

**Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

Направление подготовки/специальность: 13.04.03 Энергетическое машиностроение

Наименование образовательной программы: Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Оценочные материалы
по дисциплине
Программное обеспечение расчетов турбомашин**

**Москва
2024**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Тищенко В.А.
	Идентификатор	R4ea77783-TishchenkoVA-c16aaeb

В.А. Тищенко

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Митрохова О.М.
	Идентификатор	R1d0f453c-FichoriakOM-ee811867

О.М.
Митрохова

Заведующий
выпускающей
кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Грибин В.Г.
	Идентификатор	R44612ca0-GribinVG-8231e2ff

В.Г. Грибин

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. РПК-5 Способен к научно-исследовательской деятельности в сфере энергетического машиностроения

ИД-1 Выполняет теоретические и экспериментальные исследования процессов, происходящих в объектах профессиональной деятельности

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации: Защита задания

1. Лабораторная работа 1. Моделирование смешивания теплоносителей в тройнике (Лабораторная работа)
2. Лабораторная работа 2. Моделирование отрывных течений в диффузоре (Лабораторная работа)
3. Лабораторная работа 3. Обработка и анализ результатов численного моделирования в программе CFD Post (Лабораторная работа)
4. Лабораторная работа 4. Моделирование течения в турбинной ступени (Лабораторная работа)
5. Лабораторная работа 5. Моделирование течения в сопловой решетке осевой турбины (Лабораторная работа)

Форма реализации: Компьютерное задание

1. Контрольная работа. Расчет течения в двумерной постановке (Контрольная работа)

Форма реализации: Письменная работа

1. Тест «Методы численного моделирования в инженерных задачах» (Тестирование)

БРС дисциплины

2 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- | | |
|------|---|
| КМ-1 | Лабораторная работа 1. Моделирование смешивания теплоносителей в тройнике (Лабораторная работа) |
| КМ-2 | Тест «Методы численного моделирования в инженерных задачах» (Тестирование) |
| КМ-3 | Лабораторная работа 2. Моделирование отрывных течений в диффузоре (Лабораторная работа) |
| КМ-4 | Лабораторная работа 3. Обработка и анализ результатов численного моделирования в программе CFD Post (Лабораторная работа) |
| КМ-5 | Лабораторная работа 4. Моделирование течения в турбинной ступени (Лабораторная работа) |

- КМ-6 Контрольная работа. Расчет течения в двумерной постановке (Контрольная работа)
 КМ-7 Лабораторная работа 5. Моделирование течения в сопловой решетке осевой турбины (Лабораторная работа)

Вид промежуточной аттестации – Зачет с оценкой.

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %							
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4	КМ-5	КМ-6	КМ-7
	Срок КМ:	3	4	6	8	12	14	16
Численное моделирование физических процессов в инженерных задачах								
Численное моделирование физических процессов в инженерных задачах	+			+				
Вычислительная гидрогазодинамика. Основные понятия и определения.								
Вычислительная гидрогазодинамика. Основные понятия и определения.			+					
Моделирование вязких жидкостей. Модели турбулентности								
Моделирование вязких жидкостей. Модели турбулентности				+				
Пост – обработка результатов расчета								
Пост – обработка результатов расчета					+			
Численное моделирование нестационарных газодинамических явлений в ступени осевой турбины								
Численное моделирование нестационарных газодинамических явлений в ступени осевой турбины	+					+	+	
Численное моделирование трехмерного течения в сопловой решетке турбины								
Численное моделирование трехмерного течения в сопловой решетке турбины						+		+
Вес КМ:		15	5	10	10	20	20	20

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
РПК-5	ИД-1 _{РПК-5} Выполняет теоретические и экспериментальные исследования процессов, происходящих в объектах профессиональной деятельности	Знать: назначение и область применимости основных схем расчета задач вычислительной газодинамики основные этапы настройки, проведения численного газодинамического расчета и анализа его результатов Уметь: корректно использовать модели турбулентности при проведении расчетов настраивать и проводить газодинамический расчет в решетках и ступенях турбомашин с учетом специфики подобных задач проводить обработку результатов численного газодинамического расчета и представлять их в графическом виде	КМ-1 Лабораторная работа 1. Моделирование смешивания теплоносителей в тройнике (Лабораторная работа) КМ-2 Тест «Методы численного моделирования в инженерных задачах» (Тестирование) КМ-3 Лабораторная работа 2. Моделирование отрывных течений в диффузоре (Лабораторная работа) КМ-4 Лабораторная работа 3. Обработка и анализ результатов численного моделирования в программе CFD Post (Лабораторная работа) КМ-5 Лабораторная работа 4. Моделирование течения в турбинной ступени (Лабораторная работа) КМ-6 Контрольная работа. Расчет течения в двумерной постановке (Контрольная работа) КМ-7 Лабораторная работа 5. Моделирование течения в сопловой решетке осевой турбины (Лабораторная работа)

		проводить стационарные и нестационарные газодинамические расчеты однофазных вязких течений в двумерной и трехмерной постановке	
--	--	---	--

II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

КМ-1. Лабораторная работа 1. Моделирование смешивания теплоносителей в тройнике

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Лабораторная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студент предоставляет файл с результатами расчета, а также требуемые в задании графические данные. Файл открывается в программе Ansys Fluent. Преподаватель задает вопросы, связанные с процедурой проведения расчета. Студент демонстрирует свои знания непосредственно в программе.

