

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета

\_\_\_\_\_ Левихин А.А.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ПРИ СТАРТЕ

Направление/специальность подготовки	24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов
Специализация/профиль/программа подготовки	Пусковые устройства, транспортно-установочное оборудование и средства обслуживания стартовых комплексов
Уровень высшего образования	Специалитет
Форма обучения	Очная
Факультет	А Ракетно-космическая техника
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	
5	10	3	108	68	34	0	34	40	0	0	40	диф. зач.

*ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ*

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

**24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов**

год набора группы: 2026

Программу составил:

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

Синилицков 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 Маштаков А.П., к.т.н., доц. \_\_\_\_\_

Программа рассмотрена

на заседании выпускающей кафедры

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

Заведующий кафедрой Маштаков А.П., к.т.н., доц. \_\_\_\_\_

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ПРИ СТАРТЕ**

### **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-9 — Способен разрабатывать газоотводящие системы пусковых устройств и устройства для снижения воздействия потоков газа ракетных двигателей при старте ракет

Формированию компетенций служит достижение следующих результатов образования:

### **ПК-9**

*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 результатов экспериментальных и численных исследований газодинамических и двухфазных течений при старте.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Дисциплина **ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ПРИ СТАРТЕ** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению *24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов*.

Содержание дисциплины является логическим продолжением дисциплин: **ФИЗИКА, ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПУСКА, ГАЗОВЫЕ ПРИВОДЫ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ, АГРЕГАТЫ СТАРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ТЕРМОДИНАМИКА, АЭРОГАЗОДИНАМИКА**.

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-1 — Способен применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования для решения инженерных задач профессиональной деятельности
- ОПК-5 — Способен разрабатывать физические и математические модели исследуемых процессов, явлений и объектов, относящихся к профессиональной сфере деятельности для решения инженерных задач
- ПК-4 — Способен проводить математическое моделирование разрабатываемого изделия и его подсистем для прогнозирования функционирования, оптимизации, ожидаемых рисков и возможных отказов
- ПК-8 — Способен разрабатывать конструкции пусковых устройств, транспортно-установочного оборудования, систем заправки компонентами топлива и сжатыми газами и систем обслуживания ракеты на стартовом комплексе
- ПК-9 — Способен разрабатывать газоотводящие системы пусковых устройств и устройства для снижения воздействия потоков газа ракетных двигателей при старте ракет

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 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-9
5	10	<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 ракету. Повреждающий эффект воздействий. 1.3. Требования к уровням нагружения. 1.4. Схемы газотопления при старте ракет различного назначения. Их краткая характеристика. Достоинства и недостатки. Области применения.	7	5	3	2	2	5
5	10	<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 колымагоровском масштабе. 2.3. Соотношения для изменения скоростного напора и интальпии 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.	11	5	3	2	6	10
5	10	<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 газотракателем. Структура течения. 3.4. Взаимодействие струи с наклонным односкатным газотракателем. 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.	11	5	3	2	6	10
5	10	<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.	14	8	4	4	6	10
5	10	<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 преграду. 5.4. Изменение спектра и общего уровня пульсаций давления на преграду по мере подъема ракеты. 5.5. Полуэмпирическая методика оценки общего уровня и спектральной плотности пульсаций давления на наклонном односкатном газотракателе. 5.6. Получение реализации давления на поверхности газотракателя. 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.	14	8	4	4	6	10
5	10	<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 срез 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.	10	8	4	4	2	10
5	10	<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.	10	8	4	4	2	10
5	10	<b>Раздел 8. Использование систем водоподдачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте.</b> 8.1. Схемы водоподдачи при старте отечественных и зарубежных ракет космического назначения. 8.2. Общая характеристика взаимодействия газа с каплями воды. 8.3. Физическая картина процессов при внутрискрутной и внешеструйной водоподдаче. 8.4. Использование водоподдачи для снижения силовых и тепловых нагрузок на элементы стартового комплекса. 8.5. Использование водоподдачи для снижения акустических нагрузок на стартовую ракету.	9	7	3	4	2	10
5	10	<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 заброса давления. 9.7. Катапультная схема старта.	13	7	3	4	6	15
5	10	<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 эрозионное воздействия. 10.4. Затекание газа под листы металлооблицовки. 10.5. Нестационарный прогрев листов металлооблицовки. 10.6. Термонапряжения и термодеформации. Пластические деформации. Влияние схемы закрепления листов. 10.7. Квазистационарные 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.	9	7	3	4	2	10
<b>Всего за 10 семестр</b>			108	68	34	34	40	100
<b>Всего по дисциплине</b>			108	68	34	34	40	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.	2
2	Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи.	Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи	2
3	Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.	Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами	2
4	Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.	Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды	4
5	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.	4
6	Раздел 6. Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги.	Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги	4
7	Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера.	Минометный старт и старт из проточного контейнера	4
8	Раздел 8. Использование систем водоподдачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте.	Использование систем водоподдачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте	4
9	Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.	Процессы в газовых приводах стартовых комплексов	4
10	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	4
<b>Всего за 10 семестр</b>			34

