

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

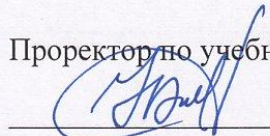
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**«УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра двигателей внутреннего сгорания

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



Зарипов Н.Г.

« 02 » 09 2015 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

«ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ»

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

Оглавление

1. Место дисциплины в структуре образовательной программы.....	2
2. Перечень результатов обучения	3
3. Содержание и структура дисциплины (модуля)	4
4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов	5
6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	10
7. Образовательные технологии	18
8. Материально-техническое обеспечение дисциплины	18
9. Адаптация рабочей программы для лиц с ОВЗ.....	18

1. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Тепловые двигатели» 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. N 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 теории рабочих процессов тепловых двигателей и их систем и практическое освоение приемов моделирования термогазодинамических процессов в них.

Задачи:

1. Изучить проблемы и направления совершенствования рабочих процессов тепловых двигателей.
2. Изучить проблемы и направления совершенствования конструкций тепловых двигателей.
3. Получить умения и навыки моделирование рабочих процессов в тепловых двигателях.

Входные компетенции не формируются никакими другими частями данной образовательной программы. Входные компетенции должны быть сформированы дисциплинами ОП по направлению подготовки магистров 13.04.03 – «Энергетическое машиностроение» (см. следующую таблицу).

№	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 «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,	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.

	устройств, установок, комплексов оборудования теплотехнического назначения по направленности «Тепловые двигатели»				
2	- способность к математическому и компьютерному моделированию рабочих процессов в тепловых двигателях и других объектах теплотехнического назначения.	ПК-2	- современные пакеты прикладных программ, их возможности, особенности применения.	- выбирать и применять пакеты прикладных программ, наиболее подходящие для решения конкретных задач.	- навыками использования выбранных пакетов прикладных программ.

3. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 9 зачетных единиц (324 часа).

Трудоемкость дисциплины по видам работ

Вид работы	Трудоемкость, час.		
	2 семестр	3 семестр	4 семестр
Лекции (Л)	4	6	4
Практические занятия (ПЗ)	6	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.)	89	85	62
Подготовка и сдача экзамена	—	-	36
Подготовка и сдача зачета	9	9	
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	зачет	зачет	экзамен

Содержание разделов и формы текущего контроля

№	Наименование и содержание раздела	Количество часов						Литература рекоменд. аспирантам	Виды интеракт. образоват.те хнологий
		Аудиторная работа				СРС	Всего		
		Л	ПЗ	ЛР	КСР				
1	Проблемы и направления совершенствования рабочих процессов.	2	10	—	—			Р. 6.1; №1; Р.6.2; №1; Р.6.2; №2	классическая лекция; обучение на основе опыта
2	Проблемы и направления совершенствования конструкций.	2		—	—			Р. 6.1; № 1; Р.6.2; № 3	классическая лекция; обучение на основе опыта
3	Воспламенение и горение в тепловых двигателях. Токсичные компоненты поршневых двигателей.	6		—	—			Р. 6.1; № 1; Р.6.2; № 1	классическая лекция; проблемное обучение
4	Газообмен в поршневых и комбинированныхдвигателях	4	10	—	—			Р.6.2; № 1; Р.6.2; № 4	классическая лекция; проблемное обучение
	Итого	14	20						

Занятия, проводимые в интерактивной форме, составляют 71 % от общего количества аудиторных часов по дисциплине «Тепловые двигатели».

Лабораторные работы рабочей программой и учебным планом дисциплины не предусмотрены.

Практические занятия (семинары):

№ занятия	№ раздела	Тема	Кол-во часов
1	1	Моделирование индикаторного процесса в двигателях с искровым воспламенением.	6
2	1	Моделирование индикаторного процесса в двигателях с искровым воспламенением.	4
3	4	Расчет газообмена двухтактного двигателя.	6
4	4	Расчет газообмена четырехтактного двигателя.	4

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Тема 1. Проблемы и направления совершенствования рабочих процессов.

Вопросы для самостоятельного изучения:

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

Тема 2. Проблемы и направления совершенствования конструкций.

Вопросы для самостоятельного изучения:

Общая тенденция развития конструкций двигателей. Повышение степеней свободы перемещений механизмов.

Физические и математические модели площадей касания для различных контактов в зависимости от физико-механических свойств материалов контактирующих поверхностей, шероховатости и волнистости. Магнитное, гравитационное и электрическое взаимодействие между атомами и молекулами веществ, находящихся в контактной зоне.

Расчет надежности сопряжений по износу. Показатели надежности. Прогнозирование износа сопряжений. Влияние износа на выходные параметры машины.

Факторы повышения износостойкости пар трения.

Классификация и технологические возможности упрочняющей поверхностной обработки деталей машин.

Тема 3. Воспламенение и горение в тепловых двигателях. Токсичные компоненты поршневых двигателей.

Вопросы для самостоятельного изучения:

1. Модели для расчета воспламенения и горения в тепловых двигателях.

2. Модели для расчета эмиссии токсичных компонентов выбросов поршневых двигателей.

Тема 4. Газообмен в поршневых двигателях.

Вопросы для самостоятельного изучения:

1. Исторически сложившиеся теории газообмена

2. Использование обобщенных переменных.

