

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
(ИПМех РАН)

«Утверждаю»  
Директор ИПМех РАН  
д.ф.-м.н.  
С.Е. Якуш

«28» сентября 2018 г.

Рабочая программа учебной дисциплины (РПУД)  
«Теория горения и взрыва»

Направление подготовки 01.06.01 Математика и механика  
Специальность 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы

Форма подготовки (очная)  
Отдел аспирантуры ИПМех РАН

Всего 108 часов, всего зачетных единиц – 3  
Аудиторных часов – 36, в том числе:  
лекции – 36 часов  
Самостоятельная работа – 72 часа

Рабочая программа составлена в соответствии с Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации (Минобрнауки России) от 30 июля 2014 г. № 866 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика (уровень подготовки кадров высшей квалификации)".

Составитель: зам. директора, д.ф.-м.н. Якуш С.Е.

Заведующий отделом аспирантуры: Щелчкова И.Н.

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Теория горения и взрыва» предназначена для аспирантов, обучающихся по специальности 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы, и входит в вариативную часть учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика, учебный план подготовки аспирантов по специальности 01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы.

**Цель** - формирование расширенных представлений в области механики жидкости, газа и плазмы.

### **Задачи:**

1. Исследовать протекание химических реакций в потоках газов;
2. Изучить уравнения химической кинетики и теплообмена, описывающие процессы горения и взрыва;
3. Рассмотреть постановки и схемы решения задач механики жидкости и газа при наличии химических реакций горения.

### **Компетенции выпускника, формируемые в результате изучения дисциплины**

#### Универсальные компетенции:

УК-1 Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.

УК -3 Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.

Общепрофессиональные компетенции:

ОПК - 1 Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий;

ОПК - 2 Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования;

Профессиональные компетенции:

ПК – 7 Умение использовать системный подход к исследованию технических систем и выработке стратегии научной деятельности в процессе реализации научных и технологических инноваций;

ПК - 8 Способность использовать знания в области математики и механики для дальнейшего освоения дисциплин в соответствии с профилем подготовки;

ПК - 13 Способность самостоятельно выполнять научные исследования в области механики жидкости и газа, используя соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установления законов теплообмена в реагирующих газовых смесях, условий возникновения, распространения и погасания волн горения, расчета критических условий и характеристик теплового взрыва, газодинамических явлений, сопровождающих процессы горения;

ПК - 14 Способность самостоятельно применять методы механики и вычислительной математики, теоретические, расчетные и экспериментальные методы исследований, методы математического и компьютерного моделирования к постановке и решению задач механики жидкости и газа для реагирующих течений;

ПК - 15 Способность овладевать новыми современными методами и средствами проведения экспериментальных исследований процессов горения; планировать и проводить эксперименты; интерпретировать

экспериментальные данные; обрабатывать, анализировать и обобщать результаты экспериментов.

### **Требования к уровню усвоения содержания дисциплины.**

Аспиранты должны приобрести следующие знания и умения:

#### ***знать:***

- методы реализации научно-исследовательской деятельности в области математики и механики, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач с использованием информационно-коммуникационных технологий;

- научные основы и закономерности механических явлений, применяемые для изучения процессов зажигания, горения и взрыва в реакционноспособных газовых смесях;

- научные основы и закономерности термогазодинамических явлений, применяемые при постановке и решении математических задач теории горения и взрыва;

- современные методы экспериментальной механики жидкости и газа для реагирующих систем, методы планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных;

#### ***уметь:***

- планировать и осуществлять научно-исследовательскую деятельность с применением современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий;

- использовать базовый физико-математический аппарат, вычислительные методы и методы компьютерного моделирования для выявления новых закономерностей распространения волн горения в различных конфигурациях и режимах течения;

- делать качественные оценки с применением критериального подхода для определения условий протекания и характеристикам реакций горения при зажигании реакционноспособных смесей;

- использовать свои знания для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач, включающих процессы горения и взрыва;

- иметь представление о применении теоретических моделей горения и взрыва для анализа технических систем;

***владеть:***

- навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации; выбора методов и средств решения задач исследования, навыками работы с вычислительной техникой;

- современными методами и технологиями вычислительной математики и механики, компьютерными технологиями, применяемыми в области механики жидкости и газа для реагирующих течений;

- современными методами и технологиями вычислительной математики и механики, теоретическими, расчетными и экспериментальными методами исследований, применяемыми для прогноза поведения реагирующих систем при различных режимах инициирования химических реакций;

- современными методами экспериментальных исследований в области механики жидкости и газа, методами обработки, анализа и обобщения результатов экспериментов.

