

УТВЕРЖДАЮ
 Декан факультета

 (подпись) Юнаков Л. П.
 ФИО
 «___» _____ 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: 2024

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 Долбенков В.Г., к.т.н., снс _____

Программа рассмотрена
на заседании выпускающей кафедры

А4 СТАРТОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Заведующий кафедрой Долбенков В.Г., к.т.н., снс _____

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:

ПСК-8.2 — способность 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:

ПСК-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: **ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ СТРАТЕГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ МОРСКОГО БАЗИРОВАНИЯ**.

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

Предварительные компетенции, сформированные у обучающегося до начала изучения дисциплины:

- ОПК-2 — Способен ставить и решать задачи по проектированию, конструированию, производству, испытанию и эксплуатации объектов профессиональной деятельности при использовании современных информационных технологий
- ОПК-6 — Способен анализировать, систематизировать и обобщать информацию о современном состоянии и перспективах развития ракетно-космической техники
- ПК-91 — способен к коммуникации и кооперации в цифровой среде, использованию различных цифровых средств, позволяющих во взаимодействии с другими людьми достигать поставленных целей
- ПК-93 — способен генерировать новые идеи для решения задач цифровой экономики, абстрагироваться от стандартных моделей, перестраивать сложившиеся способы решения задач, выдвигать альтернативные варианты действий с целью выработки новых оптимальных алгоритмов
- ПК-94 — способен к управлению информацией и данными, поиску источников информации и данных, восприятию, анализу, запоминанию и передаче информации с использованием цифровых средств, а также с помощью алгоритмов при работе с полученными из различных источников данными с целью эффективного использования полученной информации для решения задач
- ПСК-8.3 — Способен проводить проектирование, в том числе с помощью систем автоматизированного инженерного анализа, и эксплуатацию гидравлических, пневматических и газовых приводов и систем, а также различных элементов, агрегатов, систем электроснабжения, и механизмов стартовых систем, комплексов, наземного технологического оборудования 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		ПСК-8.2
6	11	Раздел 1. Задачи газодинамики старта. 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 ракету. 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	10
6	11	Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи. 2.1. Одиночная свободная сверхзвуковая расчетная струя. Структура и характеристики. Турбулентность. Смещение, догорание, эжекция. 2.2. Преобразование энергии в турбулентном слое смещения. Понятие о колмогоровском масштабе. 2.3. Соотношения для изменения скоростного напора и энтальпии 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	Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами. 3.1. Стационарные и нестационарные режимы взаимодействия струй с преградой, перпендикулярной оси. 3.2. Автомодельная схема взаимодействия. 3.3. Взаимодействие струи с коническим газоотражателем. Структура течения. 3.4. Взаимодействие струи с наклонным односкатным газоотражателем. 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 полуглаубленного газохода. 3.7. Взаимодействие струи с поверхностью нулевой отметки.	12	3	3	0	9	10
6	11	Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды. 4.1. Схема теплового воздействия при натекании струи на преграду, перпендикулярную оси. 4.2. Факторы, влияющие на тепловой поток 4.3. Критериальная 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	10
6	11	Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету. 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 односкатном газоотражателе. 5.6. Получение реализации давления на поверхности газоотражателя. 5.7. Пульсационные режимы взаимодействия струй с преградами 5.8. Акустическое воздействие на стартующую ракету. Причины и способы снижения. 5.9. Методы снижения пульсационных и акустических нагрузок.	19	9	4	5	10	10
6	11	Раздел 6. Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги. 6.1. Процессы при запуске ракетного двигателя. 6.2. Распространение прямых и отраженных пусковых волн 6.3. Реализация отрывного и безотрывного режима течения на срезе сопла. Перестройка течения. Развитие сверхзвуковой струи 6.4. Пульсационные режимы. Эффект Пауэлла. 6.5. Развитие течения в полуглаубленном стартовом разрежении. Фазы повышенного давления и разрежения 6.6. Проблема донного разрежения и методы ее решения.	12	3	3	0	9	10
6	11	Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера. 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 раскупорки. 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	Раздел 8. Использование систем водоподачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте. 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 внутриструйной и внешеструйной водоподаче. 8.4. Использование водоподачи для снижения силовых и тепловых нагрузок на элементы стартового комплекса. 8.5. Использование водоподачи для снижения акустических нагрузок на стартующую ракету.	12	3	3	0	9	10
6	11	Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов. 9.1. Основные элементы газовых приводов. 9.2. Основные положения нульмерной 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 заброса давления 9.7. Катапультная схема старта.	12	3	3	0	9	10
6	11	Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету. 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 эрозийное воздействие 10.4. Затекание газа под листы металлооблицовки. 10.5. Нестационарный прогрев листов металлооблицовки. 10.6. Термонапряжения и термодформации. Пластические деформации. Влияние схемы закрепления листов. 10.7. Квазистационарные силовые нагрузки на элементы конструкции стартовых комплексов	22	12	5	7	10	10

