

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета

\_\_\_\_\_  
(подпись) Ф.И.О.  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ СТАРТОВАЯ ГАЗОДИНАМИКА

Направление/специальность подготовки	24.04.01 Ракетные комплексы и космонавтика
Специализация/профиль/программа подготовки	Наземное технологическое оборудование стартовых систем
Уровень высшего образования	Магистратура
Форма обучения	Очная
Факультет	А Ракетно-космической техники
Выпускающая кафедра	А4 СТАРТОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
Кафедра-разработчик рабочей программы	А4 СТАРТОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

КУРС	СЕМЕСТР	ОБЩАЯ ТРУДОЁМКОСТЬ (ЗАЧЕТНЫХ ЕДИНИЦ)	ЧАСЫ (по наличию видов занятий)									ВИД ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ
			ОБЩАЯ ТРУДОЁМКОСТЬ	АУДИТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ				САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА				
				ВСЕГО	ЛЕКЦИИ	ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ	ВСЕГО	КУРСОВОЙ ПРОЕКТ	КУРСОВАЯ РАБОТА	ДРУГИЕ ВИДЫ САМОСТ. РАБОТЫ	
6	11	4	144	51	34	0	17	93	0	0	93	диф. зач.

*ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ*

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА СОСТАВЛЕНА В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СТАНДАРТА ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ (ФГОС ВО)

**24.04.01 Ракетные комплексы и космонавтика**

год набора группы: 2025

Программу составил:

Кафедра А4 СТАРТОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ \_\_\_\_\_

Синильщиков Валерий Борисович, к.т.н., доцент, доцент

Программа рассмотрена

на заседании кафедры-разработчика

рабочей программы **А4 СТАРТОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Заведующий кафедрой Андреев О.В., к.т.н. \_\_\_\_\_

Программа рассмотрена

на заседании выпускающей кафедры

**А4 СТАРТОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Заведующий кафедрой Андреев О.В., к.т.н. \_\_\_\_\_

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ СТАРТОВАЯ ГАЗОДИНАМИКА**

### **Разделы рабочей программы**

1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО
3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ
4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ
5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ
6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### **Приложения к рабочей программе дисциплины**

- Приложение 1. Аннотация рабочей программы
- Приложение 2. Технологии и формы обучения
- Приложение 3. Фонды оценочных средств

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-8.2 — Способен использовать результаты численного моделирования газодинамических процессов, процессов теплообмена, имеющих место в стартовых системах, комплексах, изделиях РКТ и наземного технологического оборудования стартовых систем для решения задач по определению различных характеристик данных систем, комплексов и их подсистем

Формированию компетенций служит достижение следующих результатов образования:

### **ПК-8.2**

*знания:*

- научно-технические основы газодинамики старта ракет;
- основные понятия и методологию газодинамики старта и способы снижения воздействия на элементы стартового комплекса и стартующую ракету;;

*умения:*

- анализировать результаты экспериментальных и численных исследований газодинамических и двухфазных течений при старте, силовых, тепловых и иных нагрузок на элементы стартового комплекса и стартующую ракету;
- обосновывать способы снижения газодинамических нагрузок на ракету и элементы стартового комплекса;;

*навыки:*

- использования научной и справочной литературы при проведении расчетов и экспериментальных исследований, анализе результатов и выборе способов снижения нагрузок;
- навыками организации и проведения расчетов и физического эксперимента в области газодинамики старта;
- анализа результаты экспериментальных и численных исследований газодинамических и двухфазных течений при старте..

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина **СТАРТОВАЯ ГАЗОДИНАМИКА** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению *24.04.01 Ракетные комплексы и космонавтика*.

Содержание дисциплины является логическим продолжением дисциплин: **ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТАРТОВЫХ СИСТЕМ В ПРИКЛАДНЫХ ПАКЕТАХ, ВЫСШАЯ МАТЕМАТИКА В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**.

Содержание дисциплины является основой для освоения дисциплин: **ПОДГОТОВКА К ПРОЦЕДУРЕ ЗАЩИТЫ И ЗАЩИТА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ, ПРЕДДИПЛОМНАЯ ПРАКТИКА**.

