

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Механико-математический факультет
Кафедра газовой и волновой динамики



УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____/Нигматулин Р.И./
« 10 » июня 2019 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины (модуля):

ЕНС на английском языке. Распространение волн в реагирующих средах

наименование дисциплины (модуля)

Уровень высшего образования:

специалитет

Направление подготовки (специальность):

01.05.01 Фундаментальные математика и механика

(код и название направления/специальности)

Направленность (профиль) ОПОП: В-ЕН

Фундаментальная механика

(если дисциплина (модуль) относится к вариативной части программы)

Форма обучения:

очная

очная, очно-заочная

Рабочая программа рассмотрена и одобрена
на заседании кафедры газовой и волновой динамики
(протокол № 15, « 10 » июня 2019 года)

Москва 2019

На обратной стороне титула:

Рабочая программа дисциплины (модуля) разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки/ специальности «Фундаментальные математика и механика» (программы бакалавриата, магистратуры, реализуемых последовательно по схеме интегрированной подготовки; программы специалитета; программы магистратуры) в редакции приказа МГУ от 30 декабря 2016 г.

Год (годы) приема на обучение _____ 2014 _____

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО (относится к базовой или вариативной части ОПОП ВО, или является факультативом). Вариативная часть ООП. Является специальной дисциплиной (ЕНС) для студентов 3-6 годов обучения, специализирующихся в данной научной области или смежной научной области, ЕНС по выбору студента. Освоение дисциплины необходимо для сдачи экзаменов по основной и смежной специальностям, сдачи выпускных экзаменов, написания курсовых и дипломных работ, статей и научных отчетов.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть): освоение дисциплин «Основы механики сплошных сред», «Математический анализ», «Линейная алгебра», «Механика сплошной среды», «Дифференциальные уравнения».

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников.

Компетенции выпускников (коды)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с компетенциями
УК-1 УК-6	Уметь проводить самостоятельно научные и прикладные исследования в специальных областях механики
ОПК-1 СПК-1 СПК-2 СПК-3 ОПК-3	Уметь использовать фундаментальные знания в области специализации в будущей профессиональной деятельности Владеть специальными разделами механики сплошной среды, физико-химической газовой динамики, теории детонации и горения, методами анализа и решения задач специализации Знать специальные разделы механики жидкости, газа и плазмы, физико-химической газовой динамики, теории детонации и горения.
ПК-2	Уметь применять методы анализа для решения задач специализации

4. Формат обучения: очная форма обучения, лекционные занятия.

5. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе 28 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 44 академических часов на самостоятельную работу обучающихся.

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

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),	Всего (часы)	В том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем)	Самостоятельная работа

Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)		Виды контактной работы, часы			обучающегося, часы (виды самостоятельной работы – эссе, реферат, контрольная работа и пр. – указываются при необходимости)
		Занятия лекционно-семинарские*	Занятия семинарские*	Всего	
Тема 1. Волны с энергосодержанием. Детонация и горение. Сильная и слабая детонация, сильная и слабая дефлаграция (горение).	2	1		1	1
Тема 2. Процессы Чепмена-Жуге (минимальная скорость стационарной детонации, максимальная скорость стационарной дефлаграции). Стационарность изменения энтропии вдоль кривой Гюгонио и прямых Михельсона в точках Чепмена-Жуге.	2	1		1	1
Тема 3. Изменение энтропии вдоль адиабаты Гюгонио с энергосодержанием и вдоль прямых Михельсона.	2	1		1	1
Тема 4. Степень определенности решения задач о поршне при наличии волн детонации или горения.	2	1		1	1
Тема 5. Примеры решения задач о распространении волн сильной и слабой детонации или дефлаграции в трубе при движении в ней поршня с положительной или отрицательной	4	2		2	2

скоростью.					
Тема 6. Переходные режимы задач распространения волн с энерговыведением. Переход горения в детонацию, расщепление детонационной волны на ударную и отстающую от нее волну горения. Галопирующие режимы. Пульсирующая и спиновая детонация.	4	2		2	2
Тема 7. Полная система уравнений физико-химической газовой динамики многокомпонентных сред с учетом теплообмена, диффузии и физико-химических превращений. Осредненные модели турбулентности и необходимость их применения при численном решении задачи. Подсеточная турбулентность. Постановка граничных условий.	4	2		2	2
Тема 8. Моделирование кинетики химических реакций. Сокращенные кинетические механизмы. Роль цепных реакций при возникновении детонации.	3	1		1	2
Тема 9. Численное моделирование задач распространения турбулентного горения и перехода горения в детонацию. Роль геометрических факторов при возникновении переходных режимов и расщеплении детонационных волн. Возникновение низкоскоростной детонации и высокоскоростного горения. Влияние состава и температуры смеси на переходные режимы.	4	2		2	2
Тема 10. Инициирование детонации при отражении ударных волн и их фокусировки в конических и	4	2		2	2

