

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ)**

УТВЕРЖДАЮ

Ректор МФТИ

д-р физ.-мат. наук, профессор

Д.В. Ливанов

2023 г.



**Дополнительная общеобразовательная
программа
дополнительного образования
«Термодинамика и молекулярная физика»**

Москва 2023

1. Общая характеристика программы

1.1. Целью реализации дополнительной общеобразовательной программы «Термодинамика и молекулярная физика» является изучение основных законов и принципов термодинамики и молекулярной физики, а также развитие у слушателей навыков анализа и решения задач, связанных с термодинамикой и молекулярной физикой.

1.2. Категории слушателей, на обучение которых рассчитана программа дополнительного образования (далее – программа): программа предназначена для любых слушателей, желающих изучить основные законы и принципы термодинамики и молекулярной физики. Для успешного освоения онлайн-курса слушателю желательно знать курс общей физики «Механика» и владеть основами математического анализа, знать основы линейной алгебры и теории вероятностей.

1.3. Нормативный срок освоения программы – 108 академических часов.

1.4. Форма обучения – очно-заочная с применением дистанционных образовательных технологий.

Программа может быть реализована в сетевой форме.

1.5. Режим обучения: 16 недель (6-7 часов в неделю).

2. Планируемые результаты обучения

В результате освоения программы слушатель должен:
знать:

- основные понятия, используемые в молекулярной физике, термодинамике;
 - смысл физических величин, используемых в молекулярной физике, термодинамике;
 - уравнения состояния идеального газа и газа Ван-дер-Ваальса;
 - распределения Больцмана и Максвелла, закон равномерного распределения энергии по степеням свободы;
 - нулевое, первое, второе и третье начала термодинамики, неравенство Клаузиуса, закон возрастания энтропии;
 - условия устойчивого термодинамического равновесия;
 - уравнение Клапейрона-Клаузиуса;
 - формулу Лапласа;
 - уравнения, описывающие процессы переноса (диффузии, вязкости, теплопроводности);
 - методы расчёта параметров состояния вещества;
 - методы расчёта работы, количества теплоты и внутренней энергии;
- уметь:

- использовать основные положения молекулярно-кинетической теории газов для решения задач;
- использовать законы молекулярной физики и термодинамики при описании равновесных состояний тепловых процессов и процессов переноса.

3. Структура программы

Программа предусматривает изучение следующих тем (модулей):

1. Основные понятия молекулярной физики и термодинамики
2. Второе начало термодинамики
3. Термодинамическое определение энтропии
4. Термодинамические функции
5. Условия термодинамического равновесия
6. Газ Ван-дер-Ваальса как модель реального газа
7. Динамические и статистические закономерности
8. Распределения Максвелла
9. Распределение Больцмана в однородном поле сил
10. Флуктуации
11. Теплоёмкость
12. Столкновения
13. Броуновское движение

Структура программы представлена в таблице 1.

Таблица 1

№	Тема (модуль)	Кол-во часов	В том числе	
			Аудит. занятия	Самост. работа
1	Основные определения, уравнение состояния, нулевое и первое начала термодинамики	8,7	4,7	4
2	Второе начало термодинамики. Круговые процессы	8,2	4,2	4
3	Энтропия	6,2	3,2	3
4	Термодинамические функции	6,8	3,8	3
5	Фазовые переходы и поверхностные эффекты	9	5	4
6	Газ Ван-дер-Ваальса. Эффект Джоуля-	8,9	4,9	4

	Томсона			
7	Контрольная работа №1	4		4
8	Введение в статистическую физику	8,3	4,3	4
9	Функции распределения по скоростям	8	4	4
10	Распределение Гиббса. Статистическое определение энтропии	6,6	3,6	3
11	Флуктуации	6,4	3,4	3
12	Элементы теории теплоемкости	6,5	3,5	3
13	Явления переноса	8	4	4
14	Броуновское движение	6,4	3,3	3,1
15	Контрольная работа №2	4		4
	Итоговая аттестация	2	1	1
Б1	Эффект Джоуля-Томсона. Скорость звука ¹	4,6	1,6	3
Б2	Поверхностные эффекты ²	5,1	2,1	3
Итого		108	52,9	55,1

4. Содержание программы

4.1. Учебно-тематический план программы

Таблица 2

Тема (модуль)	Тема урока	Кол-во часов	
		Аудит. занятия	Самост. работа
1. Основные определения, уравнение состояния, нулевое и первое начала термодинамики	Основные определения, уравнение состояния, нулевое и первое начала термодинамики	4,7	
	Учебные материалы		2
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
2. Второе начало термодинамики. Круговые процессы	Второе начало термодинамики. Круговые процессы	4,2	
	Учебные материалы		2
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
3. Энтропия	Энтропия	3,2	
	Учебные материалы		1

