?
24. В электронном микроскопе энергия пучка электронов $E = 100 \text{ кэВ}$. Определить его предельно возможную разрешающую способность.
25. При каком значении скорости дебройлевская длина волны микрочастицы равна ее комптоновской длине волны?
26. Ширина следа электрона на фотопластинке, полученного с помощью камеры Вильсона, 1 мкм . Определить, можно ли по данному следу обнаружить отклонение в движении электрона от законов классической механики? Кинетическую энергию электрона принять 15 эВ . (воспользоваться соотношением неопределенности)
27. Определить длину волны де Бройля для электрона, движущегося со средней квадратичной скоростью при температуре 290 К .
28. Электрон ускорен разностью потенциалов 100 В . Найти групповую и фазовую скорости волн де Бройля. То же рассчитайте и при разности потенциалов 105 В .
29. Поток летящих электронов параллельно друг другу проходит щель шириной $0,01 \text{ мм}$ со скоростью $u_x = 105 \text{ м/с}$. Найти ширину центрального дифракционного максимума, наблюдаемого на экране, отстоящем от щели на расстоянии 1 м . Сравнить с шириной щели.

30. Найти величину плотности тока вероятности для следующих волновых функций: $\psi(x) = A(\exp(ikx) + i \exp(ikx))$ и $\psi(x) = A(\exp(ikx) + 0.5 \cdot \exp(ikx))$.

Уравнение Шредингера и его применение для расчета простейших моделей атомных систем.

31. Определить координаты наиболее вероятного и наименее вероятного местонахождения частицы внутри бесконечно глубокой одномерной прямоугольной потенциальной ямы шириной a в состояниях с $n = 1, 2$ и 3 .
32. Частица находится в одномерной потенциальной яме бесконечно глубокой потенциальной яме шириной a в первом возбужденном состоянии. Определить вероятность обнаружения частицы в области $\frac{3a}{8} < x < \frac{5a}{8}$ внутри ямы. (Выполнить рисунок).
33. Используя соотношение неопределенностей, оцените минимальную энергию, которой может обладать частица, находящаяся в бесконечно глубокой одномерной потенциальной яме шириной a ?
34. Для частицы массы m и энергии E рассчитать вероятность туннелирования через потенциальный барьер в виде дельта-функции Дирака $V = \alpha \delta(x)$ ($\alpha > 0$). *Примечание.* Использовать граничные условия в точке $x=0$ для производной волновой функции слева (I) и справа (II): $\psi'_{I}(0) = \psi'_{II}(0) + (2m\alpha/\hbar^2) \psi(0)$.
35. Частица находится в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме шириной a в основном состоянии. Определить вероятность обнаружения частицы в левой трети ямы (выполнить рисунок).
36. Частица находится в основном состоянии в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Оценить силу, с которой частица действует на стенку. Сделать расчет электрона в «яме» размером 10^{-10} м.
37. С помощью соотношения неопределенностей Гейзенберга ($\Delta x \Delta p \geq \hbar$, где Δx – дисперсия координаты, Δp – дисперсия импульса) оценить минимальное значение энергии одномерного гармонического осциллятора, колеблющегося с частотой ω .

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Продемонстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме.
не зачтено	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки.

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Гольдин Лев Лазаревич. Введение в атомную физику : [учеб. пособие для втузов]. - М. : Наука, 1969. - 303 с. : с черт. - 0.60., 36 экз.
2. Шпольский Э. В. Атомная физика. Т. 1. Введение в атомную физику / Шпольский Э. В. - 8-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 560 с. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-1005-7., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799661&idb=0>.
3. Матвеев Алексей Николаевич. Механика и теория относительности : учеб. пособие для студентов физ. специальностей вузов. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1986. - 320 с. : ил. - 1.40., 5 экз.
4. Иродов Игорь Евгеньевич. Квантовая физика : основные законы. - 5-е изд., стер. - М. : Бином. Лаборатория знаний, 2014. - 256 с. : ил. - (Общая физика). - ISBN 978-5-9963-1322-8 : 160.00., 1 экз.
5. Сивухин Дмитрий Васильевич. Общий курс физики : учеб. пособие для физ. специальностей вузов. Т. 5. Атомная и ядерная физика, ч. 1 : Атомная физика. - М. : Наука, 1986. - 416 с. : ил. - 1.20., 194 экз.

Дополнительная литература:

1. Браун Александр Георгиевич (Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)). Атомная и ядерная физика. Элементы квантовой механики. Практикум : Учебное пособие / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). - 1. - Москва : ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2025. - 88 с. - (Высшее образование (МАТИ-МАИ)). - ВО - Бакалавриат. - ISBN 978-5-16-019148-5. - ISBN 978-5-16-111902-0 (электр. издание), <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=917497&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

<https://teach-in.ru/course/atomic-physics/lecture>

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 11.05.02 - Специальные радиотехнические системы.

Автор(ы): Шарков Валерий Валерьевич, кандидат физико-математических наук.

Заведующий кафедрой: Оболенский Сергей Владимирович, доктор технических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 16.01.2024 г., протокол № №1.