Предварительные компетенции, сформированные у обучающегося до начала изучения дисциплины:

- ОПК-1 — Способен самостоятельно приобретать, развивать и применять математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для решения нестандартных задач, в том числе в новой или незнакомой среде и в междисциплинарном контексте
- ОПК-2 — Способен ставить и решать задачи по проектированию, конструированию, производству, испытанию и эксплуатации объектов профессиональной деятельности при использовании современных информационных технологий
- ОПК-5 — Способен использовать современные подходы и методы решения профессиональных задач в области авиационной и ракетно-космической техники, включая управление проектами создания новых образцов техники и утилизации устаревших
- ОПК-6 — Способен анализировать, систематизировать и обобщать информацию о современном состоянии и перспективах развития ракетно-космической техники
- ПК-8.1 — Способен проводить обработку данных по результатам цифрового моделирования различных процессов, в том числе применять системы автоматизированного инженерного анализа для получения требуемых данных, при функционировании элементов и узлов стартовых систем, комплексов и изделий РКТ

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 з.е., 144 ч.

#### 3.1. Содержание (дидактика) дисциплины

КУРС	СЕМЕСТР	Наименование разделов и дидактических единиц	ВСЕГО	Аудиторные занятия в контактной форме			Самостоятельная работа студентов	Формируемая компетенция, %
				ВСЕГО	Лекции	Практические занятия		ПК-4.2
6	11	<b>Раздел 1. Задачи газодинамики старта.</b> 1.1. Общая характеристика задач газодинамики старта. 1.2. Виды воздействия струйных течений и вызванных ими течений воздуха на элементы конструкций стартового комплекса (СК) и ракеты. Повреждающий эффект воздействий. 1.3. Требования к уровням нагружения. 1.4. Схемы газоотведения при старте ракет различного назначения. Их краткая характеристика. Достоинства и недостатки. Области применения.	19	9	4	5	10	5
6	11	<b>Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи.</b> 2.1. Одиночная свободная сверхзвуковая расчетная струя. Структура и характеристики. Турбулентность. Смещение, дотопление, эжекция. 2.2. Преобразование энергии в турбулентном слое смешения. Понятие о колмогоровском масштабе. 2.3. Соотношения для изменения скоростного напора и энthalпии по оси струи 2.4. Одиночная свободная сверхзвуковая недорасширенная и перерасширенная струя. Ударноволновые структуры и изменение параметров на них. 2.5. Особенности распространения блочных струй.	12	3	3	0	9	10
6	11	<b>Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.</b> 3.1. Стационарные и нестационарные режимы взаимодействия струй с преградой, перпендикулярной оси. 3.2. Автомодельная схема взаимодействия. 3.3. Взаимодействие струи с коническим газотражателем. Структура течения. 3.4. Взаимодействие струи с наклонным одноосевым газотражателем. Структура течения. Понятие о критической точке. Способы оценки давлений. 3.5. Взаимодействие блочной струи с плоской преградой. Возникновение обратных токов. 3.6. Взаимодействие блочной струи с элементами полуглубленного газодода. 3.7. Взаимодействие струи с поверхностью нулевой отметки.	12	3	3	0	9	10
6	11	<b>Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.</b> 4.1. Схема теплового воздействия при натекании струи на преграду, перпендикулярную оси. 4.2. Факторы, влияющие на тепловой поток 4.3. Критерияльная методика оценки тепловых потоков 4.5. Тепловые потоки в пятне воздействия струи на преграду, перпендикулярную оси 4.4. Схема теплового воздействия при натекании струи на наклонную преграду. 4.5. Схема теплового воздействия при натекании струи на поверхность нулевой отметки. Факторы, влияющие на теплоотдачу. 4.6. Особенности теплового воздействия на кромки листов металлооблицовки 4.7. Методика, основанная на расчете течений в пограничном слое.	12	3	3	0	9	15