¹ Бонусный модуль

² Бонусный модуль

	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
4. Термодинамические функции	Термодинамические функции	3,8	
	Учебные материалы		1
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
5. Фазовые переходы и поверхностные эффекты	Фазовые переходы и поверхностные эффекты	5	
	Учебные материалы		2
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
6. Газ Ван-дер-Ваальса. Эффект Джоуля-Томсона	Газ Ван-дер-Ваальса. Эффект Джоуля-Томсона	4,9	
	Учебные материалы		2
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
7. Контрольная работа №1	Контрольная работа №1		4
8. Введение в статистическую физику	Введение в статистическую физику	4,3	
	Учебные материалы		2
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
9. Функции распределения по скоростям	Функции распределения по скоростям	4	
	Учебные материалы		2
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
10. Распределение Гиббса. Статистическое определение энтропии	Распределение Гиббса. Статистическое определение энтропии	3,6	
	Учебные материалы		1
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
11. Флуктуации	Флуктуации	3,4	
	Учебные материалы		1
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
12. Элементы теории теплоемкости	Элементы теории теплоемкости	3,5	
	Учебные материалы		1
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
13. Явления переноса	Явления переноса	4	
	Учебные материалы		2
	Проверочный тест		0,5

	Задачи		1,5
14. Броуновское движение	Броуновское движение	3,3	
	Учебные материалы		1,1
	Проверочный тест		0,5
	Задачи		1,5
15. Контрольная работа №2	Контрольная работа №2		4
Итоговая аттестация	Экзамен	1	1
<i>Б1. Эффект Джоуля-Томсона. Скорость звука</i>	<i>Эффект Джоуля-Томсона. Скорость звука</i>	1,6	
	<i>Учебные материалы</i>		1
	<i>Проверочный тест</i>		0,5
	<i>Задачи</i>		1,5
<i>Б2. Поверхностные эффекты</i>	<i>Поверхностные эффекты</i>	2,1	
	<i>Учебные материалы</i>		1
	<i>Проверочный тест</i>		0,5
	<i>Задачи</i>		1,5

4.2. Учебная программа по модулям

Таблица 3

№ п/п	Наименование темы (модуля)	Содержание обучения, наименование и тематика практических занятий (семинаров), самостоятельной работы, используемых образовательных технологий
1	Основные определения, уравнение состояния, нулевое и первое начала термодинамики	Лекции Основные понятия и задачи молекулярной физики и термодинамики Давление. Калорическое уравнение состояния. Температура Уравнение состояния идеального газа Работа и внутренняя энергия. Первое начало термодинамики Независимость внутренней энергии идеального газа от объема Теплоемкость. Энтальпия Адиабатический и политропический процессы Уравнения состояния Практические занятия Температурный коэффициент давления Неравновесное выравнивание температур Двухступенчатый компрессор Расширение идеального газа по заданному закону Масляный насос Обратимые и необратимые процессы

		Демонстрации Газовый термометр Огниво Нагрев Работа над телом Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
2	Второе начало термодинамики. Круговые процессы	Лекции Второе начало термодинамики. КПД Цикл Карно Неравенство Клаузиуса Максимальность КПД цикла Карно Абсолютная шкала температур Практические занятия Обогрев помещения Работа в круговом процессе Расчет КПД цикла 1 Расчет КПД цикла 2 Замораживание воды Расчет КПД цикла 3 Демонстрации Тепловая машина Тепловая машина и второе начало термодинамики Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
3	Энтропия	Лекции Энтропия Энтропия идеального газа Второе начало термодинамики Адиабатическое расширение газа в вакуум Третье начало термодинамики Закон возрастания энтропии Практические занятия Изменение энтропии идеального газа Необратимое расширение идеального газа Охлаждение части газа Выравнивание температур Обратимый цикл Максимальная работа Самостоятельная работа