5. Фонд оценочных средств

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

5.1. Вопросы к зачету (экзамену):

1. Особенности современных рабочих процессов.
2. Организация сгорания в дизелях.
3. Организация сгорания в двигателях с внешним смесеобразованием.
4. Организация сгорания в двигателях с внутренним смесеобразованием и искровым зажиганием.
5. Развитие конструкций поршневых двигателей.
6. Токсичность отработавших газов поршневых двигателей.
8. Номинальная площадь контакта и номинальное давление.
9. Контурная площадь контакта и контурное давление.
10. Фактическая площадь контакта и фактическое давление.
11. Отличие внешнего трения от внутреннего.
12. Зависимость силы трения от относительного перемещения.
13. Молекулярно-механическая природа фрикционного взаимодействия.
14. Упругий контакт.
15. Упругий ненасыщенный контакт.
16. Упругий насыщенный контакт.
17. Пластический контакт.
18. Пластический ненасыщенный контакт.
19. Пластический насыщенный контакт.

20. Правило положительного градиента сдвигового сопротивления.
21. Понятие третьего тела.
22. Виды и режимы трения.
23. Сухое трение.
24. Трение при граничной смазке.
25. Трение при полужидкостной смазке.
26. Трение при жидкостной смазке.
27. Газообмен двухтактного двигателя с петлевой продувкой.
28. Газообмен двухтактного двигателя с прямоточной продувкой.
29. Газообмен четырехтактного двигателя.

Критерии оценки на зачете (экзамене):

Оценка «**отлично**» выставляется студенту, 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 студенту, 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 студенту, 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 студенту, 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. Типовые оценочные материалы

Кейс-задача 1

Раздел (тема) дисциплины: **Проблемы и направления совершенствования рабочих процессов.**

Задание. Предложить способы форсирования поршневого двигателя по среднему эффективному давлению и по частоте вращения; выполнить сравнительный анализ способов, указать достоинства и недостатки. Оценить влияние предложенных способов форсирования на топливную экономичность двигателя; на величину механических потерь; на токсичность отработавших газов; на массогабаритные показатели; ресурс и надежность двигателя.

Кейс-задача 2

Раздел (тема) дисциплины: **Проблемы и направления совершенствования конструкций.**

Задание. Предложить и обосновать способ формирования постоянной величины эффективного крутящего при работе двигателя по внешней скоростной характеристике. Выполнить сравнительный анализ известных и применяемых на практике технических устройств, которые предназначены для частичного выполнения этой задачи. Обосновать достоинства и недостатки двигателя с системой (системами), предназначенными для решения этой задачи. Показать физический смысл процессов, протекающих в данной системе (системах).

Кейс-задача 3

Раздел (тема) дисциплины: **Газообмен в поршневых и комбинированных двигателях.**

Задание. Предложить конструктивную схему газовоздушного тракта четырехтактного двигателя для обеспечения высоких значений коэффициента наполнения в широком диапазоне частот вращения вала. Показать основы подбора конструктивных параметров газовоздушного тракта для выполнения задачи. Схематически изобразить основные конструктивные элементы газовоздушного тракта, объяснить принцип действия и обосновать возможности решения поставленной задачи. Привести реально существующие аналоги конструкций, оценить положительный эффект и недостатки предложенной схемы.

Критерии оценки:

- оценка «отлично» выставляется аспиранту, при полном выполнении задания, с представлением обоснований предлагаемых технических решений, анализом достоинств и недостатков; с представлением поясняющих графических материалов; при понимании им физического смысла явлений и причинно-следственной связи между ними и показателями двигателя.
- оценка «хорошо» выставляется аспиранту, при выполнении задания в целом, при незначительной неполноте всестороннего рассмотрения проблемы; при неполном обосновании правильных путей ее решения; недостаточном объеме графических поясняющих материалов;
- оценка «удовлетворительно» выставляется аспиранту при правильном по сути выполнении задания; при неполном обосновании предлагаемых решений; отсутствии графических поясняющих материалов;
- оценка «неудовлетворительно» выставляется аспиранту при отсутствии предложений по решению поставленной задачи; в случае предложения ошибочных технических решений.

5.3.Комплект заданий для практической работы.

Раздел (тема) дисциплины:

Проблемы и направления совершенствования рабочих процессов и их моделирование.

1. Определить коэффициент наполнения четырехтактного четырехцилиндрового двигателя с наддувом: диаметр цилиндра $D = 145$ мм, ходпоршня $S = 205$ мм, частота вращения вала $n = 1250$ мин⁻¹, давление наддува $p_k = 0,17$ МПа, $T_k = 365$ К и расход воздуха $G_v = 0,21$ кг/с.
2. Определить частоту вращения роторов компрессора Roots (рис. 1.3) при следующих условиях: расход воздуха через компрессор $G_k = 0,4$ кг/с; диаметр роторов $d = 0,18$ м; длина роторов $l = 0,25$ м; относительный объем полостей $V_{пол} = 0,5V_{\Sigma}$; коэффициент подачи $\eta = Q/Q_{теор} = 0,9$. Параметры окружающей среды: $p_0 = 100$ кПа; $T_0 = 300$ К.
3. Определить теоретическую производительность поршневого компрессора со степенью повышения давления $\pi_k = 3$, если рабочий объем компрессора равен 2 л, вредный объем – 0,2

л, частота вращения вала компрессора равна 3000 об/мин. Параметры окружающей среды: $p_0 = 100$ кПа; $T_0 = 293$ К.

