

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

**Направление подготовки/специальность: 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика**

**Наименование образовательной программы: Теплофизика и молекулярная физика**

**Уровень образования: высшее образование - магистратура**

**Форма обучения: Очная**

**Оценочные материалы  
по дисциплине  
Компьютерные коды для расчета теплогидравлических процессов в  
энергетическом оборудовании**

**Москва  
2022**

## ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Артемов В.И.
	Идентификатор	Rd0ce031d-ArtemovVI-сес0a72f

(подпись)

В.И. Артемов

(расшифровка  
подписи)

## СОГЛАСОВАНО:

Руководитель  
образовательной  
программы

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Яньков Г.Г.
	Идентификатор	Rbb1f0c84-YankovGG-11a2e4dc

(подпись)

Г.Г. Яньков

(расшифровка  
подписи)

Заведующий  
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Герасимов Д.Н.
	Идентификатор	Ra5495398-GerasimovDN-6b58615

(подпись)

Д.Н.  
Герасимов

(расшифровка  
подписи)

## 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. ПК-1 Способен анализировать и моделировать физические процессы, используемые в атомной энергетике

ИД-1 Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок

и включает:

**для текущего контроля успеваемости:**

Форма реализации: Защита задания

1. КМ-4 (Индивидуальный проект)

Форма реализации: Обмен электронными документами

1. КМ-1 (Индивидуальный проект)

2. КМ-2 (Индивидуальный проект)

3. КМ-3 (Индивидуальный проект)

### БРС дисциплины

1 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	5	8	12	16
Введение					
Введение	+				
Этапы решения прикладной задачи с использованием CFD кодов					
Этапы решения прикладной задачи с использованием CFD кодов	+				
Первое знакомство с кодом ANES					
Первое знакомство с кодом ANES	+				
Ф-переменные. Расчетная область. Граничные условия					
Ф-переменные	+				
Расчетная область			+		

Граничные условия		+		
Функциональное наполнение кода ANES				
Функциональное наполнение кода ANES		+		
Сетки контрольных объемов МКО				
Сетки контрольных объемов МКО		+		
Дискретные уравнения и методы их решения				
Дискретные уравнения и методы их решения			+	
Параллельные вычисления				
Параллельные вычисления			+	
Обработка результатов расчетов				
Обработка результатов расчетов				+
Открытый код OpenFOAM				
Открытый код OpenFOAM				+
Вес КМ:	20	30	30	20

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

## 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
ПК-1	ИД-1 <sub>ПК-1</sub> Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок	Знать: Визуальные способы представления результатов расчетов Методы решения дискретных уравнений с использованием итерационных алгоритмов Этапы решения прикладной задачи с помощью CFD кодов Типы сеток контрольных объемов метода МКО и принципы их построения Архитектуру, основное функциональное наполнение, математические модели и принципы работы современных компьютерных кодов для моделирования процессов термогидравлики в энергетических установках;	КМ-1 (Индивидуальный проект) КМ-2 (Индивидуальный проект) КМ-3 (Индивидуальный проект) КМ-4 (Индивидуальный проект)

		<p>Уметь: Уметь обрабатывать результаты расчетов с помощью постпроцессоров ANES и ParaView Привести описание своей задачи к математическим моделям кода ANES Использовать макропеременные ANES для описания математической постановки задачи Строить структурированные и неструктурированные сетки кода ANES Проводить расчеты с использованием Компилятора и Решателя кода ANES</p>	
--	--	--	--

## II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

### КМ-1. КМ-1

**Формы реализации:** Обмен электронными документами

**Тип контрольного мероприятия:** Индивидуальный проект

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проверка выполнения п. 1, 2 и 3 расчетного задания на основе отчета по расчетному заданию

#### Краткое содержание задания:

1. Формулировка физической и математической постановки задачи.
2. Выбор Ф-переменных прикладной задачи, макропеременных и формулировка граничных условий.
3. Построение расчетной области и задание необходимых патчей

#### Контрольные вопросы/задания:

Знать: Архитектуру, основное функциональное наполнение, математические модели и принципы работы современных компьютерных кодов для моделирования процессов термогидравлики в энергетических установках;	1.Какие физические процессы требуется смоделировать в индивидуальном задании? 2.Какие зависимые переменные необходимо использовать для моделирования? 3.Какие основные принципы выбора геометрии расчетной области?
Знать: Этапы решения прикладной задачи с помощью CFD кодов	1.Какие физические граничные условия необходимы для замыкания математической постановки задачи?
Уметь: Использовать макропеременные ANES для описания математической постановки задачи	1.Уметь использовать макропеременные проекта для описания параметров задачи
Уметь: Привести описание своей задачи к математическим моделям кода ANES	1. 1. Уметь привести математическую постановку своей задачи к математическим моделям кода ANES