Краткое содержание задания:

1. 1. Постановка задачи

Цель лабораторной работы: изучить основные этапы настройки, проведения и обработки газодинамического расчета в CFD коде AnsysFluent,

Задание на лабораторную работу: провести моделирование процесса смешения двух теплоносителей в тройнике. Рабочая среда – вода. Через два входа в тройник поступает жидкость с различными скоростями и температурами. Через единственный выход среда после смешения выходит из расчетной области.

В результате моделирования необходимо:

1. Построить распределение скоростей в среднем сечении тройника
2. Построить линии тока среды в пространстве течения, исходящие из обоих входов в тройник и окрашенные по температуре.
3. Определить среднюю температуру среды на выходе из тройника после смешения теплоносителей.

2. Описание объекта исследования, граничных условий и условий проводимого расчета

Тройник представляет из себя канал с двумя входами и одним выходом. На рисунке представлены его геометрические характеристики. Красными стрелками отмечены области входа теплоносителей, а голубой – зона выхода. На рисунке представлена расчетная схема в исследуемого канала в разрезе с обозначением названий и типов граничных условий.

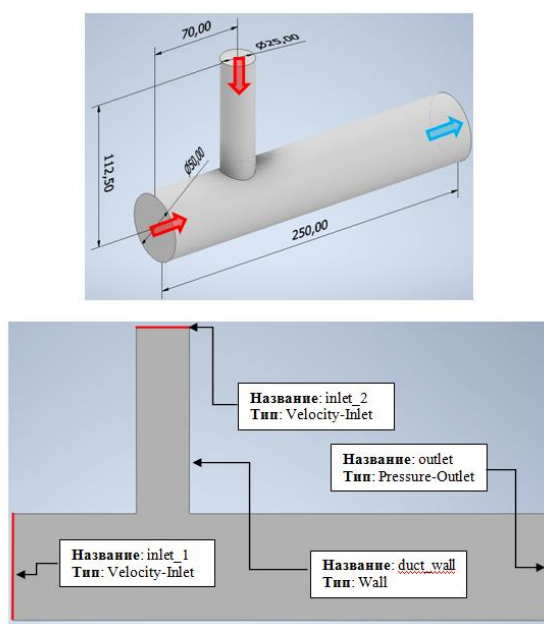


Figure 1 Геометрия исследуемого канала и граничные условия

Форма канала определяется стенкой duct_wall, имеющей тип wall, на которой реализуется условие прилипания. Через поверхность ГУ inlet_1 и inlet_2 поступают теплоносители с заданной скоростью и температурой. Среда выходит через поверхность outlet, на которой давление рабочего тела равно атмосферному. Моделирование провести с применением модели турбулентности k-εRealizable, в качестве пристеночной функции использовать Enhanced Wall Treatment. В таблице приведены значения граничных условий, которые необходимо задать каждому варианту.

№ варианта	inlet_1		inlet_2	
	Скорость, м/с	Температура, оС	Скорость, м/с	Температура, оС
1	0,5	10	4	80
2	0,6	15	3,9	75
3	0,7	20	3,8	70
4	0,8	25	3,7	65
5	0,9	30	3,6	60
6	1	35	3,5	55
7	1,1	40	3,4	50
8	1,2	45	3,3	45
9	1,3	50	3,2	40
10	1,4	55	3,1	35
11	1,5	60	3	30
12	1,6	65	2,9	25
13	1,7	70	2,8	20
14	1,8	75	2,7	15
15	1,9	80	2,6	10
16	2	85	2,5	5
17	2,1	90	2,4	5
18	2,2	95	2,3	10
19	2,3	90	2,2	15
20	2,4	85	2,1	20

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
---	------------------------------

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: назначение и область применимости основных схем расчета задач вычислительной газодинамики	1. В каких случаях необходимо использовать схему Coupled, а в каких Simple? 2. Чем отличается First Order Upwind от Second Order Upwind?
Уметь: проводить стационарные и нестационарные газодинамические расчеты однофазных вязких течений в двумерной и трехмерной постановке	1. Как во Fluent назначить свойства материала? 2. Где во Fluent необходимо задавать граничные условия? 3. Показать, как визуализировать распределение параметра течения в произвольном сечении. 4. Показать, как во Fluent можно получить среднеинтегральные характеристики потока на произвольных поверхностях.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил минимум на 4 вопроса из 5.

Оценка: 4 («хорошо»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 3 вопроса из 5.

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 2 вопроса из 5.

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если либо результаты расчета некорректны, либо студент ответил на 1 или ни на один вопрос из 5.

КМ-2. Тест «Методы численного моделирования в инженерных задачах»

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Тестирование

Вес контрольного мероприятия в БРС: 5

Процедура проведения контрольного мероприятия: Время выполнения 15 минут.

Краткое содержание задания:

Тест состоит из 10 вопросов.

