

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института-заместитель  
директора ФАКТ**

**М.А. Кудров**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Модели турбулентного переноса скаляра
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии
	Физтех-школа авиационных и цифровых технологий
	кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 15 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Р.А. Балабанов

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизики и летательных аппаратов 30.08.2024

## Аннотация

Программа является дополнением к курсам “Физическое и численное моделирование турбулентности” и “Газодинамика горения”, программа предназначена для освоения студентами специальности “Прикладная математика и физика”, а также специальности “Информатика и вычислительная техника” учебного и научно-исследовательского центра по аэромеханике и летательной технике (УНИЦ АЛТ). Она нацелена на ознакомление обучающихся с физико-математическими моделями турбулентного смешения и предварительно перемешанного турбулентного горения. Ознакомление с предметом начинается с классификации физических задач, рассматривающих турбулентный перенос скаляра, а также изложения некоторых экспериментальных закономерностей и базовых теоретических исследований для стратифицированных течений с плавучестью. Далее студент знакомится с аналогией между течениями с плавучестью и горением, а также осваивает математический аппарат предписанной функции плотности вероятности применительно к предварительно перемешанному горению. По мере ознакомления с различными моделями предварительно перемешанного горения студент также изучает различные механизмы неустойчивости фронта пламени, такие как неустойчивость Дарье-Ландау, бароклинный эффект, термодиффузионная неустойчивость и химико-акустический эффект. Далее студент изучает модель перемешанных флеймлетов и формализм Брэя-Мосса и Либби. По мере изучения различных механизмов неустойчивости и моделей турбулентного горения студент получает представление о классификации структуры фронта пламени с точки зрения чисел Дамкелера и Карловица, а также диаграммы Борги-Петерса. В заключительной части программы студент изучает различные модели турбулентного переноса тепла и концентраций, а также замыкания для их источников, рассматриваются как модели переменных турбулентных чисел Прандтля и Шмидта, так и дифференциальные модели турбулентных потоков тепла. Программа также содержит практическую работу по изучению эффективности различных замыканий моделей турбулентного переноса скаляра на основе анализа данных прямого численного моделирования (DNS) течения Рэлея-Тейлора. Программой предусматривается самостоятельное освоение студентами теоретической составляющей дисциплины с использованием электронных средств дистанционного обучения и рекомендованной в программе учебной литературы, овладение основными приемами самостоятельного решения задач о распространении пассивной примеси, а также знакомство с методами калибровки RANS моделей турбулентного переноса скаляра по данным Прямого Численного Моделирования (DNS).

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- освоение студентами базовых моделей турбулентного переноса скаляра и турбулентного горения, а также классификации различных режимов турбулентного горения.

### Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся базовых знаний о физических явлениях, происходящих в задачах турбулентного смешения и предварительно перемешанного турбулентного горения;
- формирование умений и навыков применять изученные теоретические законы и математические инструменты для решения задач вычислительной аэродинамики стратифицированных и реагирующих течений;
- формирование навыков применения теории вероятности: умение выделять существенные физические явления для построения предписанной функции плотности вероятности и ее использование для моделирования различных корреляций.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности

ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1.1 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
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные законы и понятия из теории струй, границы их применимости, характерные критерии подобия для стратифицированных течений с плавучестью;
- основные идеи и понятия: формализм Брэя, Мосса и Либби, предписанные функции плотности вероятности для турбулентного смешения и турбулентного горения, пределы черно-белого смешения и гомогенного горения;
- различные виды неустойчивости фронта пламени и режимы турбулентного горения в которых они реализуются, а именно режим волнистых флеймлетов, режим искривленных флеймлетов, режим утолщенного фронта пламени, режим хорошо перемешанного реактора, а также различные физические эффекты, связанные с этими режимами – такие как контргradientная диффузия, усиление и подавление турбулентности на фронте пламени, небуссинесковские эффекты, проявляющиеся для потоков тепла;
- характерные временные и пространственные масштабы, на которых проявляются различные неустойчивости фронта пламени.

уметь:

- применять изученные модели для расчетов задач турбулентного смешения и турбулентного горения;
- применять метод предписанной функции плотности вероятности для описания различных режимов турбулентного горения, а также поиска замыканий в уравнениях турбулентного переноса скаляра.

владеть:

- основными методами решения задач вычислительной аэродинамики стратифицированных турбулентных течений и турбулентных течений с горением;
- основными математическими инструментами, характерными для формулировки моделей турбулентного горения.

#### 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	Турбулентные стратифицированные течения	6			9
2	Модели предварительно перемешанного турбулентного горения	6			9
3	Небуссинесковские модели турбулентных потоков тепла и массовых долей	6		8	9
4	Калибровка моделей на основе данных прямого численного моделирования	6		7	9
5	Влияние химических источников на турбулентные потоки скаляра и модели турбулентности	6			9
Итого часов		30		15	45
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

## 1. Турбулентные стратифицированные течения

Введение. Разновидности задач переноса скаляра. Основные законы сохранения для поля пассивной примеси. Задача о концентрации пассивной примеси в струе. Свойства и инварианты стратифицированных течений.

## 2. Модели предварительно перемешанного турбулентного горения

Предварительно перемешанное пламя. Неустойчивость Дарье-Ландау. Критерий Рэлея. Химико-акустическая неустойчивость на примере переменной прогресса реакции.

