

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

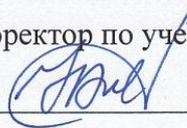
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

**«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра двигателей внутреннего сгорания

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

  
Зарипов Н.Г.

« 02 » 09 20 15 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

**УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**«СПЕЦГЛАВЫ ТЕОРИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ»**

Уровень подготовки: высшее образование – подготовка кадров высшей квалификации

Направление подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации (аспирантура)  
13.06.01 – Электро- и теплотехника

Направленность подготовки

Тепловые двигатели

Квалификация (степень) выпускника

Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения

очная

Уфа 2015

## Содержание

1. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	3
2. Перечень результатов обучения.....	4
3. Содержание и структура дисциплины (модуля).....	5
4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы.....	8
5. Фонд оценочных средств.....	9
6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)..	10
7. Образовательные технологии.....	10
8. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	11
9. Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ.....	11
Лист согласования рабочей программы дисциплины.....	12
Дополнения и изменения в рабочей программе дисциплины.....	13

## 1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Спецглавы теории рабочих процессов поршневых двигателей» является дисциплиной вариативной части.

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации (аспирантура) 13.06.01 – «Электро- и теплотехника», утвержденного приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30 июля 2014 г. № 878 и приказа Министерства образования и науки Российской Федерации от 30.04.2015 № 464 «О внесении изменений в федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации)». Является неотъемлемой частью основной образовательной профессиональной программы (ОПОП).

**Целью освоения дисциплины** является изучение и практическое освоение методологии моделирования сложных процессов в проточной части ДВС и системах топливоснабжения, которая позволит аспирантам в будущем осознанно применять эту методологию при использовании программных систем моделирования процессов в ДВС.

### Задачи:

1. Изучить основы описания феноменологическими мат. моделями обменных процессов (трение, тепло- и массообмен) и кинетических (неравновесных) процессов в свободном и пристенном турбулентном потоке газофазного и газожидкостного рабочего тела, составляющих основу рабочего процесса поршневого ДВС.

2. Изучить методологию расчетов в программных системах моделирования течений рабочих тел в тепловых двигателях (включая методики идентификации мат. моделей и применение моделей разной степени детализации) при проектировочных расчетах.

Входные компетенции не формируются никакими другими частями образовательной программы. Компетенции должны быть сформированы общепрофессиональными и специальными дисциплинами ОП по направлению подготовки магистров 13.04.03 – «Энергетическое машиностроение»: «Основы моделирования процессов в двигателях и энергоустановках», «Информационные технологии в энергомашиностроении», «Теория и моделирование рабочих процессов ДВС», «Механика жидкости и газа», «Основы физики горения», а также в ходе индивидуальной научно-исследовательской работы аспиранта в 1 и 2 семестре.

Требуемый для дисциплины «Спецглавы теории рабочих процессов поршневых двигателей» входной уровень этих компетенций – *базовый*, как следует из таблицы:

№	Компетенция	Код	Уровень освоения, определяемый этапом формирования компетенции*	Название дисциплины (модуля), практики, научных исследований, сформировавших данную компетенцию
1	Способность применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2	Базовый	На предыдущем уровне высшего образования (магистратура)
2	Способностью использовать методы решения задач оптимизации параметров различных систем	ПК-1	Базовый	На предыдущем уровне высшего образования (магистратура)
3	Способностью использовать знание теоретических основ рабочих процессов в энергетических машинах, аппаратах и установках, методов расчетного анализа объектов профессиональной деятельности	ПК-2	Базовый	На предыдущем уровне высшего образования (магистратура)

4	Способностью использовать современные технологии проектирования для разработки конкурентоспособных энергетических установок с прогрессивными показателями качества	ПК-3	Базовый	На предыдущем уровне высшего образования (магистратура)
---	--	------	---------	---

#### Исходящие компетенции:

№	Компетенция	Код	Уровень освоения, определяемый этапом формирования компетенции	Название дисциплины (модуля), практики, научных исследований для которых данная компетенция является входной
1	Способность к самостоятельному выявлению проблем при конструировании, проектировании, производстве и эксплуатации материалов, приборов, устройств, установок, комплексов оборудования теплотехнического назначения по направленности подготовки «Тепловые двигатели»	ПК-1	Базовый	научно-исследовательская практика; научные исследования; ГИА
2	Способность к математическому и компьютерному моделированию рабочих процессов в тепловых двигателях и других объектах теплотехнического назначения.	ПК-2	Базовый	научно-исследовательская практика; научные исследования; ГИА

## 2. Перечень результатов обучения

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций.