клиновидных кавернах. Сравнение вычислительного моделирования и экспериментов в ударных трубах.					
<i>Промежуточная аттестация: коллоквиум (указывается форма проведения)</i>	6				6
Тема 11. Применение детонации в двигателях, использующих принципы детонационного горения. Устройства с пульсирующей детонационной волной и с непрерывно вращающейся детонационной волной.	3	1		1	2
Тема 12. Детонация и горение в гетерогенных средах. Процессы внутри зоны реакции. Основные уравнения для описание химически реагирующих течений в многофазных средах. Параметры межфазных взаимодействий. Применение метода Эйлера для описания движения газовой фазы и метода Лагранжа для описания движения диспергированной фазы.	4	2		2	2
Тема 13. Аэровзвеси. Горение капли горючего в атмосфере окислителя. Задачи диффузионного горения. Равновесные и неравновесные модели испарения.	3	1		1	2
Тема 14. Учет многостадийности химических реакций в рамках решения задач диффузионного горения. Примеры горения капель в режиме «холодного» пламени. Результаты экспериментов в условиях микрогравитации.	4	2		2	2
Тема 15. Взаимодействие капель	4	2		2	2

жидкости с газовым потоком, два режима испарения. Вычислительное моделирование распространения пламени в аэровзвеси, перехода горения в детонацию, воспламенения струи при попадании в камеру сгорания, воспламенение облака частиц при падении на него ударной волны.					
Тема 16. Горение частиц, содержащих твердые и жидкие горючие компоненты в атмосфере окислителя. Гетерогенные реакции. Динамика выгорания частиц. Распространение турбулентного горения в аэровзвеси в замкнутом объеме. Роль начальной турбулизации при определении времени и энергии зажигания, а также скорости распространения турбулентного пламени. Влияние неоднородности аэровзвеси на пределы зажигания.	4	2		2	2
Тема 17. Горение поверхности горючего в потоке окислителя. Решение задачи в рамках приближений плоского пограничного слоя. Распространение пламени навстречу потоку.	3	1		1	2
Тема 18. Результаты вычислительного моделирования распространения пламени над поверхностью горючего материала в спутном потоке, сравнение с точными решениями пограничного слоя. Неустойчивость фронта горения. Моделирование неустановившихся процессов запуска гибридного двигателя.	4	2		2	2
<i>Итоговая аттестация: зачет</i>	6				6

<i>(указывается форма проведения)</i>					
Итого	72	28		28	44

**Внимание! В таблице должно быть зафиксировано проведение текущего контроля успеваемости, который может быть реализован, например, в рамках занятий семинарского типа.*