4. Определить параметры воздуха во впускном коллекторе двигателя с наддувом и затраты мощности на привод нагнетателя. Параметры нагнетателя: расход воздуха $G_k = 0,5$ кг/с; степень повышения давления $\pi_k = 1,5$; адиабатный КПД $\eta_k = 0,63$; механический КПД $\eta_m = 0,92$. Количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания топлива $l_0 = 14,5$ кг/кг. Параметры окружающей среды: $p_0 = 100$ кПа; $T_0 = 300$ К.

5. Поршневой двигатель без наддува развивает мощность $N_e = 220$ кВт (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,3$). Определить степень наддува двигателя с приводным нагнетателем, обеспечивающим расход воздуха $G_k = 0,45$ кг/с и степень повышения давления $\pi_k = 1,55$ при адиабатном КПД компрессора $\eta_k = 0,65$, механическом КПД привода компрессора $\eta_m = 0,92$ и сохранении коэффициента наполнения. Параметры окружающей среды: $p_0 = 100$ кПа; $T_0 = 300$ К.

6. Поршневой двигатель без наддува развивает мощность $N_e = 220$ кВт (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,3$; коэффициент наполнения $\eta_v = 0,75$). Определить, как изменится удельный эффективный расход топлива, если для наддува применить приводной нагнетатель из задачи 1.3.

7. Определить расход газа через нагнетатель, если давление в его входном патрубке диаметром 40 мм меньше давления окружающей среды на 4800 Па. Параметры окружающей среды: $p_0 = 100$ кПа; $T_0 = 300$ К. Местными потерями на входе в патрубок пренебречь.

Критерии оценки:

- оценка «отлично» выставляется аспиранту, если он верно решил предложенные задачи и сумел объяснить ход решения;
- оценка «хорошо», если аспирант верно решил предложенные задачи и в целом верно объяснил ход решения, с некоторыми незначительными недочетами;
- оценка «удовлетворительно», если аспирант верно решил предложенные задачи, но ход решения объясняет фрагментарно;
- оценка «неудовлетворительно» выставляется аспиранту, если он неверно решил предложенные задачи.

5.4 Комплексное задание.

Исходная ситуация. Представляется проект одноцилиндрового двигателя в СИМ «Альбея» с исходными данными, имитирующими работу двигателя на некотором исходном (базовом) режиме.

Задание. В соответствии с выбранным вариантом задания выполнить моделирование рабочего процесса двигателя на другом режиме работы. При необходимости на новом режиме работы подобрать оптимальный угол опережения зажигания. Выполнить сравнение полученных показателей двигателя с показателями на базовом режиме работы и по каждому показателю дать объяснения различий. Использовать формулы, полученные скриншоты экранов СИМ, графики, знания скоростных и нагрузочных характеристик двигателя, а также типовых зависимостей показателей двигателя от режима работы и т.п.

Требуется сравнить и проанализировать (с раскрытием причин):

- показатели газообмена;
- характерные давления и температуры цикла;
- индикаторные показатели;
- механические потери;
- эффективные показатели.

Критерии оценки:

- оценка «отлично» выставляется аспиранту, если он верно и в полном объеме проанализировал и объяснил причины изменений показателей двигателя при изменении режима его работы;

- оценка «хорошо», если аспирант верно, но не в полном объеме проанализировал и объяснил причины изменений показателей двигателя при изменении режима его работы;
- оценка «удовлетворительно», если аспирант верно, но не в полном объеме проанализировал и объяснил причины изменений трех и более показателей двигателя при изменении режима его работы;
- оценка «неудовлетворительно» выставляется аспиранту, если он смог объяснить причины изменений менее трех показателей двигателя.

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. Борисов А.О., Загайко С.А. Механизмы и системы двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. — Уфа: УГАТУ, 2015. — 184 с.

(* - издание находится на реализующей рабочую программу кафедре)

6.2 Дополнительная литература

1. Черноусов А.А. Основы численного моделирования рабочих процессов тепловых двигателей: Учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; — Уфа: УГАТУ 2008. — 265 с.

2. Фортон, В.Е. Уравнения состояния вещества. От идеального газа до кварк-глюонной плазмы / В. Е. Фортон. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 501 с.

3. Борисов А.О., Еникеев Р.Д. Перспективные методы управления двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т; — Уфа: УГАТУ 2011. — 113 с.

4. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых ДВС. Специальные главы: Учебник для ВУЗов. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 719 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 индивидуальным неограниченным доступом 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.)

6.4 Методические указания к практическим занятиям

Первые задачи могут решаться при консультативной помощи преподавателя, последующие – как правило, самостоятельно. Перед решением задач необходимо:

- повторить теоретический материал по соответствующей теме лекции и общие сведения по сборнику задач;
- ответить на вопросы по содержанию практикума, задаваемые преподавателем на предварительном опросе перед выполнением практической работы.

После решения задачи студенты должны обосновать преподавателю последовательность решения и в необходимых случаях привести окончательный ответ.