6	11	<b>Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.</b> 5.1. Основные характеристики пульсаций давления как случайного процесса. 5.2. Акустическое излучение струи. Методики оценки. 5.3. Физические процессы, вызывающие пульсации давления на преграде 5.4. Изменение спектра и общего уровня пульсаций давления на преграде по мере подъема ракеты. 5.5. Полуэмпирическая методика оценки общего уровня и спектральной плотности пульсаций давления на наклонном одноосевом газотражателе. 5.6. Получение реализации давления на поверхности газотражателя. 5.7. Пульсационные режимы взаимодействия струй с преградами 5.8. Акустическое воздействие на стартовую ракету. Причины и способы снижения. 5.9. Методы снижения пульсационных и акустических нагрузок.	19	9	4	5	10	10
6	11	<b>Раздел 6. Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги.</b> 6.1. Процессы при запуске ракетного двигателя. 6.2. Распространение прямых и отраженных пусковых волн 6.3. Реализация отрывного и безотрывного режима течения на срезах сопла. Перестройка течения. Развитие сверхзвуковой струи 6.4. Пульсационные режимы. Эффект Пауэлла. 6.5. Развитие течения в полуглубленном стартовом разрежении. Фазы повышенного давления и разрежения 6.6. Проблема донного разрежения и методы ее решения.	12	3	3	0	9	10
6	11	<b>Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера.</b> 7.1. Требования к параметрам в подракетном объеме при минометном старте. 7.2. Способы стабилизации давления в подракетном объеме 7.3. Проблема безударного выхода. 7.4. Проблема распушки. 7.5. Затекание струй в контейнер после запуска РД. 7.6. Особенности процессов при старте из проточного контейнера 7.7. Нагрузки на проточный контейнер при старте.	12	3	3	0	9	10
6	11	<b>Раздел 8. Использование систем водоподачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте.</b> 8.1. Схемы водоподачи при старте отечественных и зарубежных ракет космического назначения. 8.2. Общая характеристика взаимодействия газа с каплями воды. 8.3. Физическая картина процессов при внутрискрипной и внешнеструйной водоподаче. 8.4. Использование водоподачи для снижения силовых и тепловых нагрузок на элементы стартового комплекса. 8.5. Использование водоподачи для снижения акустических нагрузок на стартовую ракету.	12	3	3	0	9	10
6	11	<b>Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.</b> 9.1. Основные элементы газовых приводов. 9.2. Основные положения нулевой математической модели газовых приводов 9.3. Уравнения, описывающие горение твердого топлива 9.4. Уравнения, описывающие истечение газа из объема в объем 9.5. Интегральные уравнения массы, концентрации и энергии для объемов 9.6. Минометная схема старта. Проблема зароса давления 9.7. Катапультная схема старта.	12	3	3	0	9	10
6	11	<b>Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.</b> 10.1. Общая характеристика комплексного воздействия. Его составляющие и их повреждающий эффект. 10.2. Зоны на поверхностях стартового комплекса и ракеты, подвергающиеся наиболее интенсивному воздействию при старте для разных схем старта 10.3. Химическое и эрозивное воздействия 10.4. Затекание газа под листы металлооблицовки. 10.5. Нестационарный прогрев листов металлооблицовки. 10.6. Термонапряжения и термодинамика. Пластические деформации. Влияние схемы закрепления листов. 10.7. Кавитационные силовые нагрузки на элементы конструкции стартовых комплексов для разных схем старта 10.8. Ударноволновые нагрузки на ракету и элементы конструкции стартовых комплексов для разных схем старта 10.9. Пульсационные нагрузки на ракету и элементы конструкции стартовых комплексов для разных схем старта 10.10. Пластические деформации листов металлооблицовки 10.11. Прочность и малоцикловая усталость элементов конструкции, подвергающихся газодинамическому воздействию при старте.	22	12	5	7	10	10
<b>Всего за 11 семестр</b>			144	51	34	17	93	100
<b>Всего по дисциплине</b>			144	51	34	17	93	100