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: основные этапы настройки, проведения численного газодинамического расчета и анализа его результатов	1. 1. Какой из этих продуктов можно отнести к «чистому» CAE: a) Ansys Fluent

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
	b) Autodesk AutoCAD c) Dassault SolidWorks 2. 1. Дискретизация пространства рассчитываемой области это: a) Разбиение области расчета на элементарные элементы для расчета в каждом из них уравнений сохранения. b) Разбиение области для удобства расчета отдельно твердых тел, отдельно течений жидкости и газа. c) Разделение области на отдельные участки граничных зон – входа, выхода, стенок и так далее. 3. 1. Какой метод численного расчета уравнений газодинамики преимущественно используется в современных CFD пакетах: a) Метод конечных разностей b) Метод конечных объемов c) Метод конечных элементов 4. 1. В каком случае в задаче для ее решения необходимо задавать начальные условия: a) В случае нестационарного расчета b) В любом случае c) В случая невозможности определить граничные условия 5. 1. Чем решатель pressure based отличается от density based: a) Методом решения уравнения состояния рабочей жидкости b) Подходом к описанию уравнения неразрывности c) Способом задания граничных условий 6. 1. Укажите неверное утверждение: a) Метод density based эффективно решает задачи со сверхзвуковыми течениями b) Эффективность и устойчивость метода density based сильно зависит от числа Куранта c) Метод density based – наиболее распространенный подход в решении задач

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
	газодинамики 7. 1. Какой схемы сопряжения уравнений газодинамики не существует в pressure based решателе: a) SIMPLE b) PISO c) Coupled d) LEAD 8. 1. Коэффициенты релаксации необходимы для: a) Обеспечения устойчивости численного метода, особенно в областях начальных итераций b) Снижения нагрузки на процессор за счет разрежения матриц уравнений c) Для определения параметров турбулентности 9. 1. Какое уравнение газодинамики не обязательно должно входить в систему при моделировании течения жидкости: a) Неразрывности b) Сохранения количества движения c) Сохранения энергии 10. 1. Какой подход лежит в основе современных CFD решателей: a) Метод конечных разностей b) Метод конечных объемов c) Метод конечных элементов

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если правильно выполнено не менее 95% заданий.

Оценка: 4 («хорошо»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если правильно выполнено не менее 85% заданий.

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если правильно выполнено не менее 70% заданий.

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если правильно выполнено менее 70% заданий.

КМ-3. Лабораторная работа 2. Моделирование отрывных течений в диффузоре

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Лабораторная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 10

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студент предоставляет файл с результатами расчета, а также требуемые в задании графические данные. Файл открывается в программе Ansys Fluent. Преподаватель задает вопросы, связанные с процедурой проведения расчета. Студент демонстрирует свои знания непосредственно в программе.

Краткое содержание задания:

Цель: изучить настройки и проведения расчета вязких потоков. Выявить границы применимости различных моделей турбулентности.

Задача: необходимо провести численное моделирование течения воздуха в несимметричном плоском диффузоре, которое сопровождается отрывом пограничного слоя с одной из его стенок. Расчет провести с использованием двух моделей турбулентности: $k-\omega$ SST и $k-\epsilon$ Realizable (с пристеночной функцией Enhanced Wall Treatment). Сравнить результаты обоих расчетов: визуализировать линии тока в диффузоре, получить распределение скоростей течения в заданном сечении канала. Проверить качество подготовленной сетки для обеих моделей путем сравнения распределения параметра Y^+ вдоль нижней стенки диффузора. В качестве граничного условия на входе в канал задать профиль скоростей для развитого турбулентного течения в трубе. При этом число Рейнольдса по скорости в среднем сечении канала $umax$ представлено в таблице:

№ варианта	Re ($umax$)
1	10000
2	11000
3	12000
4	13000
5	14000
6	15000
7	16000
8	17000
9	18000
10	19000
11	20000
12	21000
13	22000
14	23000
15	24000
16	25000
17	26000
18	27000
19	28000
20	29000

Течение в канале протекает при относительно малых значениях числа Рейнольдса, влияние вязких сил в области пограничного слоя достаточно велико. В данной работе необходимо исследовать чувствительность моделей турбулентности к подобным условиям.

Описание объекта исследования, граничных условий и условий проводимого расчета:

Геометрия исследуемого несимметричного диффузора представлена на рисунке. Задача рассматривается в двумерной постановке. На рисунке представлена расчетная схема и наложенные на нее типы граничных условий (boundary conditions). На этом же рисунке отмечено расположение вертикальной линии, вдоль которой необходимо получить распределение осевых скоростей (горизонтальных). Координаты ее крайних точек: $x_0 = 1585$ мм; $y_0 = 20$ мм; $x_1 = 1585$ мм; $y_1 = -72,2941$ мм.

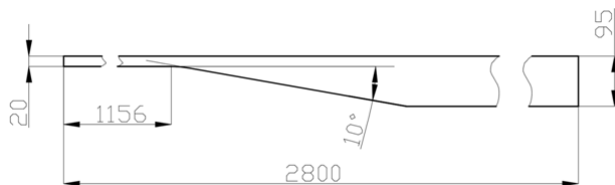


Figure 2 Геометрические характеристики исследуемого диффузора

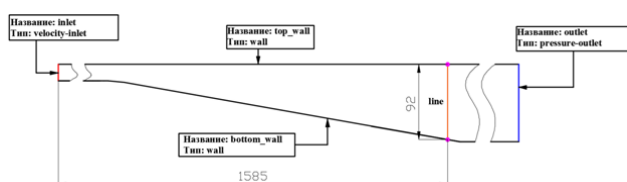


Figure 3 Расчетная схема исследуемого канала

Профиль скорости для полностью устоявшегося турбулентного течения на входе в расчетную область (inlet) задается исходя из следующего экспериментально полученного выражения:

$$\frac{u_{max} - u_i}{u^*} = -\frac{1}{\chi} \left[\ln \left(1 - \sqrt{1 - \frac{y_i}{h}} \right) + \sqrt{1 - \frac{y_i}{h}} \right]$$

где u_{max} – максимальная скорость на оси канала; χ – эмпирический коэффициент; h – половина высоты входного канала; y_i – текущая координата (откладываемая от стенки канала до оси); u_i – скорость потока при текущей координате; u^* – динамическая скорость, определяемая как:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