## **СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (36 час.)**

### **Основы теории реагирующих систем (6 час.)**

#### **Тема 1. Основные понятия теории горения и взрыва (2 час.)**

Обзор основных положений теории горения и взрыва. Горение как класс экзотермических реакций. Горение предварительно перемешанных газов. Диффузионное горение неперемешанных газов, горение жидких топлив, горение твердых топлив. Горение смесевых твердых топлив, детонация.

#### **Тема 2. Основные понятия химической кинетики (4 час.)**

Термодинамические характеристики и свойства многокомпонентных газовых смесей. Массовые и объемные концентрации и связь между ними. Скорость реакции. Константа скорости реакции. Энергия активации. Порядок реакции. Стехиометрические, богатые и бедные смеси газов. Стехиометрический коэффициент. Коэффициент избытка воздуха. Равновесие в химически реагирующих системах. Константа равновесия.

### **Классическая теория горения и взрыва (14 час.)**

#### **Тема 1. Введение (2 час.)**

Уравнения неразрывности и импульса при течении газов с переменной плотностью. Предел существенно дозвуковых течений. Уравнения неразрывности компонент химически реагирующей смеси. Уравнение теплопроводности с учетом скорости тепловыделения в химической реакции. Уравнение диффузии при использовании массовых и объемных концентраций. Среднечисловая и среднемассовая скорости потока. Термодиффузия.

#### **Тема 2. Теория теплового взрыва (4 час.)**

Тепловое самовоспламенение реагирующих смесей. Адиабатический тепловой взрыв. Теория теплового взрыва Н.Н. Семенова. Преобразование Д.А. Франк-Каменецкого. Тепловой взрыв в плоском, цилиндрическом и сферическом сосудах. Период индукции воспламенения реагирующего газа.

#### **Тема 3. Химический реактор идеального перемешивания. (4 час.)**

Модель химического реактора идеального перемешивания. Уравнения баланса массы и энергии для проточной системы. Графическая интерпретация уравнения баланса энергии. Существование стационарных режимов. Устойчивость стационарных режимов. Возможность множественных режимов при заданном массовом расходе горючей смеси через реактор. Зависимость температуры в реакторе от массового расхода. Гистерезис зажигания и погасания реактора. Характеристики точек зажигания и погасания. Теплонапряженность процесса горения в реакторе.

#### **Тема 4 . Теория зажигания горючей смеси. (4 час.)**

Зажигание горючей смеси. Теория зажигания горючей смеси плоской накаливаемой поверхностью. Зажигание реагирующего газа цилиндрической поверхностью. Учет выгорания смеси вблизи накаливаемой поверхности. Обтекание нагретого тела реагирующим газом.

#### **Современная теория горения и взрыва (16 час.)**

##### **Тема 1. Распространение плоского ламинарного пламени (2 час.)**

Теория распространения плоского ламинарного пламени Я.Б. Зельдовича. Зависимость скорости распространения пламени от кинетических параметров реагирующей смеси и теплофизических параметров. Концентрационные пределы распространения пламени. Предел распространения пламени при наличии тепловых потерь.

##### **Тема 2. Горение капель жидких топлив (2 час.)**

Процессы теплообмена вблизи поверхности раздела жидкость-газ. Стефановский поток. Диффузионная теория горения капли жидкого топлива. Скорость испарения капли. Зависимость времени испарения капли от ее размера. Горение капли. Распределения концентраций и температур у поверхности капли. Зависимость диаметра горящей капли от времени.