Эффективная мощность двигателя определяется по следующему выражению:

$$N_e = \frac{1}{30} \frac{H_u}{l_0} \frac{V_h}{\tau} i \frac{\eta_i}{\alpha} \eta_v \eta_m \rho_k n,$$

где H_u – низшая теплота сгорания топлива; l_0 – количество воздуха, теоретически необходимое для полного сгорания топлива; V_h – рабочий объем цилиндра; τ – тактность двигателя (4 или 2); i – число цилиндров; η_v – коэффициент наполнения; η_i – индикаторный КПД; η_m – механический КПД; α – коэффициент избытка воздуха; ρ_k – плотность наддувочного воздуха; n – частота вращения коленчатого вала.

Анализ выражения показывает, что одним из путей повышения мощности двигателя без существенного изменения его габаритов и массы является повышение плотности воздуха, подаваемого в двигатель за счет применения наддува. Для повышения плотности воздуха перед впускными органами ДВС и, соответственно, мощности двигателя используются нагнетатели (компрессоры).

Степень повышения мощности двигателя при наддуве оценивают степенью наддува

$$\lambda_n = \frac{N_{en}}{N_e},$$

где N_{en} – эффективная мощность двигателя с наддувом; N_e – эффективная мощность двигателя без наддува.

Одними из распространенных объемных нагнетателей являются поршневой компрессор и роторно-шестеренчатый компрессор Roots (рис. 1.3.).

На рисунке 1.1 показана принципиальная схема поршневого компрессора.

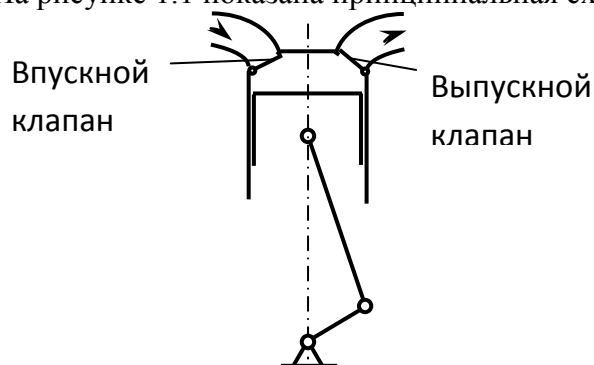
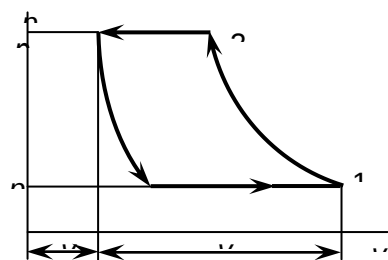


Схема поршневого компрессора

На рисунке 1.2 приведена идеальная p - V -диаграмма поршневого компрессора, на которой процессы сжатия и расширения протекают по адиабате

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}.$$



Идеальная p - V -диаграмма поршневого компрессора:

p_1 – давление воздуха на входе в компрессор; p_2 – давление на выходе из компрессора;
 V_v – вредный объем; V_h – рабочий объем компрессора

Для оценки нагнетателей используется ряд параметров.

Отношение полного давления воздуха на выходе из компрессора p_k^* к полному давлению p_1^* на входе в него называется степенью повышения полного давления в компрессоре
 $\pi_k^* = p_k^* / p_1^*$.

Удельная адиабатная работа компрессора определяется по выражению

$$l_{k.ад} = \frac{\gamma}{\gamma-1} R T_0 \left(\pi_k^{*\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right),$$

где γ – показатель адиабаты воздуха; T_0 – температура торможения на входе в компрессор;
 R – газовая постоянная воздуха.

В компрессоре отношение заторможенных параметров мало отличается от отношения статических параметров. Поэтому приближенно принимают $\pi_k = \pi_k^*$.

В реальном компрессоре сжатие воздуха сопровождается гидравлическими потерями, поэтому удельная работа сжатия больше адиабатной работы и определяется по выражению

$$l_k = c_p (T_k^* - T_0),$$

где c_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении; T_k^* – действительная температура торможения газа после компрессора.

Степень совершенства компрессора характеризуется адиабатным КПД:

$$\eta_k = \frac{l_{k.ад}}{l_k}.$$

Мощность, необходимая для привода компрессора

$$N_k = \frac{G_k l_{k.ад}}{\eta_k},$$

где G_k – расход воздуха через компрессор.

При решении задач по данной теме необходимо учитывать, что в случае применения приводного нагнетателя мощность на его привод снимается с коленчатого вала двигателя, что учитывается при расчете эффективной мощности двигателя.

ПРИМЕР

Определить мощность на привод компрессора для двигателя с механическим наддувом мощностью 100 кВт, если КПД компрессора $\eta_k = 0,6$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$; удельная адиабатная работа компрессора $l_{k.ад} = 40$ кДж/кг; удельный эффективный расход топлива $g_e = 0,245$ кг/кВт·ч; количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания топлива $l_0 = 14,3$ кг/кг, механический КПД передачи $\eta_m = 0,95$.

Решение

Расход воздуха через двигатель и, соответственно, компрессор равен

$$G_k = \frac{g_e \alpha l_0 N_e}{3600} = \frac{0,245 \cdot 1,1 \cdot 14,3 \cdot 100}{3600} = 0,107 \text{ кг/с}.$$

Мощность, необходимая для привода компрессора

$$N_k = \frac{G_k l_{k.ад}}{\eta_k \eta_m} = \frac{0,107 \cdot 40000}{0,6 \cdot 0,95} = 7,51 \text{ кВт}.$$

Выражения для удельной адиабатной работы и КПД объемных компрессоров справедливы и для лопаточных компрессоров.