#### Планируемые результаты обучения по дисциплине:

№	Формируемые компетенции	Код	Знать	Уметь	Владеть
1	- способность к самостоятельному выявлению проблем при конструировании, проектировании, производстве и эксплуатации материалов, приборов, устройств, установок, комплексов оборудования теплотехнического назначения по направленности «Тепловые двигатели»	ПК-1	- современное состояние науки в области тепловых двигателей;  - современный уровень качества показателей тепловых двигателей.	- выявлять, формулировать и сравнивать между собой возможные варианты решения проблем развития тепловых двигателей.	- навыками количественной оценки резервов повышения эффективности тепловых двигателей в случае решения тех или иных технических проблем.
2	- способность к математическому	ПК-2	- современные пакеты прикладных программ,	- выбирать и применять пакеты прикладных	- навыками использования

и компьютерному моделированию рабочих процессов в тепловых двигателях и других объектах теплотехнического назначения.		их возможности, особенности применения.	программ, наиболее подходящие для решения конкретных задач.	выбранных пакетов прикладных программ.
---	--	---	---	--

### 3. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 зачетных единиц (252 часов).

Трудоемкость дисциплины по видам работ

Вид работы	Трудоемкость, час.	
	3 семестр	4 семестр
Лекции (Л)	6	4
Практические занятия (ПЗ)	8	6
Лабораторные работы (ЛР)	–	–
КСР	–	–
Курсовая проект работа (КР)	–	–
Расчетно-графическая работа (РГР)	–	–
Самостоятельная работа (проработка и повторение лекционного материала и материала учебников и учебных пособий, подготовка к лабораторным и практическим занятиям, коллоквиумам, рубежному контролю и т.д.)	85	98
Подготовка и сдача экзамена	–	36
Подготовка и сдача зачета	9	–
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	зачет	экзамен

Содержание разделов и формы текущего контроля

№	Наименование и содержание раздела	Количество часов						Лит-ра, рек.-мая студентам*	Виды интеракт. образоват. технологий
		Аудиторная работа				СРС	Всего		
		Л	ПЗ	ЛР	КСР				
1	<p>Методология трехмерного моделирования процессов в проточной части систем ДВС.</p> <p>Методология моделирования процессов на ЭВМ. Особенности движения рабочего тела. Исходные гипотезы и уравнения. Дополнительные гипотезы. Феноменологические модели.</p> <p><i>Подходы и модели, принятые для моделирования рабочих процессов (обзор).</i></p>	2	–	–	–	30	32	Р. 6.1; №1; Р.6.2; №1; Р.6.2; №2	<i>классическая лекция; обучение на основе опыта</i>
2	<p>Модели тепловых свойств рабочих тел ДВС.</p> <p>Локальное термодинамическое и фазовое равновесие. Обобщенный вид уравнений состояния (УС). Модель идеального газа. Модель реального газа. Модель парогазовой смеси для рабочего тела ДВС.</p> <p><i>Уравнение состояния Пенга – Робинсона. Уравнение состояния Брусилковского.</i></p>	2	2	–	–	36	40	Р. 6.1; № 1; Р.6.2; № 3	<i>классическая лекция; обучение на основе опыта</i>
3	<p>Свободные течения газозидкостных рабочих тел.</p> <p>Проблемы численного моделирования «свободных» (не ограниченных стенками) течений рабочих тел. Подходы с применением феноменологических моделей. Модели осредненного турбулентного течения. Феноменологические модели переноса химических реакций. Обобщения для газозидкостного течения. Феноменологические модели межфазных взаимодействий. Моделирование крупномасштабных вихрей турбулентного течения. Феноменологические модели для газозидкостного течения.</p> <p><i>Обобщения для газозидкостного течения. Модели для расчета осредненного газозидкостного течения. Модели для расчета крупновихревого газозидкостного течения.</i></p>	2	6	–	–	45	53	Р. 6.1; № 1; Р.6.2; № 1	<i>классическая лекция; проблемное обучение</i>
4	<p>Пристенные течения газозидкостных рабочих тел.</p> <p>Особенности пристенного течения. Граничные условия. Модели газозидкостного течения в пристенной</p>	2	4	–	–	36	42	Р.6.2; № 1; Р.6.2; № 4	<i>классическая лекция; проблемное обучение</i>

	<p>области. Автомоделность и «законы стенки».</p> <p>Эмпирические «законы» трения, тепло- и массоотдачи. Феноменологическая модель.</p> <p>Обобщения для газожидкостного течения. <i>Модели трения, тепло- и массоотдачи в среднем газожидкостном течении. Модели трения, тепло- и массоотдачи в модели крупновихревого газожидкостного течения.</i></p>								
5	<p>Практические аспекты методологии моделирования рабочих процессов на ЭВМ.</p> <p>Идентификация («калибровка») моделей рабочих процессов. Верификация (и кросс-верификация) моделей.</p> <p>Параметрический анализ и синтез. <i>Методы и технология решения обратных задач в коммерческих пакетах программ.</i></p> <p><i>Задачи проекторочных расчетов систем поршневых ДВС. Требования к системе моделирования рабочего процесса.</i> Роль и место моделей разного уровня детализации в системе. Интеграция моделей в систему моделирования и «косимуляция».</p> <p><i>Проблемы реализации проекторочных расчетов в системах моделирования и пути решения.</i></p>	2	2	–	–	36	40	Р. 6.1; № 1; Р.6.2; № 2	<i>проблемная лекция</i>

Занятия, проводимые в интерактивной форме, составляют 71 % от общего количества аудиторных часов по дисциплине «Спецглавы теории рабочих процессов поршневых двигателей».