#### Описание шкалы оценивания:

*Оценка:* зачтено

*Описание характеристики выполнения знания:* В целом выполнены все два пункта задания с отдельными ошибками, исправленными после первого контроля текста отчета

*Оценка:* не зачтено

*Описание характеристики выполнения знания:* Ошибки не исправлены после второго контроля текста отчета

### КМ-2. КМ-2

**Формы реализации:** Обмен электронными документами

**Тип контрольного мероприятия:** Индивидуальный проект

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 30**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проверка выполнения п. 4 и 5 расчетного задания на основе отчета по расчетному заданию

**Краткое содержание задания:**

1. Построение базовой численной сетки, доказательство сеточной сходимости.
2. Задание граничных условий на языке файла проекта кода ANES.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: Типы сеток контрольных объемов метода МКО и принципы их построения	1.Какие основные принципы построения “правильных” сеток КО?
Уметь: Проводить расчеты с использованием Компилятора и Решателя кода ANES	1.Уметь использовать операторы генератора сеток ANES для построения неоднородных структурированных сеток? 2.Уметь использовать операторы генератора сеток ANES для построения неоднородных неструктурированных сеток?

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка:* зачтено

*Описание характеристики выполнения знания:* В целом выполнены все два пункта задания с отдельными ошибками, исправленными после первого контроля текста отчета

*Оценка:* не зачтено

*Описание характеристики выполнения знания:* Ошибки не исправлены после второго контроля текста отчета

### **КМ-3. КМ-3**

**Формы реализации:** Обмен электронными документами

**Тип контрольного мероприятия:** Индивидуальный проект

**Вес контрольного мероприятия в БРС: 30**

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проверка выполнения п. 6 и 7 расчетного задания на основе отчета по расчетному заданию

**Краткое содержание задания:**

1. Выполнение расчетов. Анализ полученных результатов.
2. Обработка результатов и сравнение с имеющимися в литературе данными.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: Методы решения дискретных уравнений с использованием итерационных алгоритмов	1.Что является критерием получения правильных результатов расчета в процессе итерационного решения задачи в Решателе ANES?
Уметь: Строить структурированные и неструктурированные сетки кода ANES	1.Уметь использовать Постпроцессор ANES или постпроцессор ParaView для представления результатов моделирования (сетки КО, изоконтурные основные поля, различные графики в одномерных сечениях).

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка:* зачтено

*Описание характеристики выполнения знания:* В целом выполнены все два пункта задания с отдельными ошибками, исправленными после первого контроля текста отчета

*Оценка:* не зачтено

*Описание характеристики выполнения знания:* Ошибки не исправлены после второго контроля текста отчета

#### **КМ-4. КМ-4**

**Формы реализации:** Защита задания

**Тип контрольного мероприятия:** Индивидуальный проект

**Вес контрольного мероприятия в БРС:** 20

**Процедура проведения контрольного мероприятия:** Проверка выполнения п. 8 расчетного задания

**Краткое содержание задания:**

Окончательная подготовка отчета по расчетному заданию и краткой презентации.

**Контрольные вопросы/задания:**

Знать: Визуальные способы представления результатов расчетов	1.Знать все этапы решения индивидуальной задачи
Уметь: Уметь обрабатывать результаты расчетов с помощью постпроцессоров ANES и ParaView	1.Уметь кратко рассказать о полученных результатах

**Описание шкалы оценивания:**

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 85*

*Описание характеристики выполнения знания:*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания:*

# СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

## 1 семестр

**Форма промежуточной аттестации:** Экзамен

### Пример билета

1. Аппроксимация потока на гранях КО в задачах диффузии при произвольно изменяющемся коэффициенте диффузии. Стандартный вид дискретного аналога обобщенного дифференциального уравнения диффузии.
2. Стандартная  $k$ -е модель с пристеночными функциями. Реализация пристеночных функций при численном решении методом КО уравнения для *кинетической энергии* турбулентных пульсаций в приближении пограничного слоя

### Процедура проведения

Студентам выдаются билет из двух вопросов. Первый вопрос содержит теоретический материал, связанный с численными алгоритмами CFD кодов для решения уравнений гидродинамики и уравнений переноса. Второй вопрос посвящен главным математическим моделям CFD кодов - моделированию турбулентного переноса импульса и тепла. На ответ на вопросы отводится 1,5 часа.