#### 3.2. Аудиторный практикум

№ п/п	Номер и наименование раздела дисциплины	Тема практического занятия	Объем, ауд. часов
1	Раздел 1. Задачи газодинамики старта.	Общая характеристика задач газодинамики старта.	5
2	Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.	Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.	5
3	Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.	Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету	7
<b>Всего за 11 семестр</b>			17

#### 3.3. Самостоятельная работа студента (СРС)

№ п/п	Номер и наименование раздела дисциплины	Содержание учебного задания	Объем, часов
1	Раздел 1. Задачи газодинамики старта.	Самостоятельное изучение дидактической единицы 1.4 по учебной литературе	10
2	Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи.	Повторение разделов 4-5 из курса "Струйные течения"	9
3	Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.	Самостоятельное изучение дидактических единиц 3.2-3.4 по учебной литературе	9
4	Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.	Самостоятельное изучение дидактических единиц 4.1-4.3 по учебной литературе	9
5	Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.	Самостоятельное изучение дидактических единиц 5.1-5.3 по учебной литературе	10
6	Раздел 6. Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя	Самостоятельное изучение дидактических	9

	и выходе на основной режим тяги.	единиц 6.1-6.3 по учебной литературе	
7	Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера.	Изучение дидактических единиц 7.1, 7.2, 7.7 по учебной литературе	9
8	Раздел 8. Использование систем водоподдачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте.	Самостоятельное изучение дидактических единиц 8.1-8.2 по учебной литературе	9
9	Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.	Самостоятельное изучение дидактических единиц 9.6-9.7 по учебной литературе	9
10	Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.	Самостоятельное изучение дидактической единицы 10.10 по учебной литературе	10
<b>Всего за 11 семестр</b>			<b>93</b>

#### 4. ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

СЕМЕСТР	НЕДЕЛИ СЕМЕСТРА																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
11			КВ			ДР		КВ		ДР			КВ			ДР	Вопр.Диф.Зач, диф. зач.

Условные обозначения:

- ДР – диагностическая работа;
- КВ – контрольные вопросы;
- Вопр.Диф.Зач – вопросы к дифференцированному зачету;
- диф. зач. – дифференцированный зачет.

**Текущий контроль успеваемости** студентов проводится в дискретные временные интервалы в следующих формах:

- диагностическая работа;
- контрольные вопросы;
- вопросы к дифференцированному зачету.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- дифференцированный зачет.

## 5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Основная литература по дисциплине:

1. . Теория пластичности. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018, 36 экз.
2. . Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. М.: Полиграфикс РПК, 2006, эл. рес.
3. А. П. Маштаков. . Физические основы пуска. СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023, 15 экз.
4. А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018, 26 экз.
5. А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018, эл. рес.
6. А. П. Маштаков, С. В. Бобышев, В. И. Балобан. . Расчёт сверхзвуковых струйных течений структурно-элементным методом. СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2022, 16 экз.
7. В. В. Сахин, Е. М. Герлиман, И. В. Тетерина. . Теплопередача. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2020, 86 экз.
8. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Двухфазные течения. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2005, эл. рес.
9. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013, 30 экз.
10. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017, 50 экз.
11. Ю. А. Круглов, В. П. Зюзиков, Б. Е. Синицын. . Системы катапультирования ракет. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2010, 18 экз.

### 5.2. Дополнительная литература по дисциплине:

1. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, А. И. Цветков. . Акустические взаимодействия в газовых потоках. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021, 3 экз.
2. Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко, Б. В. Новиков. . Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977, 1 экз.

### 5.3. Периодические издания:

1. Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук.

### 5.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины, электронные библиотечные системы:

1. <https://e.lanbook.com/> — ЭБС Лань;
2. <https://urait.ru/> — Образовательная платформа «Юрайт». Для вузов и ссузов..

### Современные профессиональные базы данных:

1. <https://rusneb.ru> – Национальная электронная библиотека (НЭБ);
2. <https://cyberleninka.ru/> - Научная электронная библиотека «Киберленинка»;  
<http://www.rfbr.ru/rffi/ru/library> - Полнотекстовая электронная библиотека Российского фонда фундаментальных исследований.

### Информационные справочные системы:

1. Техэксперт – Информационный портал технического регулирования: Нормы, правила, стандарты РФ;
2. [http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com\\_irbis&view=irbis&Itemid=457](http://library.voenmeh.ru/jirbis2/index.php?option=com_irbis&view=irbis&Itemid=457) - БД ГОСТов собственной генерации БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова;
3. <http://www.consultant.ru/>- КонсультантПлюс- информационный портал правовой информации.

### 5.5. Программное обеспечение:

1. Ansys Multiphysics 2019 Teaching Advanced;
2. Matlab 2015a SP1.

### 5.6. Информационные технологии:

взаимодействие с обучающимися посредством ЭИОС Moodle БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова.



## **6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. Лекционные занятия:**

специализированные требования по оборудованию отсутствуют; аудитория с посадочными местами по количеству студентов; доска.

### **6.2. Практические занятия:**

1. Ansys Multiphysics 2019 Teaching Advanced;
2. Matlab 2015a SP1.

### **6.3. Прочее:**

1. рабочее место преподавателя, оснащенное компьютером с доступом в Интернет;
2. рабочие места студентов, оснащенные компьютерами с доступом в Интернет, предназначенные для работы в электронной образовательной среде.

### Аннотация рабочей программы

Дисциплина **СТАРТОВАЯ ГАЗОДИНАМИКА** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению *24.04.01 Ракетные комплексы и космонавтика*. Дисциплина реализуется на факультете А Ракетно-космической техники БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова кафедрой А4 СТАРТОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.