Лабораторные работы рабочей программой и учебным планом дисциплины не предусмотрены.

Практические занятия (семинары):

№ занятия	№ раздела	Тема	Кол-во часов
1	2	Составление уравнений состояния реальных газов и двухфазных сред	2
2	3	Составление уравнений модели осредненного течения жидкости с простым описанием явлений переноса	2
3	3	Составление уравнений модели (а) осредненного и (б) крупновихревогогазофазного течения	2
4	3	Феноменологические модели межфазного взаимодействия для модели течения газожидкостной смеси	2
5	4	Решение задач на применение эмпирических и феноменологических моделей пристенной области течения	2

№ занятия	№ раздела	Тема	Кол-во часов
6	4	Модели и граничные условия для пристенной области течения газожидкой смеси	2
7	5	Формулирование требований к системе моделирования рабочего процесса поршневого двигателя	2

#### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

**Тема 1.** Методология моделирования рабочих процессов в системах поршневых ДВС.

Вопросы для самостоятельного изучения:

1. Подходы и модели, принятые для моделирования рабочих процессов (обзор).

**Тема 2.** Модели теплофизических свойств рабочих тел поршневых ДВС.

Вопросы для самостоятельного изучения:

1. Уравнение состояния Пенга – Робинсона.
2. Уравнение состояния Брусилковского.

Расчетные задания (задачи и пр.):

1. Составить описание и разработать тестовую программу для вычисления определяемых параметров состояния по уравнению Пенга – Робинсона.

2. То же, для уравнения Брусилковского.

**Тема 3.** Течение газожидкого рабочего тела вдали от стенок.

Вопросы для самостоятельного изучения:

1. Модели для расчета осредненного газожидкого течения
2. Модели для расчета крупновихревого газожидкого течения.

Расчетные задания (задачи и пр.):

1. Составить уравнения модели осредненного турбулентного газожидкого течения (в рамках гипотезы фазового равновесия и односкоростного приближения).

2. Сформулировать конкретную модель межфазного взаимодействия для учета вклада турбулентных пульсаций подсеточного масштаба (в рамках эйлера и лагранжева описаний).

**Тема 4.** Пристенное течение газожидкого рабочего тела.

Вопросы для самостоятельного изучения:

1. Модели трения, тепло- и массоотдачи в осредненном газожидком течении.
2. Модели трения, тепло- и массоотдачи в модели крупновихревого газожидкого течения.

Расчетные задания (задачи и пр.):

1. Сформулировать конкретную модель трения, тепло- и массоотдачи, применимую в составе модели осредненного газожидкого течения.

2. Сформулировать (феноменологическую) модель трения, тепло- и массоотдачи, применимую в составе модели крупновихревого газожидкого течения.

**Тема 5.** Практические аспекты моделирования рабочих процессов на ЭВМ.

Вопросы для самостоятельного изучения:

1. Задачи проектировочных расчетов систем поршневых ДВС.
2. Требования к системе моделирования рабочего процесса.
3. Технология и методы решения обратных задач в коммерческих пакетах программ.
4. Проблемы на пути реализации проектировочных расчетов в системах моделирования и подходы к их решению.

Расчетные задания:

1. Подготовить список типовых расчетных задач, решаемых посредством моделирования процессов при проектировании; выписать разъяснения терминов.

2. Подготовить перечень *требований* к системе моделирования рабочих процессов поршневых ДВС. Ранжировать их (по важности; по выполнимости).

3. Подготовить краткую сводку используемых в прикладных пакетах технологий и методов решения задач идентификации моделей, параметрического анализа и синтеза проточных частей тепловых двигателей.

4. Подготовить список фундаментальных и технических проблем на пути реализации автоматизированных расчетов рабочих процессов; по каждой проблеме указать 2-3 возможных подхода к решению/преодолению проблемы.

## **5. Фонд оценочных средств**

Форм контроля рабочей программой дисциплины не предусмотрено (помимо итоговых – зачета с выставлением оценки и экзамена).

### **5.1. Вопросы к зачету (экзамену):**

1. Исходные гипотезы моделей течения рабочих тел.
2. Исходные уравнения моделей течения рабочих тел.
3. Принципы замыкания конкретных моделей течения рабочих тел. Примеры.
4. Гипотеза в основе и вид обобщенного уравнения состояния рабочего тела.
5. Доп. гипотезы и частные случаи уравнений состояния. Примеры.
6. Доп. гипотезы и подход к описанию течения как осредненного.
7. Доп. гипотезы и подход к описанию течения как крупновихревого.
8. Модели переноса в осредненном течении. Примеры.
9. Модели межфазных взаимодействий в осредненном течении. Примеры.
10. Модели переноса в модели крупновихревого течения. Примеры.
11. Модели межфазных взаимодействий в крупновихревом течении. Примеры.
12. Модели трения, тепло- и массоотдачи в осредненном газофазном течении.
13. Модели трения, тепло- и массоотдачи в осредненном газожидкостном течении.
14. Задачи проектировочных расчетов систем поршневых ДВС.
15. Общие требования к системе моделирования рабочего процесса.
16. Методы решения задач параметрического анализа и синтеза (модели и объекта).
17. Технологии проектировочных расчетов в коммерческих пакетах программ.
18. Проблемы реализации проектировочных расчетов в системах моделирования. Возможные пути их решения.