#### 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	2
2	Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи.	Повторение разделов 4-5 из курса "Струйные течения"	2
3		Выполнение части 1 Домашнего задания №1	4
4		Выполнение части 2 Домашнего задания №1	4
5	Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.	Самостоятельное изучение дидактических единиц 3.2-3.4 по учебной литературе	2
6	Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.	Выполнение части 3 Домашнего задания №1	4
7		Самостоятельное изучение дидактических единиц 4.1-4.3 по учебной литературе	2
8	Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.	Выполнение части 4 Домашнего задания №1	4
9		Самостоятельное изучение дидактических единиц 5.1-5.3 по учебной литературе	2
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	2
11	Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера.	Изучение дидактических единиц 7.1, 7.2, 7.7 по учебной литературе	2
12	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	2
13	Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.	Самостоятельное изучение дидактических единиц 9.6-9.7 по учебной литературе	2
14		Выполнение домашнего задания №2	4
15	Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.	Самостоятельное изучение дидактической единицы 10.10 по учебной литературе	2
<b>Всего за 10 семестр</b>			<b>40</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
<b>10</b>		ДЗ		ДЗ		ДР	ДЗ			ДР				ДЗ		ДР
	17															
	Вопр.Диф.Зач, диф. зач.															

Условные обозначения:

- ДР – диагностическая работа;
- ДЗ – домашнее задание;
- 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;
- домашнее задание;
- 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, эл. рес.
2. . Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. М.: Полиграфикс РПК, 2006, эл. рес.
3. . Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники. М.: Полиграфикс РПК, 2005, эл. рес.
4. А. П. Маштаков. . Физические основы пуска. СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023, 15 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, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018, 26 экз.
7. В. В. Сахин, Е. М. Герлиман, И. В. Тетерина. . Теплопередача. СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2020, 86 экз.
8. 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.
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, эл. рес.

### 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/> — 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. 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. Аудитория с числом посадочных мест не меньше количества обучающихся;
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 **ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ПРИ СТАРТЕ** является дисциплиной **части, формируемой участниками образовательных отношений блока 1**, программы подготовки по направлению *24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов*. Дисциплина реализуется на факультете А Ракетно-космическая техника БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова кафедрой А4 СТАРТОВЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РАКЕТ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.

Дисциплина нацелена на формирование *компетенций*:  
ПК-9 Способен разрабатывать газоотводящие системы пусковых устройств и устройства для снижения воздействия потоков газа ракетных двигателей при старте ракет.

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с газодинамическими нагрузками, возникающими при работе двигательной установки:

- 1) знакомство с видами газодинамических процессов, происходящих при запуске и работе двигательной установки;
- 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;
- домашнее задание;
- вопросы к дифференцированному зачету.

**Промежуточная аттестация** проводится в формах:

- дифференцированный зачет.

Общая трудоемкость освоения дисциплины составляет 3 з.е., **108 ч**. Программой дисциплины предусмотрены лекционные занятия (**34 ч.**), практические занятия (**34 ч.**), самостоятельная работа студента (**40 ч.**).