Дисциплина нацелена на формирование *компетенций*:

ПК-8.2 Способен использовать результаты численного моделирования газодинамических процессов, процессов теплообмена, имеющих место в стартовых системах, комплексах, изделиях РКТ и наземного технологического оборудования стартовых систем для решения задач по определению различных характеристик данных систем, комплексов и их подсистем.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с газодинамическими процессами при старте ракет различного назначения:

- 1) знакомство с видами газодинамических процессов, происходящих при запуске и работе двигательной установки, а также при минометном старте ракеты;
- 2) изучение различных видов нагрузок, действующих на ракету, на элементы стартового сооружения при различных схемах старта ракеты;
- 3) изучение способов снижения различного рода газодинамических нагрузок, действующих на ракету и стартовое сооружение.

Программой дисциплины предусмотрены следующие **виды контроля**:

**Текущий контроль успеваемости** студентов проводится в дискретные временные интервалы в следующих формах:

- диагностическая работа;
- контрольные вопросы;
- вопросы к дифференцированному зачету.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 4 з.е., **144 ч.** Программой дисциплины предусмотрены лекционные занятия (**34 ч.**), практические занятия (**17 ч.**), самостоятельная работа студента (**93 ч.**).

## ТЕХНОЛОГИИ И ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

### Рекомендации по освоению дисциплины для студента

Трудоемкость освоения дисциплины составляет 144 ч., из них 51 ч. аудиторных занятий, и 93 ч., отведенных на самостоятельную работу студента.

Рекомендации по распределению учебного времени по видам самостоятельной работы и разделам дисциплины приведены в таблице.

Контроль освоения дисциплины производится в соответствии с Положением о текущем, рубежном контроле успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся.

Формы контроля и критерии оценивания приведены в приложении 3 к Рабочей программе.

Наименование работы	Рекомендуемая литература	Трудоемкость, час.
<b>Раздел 1. Задачи газодинамики старта.</b>		
Самостоятельное изучение дидактической единицы 1.4 по учебной литературе	. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: М.: Полиграфикс РПК, 2006 (3) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (2) А. П. Маштаков. . Физические основы пуска: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023 (1) А. П. Маштаков, С. В. Бобышев, В. И. Балобан. . Расчёт сверхзвуковых струйных течений структурно-элементным методом: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2022 (1)	10
Итого по разделу 1		10
<b>Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи.</b>		
Повторение разделов 4-5 из курса "Струйные течения"	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013 (3) А. П. Маштаков, С. В. Бобышев, В. И. Балобан. . Расчёт сверхзвуковых струйных течений структурно-элементным методом: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2022 (2,3)	9
Итого по разделу 2		9
<b>Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.</b>		
Самостоятельное изучение дидактических единиц 3.2-3.4 по учебной литературе	А. П. Маштаков. . Физические основы пуска: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023 (3) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013 (5) А. П. Маштаков, С. В. Бобышев, В. И. Балобан. . Расчёт сверхзвуковых струйных течений структурно-элементным методом: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2022 (4)	9
Итого по разделу 3		9
<b>Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.</b>		
Самостоятельное изучение дидактических единиц 4.1-4.3 по учебной литературе	В. В. Сахин, Е. М. Герлиман, И. В. Тетерина. . Теплопередача: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2020 (4) . Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: М.: Полиграфикс РПК, 2006 (3) А. П. Маштаков, С. В. Бобышев, В. И. Балобан. . Расчёт сверхзвуковых струйных течений структурно-элементным методом: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2022 (6) А. П. Маштаков. . Физические основы пуска: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023 (4)	9
Итого по разделу 4		9
<b>Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.</b>		
Самостоятельное изучение дидактических единиц 5.1-5.3 по учебной литературе	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, А. И. Цветков. . Акустические взаимодействия в газовых потоках: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021 (3,4) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (6) . Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: М.: Полиграфикс РПК, 2006 (3) А. П. Маштаков. . Физические основы пуска: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023 (4)	10
Итого по разделу 5		10
<b>Раздел 6. Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги.</b>		
Самостоятельное изучение дидактических единиц 6.1-6.3 по учебной литературе	. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: М.: Полиграфикс РПК, 2006 (3) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (4) А. П. Маштаков. . Физические основы пуска: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023 (5)	9
Итого по разделу 6		9
<b>Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера.</b>		
Изучение дидактических единиц 7.1, 7.2, 7.7 по учебной литературе	А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (6) А. П. Маштаков, С. В. Бобышев, В. И. Балобан. . Расчёт сверхзвуковых струйных	9