### **Критерии оценки на зачете (экзамене):**

Оценка «отлично» выставляется аспиранту, который:

- правильно, аргументировано ответил на все вопросы, с приведением примеров;
- показал глубокие систематизированные знания,
- владеет приемами рассуждения и сопоставляет материал из разных источников: теорию связывает с практикой, другими темами данного курса, других изучаемых предметов;
- без ошибок выполнил практическое задание (на экзамене);
- дополнительным условием получения оценки «зачтено» могут стать хорошие успехи при выполнении самостоятельной и контрольной работы, систематическая активная работа на семинарских занятиях.

Оценка «хорошо» выставляется аспиранту, который:

- в основном правильно ответил на все вопросы, с приведением примеров;
- обнаруживает знание физической сущности явлений;
- умеет правильно оценивать их представление в моделях;
- хорошо разбирается в современных подходах к моделированию рабочих процессов ДВС, существующих методиках моделирования и в методах экспериментальных исследований, изложенных в основной учебной литературе.

Оценка «удовлетворительно» выставляется аспиранту, который:

- дает ответы только в рамках лекционного курса, и такой ответ краток, приводимые формулировки недостаточно четки, в графических изображениях и формулах допускаются неточности;

- обнаруживает понимание сущности основных категорий, явлений и подходов к их моделированию (что устанавливается из ответов как на основные, так и на дополнительные вопросы).

Оценка «неудовлетворительно» выставляется аспиранту, который:

- не справился с 50% вопросов и заданий билета;

- в ответах на другие вопросы допустил существенные ошибки;

- не может ответить на дополнительные вопросы.

## 5.2. Комплект комплексных заданий для практических занятий.

Методические указания к выполнению практических занятий см. в разделе 6.4.

**Задание 1.** Выполнить численный расчет на ЭВМ показателей поршневого ДВС с турбонаддувом при работе по внешней скоростной характеристике; полученные расчетом графики давления, температуры рабочего тела в РК (и др. величин) представить к защите работы и проанализировать. Перед защитой работы следует подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Моделируемый объект — двигатель с турбонаддувом ЯМЗ-6581.10. Двигатель ЯМЗ-6581.10 — V-образный четырехтактный ( $\tau = 4$ ) восьмицилиндровый ( $i = 8$ ) дизель с ГТН, выпускается серийно ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод). Размеры цилиндра двигателя:  $D = 130$  мм;  $S = 140$  мм; рабочий объем всех цилиндров  $iV_h = 14,866$  л. Турбонаддув в ЯМЗ-6581.10 — одноступенчатый, со свободным ТК с осерадиальной турбиной и охладителем наддувочного воздуха.

Расчет характеристики двигателя производится по квазимерной модели, описывающей осредненные по рабочим циклам показатели двигателя и параметры рабочего тела в сечениях его проточной части. В соответствии с целью работы в ней решаются задачи: изучение модели, постановки задачи и приемов работы с инструментами в рамках расчетного проекта, анализ численного решения задачи (расчетной характеристики двигателя с турбонаддувом).

Контрольные вопросы к заданию.

1. Охарактеризуйте задачу и примененную математическую модель.

2. Какие исходные гипотезы (допущения) заложены в уравнения модели?

3. Какие дополнительные гипотезы (допущения), явно или неявно, введены для получения конкретной системы уравнений модели? Опишите соответствующие вспомогательные (элементарные) модели.

**Задание 2.** Выполнить численный расчет на ЭВМ процессов в цилиндре (рабочей камере) поршневого ДВС (ПДВС); полученные графики давления, температуры рабочего тела в РК (и др. величин) представить к защите работы и проанализировать. Перед защитой работы следует подготовиться к ответам на контрольные вопросы.

Тепловой расчет двигателя производится по нульмерной модели, описывающей процесс при закрытых органах газообмена. В соответствии с целью работы в ней решаются задачи: изучение модели, постановки задачи и приемов работы с инструментами в рамках расчетного проекта, получение численного решения задачи и его анализ.

Контрольные вопросы к заданию.

1. Охарактеризуйте задачу и примененную математическую модель.

2. Какие исходные гипотезы (допущения) заложены в уравнения модели?

3. Какие дополнительные гипотезы (допущения), явно или неявно, введены для получения конкретной (замкнутой) системы уравнений модели? Опишите соответствующие вспомогательные (элементарные) модели.

**Задание 3.**Расчетом на ЭВМ подобрать параметры модели процесса в рабочей камере поршневого ДВС.

В данной работе аспирантам предлагается реализовать (по шаблону) решение задачи идентификации параметров модели для теплового расчета. Полученное оптимальное решение (графики давления, массовой доли свежего заряда и др.) предлагается представить и прокомментировать в отчете.

Контрольные вопросы к заданию.