## ТЕХНОЛОГИИ И ФОРМЫ ОБУЧЕНИЯ

### Рекомендации по освоению дисциплины для студента

Трудоемкость освоения дисциплины составляет 108 ч., из них 68 ч. аудиторных занятий, и 40 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	А. П. Маштаков. . Физические основы пуска: СПб.: Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023 (1) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (1) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (1) . 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. Ф. Устинова, 2004 (1)	2
Итого по разделу 1		2
<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)	2
Выполнение части 1 Домашнего задания №1	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 (3-4)	4
Итого по разделу 2		6
<b>Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.</b>		
Выполнение части 2 Домашнего задания №1	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) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (3)	4
Самостоятельное изучение дидактических единиц 3.2-3.4 по учебной литературе	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. . Турбулентные струи - статистические модели и моделирование крупных вихрей: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013 (5)	2
Итого по разделу 3		6
<b>Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.</b>		
Выполнение части 3 Домашнего задания №1	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 (5) В. В. Сахин, Е. М. Герлиман, И. В. Тетерина. . Теплопередача: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2020 (4)	4
Самостоятельное изучение дидактических единиц 4.1-4.3 по учебной литературе	. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: М.: Полиграфикс РПК, 2005 (3) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (4) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (4)	2
Итого по разделу 4		6
<b>Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.</b>		
Выполнение части 4 Домашнего задания №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 (6)	4
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)	2
Итого по разделу 5		6
<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	А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (5) К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина. . Газовые течения в соплах энергоустановок: М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017 (4) . Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: М.: Полиграфикс РПК, 2005 (3) А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (5)	2

Итого по разделу 6		2
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)	2
	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)	
	А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (6)	
Итого по разделу 7		2
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)	2
	. Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники: М.: Полиграфикс РПК, 2005 (3)	
	К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. . Двухфазные течения: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2005 (3)	
Итого по разделу 8		2
Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.		
Самостоятельное изучение дидактических единиц 9.6-9.7 по учебной литературе	Ю. А. Круглов, В. П. Зюзликов, Б. Е. Синильщиков. . Системы катапультирования ракет: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2010 (1,4)	2
Выполнение домашнего задания №2	А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (6)	4
Итого по разделу 9		6
Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.		
Самостоятельное изучение дидактической единицы 10.10 по учебной литературе	А. П. Маштаков, Р. В. Красильников. . Физические основы пуска: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (5)	2
	. Теория пластичности: СПб.БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2018 (3)	
Итого по разделу 10		2

## ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

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

- диагностическая работа
- вопросы к дифференцированному зачету;
- домашнее задание;
- 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 газодода 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 внутрискрутной водоподдаче. Использование водоподдачи для снижения нагрузок на РКН и СК.
25. Инженерный подход к приближенному расчету термодинамики газовых приводов
26. Минометная схема старта
27. Катапультная схема старта

#### Домашнее задание

Домашнее задание №1 состоит из 4-х частей:

- 1) Расчет свободной сверхзвуковой осесимметричной струи структурно-элементным методом
- 2) Расчет давлений на газоотражателе в области натекания струи при разных расстояниях от среза сопла
- 3) Расчет тепловых потоков в поверхность газоотражателя для разных температур поверхности и нестационарной теплопроводности
- 4) Расчет пульсационных нагрузок на газоотражатель

Все части Домашнего задания №1 сдаются по мере выполнения.

Домашнее задание считается зачтенным, если искомые значения определены погрешностью не более 5%

Домашнее задание № 2 состоит в выборе рационального сочетания параметров для системы минометного или катапультного старта.

Домашнее задание считается принятым, если при выбранном сочетании параметров выполняются все заданные ограничения.

Отчеты по домашним заданиям должны содержать исходные данные, расчетные схемы, формулы, графики и числовые значения.

Домашние задания представляются в бумажном или электронном виде.

Примеры домашних заданий входят в состав УМК дисциплины

#### Дифференцированный зачет

Студент допускается к дифференцированному зачету при условии успешной сдачи Домашнего задания №1 и Домашнего задания №2.