##### **Тема 3. Газодинамика горения (4 час.)**

Пламя как гидродинамический разрыв. Условия сохранения на фронте пламени. Пламя бунзеновской горелки. Горение в закрытых сосудах. Махе-эффект.

##### **Тема 4. Устойчивость пламен (4 час.)**

Устойчивость плоского ламинарного пламени. Гидродинамическая неустойчивость плоского пламени. Теория Ландау. Дисперсионное соотношение. Диффузионно-тепловая устойчивость пламени. Критерий Льюиса.

##### **Тема 5. Теория детонации (4 час.)**

Дефлаграция и детонация как два различных механизма распространения волны химической реакции. Уравнения сохранения массы,

импульса и энергии на волне детонации. Детонационная адиабата. Точка Жуге. Пересжатая и недосжатая детонации. Структура детонационной волны. Изменение температуры и давления в волне детонации.

## **КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

### **Вопросы к экзамену**

1. Горение как класс экзотермических реакций. Основные типы распространения волны реакции.
2. Горение предварительно перемешанных газов. Диффузионное горения неперемешанных газов.
3. Горение жидких топлив, горение твердых топлив.
4. Термодинамические характеристики и свойства многокомпонентных газовых смесей. Массовые и объемные концентрации и связь между ними.
5. Скорость реакции. Константа скорости реакции. Энергия активации. Порядок реакции.
6. Стехиометрические, богатые и бедные смеси газов. Стехиометрический коэффициент. Коэффициент избытка воздуха.
7. Равновесие в химически реагирующих системах. Константа равновесия.
8. Уравнения неразрывности и импульса при течении газов с переменной плотностью. Предел существенно дозвуковых течений.
9. Уравнения энергии и сохранения компонент в многокомпонентных химически реагирующих газовых смесях.
10. Тепловое самовоспламенение реагирующих смесей. Адиабатический тепловой взрыв. Теория теплового взрыва Н.Н. Семенова.
11. Теория теплового взрыва Д.А. Франк-Каменецкого. Тепловой взрыв в плоском, цилиндрическом и сферическом сосудах. Период индукции воспламенения реагирующего газа.
12. Зажигание горючей смеси. Теория зажигания горючей смеси плоской

и цилиндрической накаливаемой поверхностью.

13. Теория распространения плоского ламинарного пламени Я.Б. Зельдовича.

14. Концентрационные пределы распространения пламени. Предел распространения пламени при наличии тепловых потерь.

15. Процессы тепломассообмена вблизи поверхности раздела жидкость-газ. Стефановский поток.

16. Диффузионная теория горения капли жидкого топлива. Скорость испарения и горения капли. Зависимость времени сгорания капли от ее размера.

17. Пламя как гидродинамический разрыв. Условия сохранения на фронте пламени.

18. Горение в закрытых сосудах. Махе-эффект.

19. Устойчивость плоского ламинарного пламени. Гидродинамическая неустойчивость плоского пламени.

20. Диффузионно-тепловая устойчивость пламени. Критерий Льюиса.

21. Дефлаграция и детонация как два различных режима распространения волн химической реакции.

22. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии на волне детонации.

23. Детонационная адиабата. Точка Жуге. Пересжатая и недосжатая детонации.

24. Структура детонационной волны. Изменение температуры и давления в волне детонации

## **УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Основная литература**

(печатные и электронные издания)

1. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.  
Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН

2. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН

3. Зельдович Я. Б., Компанеец А. С. Теория детонации. М.: Из-во технико-теоретической литературы, 1953.

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН

4. Снегирев А.Ю. Основы теории горения. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014, 352 с.

<http://www.iprbookshop.ru/>

5. Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. Газодинамика горения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987, 307 с.

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН

6. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Пер. с англ. Г.Л. Агафонова. Под ред. П.А. Власова. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 352 с.

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН

7. Гремячкин В. М. Гетерогенное горение частиц твердых топлив - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015. - 230 с.

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН

**Дополнительная литература**  
(печатные и электронные издания)

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986.

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН

2. Вильямс Ф.А. Теория горения. М.: Наука, 1971.

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН

3. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М.: Из-во АН СССР. 1963

Справочно-информационный фонд ИПМех РАН