*** Часы, отводимые на проведение промежуточной аттестации, выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося*

7. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

7.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

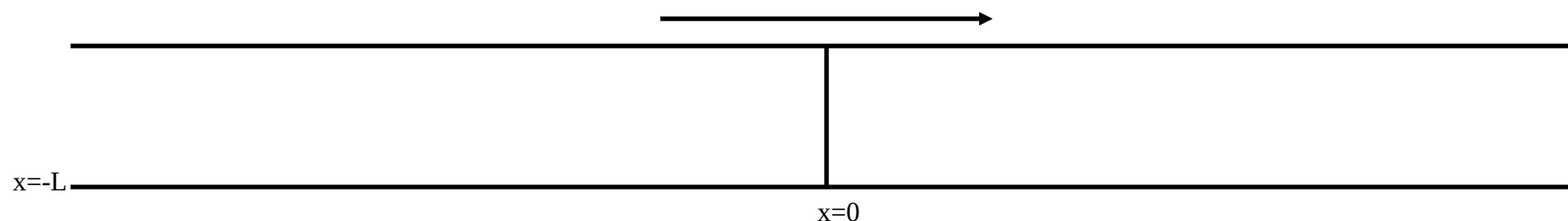
Задачи

1. Что такое горение? Что такое волна детонации и волна дефлаграции?
2. Что такое кривая Гюгонио с энергосвободой? Кривая Гюгонио без энергосвободы?
3. Что такое прямая Михельсона?
4. Указать на кривой Гюгонио состояния, соответствующие сильной детонации, слабой детонации, детонации Чепмена-Жуге, слабой дефлаграции, сильной дефлаграции. Объяснить, какова скорость течения газа относительно фронта реакции перед волной и позади волны для всех этих процессов.
5. Нарисовать профили давления и скорости за волной детонации Чепмена Жуге и за волной слабой дефлаграции для случая одномерного распространения волны от закрытого торца трубы.
6. Дать определение массовой концентрации реагента в многокомпонентной смеси. Записать уравнение конвективной диффузии.
7. Для одномерного установившегося течения найти распределения концентраций примеси в потоке при следующих граничных условиях:

При $x=0$: концентрация $Y=Y_0$

При $x=-L$: концентрация $Y=Y_{00}$; $Y_0 > Y_{00}$

Рассмотреть случаи, когда скорость потока равна нулю $v = 0$,
и когда скорость потока – положительная константа $v = \text{const} > 0$



7.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации: собеседование со слушателями для оценки усвояемости материала и консультаций

Тема 1. Волны с энергосвободой. Детонация и горение. Сильная и слабая детонация, сильная и слабая дефлаграция (горение).

Тема 2. Процессы Чепмена-Жуге (минимальная скорость стационарной детонации, максимальная скорость стационарной дефлаграции).

Стационарность изменения энтропии вдоль кривой Гюгонио и прямых Михельсона в точках Чепмена-Жуге.

Тема 3. Изменение энтропии вдоль адиабаты Гюгонио с энерговыведением и вдоль прямых Михельсона.

Тема 4. Степень определенности решения задач о поршне при наличии волн детонации или горения.

Тема 5. Примеры решения задач о распространении волн сильной и слабой детонации или дефлаграции в трубе при движении в ней поршня с положительной или отрицательной скоростью.

Тема 6. Переходные режимы задач распространения волн с энерговыведением. Переход горения в детонацию, расщепление детонационной волны на ударную и отстающую от нее волну горения. Галоппирующие режимы. Пульсирующая и спиновая детонация.

Тема 7. Полная система уравнений физико-химической газовой динамики многокомпонентных сред с учетом теплообмена, диффузии и физико-химических превращений. Осредненные модели турбулентности и необходимость их применения при численном решении задачи. Подсеточная турбулентность. Постановка граничных условий.

Тема 8. Моделирование кинетики химических реакций. Сокращенные кинетические механизмы. Роль цепных реакций при возникновении детонации.

Тема 9. Численное моделирование задач распространения турбулентного горения и перехода горения в детонацию. Роль геометрических факторов при возникновении переходных режимов и расщеплении детонационных волн. Возникновение низкоскоростной детонации и высокоскоростного горения. Влияние состава и температуры смеси на переходные режимы.

Тема 10. Иницирование детонации при отражении ударных волн и их фокусировки в конических и клиновидных кавернах. Сравнение вычислительного моделирования и экспериментов в ударных трубах.

Тема 11. Применение детонации в двигателях, использующих принципы детонационного горения. Устройства с пульсирующей детонационной волной и с непрерывно вращающейся детонационной волной.

Тема 12. Детонация и горение в гетерогенных средах. Процессы внутри зоны реакции. Основные уравнения для описания химически реагирующих течений в многофазных средах. Параметры межфазных взаимодействий. Применение метода Эйлера для описания движения газовой фазы и метода Лагранжа для описания движения диспергированной фазы.

Тема 13. Аэровзвеси. Горение капли горючего в атмосфере окислителя. Задачи диффузионного горения. Равновесные и неравновесные модели испарения.

Тема 14. Учет многостадийности химических реакций в рамках решения задач диффузионного горения. Примеры горения капель в режиме «холодного» пламени. Результаты экспериментов в условиях микрогравитации.

Тема 15. Взаимодействие капель жидкости с газовым потоком, два режима испарения. Вычислительное моделирование распространения пламени в аэровзвеси, перехода горения в детонацию, воспламенения струи при попадании в камеру сгорания, воспламенение облака частиц при падении на него ударной волны.

Тема 16. Горение частиц, содержащих твердые и жидкие горючие компоненты в атмосфере окислителя. Гетерогенные реакции. Динамика выгорания частиц. Распространение турбулентного горения в аэровзвеси в замкнутом объеме. Роль начальной турбулизации при определении времени и энергии зажигания, а также скорости распространения турбулентного пламени. Влияние неоднородности аэровзвеси на пределы зажигания.