Дифференцированный зачет по дисциплине проходит 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-9	
5	10	Раздел 1. Задачи газодинамики старта.	7	5	3	2	2	5	Вопросы к дифференцированному зачету
5	10	Раздел 2. Стационарные сверхзвуковые одиночные и блочные струи.	11	5	3	2	6	10	Вопросы к дифференцированному зачету, Домашнее задание
5	10	Раздел 3. Взаимодействие сверхзвуковых струй с преградами.	11	5	3	2	6	10	Вопросы к дифференцированному зачету, Домашнее задание
5	10	Раздел 4. Тепловое воздействие струй ракетных двигателей на преграды.	14	8	4	4	6	10	Вопросы к дифференцированному зачету, Домашнее задание
5	10	Раздел 5. Пульсационное и акустическое воздействие струй ракетных двигателей на стартовый комплекс и ракету.	14	8	4	4	6	10	Вопросы к дифференцированному зачету, Домашнее задание
5	10	Раздел 6. Нестационарные процессы при запуске ракетного двигателя и выходе на основной режим тяги.	10	8	4	4	2	10	Вопросы к дифференцированному зачету
5	10	Раздел 7. Минометный старт и старт из проточного контейнера.	10	8	4	4	2	10	Вопросы к дифференцированному зачету
5	10	Раздел 8. Использование систем водоподдачи для снижения тепловых, силовых и акустических нагрузок при старте.	9	7	3	4	2	10	Вопросы к дифференцированному зачету
5	10	Раздел 9. Процессы в газовых приводах стартовых комплексов.	13	7	3	4	6	15	Вопросы к дифференцированному зачету, Домашнее задание
5	10	Раздел 10. Комплексное воздействие струйных течений при старте на элементы стартового комплекса и ракету.	9	7	3	4	2	10	Вопросы к дифференцированному зачету
Всего за 10 семестр			108	68	34	34	40	100	
Всего по дисциплине			108	68	34	34	40	100	

**ПК-9 - Способен разрабатывать газоотводящие системы пусковых устройств и устройства для снижения воздействия потоков газа ракетных двигателей при старте ракет**

№ 1 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ

Почему в конструкциях самолетов, рассчитанных на движение со сверхзвуковой скоростью, обычно имеется заостренная носовая часть?

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

Какой фактор является необходимым условием реализации всех механизмов шумоизлучения струи ракетного двигателя, за исключением диск

1. Турбулентность в слое смещения струи;
2. Скачки уплотнения в струе;
3. Течение Прандтля-Майера на срезе сопла;
4. Взаимодействие струи с газоотражателем

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

На фотографии изображены струи ракетных двигателей. Какой режим истечения реализуется?



- 1 – с недорасширением
- 2 – с перерасширением
- 3 – расчетный
- 4 – в разных соплах - различный

№ 4 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

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

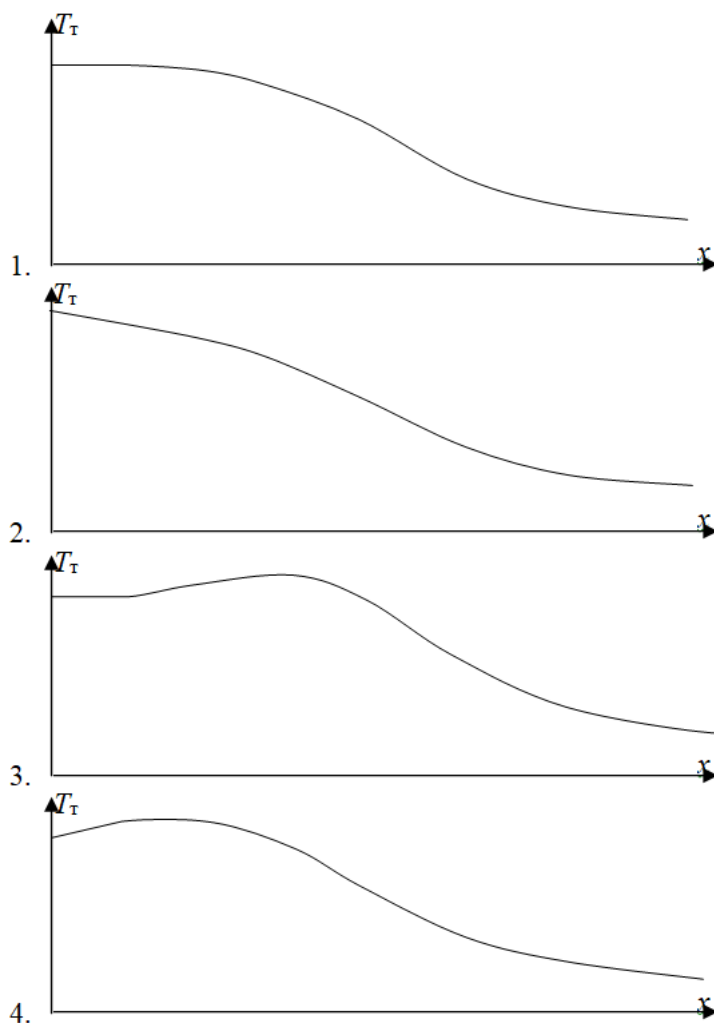
Отметьте параметры, с увеличением которых растет интенсивность теплового потока в поверхность газоотражателя. Температура торможения