Кроме приведенных выше параметров часто используется коэффициент адиабатического напора

$$\bar{i}_{\text{к.ад}} = \frac{l_{\text{к.ад}}}{u_2^2},$$

где u_2 – окружная скорость рабочего колеса на максимальном диаметре.

Поскольку коэффициент напора для разных компрессоров изменяется в очень узких пределах и равен 0,68-0,72, его часто используют при выборе окружной скорости колеса компрессора.

Для наддува ДВС используются центробежные компрессоры, имеющие более широкий диапазон работы и большую степень повышения давления по сравнению с осевыми.

Схема течения воздуха через центробежный компрессор и треугольники скоростей на входе в колесо и выходе из него приведены на рисунке 2.1.

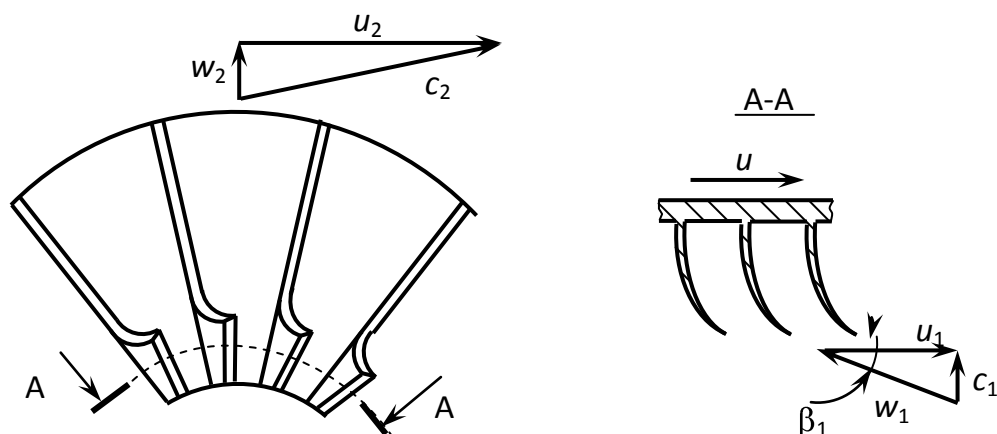


Рис. 2.1. Схема течения воздуха через центробежный компрессор: c – абсолютная скорость потока; u – окружная скорость колеса; w – относительная скорость потока; β_1 – угол потока на входе в колесо

Треугольник скоростей изображает векторы скоростей воздуха, обтекающего в абсолютном и относительном движении решетки профилей рабочего колеса.

Перед решением задач следует повторить теоретические вопросы, касающиеся построения треугольников скоростей и выбора угла входа лопаток компрессора.

ПРИМЕР

При частоте вращения ротора $n = 160\,000$ об/мин абсолютная скорость воздуха на входе в лопатки центробежного компрессора равна $c_1 = 140$ м/с. Определить относительную скорость воздуха на входе в лопатки компрессора на диаметре колеса на входе, равном $d = 37$ мм, а также угол между вектором относительной скорости и вектором окружной скорости.

Решение

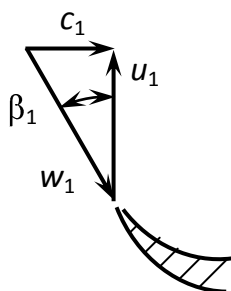
Схема течения (треугольник скоростей) воздуха на входе в колесо показана на рис. 2.2.

Окружная скорость колеса на диаметре $d_1 = 37$ мм

$$u_1 = \frac{\pi n d_1}{30 \cdot 2} = \frac{3,14 \cdot 160\,000 \cdot 0,037}{30 \cdot 2} = 310 \text{ м/с}$$

Угол между векторами скоростей w_1 и c_1

$$\beta_1 = \arctg \frac{c_1}{u_1} = \arctg \frac{140}{310} = 24,3^\circ$$



Треугольник скоростей газа на входе в рабочее колесо компрессора

Отношение полного давления газа на входе в турбину P_T^* к полному давлению P_Γ^* на выходе из нее называется степенью понижения полного давления в турбине

$$\pi_T^* = P_T^* / P_\Gamma^*.$$

Максимально возможная удельная работа газа на турбине при отсутствии потерь энергии с выходной скоростью называется изоэнтروпической работой турбины по статическим параметрам и равна

$$l_{ts} = \frac{\gamma_\Gamma}{\gamma_\Gamma - 1} R_\Gamma T_\Gamma^* \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{\frac{\gamma_\Gamma}{\gamma_\Gamma - 1}}} \right),$$

где R_Γ – газовая постоянная выхлопных газов; T_Γ^* – заторможенная температура газа перед турбиной; $\pi_T = P_T^* / P_\Gamma$ – степень понижения давления газа в турбине; p_Γ – статическое давление на выходе из турбины; γ_Γ – показатель адиабаты выхлопных газов.

Изоэнтروпическая работа турбины по параметрам заторможенного потока определяется по выражению

$$l_{ts}^* = \frac{\gamma_\Gamma}{\gamma_\Gamma - 1} R_\Gamma T_\Gamma^* \left(1 - \frac{1}{\pi_T^{*\frac{\gamma_\Gamma}{\gamma_\Gamma - 1}}} \right).$$

Работа расширения в реальной турбине равна

$$l_T = c_p (T_\Gamma^* - T_\Gamma),$$

где T_Γ^* – заторможенная температура газа на выходе из турбины.