	течений структурно-элементным методом: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2022 (6)	
Итого по разделу 7		9
<b>Раздел 8. Использование систем водоподачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте.</b>		
Самостоятельное изучение дидактических единиц 8.1-8.2 по учебной литературе	Ю. Ф. Дитякин, Л. А. Клячко, Б. В. Новиков. . Распыливание жидкостей: М.: Машиностроение, 1977 (2-3) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Двухфазные течения: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2005 (3) . Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: М.: Полиграфикс РПК, 2006 (3)	9
Итого по разделу 8		9
<b>Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.</b>		
Самостоятельное изучение дидактических единиц 9.6-9.7 по учебной литературе	А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (6) Ю. А. Круглов, В. П. Зюзликов, Б. Е. Синильщиков. . Системы катапультирования ракет: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2010 (1,4)	9
Итого по разделу 9		9
<b>Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.</b>		
Самостоятельное изучение дидактической единицы 10.10 по учебной литературе	. Теория пластичности: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (3) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (5)	10
Итого по разделу 10		10

## ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств, позволяющие оценить результаты обучения по данной дисциплине, включают в себя:

- диагностическая работа
- вопросы к дифференцированному зачету;
- контрольные вопросы;
- дифференцированный зачет.

### Критерии оценивания

#### Диагностическая работа

Диагностическая работа проводится в форме теста в ЭИОС Moodle:

- при правильном ответе менее чем на 60% вопросов - не аттестация;
- при правильном ответе на 60% вопросов и более - аттестация.

#### Вопросы к дифференцированному зачету

1. Схемы газоотведения в стартовых комплексах.
2. Одиночная свободная сверхзвуковая расчетная струя. Структура и характеристики. Турбулентность. Смешение, догорание, эжекция. Преобразование энергии в турбулентном слое смешения. Понятие о Колмогоровском масштабе.
3. Соотношения для изменения скоростного напора и энтальпии по оси осесимметричной стационарной сверхзвуковой свободной струи
4. Одиночная свободная сверхзвуковая недорасширенная и перерасширенная струя. Ударно-волновые структуры и изменение параметров на них.
5. Особенности распространения блочных струй. Влияние ветра на распространение свободных одиночных и блочных струй
6. Стационарные и нестационарные режимы взаимодействия струй с преградой, перпендикулярной оси. Автомодельная схема взаимодействия.
7. Взаимодействие струи с коническим газоотражателем. Структура течения
8. Взаимодействие струи с наклонным односкатным газоотражателем. Структура течения. Понятие о критической точке. Способы оценки давлений.
9. Взаимодействие блочной струи с элементами полузаглубленного газохода и с поверхностью нулевой отметки.
10. Схема теплового воздействия при натекании струи на преграду, перпендикулярную оси. Факторы, влияющие на тепловой поток. Критериальная методика оценки тепловых потоков
11. Схема теплового воздействия при натекании струи на наклонную преграду. Схема теплового воздействия при натекании струи на поверхность нулевой отметки. Факторы, влияющие на теплоотдачу. Особенности теплового воздействия на кромки листов металлооблицовки
12. Основные характеристики пульсаций давления как случайного процесса. Физические процессы, вызывающие пульсации давления на преграде
13. Изменение спектра и общего уровня пульсаций давления на преграде по мере подъема ракеты. Получение реализации давления на поверхности газоотражателя.
14. Пульсационные режимы взаимодействия струй с преградами. Акустическое воздействие на стартующую ракету. Причины и способы снижения.
15. Нестационарные процессы в сопле и на выходе из сопла при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги
16. Нестационарные процессы в полузаглубленном сооружении при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги
17. Общая характеристика комплексного воздействия. Его составляющие и их повреждающий эффект. Химическое и эрозионное воздействия
18. Нестационарный прогрев листов металлооблицовки.
19. Термонапряжения и термодформации. Пластические деформации. Влияние схемы закрепления листов. Понятие о малоцикловой усталости
20. Требования к параметрам в подракетном объеме при минометном старте. Способы стабилизации давления в подракетном объеме
21. Проблема безударного выхода. Проблема раскупорки. Затекание струй в контейнер после запуска РД.
22. Нагрузки на открытый контейнер при старте крылатых ракет
23. Схемы водоподдачи при старте отечественных и зарубежных ракет космического назначения.
24. Физическая картина процессов при внутрискрутиной водоподдаче. Использование водоподдачи для снижения нагрузок на РКН и СК.
25. Инженерный подход к приближенному расчету термодинамики газовых приводов
26. Минометная схема старта
27. Катапультиная схема старта

#### Контрольные вопросы

Контроль в форме контрольных вопросов проводится по результатам изучения разделов 2-6.