1. Охарактеризуйте решаемую задачу как оптимизационную.
2. Охарактеризуйте примененный численный метод.
3. Прокомментируйте последовательность решения задач идентификации модели, анализа и синтеза объекта при проектировочных расчетах энергетических установок.
4. Охарактеризуйте примененную технологию организации расчета и примененные инструменты.
5. Сформулируйте требования к реализации поддержки расчетов в таких режимах в структуре ППП ALLBEA.

### **Критерии оценки:**

Оценка **«отлично»** выставляется аспиранту, который:

- без ошибок выполнил практическое задание;
- правильно, аргументировано ответил на все вопросы, с приведением примеров;
- показал глубокие систематизированные знания,
- владеет приемами рассуждения и сопоставляет материал из разных источников: теорию связывает с практикой, другими темами данного курса, других изучаемых предметов.

Оценка **«хорошо»** выставляется аспиранту, который:

- без грубых ошибок выполнил практическое задание;
- в основном правильно ответил на все вопросы, с приведением примеров;
- обнаруживает знание физической сущности явлений;
- умеет правильно оценивать их представление в моделях;
- хорошо разбирается в современных подходах к моделированию рабочих процессов ДВС, существующих методиках моделирования и в методах экспериментальных исследований, изложенных в основной учебной литературе.

Оценка **«удовлетворительно»** выставляется аспиранту, который:

- без грубых ошибок выполнил практическое задание;
- дает ответы только в рамках лекционного курса, приводимые формулировки недостаточно четки, в графических изображениях и формулах допускаются неточности;
- обнаруживает частичное понимание сущности основных категорий, и моделируемых явлений.

Оценка **«неудовлетворительно»** выставляется аспиранту, который:

- не выполнил практическое задание или допустил грубые ошибки при его выполнении;
- не может прокомментировать свои действия; - в ответах на дополнительные вопросы допустил существенные ошибки или не может на них ответить.

## **6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **6.1 Основная литература**

1. *Клеванский В.М.* Гидрогазодинамика: Учебное пособие. — 2-е изд., стер. — Уфа: УГАТУ, 2013. — 309 с.
2. *Фортов, В.Е.* Уравнения состояния вещества. От идеального газа до кварк-глюонной плазмы /В. Е. Фортов. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 501 с.

## 6.2 Дополнительная литература

1. *Кавтарадзе Р.З.* Теория поршневых ДВС. Специальные главы: Учебник для ВУЗов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 719 с.
2. *Черноусов А.А.* Основы численного моделирования рабочих процессов тепловых двигателей: Учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; — Уфа: УГАТУ 2008. — 265 с.
3. *Фортов, В.Е.* Уравнения состояния вещества. От идеального газа до кварк-глюонной плазмы / В. Е. Фортов. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 501 с.

## 6.3 Интернет-ресурсы (электронные учебно-методические издания, лицензионное программное обеспечение)

Обучающимся по программам подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации (аспирантам) в течение всего периода обучения обеспечен индивидуальный неограниченный доступ к следующим ресурсам:

1. Сайт библиотеки УГАТУ: <http://library.ugatu.ac.ru>.
2. Портал кафедры ДВС: <http://www.dvs.ugatu.ac.ru>.

и электронно-библиотечным системам:

3. ЭБС «Лань»: <http://e.lanbook.com>.

4. ЭБС Ассоциации «Электронное образование Республики Башкортостан»: <http://e-library.ufa-rb.ru>.

5. Консорциум аэрокосмических вузов России: <http://elsau.ru>.

6. Электронная коллекция образовательных ресурсов УГАТУ:

<http://www.library.ugatu.ac.ru/cgi-bin/zgate.exe?Init+ugatu-fulltxt.xml,simple-fulltxt.xml+rus>.

(По ссылке в последнем пункте доступны все издания по списку основной литературы, перечисленной в рабочих программах дисциплин (модулей), практик, НИР, сформированному на основании прямых договорных отношений с правообладателями).

7. Программный комплекс для численного моделирования сложных технических объектов «ALLBEA»: свидетельство о гос. регистрации программы № 2011619399 от 08.12.11.

## 6.4. Методические указания к практическим занятиям

**Задание 1.** Напрактических занятиях выполняется численный расчет на ЭВМ характеристик поршневого ДВС с турбонаддувом.

Двигатель ЯМЗ-6581.10 — V-образный четырехтактный ( $\tau = 4$ ) восьмицилиндровый ( $i = 8$ ) дизель с ГТН, выпускается серийно ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод). Размеры цилиндра двигателя:  $D = 130$  мм;  $S = 140$  мм; рабочий объем всех цилиндров  $iV_h = 14,866$  л. Турбонаддув в ЯМЗ-6581.10 — одноступенчатый, со свободным ТК с осерадиальной турбиной и охладителем наддувочного воздуха.

Инструментом для расчетов характеристик служи расчетная программа пакета ALLBEA TURBO.

В соответствии с целью работы в ней решаются задачи: изучение модели, постановки задачи и приемов работы с инструментами в рамках расчетного проекта, получение численного решения задачи и его анализ. Ознакомиться с моделью ДВС с турбонаддувом и моделями агрегатов, описывающими рабочий процесс в двигателях «квазимерном» приближении. Освоить применение ALLBEA TURBO для расчетов характеристик (а) по указаниям преподавателя; (б) по материалам из подпапки info/; (в) по материалам из ALLBEA TURBO/manuals/\*.pdf.