Уровень внутренних потерь в турбине оценивается адиабатным КПД и определяется по формуле

$$\eta_{т.ад} = \frac{l_T + c_\Gamma^2 / 2}{l_{ts}} = \frac{T_\Gamma^* - T_\Gamma}{T_\Gamma^* - T_{\Gamma.ад}},$$

где c_Γ – скорость газа на выходе из турбины; T_Γ – статическая температура газа на выходе из турбины; $T_{\Gamma.ад}$ – температура газа в конце адиабатного расширения.

Учет всех безвозвратных гидродинамических потерь производится с помощью КПД по параметрам заторможенного потока

$$\eta_\Gamma^* = \frac{l_T}{l_{ts}^*} = \frac{T_\Gamma^* - T_\Gamma}{T_\Gamma^* - T_{\Gamma.ад}^*},$$

где $T_{\Gamma.ад}^*$ – заторможенная температура газа в конце адиабатного расширения.

Оценка турбины как машины для привода производится с помощью мощностного КПД

$$\eta_\Gamma = \frac{l_T}{l_{ts}} = \frac{T_\Gamma^* - T_\Gamma}{T_\Gamma^* - T_{\Gamma.ад}}.$$

Соотношения между значениями приведенных выше КПД выглядят следующим образом

$$\eta_{т.ад}^* > \eta_\Gamma^* > \eta_\Gamma.$$

Расход газа через турбину больше количества воздуха, проходящего через компрессор на величину поступающего в двигатель топлива

$$G_\Gamma = G_\kappa \left(1 + \frac{1}{\alpha l_0} \right).$$

Мощность, вырабатываемая турбиной постоянного давления, определяется по выражению $N_t = G l_{ts} \eta_t$.

Чаще всего турбина является частью турбокомпрессора. Механический КПД турбокомпрессора

$$\eta_m = \frac{N_k}{N_t} = \frac{l_k G_k}{l_t G_t}.$$

КПД турбокомпрессора

$$\eta_{тк} = \eta_t \eta_{к.ад} \eta_m.$$

Максимальная полезная работа в турбине при адиабатном процессе расширения от давления p_t до давления p_r равна разности удельной работоспособности потока на входе в турбину и на выходе из нее.

$$l_{\max} = l_{\max t} - l_{\max r}.$$

Максимальную удельную работоспособность потока газа называют эксергией

$$l_{\max} = ex = (h_1 - h_0) = T_0(s_1 - s_0),$$

где h – энтальпия; $s_1 - s_0$ – изменение энтропии.

Изменение энтропии определяется по выражению

$$s_1 - s_0 = c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{p_1}{p_0}.$$

Таким образом, на турбине

$$l_{\max t} = ex_1 - ex_2 = h_t^* - h_{г.ад}.$$

Термодинамическое совершенство турбины оценивают эксергическим КПД турбины

$$\eta_{ex t} = \frac{l_t}{h_t^* - h_{г.ад}}.$$

Очевидно, что $\eta_{ex t} = \eta_t$.

Необходимо понимать разницу между активными и реактивными турбинами и повторить лекционный материал, касающийся различных КПД турбины.

В ДВС применяют реактивные турбины, которые по сравнению с активной имеют более высокий КПД, и отклонение режима работы от расчетного меньше влияет на КПД.

Схема течения газа через осевую реактивную турбину показана на рисунке 3.1.

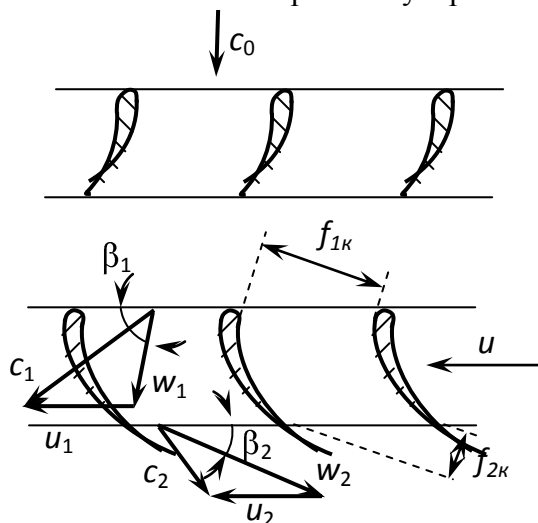


Рис. 3.1. Схема течения газа через реактивную турбину: c – абсолютная скорость потока; u – окружная скорость колеса; w – относительная скорость потока
ПРИМЕР

Определить мощность, развиваемую турбиной, если расход газа через нее $G_t = 0,1$ кг/с, давление и температура газа перед турбиной $p_t^* = 0,18$ МПа, $T_t^* = 700$ К, КПД по параметрам торможения $\eta_{т}^* = 0,75$. Давление газа за турбиной $p_{г}^* = 0,105$ МПа. Показатель адиабаты выхлопных газов $\gamma_g = 1,33$, газовая постоянная $R_g = 289$ Дж/(кг·К).

