

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физика быстропротекающих газодинамических процессов
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

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

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: В.Н. Семенов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем безопасного развития современных энергетических технологий 04.06.2020

## Аннотация

Изложены проблемы анализа взрывобезопасности АЭС с водо-водяными реакторами. Это проблемы физики горения в газовых смесях, таких как водородопаровоздушная смесь. Рассмотрены основы теории горения, гидродинамики реагирующего газа, режимы горения, их характеристики, условия того или иного режима распространения горения в пространстве.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний по гидродинамике, процессам горения и детонации газовых смесей применительно к проблеме водородной безопасности АЭС;
- изучение физических основ и механизмов разных режимов распространения горения в пространстве и выявление наиболее опасных с точки зрения безопасности АЭС.

#### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области химической кинетики, физики и химии горения газовых смесей;
- приобретение теоретических знаний в области гидродинамики – ударные волны, сверхзвуковые, дозвуковые течения;
- приобретение студентами знаний и навыков качественного анализа в задачах гидродинамики и теплофизики применительно к проблеме безопасности атомных станций.

### 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-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-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-1.2 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-3 Способен профессионально работать с	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)

исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	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:

- современные проблемы физики, химии, математики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- порядки теплофизических параметров веществ;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и приложениях;
- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- физические аспекты процессов горения и детонации газовых смесей;
- характерные значения теплофизических параметров материалов, используемых на АЭС.

уметь:

- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных задач и технологических задач;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области и теоретические подходы;
- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- методами оценки характерных параметров процессов;
- методами проверки с помощью анализа размерностей;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач, относящихся к проблеме безопасности атомной энергетики;
- методами исследования гидродинамических течений реагирующих газов;
- методами анализа пределов существования детонации в газах.

### 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	Введение.	2			5
2	Горение газовых смесей.	10			7
3	Ударные волны.	5			5
4	Детонация газовых смесей.	8			8
5	Детонация в двухфазной газочапельной системе.	5			5
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. Введение.

Водородная безопасность АЭС.

##### 2. Горение газовых смесей.

Реакции окисления водорода. Цепной механизм. Период индукции.

Химическая кинетика. Скорости реакций, химическое равновесие.

Зависимость скорости реакции от температуры. Упрощенная кинетика реакции, «брутто-реакция». Характерные параметры, отличающие реакции горения.

Распространение горения в пространстве, дефлаграция. Нормальная скорость распространения пламени, отношение к скорости звука.

Законы сохранения для стационарного фронта пламени. Параметры газа за фронтом пламени.

Структура фронта пламени.

Распространение пламени в конечных объемах.

Наклонный фронт горения.

Самоускорение пламени. Неустойчивость фронта горения.

##### 3. Ударные волны.

Образование ударных волн при эволюции больших возмущений. Ширина ударного фронта.

Соотношения Гюгонио.

Ударные волны малой интенсивности. Направление изменения величин в ударной волне.

Ударная адиабата.

Асимптотическое поведение ударных волн. Волна разрежения.

##### 4. Детонация газовых смесей.

Ударные волны в реагирующем газе. Структура фронта детонации.

Решение уравнений для стационарного потока с нагревом. Режим Чепмена-Жуге и пересжатые режимы.

Параметры детонации в политропном газе. Детонационная адиабата.

Распространение детонационной волны. Асимптотическая структура.

Концентрационные пределы распространения пламени и детонации. Скорость распространения на пределе.

Неустойчивость детонации. Трехмерная структура детонации.

Критическая энергия инициирования.

##### 5. Детонация в двухфазной газочапельной системе.

Основные уравнения.

Замыкающие соотношения.

Условия существования детонации в двухфазной системе.

Медленные детонационные режимы в двухфазных средах.

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

Необходимое оборудование для лекций: учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).  
Необходимое программное обеспечение: офисный пакет OpenOffice для презентаций.  
Обеспечение самостоятельной работы – доступ в Интернет, базы данных по научным журналам.