Каждому студенту задается один вопрос по базовым понятиям курса, особенностям течений или нагрузкам, действующим на ракету или стартовый комплекс. Ответ должен быть дан без подготовки.

Опрос считается успешно пройденным, если студент дал верное по смыслу определение понятия, качественно точно описал характер течения, зоны наибольшего воздействия и порядки величин.

Перечень контрольных вопросов имеется в УМК дисциплины

#### Дифференцированный зачет

Дифференцированный зачет по дисциплине проходит в форме устных ответов на вопросы из списка, приведенного в пункте "Вопросы к дифференцированному зачету".

Оценка выставляется после собеседования со студентом в соответствии со следующими критериями:

- оценка ЗАЧТЕНО-ОТЛИЧНО – полное раскрытие теоретического вопроса при высоком уровне владения материалом;
- оценка ЗАЧТЕНО-ХОРОШО – полное раскрытие теоретического вопроса при среднем уровне владения материалом;
- оценка ЗАЧТЕНО-УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО – полное раскрытие теоретического вопроса при слабом уровне владения материалом, либо недостаточно полное раскрытие теоретического вопроса при среднем уровне владения материалом;
- оценка НЕ ЗАЧТЕНО – в иных случаях.

КУРС	СЕМЕСТР	Наименование разделов и дидактических единиц	ВСЕГО	Аудиторные занятия в контактной форме			Самостоятельная работа студентов	Формируемая компетенция, %	НАИМЕНОВАНИЕ ОЦЕНОЧНОГО СРЕДСТВА
				ВСЕГО	Лекции	Практические занятия		ПК-8.2	
6	11	Раздел 1. Задачи газодинамики старта.	19	9	4	5	10	5	Вопросы к дифференцированному зачету
6	11	Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи.	12	3	3	0	9	10	Вопросы к дифференцированному зачету, Контрольные вопросы
6	11	Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.	12	3	3	0	9	10	Вопросы к дифференцированному зачету, Контрольные вопросы
6	11	Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.	12	3	3	0	9	15	Вопросы к дифференцированному зачету, Контрольные вопросы
6	11	Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.	19	9	4	5	10	10	Вопросы к дифференцированному зачету, Контрольные вопросы
6	11	Раздел 6. Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги.	12	3	3	0	9	10	Вопросы к дифференцированному зачету
6	11	Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера.	12	3	3	0	9	10	Вопросы к дифференцированному зачету
6	11	Раздел 8. Использование систем водоподдачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте.	12	3	3	0	9	10	Вопросы к дифференцированному зачету
6	11	Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.	12	3	3	0	9	10	Вопросы к дифференцированному зачету
6	11	Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.	22	12	5	7	10	10	Вопросы к дифференцированному зачету
Всего за 11 семестр			144	51	34	17	93	100	
Всего по дисциплине			144	51	34	17	93	100	

A large industrial machine, possibly a paper mill component, featuring multiple vertical rollers. Bright yellow light emanates from the center, suggesting a high-temperature process or a specific lighting effect. The machine is dark and metallic, with a complex structure of rollers and supports.

-

Термины Определения

1. А. Отошедший скачок
2. Б. Пограничный слой
3. В. Ламинарный подслой
4. Г. Критическая точка
- Е. Растекающаяся струя

№ 5 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ

Как выбирается величина расхода жидкостного ракетного двигателя, соответствующая участку постоянной тяги ракеты космического назначения

№ 6 Прочитайте текст и установите последовательность

Запишите последовательность процессов в расширяющейся части сопла при увеличении расхода и тяги ракетного двигателя от запуска до уст

1. Прилипание потока к стенкам
2. Безотрывное истечение с уменьшением скорости в расширяющейся части
3. Отрыв потока от стенок
4. Истечение сверхзвуковой струи в районе оси сопла с затеканием воздуха внутрь вблизи кромок
5. Безотрывное истечение с увеличением скорости в расширяющейся части

№ 7 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа

Как изменяется температура торможения на оси струи ракетного двигателя в области догорания сопловых газов?