Решение

Степень понижения полного давления в турбине

$$\pi_r^* = p_r^* / p_r^* = 0,18 / 0,105 = 1,67.$$

Изоэнтروпическая работа турбины по параметрам заторможенного потока

$$l_{ts}^* = \frac{\gamma_r}{\gamma_r - 1} R T_r^* \left(1 - \frac{1}{\pi_r^{\frac{\gamma_r}{\gamma_r - 1}}} \right) =$$

$$= \frac{1,33}{1,33 - 1} 289 \cdot 700 \left(1 - \frac{1}{1,67^{\frac{1,33}{1,33 - 1}}} \right) = 97400 \text{ Дж/кг.}$$

Работа расширения в реальной турбине

$$l_T = l_{ts}^* \eta_T^* = 97400 \cdot 0,75 = 73000 \text{ Дж/кг.}$$

Мощность, развиваемая турбиной

$$N_T = G_T l_T = 0,1 \cdot 73000 = 7300 \text{ Вт.}$$

Для увеличения плотности воздуха, подаваемого в двигатель, часто применяют его охлаждение после компрессора. Наибольшее распространение получили поверхностные охладители. Схема охладителя приведена на рис. 4.1.

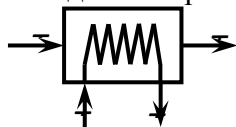


Рис. 4.1. Схема охладителя наддувочного воздуха:

T_k — температура воздуха после компрессора, $T_{охл}$ — температура воздуха после охладителя, T_1 — температура охлаждающей среды на входе в охладитель, T_2 — температура охлаждающей среды на выходе из охладителя

Задачи по данной теме близки к разделам теплообмена дисциплины «Термодинамика и тепломассообмен», поэтому для успешного решения задач следует ознакомиться, прежде всего, с методикой расчета теплообменников.

Тепловая мощность, отводимая от наддувочного воздуха в охладителе

$$Q = G_k \Delta T_k c_p,$$

где $\Delta T_k = T_k - T_{охл}$ — разность между температурами наддувочного воздуха на входе и выходе из охладителя; c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Эта же тепловая мощность подводится к охлаждающей среде

$$Q = G_c \Delta T_c,$$

где G_c — расход охлаждающей среды; $\Delta T = T_2 - T_1$ — разность между температурами охлаждающей среды на выходе и входе из охладителя; c_c — теплоемкость охлаждающей среды.

Если для охлаждения используется вентилятор, то его мощность определяется по формуле

$$N_v = \frac{Q_v \Delta p}{\eta_v},$$

где Q_v — объемный расход воздуха; Δp — избыточное давление, создаваемое вентилятором.

Для оценки охладителя используется ряд характеристик.

Среднелогарифмический температурный напор

$$T_n = \frac{(T_k - T_2) - (T_{охл} - T_1)}{2,3 \lg \frac{T_k - T_2}{T_{охл} - T_1}}.$$

Коэффициент использования массы охлаждающего элемента

$$k_g = \frac{Q}{m \Delta T_n} [\text{Вт/кг} \cdot \text{К}],$$

где m — масса охлаждающего элемента охладителя (суммарная масса теплообменных труб и пластин).

Тепловая эффективность охладителя

$$\eta = \frac{T_k - T_{охл}}{T_k - T_1}.$$

Плотность теплового потока между охлаждаемым воздухом и охлаждающей средой

$$q = \frac{T_n}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c}},$$

где α_v – коэффициент теплоотдачи со стороны охлаждаемого воздуха; α_c – коэффициент теплоотдачи со стороны охлаждающей среды; δ – толщина стенки; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки.

Величина k , равная $\frac{1}{\frac{1}{\alpha_v} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_c}}$ называется коэффициентом теплопередачи.

Тепловая мощность (тепловой поток) воздухоохладителя

$$Q = kT_n F_{\text{охл}},$$

где $F_{\text{охл}}$ – площадь теплообмена воздухоохладителя.

ПРИМЕР 1

Температура воздуха на выходе из компрессора $T_k = 385$ К, температура воды на входе в охладитель $T_1 = 298$ К, температура воды на выходе из воздухоохладителя $T_2 = 303$ К, коэффициент теплопередачи воздухоохладителя 201 Вт/(м²·К), тепловая мощность воздухоохладителя 215 кВт, температура воздуха после охладителя $T_{\text{охл}} = 324$ К. Определить среднелогарифмический перепад температур в охладителе и площадь теплообмена охладителя.

Решение

Среднелогарифмический перепад температур в воздухоохладителе

$$T_n = \frac{(T_k - T_2) - (T_{\text{охл}} - T_1)}{2,3 \lg \frac{T_k - T_2}{T_{\text{охл}} - T_1}} = \frac{(385 - 303) - (324 - 298)}{2,3 \lg \frac{385 - 303}{324 - 298}} = 49^\circ$$

Площадь теплообмена воздухоохладителя

$$F_{\text{охл}} = \frac{Q}{kT_n} = \frac{215}{201 \cdot 49} = 22 \text{ м}^2$$

ПРИМЕР 2

Составить энергетический баланс двигателя с турбокомпрессором и определить его эффективный КПД. Исходные данные: расход воздуха $G_k = 0,412$ кг/с; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,3$; температура выхлопных газов $T_t = 893$ К; теплоемкость отработавших газов при постоянном давлении $c_{pg} = 1115$ Дж/(кг·К); мощность турбины $N_t = 22,6$ кВт; эффективная мощность двигателя $N_e = 284$ кВт; мощность механических потерь в турбокомпрессоре $N_m = 2,5$ кВт.