Максимальная скорость на оси канала определяется по эмпирическому уравнению:

$$u_{max} = u^* \left(5,75 \lg \left(\frac{11,5 u^*}{\nu} \right) + 5,5 \right)$$

Необходимо подобрать среднюю скорость потока таким образом, чтобы число Рейнольдса $Re_{u_{max}}$ соответствовало данным из таблицы. Необходимо определить распределение скоростей потока в поперечном сечении входного канала и использовать

их как граничные условия на входе в расчетную схему. Пример профиля скорости представлен на рисунке:

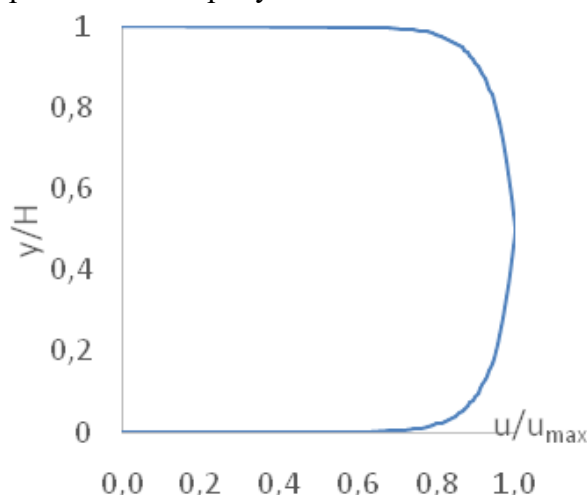


Figure 4 Профиль скорости турбулентного потока на входе в канал.

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: назначение и область применимости основных схем расчета задач вычислительной газодинамики	1.Какие модели турбулентности преимущественно применяются при расчете вязкой жидкости в турбомашиностроении?
Уметь: корректно использовать модели турбулентности при проведении расчетов	1.Покажите, как при расчете установить модель турбулентности k-ε Realizable с пристеночной функцией Enhanced Wall Treatment. 2.Покажите, как при расчете установить модель турбулентности k-ω SST. 3.Как можно проверить корректность результатов моделирования вязкого пограничного слоя? 4.Покажите, какие из невязок, используемых Fluent, отвечают за контроль сходимости уравнений модели турбулентности? 5.Покажите, как визуализировать отрывную зону в потоке с помощью линий тока.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил минимум на 4 вопроса из 5.

Оценка: 4 («хорошо»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 3 вопроса из 5.

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 2 вопроса из 5.

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если либо результаты расчета некорректны, либо студент ответил на 1 или ни на один вопрос из 5.

КМ-4. Лабораторная работа 3. Обработка и анализ результатов численного моделирования в программе CFD Post

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Лабораторная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 10

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студент предоставляет файл с результатами расчета, а также требуемые в задании графические данные. Файл открывается в программе Ansys Fluent. Преподаватель задает вопросы, связанные с процедурой проведения расчета. Студент демонстрирует свои знания непосредственно в программе.

Краткое содержание задания:

Цель: изучить основной функционал, предоставляемый пакетом пост обработки CFDPost.

Задача: необходимо провести численное моделирование и анализ течения воздуха в циклоне. Задача решается в стационарной постановке с использованием модели турбулентности k-εRealizable (с пристеночной функцией EnhancedWallTreatment).

Результаты моделирования открыть в программе CFDPost и провести их анализ. Для этого необходимо:

А). Визуализировать линии тока, исходящие из патрубков подвода

Б). Визуализировать векторные поля скоростей в трех поперечных сечениях циклона.

В). Получить распределение статического давления потока на продольном сечении циклона.

Г). Построить распределение отношения давлений вдоль внутренней и внешней образующих циклона.

Положение плоскостей поперечного сечения представлены в описании выполнения лабораторной работы. Величина отношения давлений определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{p}{p_{0\text{вх}}} = \frac{p}{p_{\text{вх}} + \rho_{\text{вх}} \frac{c_{\text{вх}}^2}{2}}$$

№ варианта	Скорость на входе, м/с	Температура на входе, оС	Абсолютное давление за циклоном, кПа
1	5	50	80
2	10	55	90
3	15	60	40
4	20	65	70
5	25	70	50
6	30	75	45
7	35	80	85
8	40	85	55
9	45	90	95
10	40	95	100
11	35	100	40
12	30	95	60
13	25	90	65
14	20	85	85
15	15	80	95

16	10	75	55
17	5	70	75
18	10	65	45
19	15	80	100
20	20	90	65

Описание объекта исследования, граничных условий и условий проводимого расчета:

На рисунке представлена геометрия исследуемой модели циклона. Твердое тело в данном случае представляет собой объем, занимаемый пространством течения жидкости (т.е. штриховка соответствует зоне течения). Поток входит в циклон через два тангенциально расположенных патрубка. Пространство трубы циклона представляет собой диффузор с углом раскрытия 8 градусов. На рисунке представлены плоскости и их названия, которые будут использоваться при пост обработке результатов расчета. На рисунке представлены названия и типы заданных в расчетной области граничных условий.