1. Растет
2. Падает
3. Сначала растет, потом падает
4. В зависимости от сочетания параметров может и расти и падать

№ 8 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов

Воздух из баллона истекает в атмосферу через малое отверстие. При каких значениях избыточного давления в баллоне реализуется критическ

1.  $0,8 \cdot 10^5$  Па;
2.  $1,0 \cdot 10^5$  Па;
3.  $1,8 \cdot 10^5$  Па;
4.  $2,0 \cdot 10^5$  Па

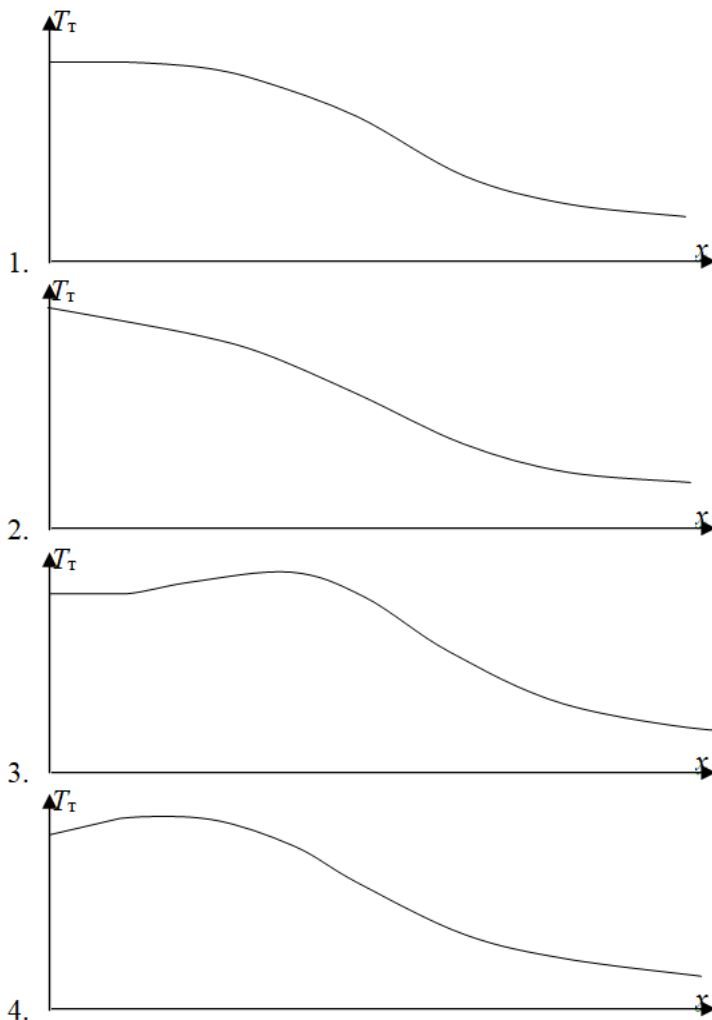
№ 9 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов

Отметьте параметры, с увеличением которых растет интенсивность теплового потока в поверхность газотражателя. Температура торможени

1. Давление внешнего потока
2. Скорость внешнего течения
3. Толщина пограничного слоя
4. Температура поверхности газотражателя

№ 10 Прочитайте текст, выберите правильные ответы и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответов

Какой вид может иметь график изменения температуры торможения по оси свободной струи ракетного двигателя? Влиянием давления на пол





№ 11 Прочитайте текст и установите последовательность

Расположите этапы расчета силовых и тепловых нагрузок на преграду, перпендикулярную оси струи, по инженерной методике

1. Определение параметров на срезе эффективного сопла
2. Определение параметров на срезе реального сопла
3. Определение параметров на оси свободной струи в сечении, на котором расположена преграда
4. Определение энтальпийного фактора и характерной длины начального участка
5. Определение параметров в критической точке.
6. Построение эпюры давления на преграде
7. Определение коэффициента теплообмена и тепловых потоков

№ 12 Прочитайте текст, выберите правильный ответ и запишите аргументы, обосновывающие выбор ответа

Как изменяется частота пульсаций давления в пятне воздействия струи на газоотражателе, соответствующая максимуму спектральной плотно

1. Растет;
2. Падает;
3. Сначала растет, потом падает;
4. Сначала падает, потом растет.