Модель перемешанных флеймлетов. Формализм Брэя, Мосса и Либби. Контргradientная диффузия на фронте пламени. Критерии подобия: число Брэя, Дамкёлера, Карловица, диаграмма Борги-Петерса.

## 3. Небуссинесковские модели турбулентных потоков тепла и массовых долей

Уравнение на турбулентные потоки активного скаляра и замыкания его источников. Некоторые свойства корреляции пульсации давления с градиентом скаляра. Примеры алгебраических моделей турбулентного потока скаляра. Примеры небуссинесковских свойств для турбулентных потоков скаляра.

## 4. Калибровка моделей на основе данных прямого численного моделирования

Лабораторная работа – исследование свойств потоков скаляра в стратифицированных течениях на примере DNS базы данных задачи о смешении.

## 5. Влияние химических источников на турбулентные потоки скаляра и модели турбулентности

Вывод некоторых замыканий для химического источника в уравнении турбулентных потоков скаляра.

Модели переменных турбулентных чисел Прандтля и Шмидта. Особенности моделирования производства пульсаций скаляра за счет градиентов скорости.

Влияние горения на турбулентный перенос через корреляцию пульсации давления с дивергенцией скорости и ее замыкание для небуссинесковских моделей турбулентности.

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

Необходимое оборудование: учебная аудитория, доска, мел, компьютер (ноутбук) и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система).

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Турбулентные течения в инженерных приложениях [Текст]/А. Дж. Рейнольдс, -М., Энергия, 1979
2. Внутренние течения газовых смесей [Текст]/Ю. В. Лапин, М. Х. Стрелец, -М., Наука, 1989
3. Прямое численное моделирование течений газа (численный эксперимент в газовой динамике) [Текст]/отв. ред. О. М. Белоцерковский, -М., ВЦ Акад. наук СССР, 1978

### Дополнительная литература

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

Не используются

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

Информационные ресурсы:

1. А.В.Гарбарук. Моделирование турбулентности. <https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/>
2. [https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_modeling](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_modeling)
3. <https://cloud.mail.ru/home/Модели турбулентности 2019-2020/>

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

Студент, изучающий дисциплину " Модели турбулентного переноса скаляра ", должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы. Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра аэрофизики и летательных аппаратов
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

<b>Разработчик:</b>	Р.А. Балабанов
---------------------	----------------

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
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-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
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-1.1 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
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов



## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Модели турбулентного переноса скаляра» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные законы и понятия из теории струй, границы их применимости, характерные критерии подобия для стратифицированных течений с плавучестью;
- основные идеи и понятия: формализм Брэя, Мосса и Либби, предписанные функции плотности вероятности для турбулентного смешения и турбулентного горения, пределы черно-белого смешения и гомогенного горения;
- различные виды неустойчивости фронта пламени и режимы турбулентного горения в которых они реализуются, а именно режим волнистых флеймлетов, режим искривленных флеймлетов, режим утолщенного фронта пламени, режим хорошо перемешанного реактора, а также различные физические эффекты, связанные с этими режимами – такие как контргradientная диффузия, усиление и подавление турбулентности на фронте пламени, небуссинесковские эффекты, проявляющиеся для потоков тепла;
- характерные временные и пространственные масштабы, на которых проявляются различные неустойчивости фронта пламени.

### уметь:

- применять изученные модели для расчетов задач турбулентного смешения и турбулентного горения;
- применять метод предписанной функции плотности вероятности для описания различных режимов турбулентного горения, а также поиска замыканий в уравнениях турбулентного переноса скаляра.

### владеть:

- основными методами решения задач вычислительной аэродинамики стратифицированных турбулентных течений и турбулентных течений с горением;
- основными математическими инструментами, характерными для формулировки моделей турбулентного горения.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

1. Разновидности задач переноса скаляра.
2. Основные законы сохранения для поля пассивной примеси. Задача о концентрации пассивной примеси в струе.
3. Свойства и инварианты стратифицированных течений, интеграл Эртеля.
4. Предварительно перемешанное пламя. Неустойчивость Дарье-Ландау.
5. Критерий Рэлея. Химико-акустическая неустойчивость на примере переменной прогресса реакции.
6. Модель перемешанных флеймлетов. Формализм Брэя, Мосса и Либби.
7. Критерии подобия: число Брэя, Дамкёлера, Карловица, диаграмма Борги-Петерса.
8. Уравнение на турбулентные потоки активного скаляра и замыкания его источников.
9. Свойства корреляции пульсации давления с градиентом скаляра.
10. Примеры алгебраических моделей турбулентного потока скаляра. Примеры небуссинесковских свойств для турбулентных потоков скаляра.
11. Алгоритмы обработки базы данных прямого численного моделирования, метод градиентного спуска, коэффициенты корреляции.

12. Замыкания для химического источника в уравнении турбулентных потоков скаляра на основе предписанной функции плотности вероятности и на основе метода PaSR.
13. Модели переменных турбулентных чисел Прандтля и Шмидта. Особенности моделирования производства пульсаций скаляра за счет градиентов скорости.
14. Моделирование производства пульсаций скаляра за счет градиентов скорости.
15. Влияние горения на турбулентный перенос через корреляцию пульсации давления с дивергенцией скорости и ее замыкание для небуссинесковских моделей турбулентности

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Во время проведения дифференцированного зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.