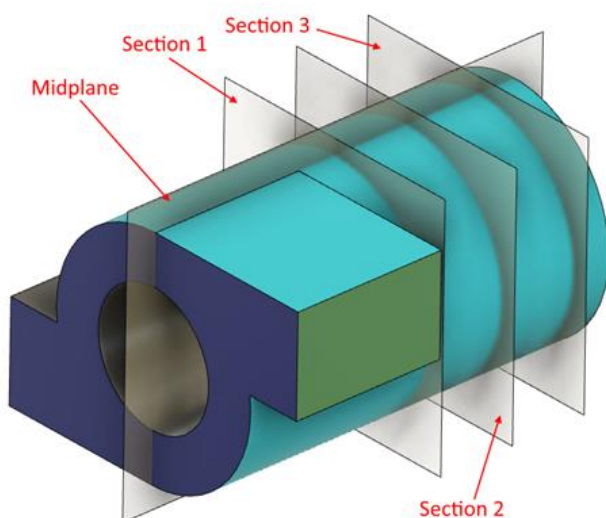


Figure 5 Геометрия расчетной схемы циклона

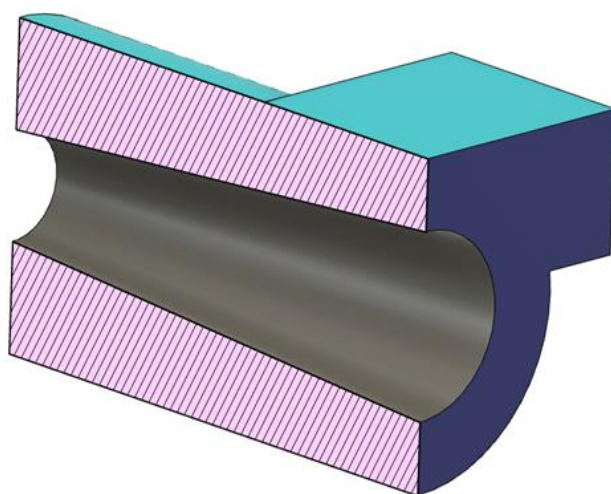


Figure 6 Внутренняя часть циклона

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: проводить обработку результатов численного газодинамического расчета и представлять их в графическом виде	1.Покажите, как сохранить для пост обработки в CFD Post данные о распределении давления полного торможения. 2.Покажите, как визуализировать линии тока, исходящие из обоих подводов воздуха. 3.Покажите, как создать продольное среднее сечение модели и построить на нем контур распределения скорости. 4.Покажите, как построить прямую линию в области течения и построить вдоль нее график распределения статического давления. 5.Покажите, как в CFD Post можно добавлять собственные переменные течения, представленные в виде выражений.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил минимум на 4 вопроса из 5.

Оценка: 4 («хорошо»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 3 вопроса из 5.

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 2 вопроса из 5.

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если либо результаты расчета некорректны, либо студент ответил на 1 или ни на один вопрос из 5.

КМ-5. Лабораторная работа 4. Моделирование течения в турбинной ступени

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Лабораторная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студент предоставляет файл с результатами расчета, а также требуемые в задании графические данные. Файл открывается в программе Ansys Fluent. Преподаватель задает вопросы, связанные с процедурой проведения расчета. Студент демонстрирует свои знания непосредственно в программе.

Краткое содержание задания:

Цель. Изучить аспекты применения модели SlidingMesh для моделирования течения в ступенях турбомашин, в которых присутствуют подвижные и неподвижные элементы.

Задача. Провести численное моделирование в нестационарной постановке течения потока пара в турбинной ступени. Использовать метод подвижной сетки (SlidingMesh). В результате расчета необходимо:

1. Получить анимацию изменения статического давления и скорости потока в ступени.
2. Построить треугольники скоростей ступени по осредненным параметрам течения.
3. Получить график пульсаций давления на входной кромке рабочей лопатки.
4. Построить термодинамический процесс расширения пара в степени в h - s диаграмме. Значения энтальпии и энтропии в его характерных точках определить по давлению и температуре перегретого пара.
5. Получить визуальную картину распределения осредненных по времени абсолютной и относительной скоростей в сопловой и рабочей решетках соответствующую

Описание геометрии исследуемого канала и граничных условий расчета.

Рассматривается течение в ступени паровой турбины. Моделирование производится в двумерной постановке на среднем диаметре. На рисунке представлена развертка профилей сопловой и рабочей решеток в среднем сечении. На рисунке изображена расчетная схема, применяемая для моделирования. Область течения разбита на две зоны – неподвижная (stator) и подвижная (rotor). Для обеспечения периодичности каждая из них ограничена поверхностями с типом periodic (stator_periodic и rotor_periodic соответственно). Модель подвижных сеток (Sliding Mesh) требует, чтобы шаги по периодичности для обеих областей течения были одинаковы, поэтому в расчетной схеме присутствует 3 рабочие лопатки, суммарный шаг которых соответствует одному шагу сопловой решетки. В расчетной схеме поверхности профилей имеют тип стенки (wall), при этом для средней рабочей лопатки (выделена пунктирным прямоугольником на рисунке) все поверхности профиля представлены отдельными границами. Зоны течения (rotor и stator) разделены между собой границами с типом interface (rotor_interface и stator_interface соответственно), которые лежат на одной прямой и через них происходит взаимодействие между зонами течения.