Тема 17. Горение поверхности горючего в потоке окислителя. Решение задачи в рамках приближений плоского пограничного слоя.

Распространение пламени навстречу потоку.

Тема 18. Результаты вычислительного моделирования распространения пламени над поверхностью горючего материала в спутном потоке, сравнение с точными решениями пограничного слоя. Неустойчивость фронта горения. Моделирование неустойчивых процессов запуска гибридного двигателя.

ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ результатов обучения (РО) по дисциплине (модулю)				
Оценка РО и соответствующие виды оценочных средств	2	3	4	5
Знания (виды оценочных средств: устные и письменные опросы и контрольные работы, тесты, и т.п.)	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
Умения (виды оценочных средств: практические контрольные задания, написание и защита рефератов на заданную тему и т.п.)	Отсутствие умений	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера)	Успешное и систематическое умение
Навыки (владения, опыт деятельности) (виды оценочных средств: выполнение и защита курсовой работы, отчет по практике, отчет по НИР и т.п.)	Отсутствие навыков (владений, опыта)	Наличие отдельных навыков (наличие фрагментарного опыта)	В целом, сформированные навыки (владения), но используемые не в активной форме	Сформированные навыки (владения), применяемые при решении задач

8. Ресурсное обеспечение

Список литературы

1. Smirnov N.N., Betelin V.B., Nikitin V.F., Phylippov Y.G., Koo J. Detonation engine fed by acetylene-oxygen mixture. *Acta Astronaut.* 2014.
2. N.N. Smirnov, V.F. Nikitin, Yu.G. Phylippov. Deflagration to detonation transition in gases in tubes with cavities. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 83, 6 (2010), pp. 1287-1316
3. N. N. Smirnov, O. G. Penyazkov, K. L. Sevrouk, V. F. Nikitin, L. I. Stamov, V. V. Tyurenkova. Onset of detonation in hydrogen-air mixtures due to shock wave reflection inside a combustion chamber. *Acta Astronautica*, 149:77–92, 2018.
4. V.B. Betelin, V.F. Nikitin, V.R. Dushin, A.G. Kushnirenko, V.A. Nerchenko, Evaporation and ignition of droplets in combustion chambers modeling and simulation, *Acta Astronaut.* 70 (2012) 23–35.
5. V.M. Guendugov, N.N. Smirnov, V.V. Tyurenkova, Solving the problem of diffusion combustion of a droplet with allowance for several independent reactions, *Combust. Explos. Shock Waves* 49 (6) (2013) 648–656.
6. V.V. Tyurenkova, Non-equilibrium diffusion combustion of a fuel droplet, *Acta Astronaut.* 75 (2012) 78–84.
7. V.V. Tyurenkova, N.N. Smirnov, V.M. Guendugov, Analytical solution for a single droplet diffusion combustion problem accounting for several chain reaction stages, *Acta Astronaut.* 83 (2013) 208–215.
8. N.N. Smirnov, V.B. Betelin, A.G. Kushnirenko, V.F. Nikitin, V.R. Dushin, V.A. Nerchenko. Ignition of fuel sprays by shock wave mathematical modeling and numerical simulation. *Acta Astronautica* 87 (2013) 14–29.
9. Nickolay N. Smirnov, Valeriy F. Nikitin, Vladislav R. Dushin, Yuriy G. Filippov, Valentina A. Nerchenko, Javad Khadem Combustion onset in non-uniform dispersed mixtures. *Acta Astronautica* (2015), 115, 94-101.
10. N.N. Smirnov, V.V. Tyurenkova, M.N. Smirnova, Laminar diffusion flame propagation over thermally destructing material, *Acta Astronautica* (2015), 109, 217-224.
11. V. B. Betelin, A. G. Kushnirenko, N. N. Smirnov, V. F. Nikitin, V. V. Tyurenkova, L. I. Stamov. Numerical investigations of hybrid rocket engines. *Acta Astronautica*, 144:363–370, 2018.
12. N.N. Smirnov, V.F. Nikitin, L.I. Stamov, E.V. Mikhalechenko, V.V. Tyurenkova. Rotating detonation in a ramjet engine three-dimensional modelling. *Aerospace Science and Technology*. 81: 213-224, (2018).

9. Язык преподавания.

Английский

10. Преподаватель.

Смирнов Н.Н., Тюреноква В.В.

11 Авторы программы.

Смирнов Н.Н., Тюреноква В.В.