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст]/Д. А. Франк-Каменецкий, -М., Наука, 1987
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. Детонация конденсированных и газовых систем [Текст], сборник/отв. ред. Ю. В. Фролов, -М., Наука, 1986
4. Теория детонации [Текст] / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев - М.Гостехиздат,1955
5. Семенов, В.Н. Новый механизм распространения горения в двухфазных газокапельных системах // Известия академии наук. Серия Энергетика. № 3. 2004. С. 3 11.

### **Дополнительная литература**

1. Щелкин, К.И. Неустойчивость горения и детонации газов. // Успехи Физических Наук. т.87. вып.2. 1965. С. 273 302.
2. Эдье Б., Горение, пламя и взрывы в газах. / Эдье Б., Льюис Г. // М.: Мир, 1968.
3. Ивандаев, А.И. Газовая динамика многофазных сред. Ударные и детонационные волны в газозвесах / А.И. Ивандаев, А.Г. Кутушев, Р.И. Нигматулин // Итоги науки и техники. Серия механика жидкости и газа. т.16. 1982. С. 209-287.
4. Гонтковская, В.Т. Химическая физика горения и взрыва. Горение газов и натуральных топлив. / В.Т. Гонтковская, Н.И. Озерковская, А.Н. Перегудов //Черноголовка. 1980. С. 14.
5. Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear safety. Nuclear Energy Agency, NEA/CSNI/R(2000)7. 2000.
6. Brailovsky, G. Sivashinsky Hydraulic Resistance and Multiplicity of Detonation Regimes. Combustion and Flame 122. 2000. P. 130-138.

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

<http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».  
<http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.  
<http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха.  
<http://elibrary.ru/> - научная электронная библиотека.

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

На занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как OpenOffice Mathcad, Scilab и др.

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

Студент, изучающий данный курс, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике для решения практических задач.

Поскольку в ходе занятий проводится обсуждение современных актуальных проблем физики и энергетики, не в полной мере отраженных в существующих учебниках и учебных пособиях, посещение занятий является необходимым условием для успешного усвоения материала.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. 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 экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций. С целью углубленного изучения тех или иных разделов курса студентам могут быть предложены специальные темы для самостоятельной работы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем безопасного развития современных энергетических технологий
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	В.Н. Семенов, д-р физ.-мат. наук, профессор

## 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-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-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-1.2 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-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 «Физика быстропротекающих газодинамических процессов» обучающийся должен:

### знать:

- современные проблемы физики, химии, математики;
- порядки численных величин, характерные для различных разделов физики;
- порядки теплофизических параметров веществ;
- теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и приложениях;
- фундаментальные понятия, законы, теории классической и современной физики;
- физические аспекты процессов горения и детонации газовых смесей;
- характерные значения теплофизических параметров материалов, используемых на АЭС.

### уметь:



- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций;
- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных, прикладных задач и технологических задач;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области и теоретические подходы;
- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы.

**владеть:**

- навыками освоения большого объема информации;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- методами оценки характерных параметров процессов;
- методами проверки с помощью анализа размерностей;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач, относящихся к проблеме безопасности атомной энергетики;
- методами исследования гидродинамических течений реагирующих газов;
- методами анализа пределов существования детонации в газах.

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

Задания для самостоятельной работы:

1. Дать оценку скорости распространения горения (дефлаграции) в газовой смеси. Вывести параметры стационарной волны горения на основе законов сохранения. Определить скачок давления за волной горения.
2. Определить направление изменения величин в ударной волне малой амплитуды с использованием второго начала термодинамики.
3. Вывести соотношения Гюгонио на ударном фронте. Построить ударную адиабату и определить отношение скорости газового потока к скорости звука перед и за ударной волной.
4. Вывести уравнения для скорости газа в стационарном газовом потоке с подводом тепловой энергии. Построить модель детонационной волны. Определить направление изменения величин во фронте детонационной волны.
5. Объяснить явление предельного расхода и кризиса теплопередачи в стационарном потоке с подводом тепла. Объяснить различие режимов детонации – пересжатого и режима Чепмена-Жуге.
6. Построить детонационную адиабату и вывести свойства детонационной волны на основе законов сохранения. Показать единственность и выделенность режима Чепмена-Жуге.
7. Вывести закономерности эволюции профиля сильного (нелинейного) возмущения в газе. Определить скорость распространения точки профиля с постоянной плотностью и скоростью частиц газа.
8. Вывести асимптотический профиль любого возмущения большой амплитуды (ударной волны). Асимптотический профиль детонационной волны