	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.						
Всего за 11 семестр		144	51	34	17	93	100
Всего по дисциплине		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
Всего за 11 семестр			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 и выходе на основной режим тяги.	Самостоятельное изучение дидактических единиц 6.1-6.3 по учебной литературе	9
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 водоподачи 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
Всего за 11 семестр			93

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. В. В. Сахин, Е. М. Герлиман, И. В. Тетерина. . Теплопередача. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2020, 86 экз.
7. Е. В. Афанасьев, В. И. Балобан, С. В. Бобышев. . Структурно-элементное моделирование газодинамических процессов при старте ракет. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2004, 175 экз.
8. Е. В. Афанасьев, С. В. Бобышев, И. Л. Добросердов. . Определение параметров поля течения одиночной неизобарической струи. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2008, эл. рес.
9. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Двухфазные течения. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2005, эл. рес.
10. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013, 30 экз.
11. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017, 50 экз.
12. Ю. А. Круглов, В. П. Зюзликов, Б. Е. Синильщиков. . 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:

не требуются.

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/> — Главная – 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 - 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*:

ПСК-8.2 способность 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.
Раздел 1. Задачи газодинамики старта.		
Самостоятельное изучение дидактической единицы 1.4 по учебной литературе	Е. В. Афанасьев, В. И. Балобан, С. В. Бобышев. . Структурно-элементное моделирование газодинамических процессов при старте ракет: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2004 (1) . 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)	10
Итого по разделу 1		10
Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи.		
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) Е. В. Афанасьев, С. В. Бобышев, И. Л. Добросердов. . Определение параметров поля течения одиночной неизобарической струи: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2008 (3-4)	9
Итого по разделу 2		9
Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.		
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) Е. В. Афанасьев, В. И. Балобан, С. В. Бобышев. . Структурно-элементное моделирование газодинамических процессов при старте ракет: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2004 (3)	9
Итого по разделу 3		9
Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.		
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) Е. В. Афанасьев, В. И. Балобан, С. В. Бобышев. . Структурно-элементное моделирование газодинамических процессов при старте ракет: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.	9

	Ф. Устинова, 2004 (5) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (4)	
Итого по разделу 4		9
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	А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (6) 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) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, А. И. Цветков. . Акустические взаимодействия в газовых потоках: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021 (3,4)	10
Итого по разделу 5		10
Раздел 6. Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги.		
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, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (5)	9
Итого по разделу 6		9
Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера.		
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) Е. В. Афанасьев, В. И. Балобан, С. В. Бобышев. . Структурно-элементное моделирование газодинамических процессов при старте ракет: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2004 (6)	9
Итого по разделу 7		9
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	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
Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.		
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
Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.		
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. Одинокрая свободная сверхзвуковая расчетная струя. Структура и характеристики. Турбулентность. Смещение, догорание, эжекция. Преобразование энергии в турбулентном слое смещения. Понятие о Колмогоровском масштабе.
3. Соотношения для изменения скоростного напора и энтальпии по оси осесимметричной стационарной сверхзвуковой свободной струи
4. Одинокрая 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 стартовую 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 малоциклового 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 водоподачи при старте отечественных и зарубежных ракет космического назначения.
24. Физическая картина процессов при внутривстрельной водоподаче. Использование водоподачи для снижения нагрузок на РКН и СК.
25. Инженерный подход к приближенному расчету термодинамики газовых приводов
26. Минометная схема старта
27. Катапультная 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		ПСК-8.2		
6	11	Раздел 1. Задачи газодинамики старта.	19	9	4	5	10	10	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	10	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		

Критерии оценивания

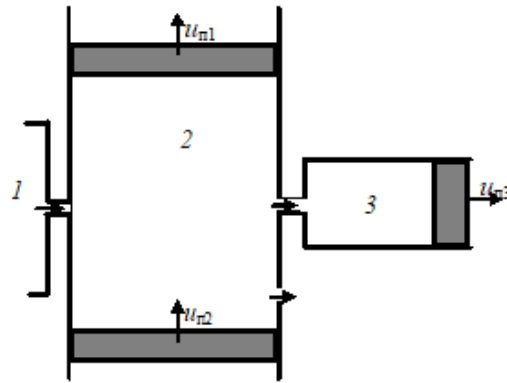
ПСК-8.2

Вопросы открытого типа:

- № 1 Что учитывает Энтальпийный фактор?
- № 2 Как зависит поверхность горения твердотопливной шашки-моноблока с цилиндрическими отверстиями и бронировкой торцевых и наружной цилиндрической поверхностей от толщины сгоревшего слоя?
- № 3 Где может реализоваться давление, меньшее давления окружающей среды при натекании сверхзвуковой струи на преграду?
- № 4 Что называют начальным участком струи?
- № 5 Как толщина пограничного слоя влияет на тепловые потоки при натекании струй РД на преграду, при фиксированных параметрах внешнего течения?
- № 6 В камеру 1, заполненную продуктами сгорания твердого топлива при температуре 2000 К при давлении 10 МПа поступает воздух из баллона высокого давления, в котором он находится под давлением 11 МПа при температуре 293 К. Как при этом изменяется полная энергия газа в камере 1, если объем камеры постоянен, расход в другие камеры отсутствует, а теплоотдачей в стенки камеры 1 можно пренебречь?
- № 7 Изменение энергии газа в камере при его истечении через отверстие в другую камеру обусловлено...
- № 8 Перечислите важнейшие факторы, влияющие на скорость горения твердого топлива в пороховом газогенераторе.
- № 9 При каких условиях сохраняется полная энтальпия в стационарном течении?
- № 10 Эффективное сопло – это

Вопросы закрытого типа:

- № 1 Перечислите условия, которые должны быть выполнены в изоэнтропическом течении:
 - 1) Отсутствие теплообмена со стенками
 - 2) Отсутствие трения на стенках
 - 3) Отсутствие скачков уплотнения
 - 4) Отсутствие турбулентности
 - 5) Отсутствие зоны разрежения
- № 2 При критическом режиме истечения через отверстие справедливы следующие утверждения:
 - 1) Давление в минимальном сечении равно давлению в камере, в которую истекает газ
 - 2) Скорость в минимальном сечении равна скорости звука
 - 3) Параметры в камере, в которую истекает газ – не влияют на расход
 - 4) Энтальпия газа, втекающего в следующую камеру равна энтальпии газа в предыдущей камере
- № 3



Как правильно записывается уравнение энергии для камеры 2?

Примечание: T_{ij} – температура торможения газа в канале ij с учетом теплотерь на входе. Возможность перекрытия отверстий не учитывать

1)	$\frac{dE_2}{dt} = G_{12}c_{p1}T_{12} - G_{23}c_{p2}T_{23} - G_{2н}c_{p2}T_{2н} -$ $- p_2 u_{n1} F_{n1} - p_2 u_{n2} F_{n2} - p_3 u_{n3} F_{n3} - \int_{F_i} q_{\tau 2} dF_2$
2)	$\frac{dE_2}{dt} = G_{12}c_{p1}T_{12} - G_{23}c_{p2}T_2 - G_{2н}c_{p2}T_2 -$ $- p_2 u_{n1} F_{n1} + p_2 u_{n2} F_{n2} - p_3 u_{n3} F_{n3} - \int_{F_i} q_{\tau 2} dF_2$
3)	$\frac{dE_2}{dt} = G_{12}c_{p1}T_{12} - G_{23}c_{p2}T_2 - G_{2н}c_{p2}T_2 -$ $- p_2 u_{n1} F_{n1} + p_2 u_{n2} F_{n2} - \int_{F_i} q_{\tau 2} dF_2$
4)	$\frac{dE_2}{dt} = G_{12}c_{p1}T_{12} - G_{23}c_{p2}T_{23} - G_{2н}c_{p2}T_{2н} -$ $- p_2 u_{n1} F_{n1} + p_2 u_{n2} F_{n2} - p_3 u_{n3} F_{n3} - \int_{F_i} q_{\tau 2} dF_2$
5)	$\frac{dE_2}{dt} = G_{12}c_{p1}T_1 - G_{23}c_{p2}T_2 - G_{2н}c_{p2}T_2 -$ $- p_2 u_{n1} F_{n1} + p_2 u_{n2} F_{n2} - p_3 u_{n3} F_{n3} - \int_{F_i} q_{\tau 2} dF_2$

№ 4

Критическая точка на преграде, это...

- 1) Глобальный максимум давления
- 2) Локальный или глобальный максимум давления
- 3) Точка из которой струя растекается по преграде во все стороны

- 4) Точка с максимальным тепловым потоком
- 5) Точка пересечения оси струи с преградой
- № 5 Укажите соответствие между безразмерными критериями и их определениями
- 1) Nu
- 2) Re
- 3) Pr
- 4) коэффициент восстановления
- а) Доля кинетической энергии газа, которая может участвовать в теплообмене
- б) Соотношение между эффектами вязкости и теплопроводности
- в) Отношение сил инерции к силам вязкого трения
- г) Безразмерный коэффициент теплоотдачи в пограничном слое
- № 6 Отметьте факторы, которые увеличивают теплоотдачу от горячего газа в стенки трубопроводов и газовых цилиндров:
- 1) Линейный масштаб (диаметр трубопровода)
- 2) Скорость потока
- 3) Кривизна трубы
- 4) Вязкость газа
- 5) Давление
- № 7 Отметьте факторы, которые уменьшают теплоотдачу от горячего газа в стенки трубопроводов и газовых цилиндров:
- 1) Линейный масштаб (диаметр трубопровода)
- 2) Расстояние от входа в трубу
- 3) Кривизна трубы
- 4) Вязкость газа
- 5) Давление
- № 8 Воздух из баллона истекает в атмосферу через малое отверстие. При каких значениях давления в баллоне реализуется критический режим истечения?
- 1) 0,2 ати
- 2) 0,5 ати
- 3) 0,75 ати
- 4) 1,0 ати
- 5) 2,0 ати
- 6) 5,0 ати
- № 9 Перечислите меры, которые позволяют эффективно бороться с забросом давления в рабочей камере при минометном или катапультном старте ракет.
- 1) Увеличение начального объема камеры
- 2) Уменьшение начальной поверхности горения с увеличением геометрической прогрессивности заряда

- 3) Использование байпасных каналов, перепускающих газ из нижней части камеры в верхнюю
- 4) Использование ПАД с разгорающимся критическим сечением
- 5) Использование двухступенчатого ПАД
- 6) Силовое удержание ракеты замково-стопорным устройством до достижения заданного давления в камере
- № 10 Заряд воспламенителя в газогенераторах и ПАД используется для того, чтобы:
- 1) Повысить температуру поверхности основного заряда
- 2) Повысить давление в камере до величины, при которой основной заряд может устойчиво гореть
- 3) Плавное начать движение элемента, приводимого в движение приводом
- 4) Прожечь бронировку в основном заряде для его воспламенения