В папке prj/создать проект ALLBEA TURBO (на основе <путь>/examples/yamz\_a/) и обеспечить в этом проекте:

- выполнение расчета;
- отображение результатов в \*.gif (графиков показателей по СХ – по варианту задания);
- автоматическое копирование результатов (файлов "\*.gif") в ..\doc\fig;

Оформить отчет по работе, где:

- в разделе "Постановка задачи" дать соответствующее описание объекта и задачи.

- в разделе "Результаты и их обсуждение":

а) привести результаты (графики численного решения вставить методом "связывания" с файлами на диске);

б) кратко прокомментировать их (например, конкретные числовые значения расчетных показателей двигателя);

- в разделе "Выводы по работе" кратко прокомментировать:

а) решаемую задачу;

б) математическую модель;

в) программный инструмент – ALLBEA TURBO

(с т. з. представления в нем задачи и модели, а также численного метода);

г) численное решение – расчетную скоростную характеристику.

**Задание 2.** На практических занятиях выполняется численный расчет на ЭВМ процессов в цилиндре (рабочей камере) поршневого ДВС (ПДВС). Это «тепловой расчет» двигателя по нульмерной модели, описывающей процесс при закрытых органах газообмена. Выполняется «тепловой расчет» конкретного поршневого ДВС по индивидуальному варианту задания. Выдаваемый вариант соответствует размерности рабочей камеры двигателя ЯМЗ-6581.10.

В соответствии с целью работы в ней решаются задачи: изучение модели, постановки задачи и приемов работы с инструментами в рамках расчетного проекта, получение численного решения задачи и его анализ. Основным программным инструментом в работе служит пакет прикладных программ ALLBEA BURN.

Математическая модель процесса в РК ПДВС позволяет расчетом определить давление, температуру и массовое содержание компонентов рабочего тела в цилиндре двигателя в ходе процесса, протекающего при закрытых органах газообмена. В работе используется простейшая однозонная модель процесса на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений, выражающих (в нульмерном приближении) сохранение массы *свежей смеси* и *продуктов сгорания*, а также сохранение и превращение энергии их смеси (описывающей в модели газозаполненное рабочее тело ДВС):

$$\frac{dm_k}{dt} = \sum_{j=1}^J (GY_k)_j - \left( \frac{dm_k}{dt} \right)_{cr}, \quad k=1, 2,$$

$$\frac{d(me)}{dt} = \sum_{j=1}^J (Gh^*)_j + h_t \cdot \left( \frac{dm_t}{dt} \right)_{cr} - p \frac{dV}{dt} + Q_w,$$

где  $m_1 = \rho V \langle Y \rangle$  — масса ГС (в дизелях — воздуха),  $m_2 = \rho V \langle \langle -1 \rangle \rangle$  — масса ПС,  $m = m_1 + m_2$  — масса смеси в объеме РК, кг;  $\rho = p/RT = m/V$  — ее плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $R = \sum Y_k R_k = R_1 Y + R_2 \langle \langle -1 \rangle \rangle$  — уд. газовая постоянная, Дж/(кг · К);  $e \langle Y \rangle = \sum Y_k e_k = e_1 \langle Y \rangle + e_2 \langle \langle -1 \rangle \rangle$  — уд. внутренняя энергия смеси Дж/кг;  $G_j$  — поток массы в РК через  $j$ -й орган газообмена (или утечка через неплотности), кг/с;  $Q_w$  — поток энергии через стенки РК, Дж/с;  $h_t \cdot (dm_t/dt)_{cr} \approx H_u \cdot (dm_t/dt)_{cr}$  — поток энергии топлива, подаваемого в РК извне (при внутреннем смесеобразовании), Дж/с.

Для расчетов по модели ее уравнения замкнуты выражениями вспомогательных моделей: модели изменения объема (по формулам кинематики простого КШМ), модели теплоотдачи и разными вариантами модели выгорания («интегрального» типа).

Варианты модели выгорания. На изучении моделей выгорания в работе делается особый акцент. Так, в индивидуальных вариантах для расчетов интегральный «закон» выгорания в РК задается или (1) моделью (формулой) И.И. Вибе, или (2) моделью «дубль-Вибе» или же (3) произвольной табличной зависимостью.