Для задания режима течения, необходимо на входной области задать значения давления и температуры полного торможения, на выходном граничном условии – статическое давление. Кроме того, для зоны течения rotor должно быть определено значение скорости движения расчетной сетки (величина окружной скорости U на среднем диаметре ступени). В таблице приведены значения граничных условий:

№	inlet		outlet	Окружная скорость, м/с
		Давление полного торможения, МПа	Температура полного торможения, С	Статическое давление, МПа
1	1,1	200	0,8	150
2	1,2	220	0,9	155
3	1,3	230	1	160
4	1	180	0,7	165
5	0,9	190	0,6	170
6	0,8	200	0,5	175
7	0,7	230	0,4	180
8	1,6	240	1,3	185
9	1,5	250	1,2	190
10	1,4	260	1,1	195
11	1,3	240	1	200
12	0,8	230	0,5	195
13	0,7	220	0,4	190
14	0,6	240	0,3	185
15	1	300	0,7	180
16	1,1	310	0,8	175
17	1,2	320	0,9	170
18	1,3	230	1	165
19	1,4	240	1,1	160
20	1,5	250	1,2	155

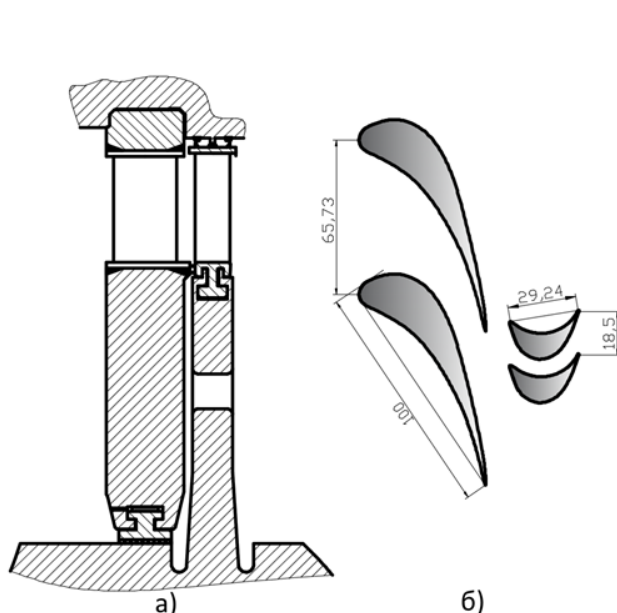


Figure 7 Ступень паровой турбины (а) и характеристики сопловой и рабочей решеток на среднем сечении (б)

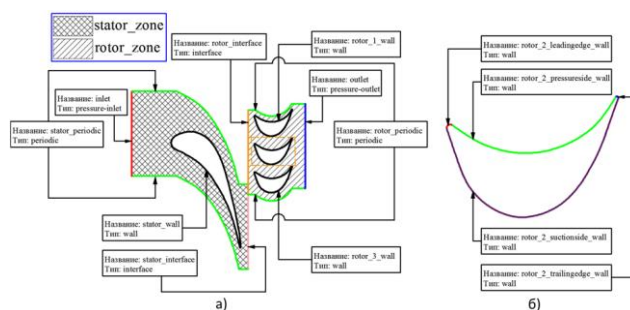


Figure 8 Расчетная схема

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: настраивать и проводить газодинамический расчет в решетках и ступенях турбомашин с учетом специфики подобных задач	1. Покажите, как настроить запись анимации параметров потока в Ansys Fluent. 2. Что такое interface, как он настраивается в Ansys Fluent? 3. Покажите, как воспроизвести записанную ранее анимацию изменения параметров в Ansys Fluent. 4. Покажите, как в Ansys Fluent настраивается подвижная зона ячеек.
Уметь: проводить стационарные и нестационарные газодинамические расчеты однофазных вязких течений в двумерной и трехмерной постановке	1. Расскажите, что такое тип Граничного условия Periodic и покажите, как он настраивается в Ansys Fluent. 2. Покажите основные этапы настройки нестационарного расчета в Ansys Fluent. 3. Покажите, как настроить запись в файл параметров нестационарного расчета. 4. Покажите, где в Ansys Fluent

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
	необходимо отмечать, что будет производиться нестационарный расчет.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил минимум на 4 вопроса из 5.

Оценка: 4 («хорошо»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 3 вопроса из 5.

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 2 вопроса из 5.

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если либо результаты расчета некорректны, либо студент ответил на 1 или ни на один вопрос из 5.

КМ-6. Контрольная работа. Расчет течения в двумерной постановке

Формы реализации: Компьютерное задание

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студент предоставляет на проверку файл с результатами расчета, а также требуемые в задании графические данные. Работа состоит из одной задачи. Время 90 минут.

Краткое содержание задания:

Рассчитать двумерное течение воды в канале с внезапным расширением. Расчетная схема представлена на рисунке. Рассмотреть два режима течения: при начальной скорости 2 м/с и 1 м/с. Граничные условия отображены в таблице. Считать, что на стенке top_wall отсутствует трение. В результате расчета каждого режима необходимо получить:

1. Картину распределения скоростей в канале (сохранить в виде рисунка).
2. Линии тока в основном потоке и в вихревой области (сохранить в виде рисунка).
3. Расход воды в канале.
4. Распределение скорости воды вдоль оси x на линии, изображенной на рисунке. Ее положение задано относительно пространственных осей.

ГУ		Режим 1	Режим 2
inlet	Скорость, м/с	2	1
	Температура полного торможения, К	300	300
outlet	Статическое давление, МПа	0,1	0,1

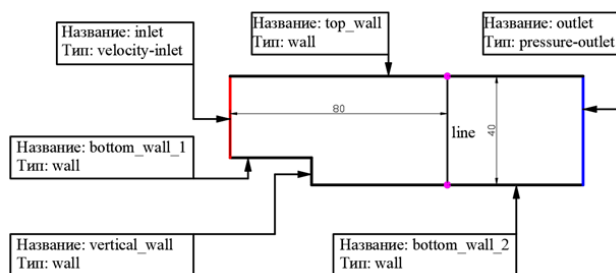


Figure 9 Геометрия расчетной области

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: проводить стационарные и нестационарные газодинамические расчеты однофазных вязких течений в двумерной и трехмерной постановке	1. Студент получил все требуемые в задаче результаты расчета.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, рассчитаны оба режима, получены все требуемые данные для каждого режима.