		Учебные материалы Проверочный тест Задачи
4	Термодинамические функции	Лекции Термодинамические функции Максимальная и минимальная работа Преобразование термодинамических функций Теплофизические свойства твердых тел Тепловое расширение Практические занятия Охлаждение воды при адиабатическом сжатии Работа по сжатию ртути Циклический процесс с железным стержнем Теплоемкость неизвестного вещества Адиабатическое растяжение проволоки Изотермическая сжимаемость воды Демонстрации Тепловое расширение твердых тел Изменение размеров резины при нагреве Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
5	Фазовые переходы и поверхностные эффекты	Лекции Фазовые превращения Условие равновесия фаз Диаграмма состояния Уравнение Клапейрона-Клаузиуса Тройная точка Фазовые переходы первого и второго рода Коэффициент поверхностного натяжения Теплота образования единицы площади поверхностной пленки Свободная энергия поверхности Краевые углы Формула Лапласа Давление пара у поверхности Демонстрации Кипение при пониженном давлении Плавление льда под нагрузкой Туман Два мыльных пузыря Лист металла на воде

		Кораблик Перемычка Вода в сите Мыльная пленка 1 Мыльная пленка 2 Практические занятия Равновесие фаз гелия Конденсация водяного пара Температура плавления Охлаждение пленки при растяжении Притяжение пластин Размер пузырьков и закипание воды Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
6	Газ Ван-дер-Ваальса. Эффект Джоуля-Томсона	Лекции Газ Ван-дер-Ваальса Изотермы газа Ван-дер-Ваальса Внутренняя энергия газа Ван-дер-Ваальса Изотерма реального газа Уравнение адиабаты газа Ван-дер-Ваальса Скорость звука в газах Скорость истечения газа из отверстия Эффект Джоуля-Томсона Получение низких температур Интегральный эффект Джоуля-Томсона Практические занятия Охлаждение из критического состояния Адиабатическое охлаждение Политропическое расширение газа Ван-дер-Ваальса Ударные волны при истечении газа Звуковые колебания в гелии Процесс Джоуля-Томсона в разреженном газе Демонстрации Перегретая жидкость Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
7	Контрольная работа №1	Самостоятельная работа Контрольная работа №1
8	Введение в статистическую	Лекции Макроскопические и микроскопические состояния

	физику	Фазовое пространство Элементы теории вероятностей Условие нормировки Средние величины и дисперсия Практические занятия Средний квадрат флуктуации Плотность вероятности распределения по энергии Число молекул в выделенном объеме Пьяный матрос Сопротивления резисторов Фазовый объем Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
9	Функции распределения по скоростям	Лекции Функция распределения вероятности и средние Распределения Максвелла Вывод распределения Максвелла Наиболее вероятная, средняя и среднеквадратичная скорости Среднее число ударов молекул, сталкивающихся в единицу времени с единичной площадкой Границы применимости распределения Максвелла Практические занятия Адиабатическое расширение газа Двумерный идеальный газ Плотность потока молекул Энергия молекул, вылетающих через малое отверстие Электроны в диоде Облучение пластинки Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
10	Распределение Гиббса. Статистическое определение энтропии	Лекции Распределение Больцмана Микро- и макросостояния Статистическое определение энтропии Распределение Гиббса Статистическая сумма Практические занятия Теплоемкость газа в поле тяжести

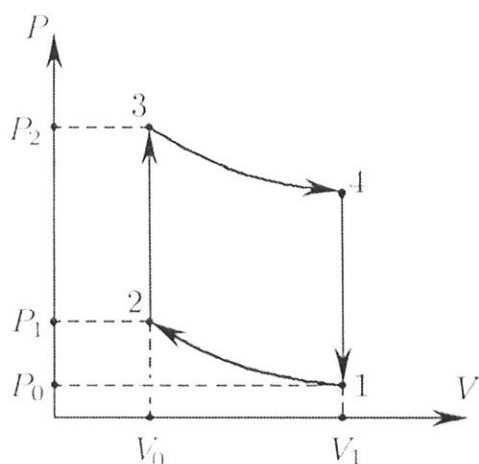
		Газ в коническом сосуде Газ во вращающемся сосуде Вероятность состояния Модель плавления Леннарда-Джонса-Девоншира Газ двухуровневых молекул Демонстрации Распределение Больцмана Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
11	Флуктуации	Лекции Флуктуации аддитивных физических величин Флуктуации Флуктуации температуры при фиксированном объеме Флуктуации объема в изотермическом процессе Флуктуация числа частиц Практические занятия Относительная флуктуация плотности Флуктуация температуры в гелии Флуктуация объема капли ртути Флуктуация высоты столба жидкости в капилляре Чувствительность пружинных весов Флуктуация кинетической энергии Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
12	Элементы теории теплоемкости	Лекции Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы Теплоемкость Практические занятия Теплоемкость системы невзаимодействующих спинов Колебательная теплоемкость Отжиг вакансий Адиабатическое сжатие водорода Теплоемкость вращающегося газа Зависимость теплоемкости от температуры Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
13	Явления переноса	Лекции