Модель (формула) И.И. Вибе :

$$x(\bar{\varphi}) = 1 - \exp \left\{ C \cdot \left( \frac{\varphi - \varphi_y}{\Delta \varphi_{yz}} \right)^{m+1} \right\},$$

где  $\bar{\varphi} = (\varphi - \varphi_y) / \Delta \varphi_{yz}$  — безразмерный угол ПКВ (в диапазоне [0...1]),  $x$  — текущая доля цикловой дозы топлива, преобразованных в «чистые» ПС (причем  $m_t(\varphi) = x(\bar{\varphi}) \cdot m_{тц} / x_z$ );  $x_z$  — коэффициент полноты сгорания ( $0,96 \leq x_z \leq 0,999$ );  $\varphi_y$  — угол начала сгорания, °ПКВ;  $\varphi$  — угол, прошедший от

начала сгорания, °ПКВ;  $\Delta\varphi_{yz} = \varphi_z - \varphi_y$  — продолжительность сгорания, °ПКВ;  $C = \ln(1 - x_z)$  — постоянная;  $m$  — показатель характера процесса сгорания (из диапазона  $[-0,25..4]$ ). Для лучшего соответствия экспериментальным данным (индикаторной диаграмме РК) обычно ряд параметров, определяющих «закон» выгорания в процессе, подбираются. Интегральная модель выгорания с заданной в ней формулой содержит «свободные» параметры:  $\varphi_y, \Delta\varphi_{yz}, x_z, m$ . Если зависимость вида неудовлетворительного описывает процесс, применяются более сложные.

Модель «дубль-Вибе». В ней «закон» выгорания топлива  $m_1(\varphi)$  задается на основе суперпозиции двух зависимостей Вибе. Данная модель лучше описывает сгорание в дизелях, где в первой фазе топливо выгорает в основном по объемно-кинетическому механизму, а во второй — лимитируется перемешиванием («диффузионное» горение). В реализованном варианте модели «дубль-Вибе» основное соотношение имеет вид:

$$x(\bar{\varphi}) = kx_2(\bar{\varphi}_2) + (1 - k)x_1(\bar{\varphi}_1)$$

где  $k$  — доля топлива, выгорающего условно по первому механизму;  $x_i(\bar{\varphi}_i), i = 1, 2$  — индивидуальные зависимости вида, а именно

$$x_i(\bar{\varphi}_i) = 1 - \exp\left\{\ln(1 - x_z) \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_y}{\Delta\varphi_{yzi}}\right)^{m_i+1}\right\}, i = 1, 2,$$

где параметры  $\varphi_y$  и  $x_z$  модели являются общими для при  $i = 1, 2$ . Здесь индекс 2 относится к сгоранию по «кинетическому» механизму. Параметры  $\varphi_{yzi}, i = 1, 2$  модели должны подчиняться условию  $\varphi_{yz2} \leq \varphi_{yz1}$ . Параметры  $m_i, i = 1, 2$  задаются независимо, из диапазона значений, указанного в пояснении к заданию.

Указания по выполнению работы приведены ниже.

1. Освоить приемы расчета процесса в РК ДВС программой теплового расчета из ALLBEA BURN.

2. В подпапке prj/ сформировать расчетный проект на основе файлов проекта-прототипа examples/test\_Vh/ из ППП ALLBEA BURN и отладить его, задав параметры исходных данных задачи по индивидуальному варианту.

3. Задать исходные данные по индивидуальному варианту и отладить тепловой расчет (при этом добиться «инсталляции» результатов в виде графика  $p(\varphi)$  в ./doc/fig/). При этом также подобрать угол, примерно соответствующий максимальной индикаторной работе.

3. Изменить файл \*.p расчетного проекта так, чтобы выводился график  $p(\varphi)$  («развернутая» индикаторная диаграмма), а также график  $T(\varphi)$ .

4. Изменить файл \*.p расчетного проекта для вывода (четвертого!) графика с зависимостью  $x(\varphi)$  («закон» выгорания).

5. В отчете по работе:

а) вставить все четыре графика (методом «Связать») и оформить подрисуночную подпись;

б) записать оцененные значения интегральных показателей двигателя;

в) привести (в выводах по работе) свои замечания по существу выполненного расчетного проекта и по недостаткам архитектуры из ППП ALLBEA BURN и реализации в нем математических моделей.

**Задание 3.** Решается задача подбора ряда параметров модели процесса сгорания в цилиндре (рабочей камере) поршневого ДВС.

Как инструмент численного решения прямой задачи (анализа процесса) используется расчетная программа из ППП ALLBEA BURN. Решаемая (обратная) задача — идентификация (т. е. оптимизационный подбор) параметров модели — решается пользовательской программой. В ней применен алгоритм на основе стандартного (реализованного в модуле optim\_nelder библиотеки numeric) метода решения задач многопараметрической однокритериальной оптимизации — метод Нелдера – Мида (метода деформируемого многогранника, или «симплекс-метода»).

Используемые в данной работе модели выгорания (модели Вибе или «дубль-Вибе», по выбору студентов) не учитывают конструктивных параметров РК. Поэтому подбор параметров этих моделей (по тому или иному критерию) оптимизационными методами является неоптимизацией параметров ДВС (т. е. проектировочным расчетом), а идентификацией параметров модели. Итак, в данном случае решается задача *параметрической идентификации* (ПИ) модели.

Задачи идентификации модели и далее оптимизации объекта могут быть решены оптимизационными методами. Цель решения задачи ПИ модели процесса в рабочей камере — установление соответствия полученной из численного расчета и экспериментально измеренной индикаторной диаграмме давление  $p_{\phi}$ . В данном случае ставится и решается задача ПИ модели выгорания по критерию максимальной индикаторной мощности  $N_i$ .