Оценка: 4 («хорошо»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, рассчитаны оба режима, выполнены 2 или 3 требуемых пункта.

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если либо результаты расчета корректны, рассчитаны оба режима, выполнен 1 требуемый пункт для каждого режима, либо результаты расчета корректны, рассчитан один режим (или оба), выполнены все требуемые пункт для одного режима.

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если либо результаты расчета некорректны, либо результаты расчета корректны, рассчитан один режим, выполнены не все требуемые пункты для одного режима.

КМ-7. Лабораторная работа 5. Моделирование течения в сопловой решетке осевой турбины

Формы реализации: Защита задания

Тип контрольного мероприятия: Лабораторная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студент предоставляет файл с результатами расчета, а также требуемые в задании графические данные. Файл открывается в программе Ansys Fluent. Преподаватель задает вопросы, связанные с процедурой проведения расчета. Студент демонстрирует свои знания непосредственно в программе.

Краткое содержание задания:

Цель. Изучить особенности моделирования течения и пост-обработки результатов в неподвижных элементах проточных частей турбомашин.

Задача. Провести моделирование течения воздуха в кольцевой решетке сопловых лопаток с малой относительной высотой. Необходимо провести моделирование течения потока воздуха в решетке для трех значений теоретических чисел Маха: 0,45; 0,65 и 0,85. Для рассматриваемых режимов применить модель турбулентности k-ε Realizable co

стандартной пристеночной функцией Standard Wall Function. В результате численного моделирования получить:

1. Для режима $M_{lt} = 0,45$ получить распределение давления полного торможения потока в среднем сечении решетки. Визуализировать распределение статического давления потока на поверхностях лопатки (входная, выходная кромки, спинка, корыто). Отобразить распределение потерь кинетической энергии потока на плоскости, расположенной на расстоянии 32 мм от выходной кромки лопатки.
2. Для всех рассматриваемых режимов по M_{lt} определить распределение потерь кинетической энергии потока за решеткой на плоскости, расположенной на расстоянии 32 мм от выходной кромки в 7 по высоте сечениях. Сравнить полученные результаты.
3. Для всех рассматриваемых режимов по M_{lt} определить среднеинтегральные (по расходу) потери кинетической энергии потока за решеткой на плоскости, расположенной на расстоянии 32 мм от выходной кромки.
4. Для всех рассматриваемых режимов по M_{lt} получить распределение скорости в среднем сечении лопатки вдоль шага решетки и в сечении, расположенном в пристеночной области решетки. Оба сечения расположены на расстоянии 32 мм от выходной кромки.
5. Сравнить распределение давлений по обводу профиля на среднем сечении лопатки для всех рассматриваемых режимов по M_{lt} .

Давление полного торможения перед решеткой для рассматриваемых случаев считать постоянным, оно составляет 115 кПа. Потери кинетической энергии определяются по приближенной формуле:

$$\zeta_i = \frac{2}{k-1} \frac{1}{M_{it}^2} \left[\left(\frac{p_0}{p_{oi}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

где k - показатель изоэнтропы (для воздуха $k = 1.4$); p_0 – давление полного торможения перед решеткой; p_{oi} – давление полного торможения в рассматриваемой точке; M_{lt} – теоретическое число Маха в рассматриваемой точке, определяемое как:

$$M_{lt} = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}$$

где p_i – статическое давление потока в рассматриваемой точке.

Описание геометрии исследуемого канала и граничных условий расчета. Внешний вид сопловой решетки представлен на рисунке. Лопатка ограничена бандажными лентами сверху и снизу. Корневой диаметр решетки оставляет 1094 мм, высота 27 мм; 100 лопаток формируют межлопаточный канал, геометрия которого в развертке на среднем диаметре представлена на рисунке. Внешний вид расчетной схемы представлен на рисунке. Моделирование ведется для области течения, вырезанной из кольцевого сектора и соответствующая шагу решетки. Это существенно ускоряет процесс расчета (по сравнению с моделированием всей кольцевой решетки) если предположить, что течение в каждом межлопаточном канале решетки одинаково. Для реализации подобного подхода используются специальные граничные условия на краях расчетной схемы: *periodic*. Они обеспечивают равенство параметров потока на этих областях. Система координат сориентирована как показано на рисунке. Ось z совпадает с осевым направлением турбины, x – с радиальным. Расположение нижней поверхности (имеющей цилиндрическую форму) вырезанного сектора расположена на радиусе 547 мм относительно оси турбины (что соответствует корневому радиусу решетки). При

проведении пост-обработки подобных расчетных схем, имеющих цилиндрическую форму, удобно проводить с помощью цилиндрической системы координат. Так в AnsysFluent это: Radial Coordinate (радиальная координата), Angular Coordinate (угловая координата), Axial Coordinate (осевая координата). На рисунке представлена поверхностная сетка лопатки и нижней бандажной ленты расчетной схемы. Положение плоскости для измерения потерь отображено в осевой координате относительно входной кромки. Для получения распределения потерь по высоте на этой поверхности необходимо задать 7 сечений, положение которых определяется радиальной координатой, которые представлены в таблице. Линия line_4 будет использована для определения распределения скорости потока вдоль шага решетки на среднем сечении (см. пункт 4 задания), линия line_7 – для распределения скорости в концевой области.