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

Вопросы к экзамену в 9 семестре:

1. Образование водорода при тяжелой аварии и опасность взрыва.
2. Проблема распространения водорода и образования горючих смесей.
3. Кинетика реакции окисления водорода. Цепной механизм.
4. Упрощенная кинетика реакции окисления водорода. Брутто-реакция.
5. Скорости реакций, зависимость от температуры.
6. Характерные параметры, отличающие реакции горения от других химических реакций.
7. Распространение горения в пространстве. Механизм передачи нагревания при дефлаграции.
8. Нормальная скорость распространения пламени. Отношение к скорости звука.
9. Законы сохранения для стационарного фронта пламени. Параметры газа за фронтом пламени.
10. Распространение пламени в разных условиях. Распространение от закрытого конца трубы.

11. Движение газа перед фронтом пламени.
12. Неустойчивость пламени. Ускорение горения при искривлении фронта.
13. Самоускорение пламени в трубах и в открытом пространстве.
14. Понятие о детонации как о другом способе распространения горения.
15. Ударная волна - механизм нагрева горючей смеси.
16. Ударные волны. Образование ударных волн при эволюции больших возмущений.
17. Задача о поршне.
18. Законы сохранения на скачке. Соотношения Гюгонио.
19. Адиабата Пуассона и ударная адиабата.
20. Направление изменения величин в ударной волне. Числа Маха по обе стороны от скачка.
21. Ударная волна в реагирующем газе.
22. Зона горения за ударной волной как стационарный поток газа с подводом тепла.
23. Кризис теплопередачи.
24. Структура детонационной волны. Направление изменения величин в зоне горения.
25. Пересжатая детонация и режим Чепмена-Жуге.
26. Детонационная адиабата. Точка Чепмена-Жуге.
27. Параметры детонационной волны в идеальном газе.
28. Сильная волна. Сопоставление с параметрами газа в пламени
29. Распространение детонационной волны. Режим Чепмена-Жуге.
30. Автомодельная волна разрежения.
31. Неустойчивость детонационного фронта.
32. Трехмерная структура детонации. Ячеистая структура.
33. Концентрационные пределы распространения пламени и детонации. Скорость распространения на пределе.

Пример экзаменационного билета

1. Образование водорода при тяжелой аварии и опасность взрыва.
2. Задача о поршне.
3. Автомодельная волна разрежения.

#### Критерии оценивания

Студент получает:

оценку отлично(10), если получены ответы на три вопроса, нет замечаний.

оценку отлично(9), если получены ответы на три вопроса, есть отдельные замечания.

оценку отлично(8), если получены ответы на три вопроса, есть существенные замечания и (или) ошибки в вычислениях.

оценку хорошо(7), если получены ответы на два вопроса, нет замечаний

оценку хорошо(6), если получены ответы на два вопроса, есть отдельные замечания

оценку хорошо(5), если получены ответы на два вопроса, есть существенные замечания и (или) ошибки в вычислениях.

оценку удовлетворительно(4), если получен ответ на один вопрос, нет замечаний

оценку удовлетворительно(3), если получен ответ на один вопрос, есть замечания

оценку неудовлетворительно(2), если правильные ответы на вопросы отсутствуют, но студент понимает и может объяснить смысл вопросов.

оценку неудовлетворительно(1), если правильные ответы на вопросы отсутствуют, студент не может объяснить смысл заданных вопросов.

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

Для данного курса принята следующая процедура оценивания:

Студент получает три вопроса, и готовится не менее 45 минут.

При этом он может пользоваться программой курса, конспектом лекций и справочной литературой.

Опрос студента не превышает 1 астрономического часа.