		Длина свободного пробега Диффузия Теплопроводность Уравнение теплопроводности Вязкость Практические занятия Число столкновений Передача тепла вдоль стержня Распределение температуры в газе между пластинами Подогрев газа в цилиндре Испарение воды из трубки Трение в плотном и разреженном воздухе Демонстрации Диффузия Теплопроводность газов Вязкость газа Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
14	Броуновское движение	Лекции Броуновское движение. Подвижность Закон Эйнштейна-Смолуховского Связь подвижности и коэффициента диффузии Явления переноса в разреженных газах Эффект Кнудсена Течение разреженного газа через прямолинейную трубку Практические занятия Сообщающиеся сосуды при разных температурах Промерзание почвы Разделение изотопов методом эффузии Разность молярных энтропий в условиях эффекта Кнудсена Падение капли в воздухе Броуновское смещение эритроцитов Демонстрации Радиометр Эффузия гелия Тепловая эффузия Самостоятельная работа Учебные материалы

		Проверочный тест Задачи
15	Контрольная работа №2	Самостоятельная работа Контрольная работа №2
	Итоговая аттестация	Практическое занятие: итоговое тестирование по материалам лекций Самостоятельная работа: подготовка к итоговому тестированию
Б1	Эффект Джоуля-Томсона. Скорость звука	Практические занятия Атмосферное давление Расширение газа в вакуум Скорость звука в примеси Температура на поверхности Марса Изотермическое расширение газа Ван-дер-Ваальса Изменение энтропии в процессе Джоуля-Томсона Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи
Б2	Поверхностные эффекты	Практические занятия Упругость насыщенных паров воды Пузыри Испарение гелия при расширении Равновесие воды и пара Работа на дробление капли Равновесие системы туман-пар Самостоятельная работа Учебные материалы Проверочный тест Задачи

Примеры заданий для организации самостоятельной работы слушателей

Задача 1. Один моль идеального газа совершает цикл, состоящий из четырех процессов



Участок 1-2 (адиабата), на котором температура газа повышается от T_1 до T_2 , а давление увеличивается от P_0 до P_1 .

Участок 2-3 (изохора), на котором давление повышается до значения P_2 , а температура поднимается до значения T_3 .

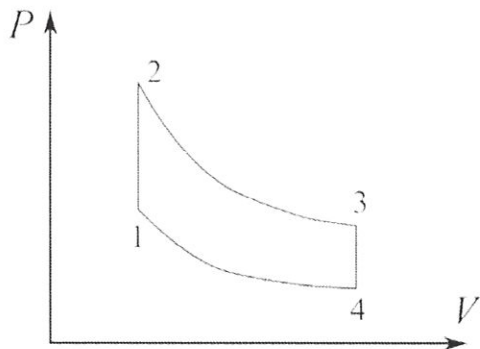
Участок 3-4 (адиабата), на котором температура падает до T_4 , а объем увеличивается до V_1 .

Участок 4-1 (изохора), при котором давление падает до P_0 .

Найдите отношение $\frac{V_1}{V_0}$ и разность между температурами T_1 и T_4 , если известно, что работа A за цикл равна 831 Дж, а отношение $\frac{T_3}{T_4} = 11$ и показатель адиабаты $\gamma = 2$.

(Универсальную газовую постоянную примите равной $R = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{Моль} \cdot \text{К}}$).

Задача 2. Идеальный одноатомный газ совершает в тепловой машине цикл, состоящий из двух изохор 1-2 и 3-4, и двух изотерм 2-3 и 4-1. Во сколько раз изменится КПД цикла, если тепло, отводимое от газа на изохоре 3-4 сохранять в некотором вспомогательном резервуаре и затем передавать газу на изохоре 1-2? Отношение максимального и минимального объемов газа равно 2, отношение температур на изотермах равно 1.5. Вспомогательный резервуар считать частью составной тепловой машины.



Ответ округлить до сотых, например, $\frac{\eta_2}{\eta_1} \approx 2,33$

Задача 3. Два моля одноатомного идеального газа находятся в адиабатически изолированном цилиндре под поршнем массы m , на котором лежит груз массы $2m$. Груз быстро убирают. Определить изменение энтропии после установления равновесия в системе. Трением поршня о стенки цилиндра пренебречь. Считать, что система изолирована от атмосферы, то есть атмосферное давление на поршень не действует. Ответ дать в Дж/К с точностью до десятой.