Указания по решению приведены ниже.

1. Освоить приемы решения обратной задачи – оптимизационного подбора параметров модели процесса в РК ДВС (для теплового расчета в программе ALLBEA BURN).

2. В подпапке `prj/base/base` сформировать исходный («базовый») расчетный проект на основе файлов проекта-прототипа (на основе «шаблонных» файлов, полученных от преподавателя), задать в нем ряд параметров исходных данных задачи по варианту и отладить решение «прямой» задачи.

3. В подпапку `prj/base/template` скопировать и параметризовать исходные данные (файл `test.xml`) – по параметру `phi_y`.

4. В подпапке `prj/base/` отладить решение обратной задачи – подбора значения по критерию максимальной эффективности сгорания (здесь – эквивалентного ему условия максимума показателя  $N_i$ ); полученное решение визуализировать, отредактировав файл `prj/base/test.p`.

5. В папку `prj/` скопировать все файлы из подпапки `prj/base/` и создать подпапку `prj/base/template`, в которую скопировать файл `prj/test.xml` и параметризовать его также по параметру `phi_y`.

6. В папке `prj/` выполнить «входной тест» полученного оптимизационного проекта – получить результаты, идентичные результатам расчета в подпапке `prj/base/`. Затем постепенно обеспечить оптимизационный подбор всех параметров, с постановкой всех ограничений (по индивидуальному варианту задания). Отладить визуализацию оптимального решения путем редактирования файла `prj/base/test.p`. Файлы `*.gif` с графиками численных решений для оптимума автоматически копировать в подпапку для представления в отчете (методом «Связать»).

7. В отчете по работе привести (в выводах) свои замечания по существу выполненного расчетного проекта и пожелания о путях реализации технологии оптимизационного подбора параметров (модели и объекта) для пакетов ALLBEA BURN и ALLBEA.

## 7. Образовательные технологии

При реализации дисциплины электронное обучение и дистанционные образовательные технологии не используются.

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Лекции и практические занятия проводятся в специализированной лаборатории (дисплейном классе) кафедры двигателей внутреннего сгорания.

Лаборатория оснащена аппаратурой для широкоформатной визуализации презентаций и других аналогичных материалов, компьютерами с установленными на них лицензионным ПО, включая пакет твердотельного моделирования и проектирования *SolidWorks*, пакеты *STARCCM+* и *STARCD* (с надстройкой *es-ice*) для моделирования течений газов и жидкостей, и систему программирования *Dev-C++* для разработки ПО на языках программирования *C* и *C++*.

## 9. Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ

В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 14 августа 2013 г. № 697 «Об утверждении перечня специальностей и направлений подготовки, при приеме на обучение по которым поступающие проходят обязательные предварительные медицинские

осмотры (обследования) в порядке, установленном при заключении трудового договора или служебного контракта по соответствующей должности или специальности» обучение лиц с ограниченными возможностями здоровья по данному направлению подготовки не предусмотрено.

ЛИСТ

согласования рабочей программы

Направление подготовки: 13.06.01 Электро- и теплотехника  
код и наименование

Направленность подготовки (программа): Тепловые двигатели  
наименование

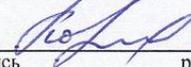
Дисциплина: «Спецглавы теории рабочих процессов поршневых двигателей»

Учебный год 2015/2016

РЕКОМЕНДОВАНА заседанием кафедры двигателей внутреннего сгорания  
наименование кафедры

протокол № 9 от "08" 06 20 15 г.

Заведующий кафедрой  Р.Д. Еникеев  
подпись расшифровка подписи

Исполнители: доцент  Борисов А.О.  
должность подпись расшифровка подписи

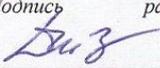
СОГЛАСОВАНО:

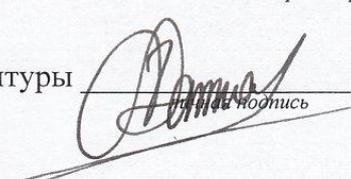
Заведующий кафедрой<sup>1</sup>  
двигателей внутреннего сгорания \_\_\_\_\_ Р.Д. Еникеев

Председатель НМС по УГСН 13.00.00 Электро- и теплотехника

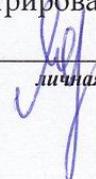
протокол № 1А от "28" 08 20 15 г.

\_\_\_\_\_  Ф.Р. Исмагилов  
личная подпись расшифровка подписи

Библиотека \_\_\_\_\_  Т.В. Дмитриева 28.08.15  
личная подпись расшифровка подписи дата

Начальник отдела аспирантуры \_\_\_\_\_  Фаттахов Р.К. 31.08.15  
личная подпись расшифровка подписи дата

Рабочая программа зарегистрирована в ООПМА и внесена в электронную базу данных

Начальник \_\_\_\_\_  И.А.Лакман 31.08.15  
личная подпись расшифровка подписи дата

<sup>1</sup> Согласование осуществляется с выпускающими кафедрами (для рабочих программ, подготовленных на кафедрах, обеспечивающих подготовку для других направлений и специальностей)