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

№ 6 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 полн



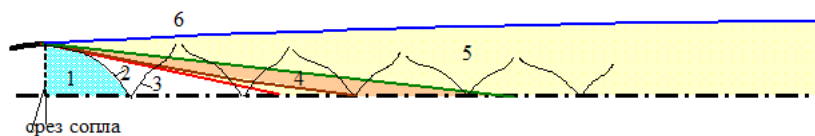


№ 7 Прочитайте текст и запишите развернутый обоснованный ответ

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

№ 8 Прочитайте текст и установите соответствие

Приведите в соответствие элементы струи РД и их положение на схеме

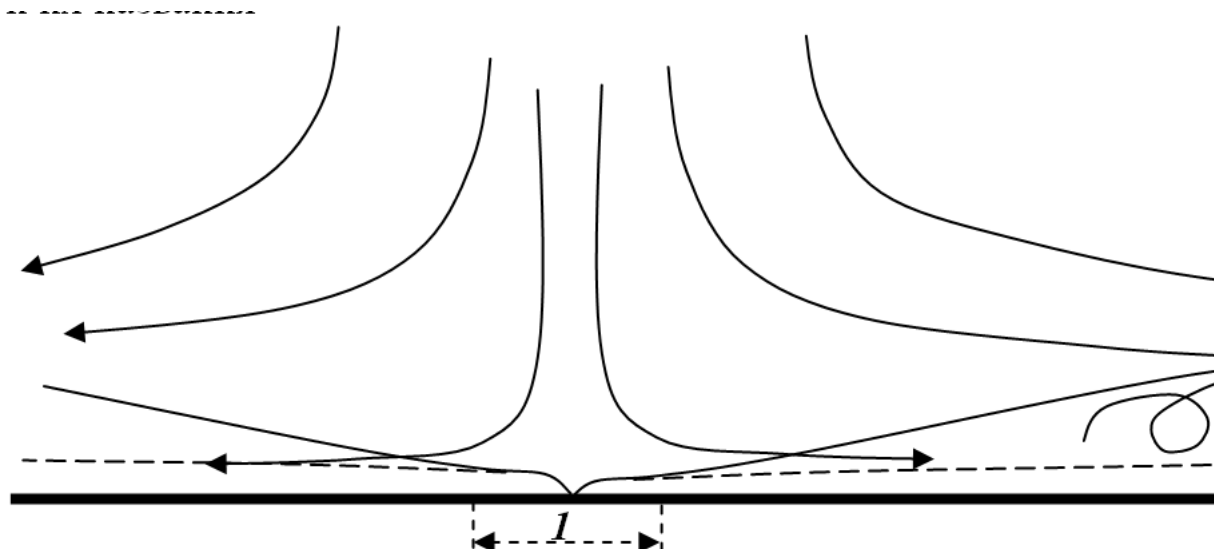


Положение на схеме Элементы струйного течения

- |   |                          |
|---|--------------------------|
| 1 | А. Висячий скачок        |
| 2 | Б. Отраженный скачок     |
| 3 | В. Область догорания     |
| 4 | Г. Область эжекции       |
| 5 | Д. Слой смешения         |
| 6 | Е. Изоэнтропическая зона |

№ 9 Прочитайте текст и установите соответствие

Приведите в соответствие положения точек и зон при натекании струи, на преграду и их названия



Термины Определения

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

№ 10 Прочитайте текст и установите последовательность

Расставьте точки, сечения и области, находящиеся на оси струи ракетного двигателя в порядке удаления от среза сопла.

1. Выход слоя смещения на ось струи
2. Основной участок
3. Область догорания
4. Отражение висячего скачка от оси струи
5. Изоэнтропическая зона

№ 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 газотражатель, соответствующая максимуму спектральной плотности

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