Решение

Схема энергетического баланса представлена на рис. 4.2.

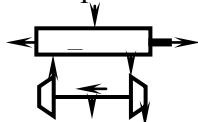


Рис. 4.2. Схема энергетического баланса комбинированного двигателя

Тепловая мощность, подводимая с топливом

$$Q_{\text{топл}} = \frac{G_k H_u}{\alpha l_0} = \frac{0,412 \cdot 42500000}{1,3 \cdot 14,5} = 928,9 \text{ кВт}$$

Тепловая мощность на входе в поршневую часть со стороны компрессора

$$Q_k = N_t - N_m = 22,6 - 2,5 = 20,1 \text{ кВт}$$

Расход газа на входе в турбину

$$G_t = G_k \left(1 + \frac{1}{\alpha l_0} \right) = 0,412 \cdot \left(1 + \frac{1}{1,3 \cdot 14,5} \right) = 434 \text{ кг/с}$$

Тепловая мощность газов на входе в турбину

$$Q_t = c_{pg} (T^* - T_0) G_t = 1115 \cdot (893 - 300) \cdot 0,434 = 287 \text{ кВт}$$

Тепловая мощность, уходящая с отработавшими

$$Q_r = Q_t - N_t = 287 - 22,6 = 264,4 \text{ кВт}$$

Тепловая мощность, уходящая в систему охлаждения

$$Q_{\text{охл}} = Q_{\text{топл}} + Q_k - N_e - Q_r = 928,9 + 20,1 - 284 - 287 = 378 \text{ кВт}$$

Тепловая мощность, подводимая в поршневую часть двигателя

$$Q_k + Q_{\text{топл}} = 20,1 + 928,9 = 949 \text{ кВт}$$

Эффективный КПД двигателя

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q_{\text{топл}}} = \frac{284}{928,9} = 0,306$$

Доля теплоты, ушедшая с отработавшими газами и на механические потери в турбокомпрессоре

$$\eta_r = \frac{Q_r + N_m}{Q_{\text{топл}}} = \frac{264,4 + 2,5}{928,9} = 0,287$$

Доля теплоты, ушедшая в систему охлаждения

$$\eta_{\text{охл}} = \frac{Q_{\text{охл}}}{Q_{\text{топл}}} = \frac{378}{928,9} = 0,407$$

Проверим сумму КПД, которая должна быть равна единице

$$\eta_e + \eta_r + \eta_{\text{охл}} = 0,306 + 0,287 + 0,407 = 1.$$

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 специализированных лабораториях 2-401, 2-408 и дисплейном классе 2-410 кафедры двигателей внутреннего сгорания.

Лаборатории оснащены аппаратурой для широкоформатной визуализации презентаций и других аналогичных материалов, дисплейный класс оснащен компьютерами с установленными на них лицензионным ПО, включая пакет твердотельного моделирования и проектирования *Solid-Works*, 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: Тепловые двигатели

Учебный год 2015/2016

РЕКОМЕНДОВАНА заседанием кафедры двигателей внутреннего сгорания
наименование кафедры

протокол № 9 от "08" 06 20 15 г.

Заведующий кафедрой [подпись] Р.Д. Еникеев
подпись расшифровка подписи

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

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий кафедрой¹
двигателей внутреннего сгорания Р.Д. Еникеев

Председатель НМС по УГСН 13.00.00 Электро- и теплотехника

протокол № 1А от "28" 08 20 15 г.

[подпись] Ф.Р. Исмагилов
личная подпись расшифровка подписи

Библиотека [подпись] Т.В. Дмитриева 28.08.15
личная подпись расшифровка подписи дата

Начальник отдела аспирантуры [подпись] Фаттахов Р.К. 31.08.15
личная подпись расшифровка подписи дата

Рабочая программа зарегистрирована в ООПМА и внесена в электронную базу данных

Начальник [подпись] И.А. Лакман 31.08.15
личная подпись расшифровка подписи дата

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

**Дополнения и изменения в рабочей программе учебной дисциплины
на 20__/20__ уч. год**

УТВЕРЖДАЮ

Декан факультета (директор института, филиала)

ФИО

(подпись)

« ____ » _____ 20__ г.

В рабочую программу по дисциплине _____

для направления _____

направленность (программа) _____

вносятся следующие изменения:

1)

2)

ПЕРЕСМОТРЕНА на заседании кафедры _____
наименование кафедры

протокол № _____ от " ____ " _____ 2015 г.

Заведующий кафедрой _____
подпись расшифровка подписи

Научный руководитель магистерской программы² _____
подпись расшифровка подписи

ОДОБРЕНА на заседании НМС по УГСН _____

протокол № _____ от " ____ " _____ 20__ г.

Председатель _____
личная подпись расшифровка подписи

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий кафедрой³

наименование кафедры личная подпись расшифровка подписи дата

Библиотека⁴ _____
личная подпись расшифровка подписи дата

Дополнения и изменения внесены в базу данных рабочих программ дисциплин

Начальник ООПМА _____
личная подпись расшифровка подписи дата

² Только направлений подготовки магистров

³ Согласование осуществляется с выпускающими кафедрами (для рабочих программ, подготовленных на кафедрах, обеспечивающих подготовку для других направлений подготовки научно-педагогических кадров высшей квалификации)

⁴ Только при внесении изменений в список литературы