Имя линии	line_1	line_2	line_3	line_4	line_5	line_6	line_7
Радиальная координата, мм	547,5	552,0	556,3	560,5	564,8	569,0	573,5

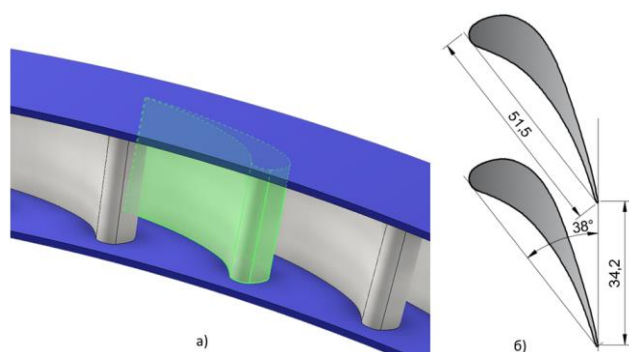


Figure 10 Внешний вид сопловой решетки (а) и геометрические характеристики межлопаточного канала на среднем диаметре (б)

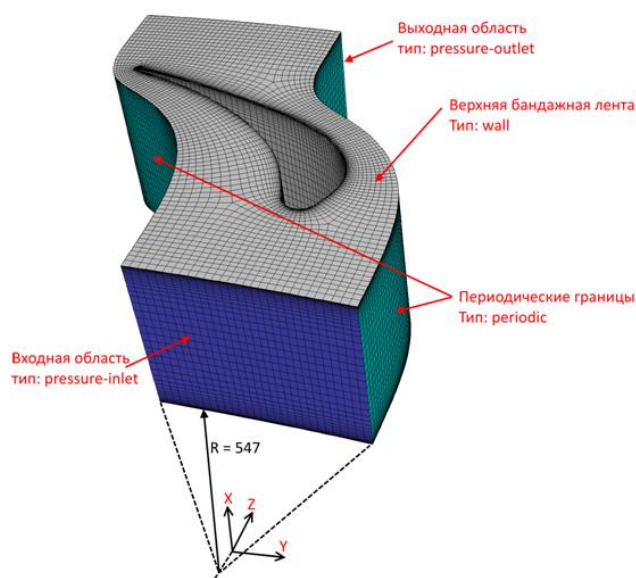


Figure 11 Внешний вид расчетной схемы

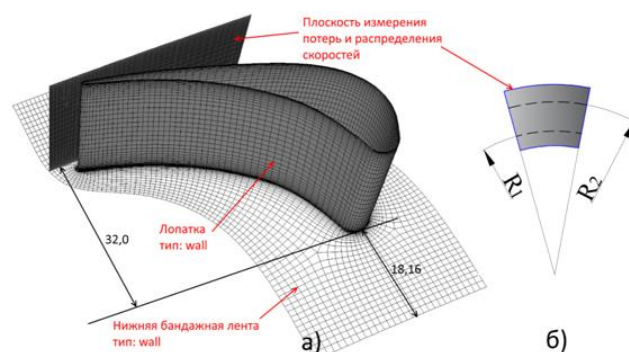


Figure 12 Положение элементов для измерения (а) и задание линий измерения потерь по высоте лопатки (б)

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: настраивать и проводить газодинамический расчет в решетках и ступенях турбомашин с учетом специфики подобных задач	1.Покажите, как в Ansys Fluent настроить периодические зоны в трехмерной расчетной схеме турбинной решетки. 2.Покажите, как в Ansys Fluent можно сгруппировать ГУ по их типу для удобства их настройки. 3.Покажите, как в Ansys Fluent работать с задачами, в которых несколько зон ячеек. 4.Покажите, как можно использовать координаты Axial, Radial и Angular для определения параметров потока в решетке (на примере построения распределения давления по обводу профиля или потерь за решеткой или построения контура скорости за решеткой). 5.Покажите, как настраивать схемы расчета в зависимости от решаемой задачи и особенностей имеющихся вычислительных мощностей.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил минимум на 4 вопроса из 5.

Оценка: 4 («хорошо»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 3 вопроса из 5.

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если результаты расчета корректны, студент ответил на 2 вопроса из 5.

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется, если либо результаты расчета некорректны, либо студент ответил на 1 или ни на один вопрос из 5.

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

2 семестр

Форма промежуточной аттестации: Зачет с оценкой

Процедура проведения

Зачет по совокупности результатов текущего контроля успеваемости.

I. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины

1. Компетенция/Индикатор: ИД-1_{РПК-5} Выполняет теоретические и экспериментальные исследования процессов, происходящих в объектах профессиональной деятельности

Вопросы, задания

1. По совокупности результатов текущего контроля успеваемости.

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Задания формируются случайным образом из базы заданий. В тестирование включены теоретические вопросы, предполагающие либо выбор одного верного ответа из предложенных, либо нескольких верных ответов из предложенных вариантов, и задания свободного изложения и(или) небольшие вычислительные задачи на основе КМ

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5 («отлично»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется по совокупности результатов текущего контроля успеваемости в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ».

Оценка: 4 («хорошо»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется по совокупности результатов текущего контроля успеваемости в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ».

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется по совокупности результатов текущего контроля успеваемости в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ».

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: выставляется по совокупности результатов текущего контроля успеваемости в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ».

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

Оценка определяется по совокупности результатов текущего контроля успеваемости в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ».