

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Директор физтех-школы**  
**аэрокосмических технологий**  
**С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Воздействие струй на космические аппараты
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии
	Физтех-школа Аэрокосмических Технологий
	кафедра аэрофизической механики и управления движением
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: Ю.И. Герасимов, д-р техн. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедру аэрофизической механики и управления движением 06.04.2020

## Аннотация

Изучение дисциплины направлено на углубление и расширение базовой профессиональной подготовки магистранта, формирование соответствующих компетенций.

В учебной дисциплине рассматриваются основные теоретические понятия, концепции и подходы в области динамики течения газовых потоков (включая двухфазные потоки). Студенты изучают задачи из области динамики газовых потоков внутри и за срезом сопла жидкостного ракетного двигателя малой тяги при различных степенях нерасчетности, теплового и загрязняющего воздействий струй таких двигателей на элементы космического аппарата, на примерах учатся решать задачи по тепловому и загрязняющему воздействиям струй ЖРДМТ на элементы КА, самостоятельно анализировать полученные результаты.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по динамике течения газовых потоков (включая двухфазные потоки) для использования в областях и дисциплинах естественнонаучного профиля, формирование исследовательских навыков и способности применять знания на практике.

#### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания в области динамики газовых потоков внутри и за срезом сопла жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРДМТ) при различных степенях нерасчетности, теплового и загрязняющего воздействий струй таких двигателей на элементы космического аппарата (КА);
- научить студентов на примерах и задачах решать задачи по тепловому и загрязняющему воздействиям струй ЖРДМТ на элементы КА, самостоятельно анализировать полученные результаты.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия и методы решения задач по динамике течения однофазных и двухфазных струй;
- вычислительные методы определения параметров воздействия струй на элементы КА.

уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач;
- формировать физические модели для проблем предметной области;
- осуществлять верификацию численных методов;
- осуществлять валидацию используемых физических моделей;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

владеть:

- навыками самостоятельной работы;
- навыками критического и конструктивного анализа большого объема информации, присутствующего в научных публикациях;
- навыками постановки и вычислительного моделирования течения газа и продуктов неполного сгорания (ПНС) топлива (загрязняющих фракций) в струях ЖРДМТ.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Классификация расчетных схем, параметров течения и методов расчета.		4		5
2	Параметры подобия осесимметричных струй, методы моделирования и пересчета результатов модельных экспериментов.		4		2
3	Методы расчета и моделирования параметров воздействия струй на элементы КА, часть 1.		4		2
4	Методы расчета и моделирования параметров воздействия струй на элементы КА, часть 2.		4		5
5	Методика и результаты исследований теплового воздействия струй двигателей в полетах КА.		4		2
6	Модель выбросов ПНС из сопел ЖРДМТ.		4		2
7	Газодинамические защитные устройства. Теоретическое обоснование и экспериментальная отработка.		4		5
8	Космические эксперименты по исследованию выбросов ПНС и определению экранирующих характеристик конструкций ГЗУ.		2		7
Итого часов			30		30
Подготовка к экзамену		30 час.			

Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.
--------------------	--------------------

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Классификация расчетных схем, параметров течения и методов расчета.

Классификация расчетных схем, установки ЖРДМТ на КА. Основные параметры ЖРДМТ, применяемых в КА. Режимы течения сверхзвуковых струй двигателей в условиях орбитального полета. Уравнения для расчета газодинамического воздействия сверхзвукового потока на элементы конструкции. Условия модельных экспериментов.

##### 2. Параметры подобия осесимметричных струй, методы моделирования и пересчета результатов модельных экспериментов.

Подобие струй, истекающих из сопел в вакуум. Подобие сильно недорасширенных струй. Моделирование силового воздействия натурной струи. Формулы пересчета результатов модельных экспериментов. Параметры подобия в задаче о взаимодействии свободно расширяющейся струи с пластиной.

##### 3. Методы расчета и моделирования параметров воздействия струй на элементы КА, часть 1.

Воздействие на элементы КА свободной струи. Распределение параметров газа в поле течения одиночной струи, взаимодействующей с пластиной конечной длины. Методы расчета параметров течения и теплообмена в составной струе, истекающей из двухсоплового блока. Параметры течения и теплообмена в струе, истекающей из трехсоплового блока.

##### 4. Методы расчета и моделирования параметров воздействия струй на элементы КА, часть 2.

Воздействие на элементы КА составной струи, истекающей из сопел 4-х двигателей, размещенных вокруг корпуса. Результаты исследований задачи. Результаты численных исследований. Моделирование параметров теплообмена при воздействии струй КК «Аполлон» на элементы корабля «Союз».

##### 5. Методика и результаты исследований теплового воздействия струй двигателей в полетах КА.

Методика проведения натурных экспериментов, измерительное и регистрирующее оборудование, режимы работы телеметрической (ТМ) системы КА. Результаты экспериментов, проведенных на КА различного назначения.

##### 6. Модель выбросов ПНС из сопел ЖРДМТ.

Причины образования и основные характеристики выбросов ПНС. Параметры движения капель ПНС внутри сопла. Траектории движения капель ПНС за срезом сопла, расчетная функция распределения потока капель ПНС в приосевой зоне. Параметры пленочного механизма выноса ПНС. Модель капельного механизма выноса ПНС на кромку сопла. Экспериментальные модельные исследования выноса жидкости со стенок сопла. Модель распределения кластерной фракции ПНС в поле струи. Модель распределения капельной фракции ПНС в периферийной части струи. Метод расчета распределения в поле струи выбросов ПНС из сопла ЖРДМТ.

##### 7. Газодинамические защитные устройства. Теоретическое обоснование и экспериментальная отработка.

Обоснование и выбор схемы газодинамических защитных устройств. Отработка и реализация конструкций ГЗУ для космических объектов.

8. Космические эксперименты по исследованию выбросов ПНС и определению экранирующих характеристик конструкций ГЗУ.

Цели и задачи проведения КЭ на борту ОС «Мир» и на МКС. Перечень сроки выполнения КЭ. Методика проведения исследований, оборудование КЭ схемы установки экспонируемого оборудования относительно сопел ДО. Результаты космических экспериментов. Экранирующие характеристики ГЗУ ДО СМ, функции пространственного распределения выбросов ПНС. Динамика изменения состояния осадков ПНС в условиях полета орбитальных станций. Основы мониторинга загрязнения внешних элементов космических объектов выбросами ПНС из ЖРДМТ.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

необходимое оборудование для практических занятий: учебная аудитория, ПК, вычислительный кластер.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Теоретическая гидромеханика [Текст] : 2 ч. Ч. 1 : учеб. пособие для вузов / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе ; под ред. И. А. Кибеля .— 6-е изд., испр. и доп. — М : Физматгиз, 1963 .— 583 с.
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 6 : Гидродинамика : учеб. пособие для вузов : рек. М-вом образования Рос. Федерации / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — 3-е изд., перераб. — М. : Физматлит, 1986, 1988, 2003, 2006 .— 736 с.
3. Прикладная газовая динамика [Текст] : в 2 ч. Ч. 1 : [учеб. пособие для вузов] / Г. Н. Абрамович .— 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Наука, 1991 .— 600 с.
4. Аэрогазодинамика : (Краткий курс) [Текст] / И. П. Гинзбург - М.Высшая школа,1966
5. Течения газа в соплах [Текст], монография/У. Г. Пирумов, Г. С. Росляков, -М., МГУ, 1978
6. Теория подобия [Текст]/М. В. Кирпичев , -М., Изд-во Акад. наук, 1953
1. Мурзинов И.Н. Параметры подобия при истечении сильно недорасширенных струй в затопленное пространство. Изв. АН СССР, МЖГ, N4, 1971

### Дополнительная литература

1. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия. 1. Истечение струй в вакуум // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Том 1. URL : <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-07-13-001.pdf>.
2. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. Истечение струй идеального и реальных газов из осесимметричных сопел. Вопросы подобия. 2. Истечение в затопленное пространство// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Том 13, URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-11-22-001.pdf>
3. Герасимов Ю.И. Параметры капель продуктов неполного сгорания в соплах жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Хим. физика. 2006. Т. 25. № 11. С.25-34.
4. Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Ярыгин В.Н. и др. Моделирование в вакуумных камерах процессов внешнего загрязнения Международной космической станции струями двигателей ориентации. Хим. физика. 2006. Т. 25. № 11. С. 35-47.
5. Герасимов Ю.И., Буряк А.К. Условия образования устойчивых осадков продуктов неполного сгорания топлива жидкостных ракетных двигателей на внешних элементах орбитальных станций. Хим. физика. 2008. Т. 27. № 10, С. 26-34.
6. Герасимов Ю.И., Ярыгин И.В. методология исследований в космосе параметров выбросов загрязняющих фракций из двигателей ориентации орбитальных станций, оперативного и послеполетного анализа их результатов. Хим. физика. 2008. Т. 27. № 10, С. 35-43.
7. Ярыгин В.Н., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Мишина Л.В., Приходько В.Г., Ярыгин И.В. Газодинамика космических кораблей и орбитальных станций (обзор). ТиА, том 18, № 3 , Новосибирск, 2011. с. 345-372.
8. Герасимов Ю.И. Параметры подобия в задаче о взаимодействии свободно расширяющейся струи с пластиной. Изв. АН СССР, МЖГ, N2, 1981, с.169-173.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

- |   |   |
|---|---|
| <a href="http://elibrary.ru/defaultx.asp">http://elibrary.ru/defaultx.asp</a>             | российский информационно-аналитический портал в области науки, технологии, медицины и образования, содержащий рефераты и полные тексты более 19 млн научных статей и публикаций |
| <a href="http://www.netlib.org/na-digest-html/">http://www.netlib.org/na-digest-html/</a> | Netlib, a collection of mathematical software, papers, and databases  |
| <a href="http://www.cfd-online.com/">http://www.cfd-online.com/</a>                       | Ресурс по вычислительной газодинамике CFD Online  |

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Пакеты офисного программного обеспечения Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), OpenOffice.

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Успешное освоение курса требует большой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам семинаров, учебной и научной литературе);
- подготовку к контрольным, самостоятельным работам и тестам.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также индивидуальных консультаций.

Критерием качества владения материалом служит умение решать задачи соответствующего уровня сложности.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Космические технологии  
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий  
кафедра аэрофизической механики и управления движением  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

**Разработчик:** Ю.И. Герасимов, д-р техн. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Воздействие струй на космические аппараты» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия и методы решения задач по динамике течения однофазных и двухфазных струй;
- вычислительные методы определения параметров воздействия струй на элементы КА.

### уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач;
- формировать физические модели для проблем предметной области;
- осуществлять верификацию численных методов;
- осуществлять валидацию используемых физических моделей;
- эффективно использовать информационные технологии и компьютерную технику для достижения необходимых теоретических и прикладных результатов.

### владеть:

- навыками самостоятельной работы;
- навыками критического и конструктивного анализа большого объема информации, присутствующего в научных публикациях;
- навыками постановки и вычислительного моделирования течения газа и продуктов неполного сгорания (ПНС) топлива (загрязняющих фракций) в струях ЖРДМТ.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Текущий контроль осуществляется в форме устного опроса на практических занятиях.

### 3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Аттестация по дисциплине «Воздействие струй на космические аппараты» проводится в форме экзамена (устного).

#### Примеры экзаменационных билетов:

##### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

1. Уравнения для расчета теплового воздействия сверхзвукового потока струи ЖРДМТ на элементы конструкции КА различной формы.
2. Укажите пару сопел из приведенных ниже, у которых при указанных полных перепадах давления истечения струй ( $N=P_0/P_\infty$ ) совпадают границы полей течения в безразмерных координатах ( $X/R_a$  и  $Y/R_a$ ).

№ сопла	$M_a$	$g$	$Q_{+}^0$	$F$	$N$
1	3.0	1.2	30	6.6	1000
2	3.0	1.4	21.5	4.23	400
3	2.0	1.4	30	1.7	400
4	3.0	1.4	21.5	4.23	1000
5	2.5	1.26	30	3.3	500

3. Причины образования ПНС при работе ЖРДМТ. Суммарные массовые характеристики доли ПНС на различных стадиях работы двигателя.

##### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

1. Структура поля течения в составной струе, реализующаяся при истечении газа из двух соседних сопел.
2. Основные параметры сопел, определяющие характер изменения параметров газа в струях идеального газа, истекающих из осесимметричных сверхзвуковых сопел в вакуум. Изменение плотности газа в поле струи идеального газа, истекающего из сопла в вакуум. Параметры подобия струй идеального газа, истекающих в вакуум.
3. Структура поля течения продуктов неполного сгорания (ПНС) топлива за срезом сопла. Функции пространственного распределения фракций ПНС в поле струи. Суммарные функции на этапах пуска-останов и на стационарном режиме работы ЖРДМТ

##### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

1. Структура поля течения в составной струе, реализующаяся при истечении газа из четырех сопел в присутствии корпуса КА.
2. Параметры подобия струй, истекающих из осесимметричных сверхзвуковых сопел в затопленное пространство с большими степенями нерасчетности ( $n>100$ ).
3. Механизмы выноса ПНС из камеры сгорания за срез сопла. Мероприятия по минимизации выбросов ПНС в периферийную зону поля струи.

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

1. Параметры подобия в задаче о взаимодействии свободно расширяющейся струи с пластиной.
2. Укажите пары сопел из приведенных ниже, у которых функции распределения плотности газа в струях за срезом сопла подобны друг другу в физических координатах ( $Q$  при  $R=\text{const}$ ).

№ сопла	$M_a$	$g$	$Q_{+}^0$
1	3.0	1.2	30
2	3.7	1.3	21.5
3	3.0	1.4	21.5
4	2.5	1.26	30
5	3.7	1.4	18.4
6	2.5	1.4	24.3

3. Метод расчета распределения в поле струи выбросов ПНС из сопла ЖРДМТ.

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

1. Распределение параметров газа в поле течения одиночной струи, взаимодействующей с пластиной конечной длины. Методы расчета параметров течения и теплообмена в составной струе, истекающей из двухсоплового блока в присутствии корпуса КА (пластиной конечной длины).
2. Моделирование силового воздействия натурной струи. Формулы пересчета результатов модельных экспериментов.
3. Экранирующие характеристики ГЗУ ДО СМ, функции пространственного распределения выбросов ПНС. Динамика изменения состояния осадков ПНС в условиях полета орбитальных станций.

#### 4. Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал, что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения экзамена при подготовке ответов на билеты обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами семинаров и любой другой литературой.

Во время проведения экзамен при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины он не может пользоваться конспектами семинаров и любой другой литературой.