Задача 4. Серебряную проволоку диаметром $d = 1$ мм при комнатной температуре $T_1 = 300$ К быстро (адиабатически) нагружают с силой f . Удельная теплоемкость серебра $c = 0.234 \frac{\text{Дж}}{\text{г}\cdot\text{К}}$, плотность $\rho = 10 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, линейный коэффициент теплового расширения $\alpha = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Какую силу f нужно приложить, чтобы температура проволоки упала до $T_2 = 273$ К? Ответ дать в килоньютонах с точностью до второй значащей цифры.

4.3. Список рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика. – Физматлит, 2006.
2. Кириченко Н.А. Термодинамика, статистическая молекулярная физика. – Физматкнига, 2012.
3. Сборник задач по общему курсу физики. Часть 1. Под редакцией В.А. Овчинкина. – Физматкнига, 2013.
4. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М. Основы физики. Курс общей физики. Том 2. Квантовая и статистическая физика / под ред. Ю.М. Ципенюка. Часть 5. Главы 1-4. – Физматлит, 2001.
5. Белонучкин В.Е. Краткий курс термодинамики. – МФТИ, 2010.

Дополнительная литература

1. Щёголев И.Ф. Элементы статистической механики, термодинамики и кинетики. – Янус, 1996.
2. Рейф Ф. Статистическая физика (Берклевский курс физики). Т. 5. – Наука 1972.
3. Ландау Л.Д., Ахиезер А.И., Лифшиц Е.М. Курс общей физики. – ИД «Интеллект», 2014 (4-е изд.).
4. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. – Мир, 2009.
5. Коротков П.Ф. Молекулярная физика и термодинамика. – МФТИ, 2009.

Электронные ресурсы

https://mipt.ru/education/chair/physics/S_II/method/

5. Материально-технические условия реализации программы

Таблица 4

Наименование специализированных аудиторий, кабинетов, лабораторий	Вид занятий	Наименование оборудования, программного обеспечения
Система дистанционного обучения	Аудиторные занятия	Слушателю необходим компьютер, наличие доступа в сеть интернет.
Система дистанционного обучения	Самостоятельная работа	Слушателю необходим компьютер, наличие доступа в сеть интернет.
Система дистанционного обучения	Экзамен	Слушателю необходим компьютер, наличие доступа в сеть интернет.

6. Оценка качества освоения программ

Оценка качества освоения программы осуществляется в процессе промежуточной аттестации.

Формы и методы промежуточного контроля представлены в таблице 5.

Таблица 5

Наименование модулей	Основные показатели оценки	Формы и методы контроля и оценки
Основные определения, уравнение состояния, нулевое и первое начала термодинамики	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Второе начало термодинамики. Круговые процессы	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Энтропия	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Термодинамические функции	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Фазовые переходы и поверхностные эффекты	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Газ Ван-дер-Ваальса.	Установленное количество	Самостоятельное

Эффект Джоуля-Томсона	выполненных заданий	выполнение заданий, тестирование, решение задач
Контрольная работа №1	Установленное количество выполненных заданий	Тестирование, решение задач
Введение в статистическую физику	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Функции распределения по скоростям	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Распределение Гиббса. Статистическое определение энтропии	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Флуктуации	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Элементы теории теплоемкости	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Явления переноса	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Броуновское движение	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
Контрольная работа №2	Установленное количество выполненных заданий	Тестирование, решение задач
Итоговая аттестация	Обобщение знаний по темам курса. Применение полученных знаний.	Тестирование, решение задач
<i>Эффект Джоуля-Томсона. Скорость звука</i>	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач
<i>Поверхностные эффекты</i>	Установленное количество выполненных заданий	Самостоятельное выполнение заданий, тестирование, решение задач

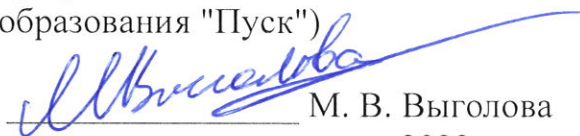
7. Составители программы

Зубцова Жанна Исхаковна, к.ф.-м.н., ведущий специалист Отдела сопровождения образовательных программ (Центр «Пуск»).

Согласовано
Ведущий специалист ОСОП


_____ Ж. И. Зубцова
« _____ » 2023 г.

Согласовано
Руководитель проектов (Центр
дополнительного, дополнительного
профессионального и онлайн-
образования "Пуск")


_____ М. В. Выголова
« _____ » 2023 г.