### *1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины*

**1. Компетенция/Индикатор:** ИД-1ПК-1 Имеет навыки математического описания и моделирования процессов в рабочих телах и элементах энергетических установок

### Вопросы, задания

1. Обобщенное дифференциальное уравнение переноса. Физический смысл отдельных членов. Получение дискретного аналога методом контрольного объема. Стандартный вид дискретного аналога
2. Аппроксимация потока на гранях КО в задачах диффузии при произвольно изменяющемся коэффициенте диффузии. Стандартный вид дискретного аналога обобщенного дифференциального уравнения диффузии.
3. Особенности численного решения уравнений Навье-Стокса. Переменные завихренность — функция тока. Уравнение для давления. Особенности итерационного метода решения уравнения для давления.
4. Схемная диффузия. Причины появления схемной диффузии, методы, применяемые для ее уменьшения.
5. Для уравнения диффузии  $\text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) = 0$ 
  - 1) вывести дискретный аналог граничного условия III рода

$$\left(-\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial n}\right)_B = \alpha(\Phi_B - \Phi_f),$$

где  $n$  — внешняя нормаль к границе,  $\Phi_B$  — значение искомой функции в точке « $B$ », принадлежащей границе,  $\alpha$ ,  $\Phi_f$  — свободные параметры.

2) какие значения  $\alpha$  и  $\Phi_f$  должны быть заданы для того, чтобы в граничной точке « $B$ » рассчитанное значение искомой функции  $\Phi$  оказалось равным  $\Phi_0$ ?

6. Метод задания граничного условия II рода с помощью дополнительного источникового члена в примыкающем к границе КО

7.Используя схему с разностями против потока определите коэффициенты дискретного аналога для уравнения

$$\text{div}(\rho u \Phi - \Gamma \text{grad} \Phi) = 0$$

для внутреннего двумерного КО с узловой точкой «P» при условии  $\Gamma = 0$  во всей области, течение одномерное, сетки равномерные.

Направления течения см. на рис. 1, 2.

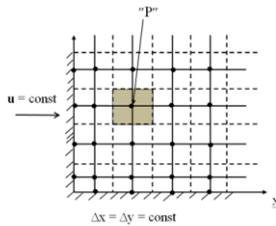


Рис. 1

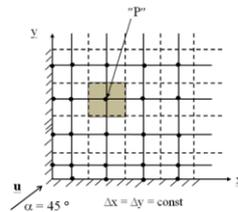


Рис. 2

8.«Шахматные» расчетные сетки КО для расчета поля скорости. Основные преимущества

9.Алгоритм SIMPLE

10.Алгоритм SIMPLER

11.Метод блокированных ячеек при расчете полей скорости и температуры в областях сложной геометрии. Метод задания произвольных значений зависимой переменной во внутренних точках расчетной области

12.Принципиальные проблемы прямого моделирования турбулентности. Осреднение Рейнольдса и Фавра. Рейнольдсовы напряжения.

13.Гипотеза Буссинеска. Основные недостатки гипотезы. Используемые аналогии между молекулярной и турбулентной вязкостями. Формула Прандтля для турбулентной вязкости. Пределы ее применимости, преимущества и недостатки.

14.Формула Прандтля—Колмогорова для турбулентной вязкости. Пример однопараметрической модели турбулентности, использующий формулу Прандтля—Колмогорова. Преимущества и недостатки модели.

15.Уравнение переноса для компонент тензора напряжений Рейнольдса

$$\left( -\rho \overline{u'_i u'_j} \right)$$

Физический смысл отдельных членов. Какие члены в этом уравнении требуют модельных замыкающих соотношений? Что изменится, если проделать свертку этого уравнения, т.е. принять  $i = j$ .

16.«Замыкание» уравнения для кинетической энергии турбулентных пульсаций

17.Качественное поведение характеристик турбулентности в сдвиговых пристеночных слоях

18.Стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель с пристеночными функциями. Реализация пристеночных функций при численном решении методом КО уравнения движения в приближении пограничного слоя

19.Стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель с пристеночными функциями. Реализация пристеночных функций при численном решении методом КО уравнения энергии в приближении пограничного слоя

20. Стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель с пристеночными функциями. Реализация пристеночных функций при численном решении методом КО уравнения для *кинетической энергии* турбулентных пульсаций в приближении пограничного слоя
21. Отличие  $k$ - $\epsilon$  моделей турбулентности для расчета течений с низкими числами  $Re_t$  от стандартной  $k$ - $\epsilon$  модели.
22. Алгебраическая модель для рейнольдсовых напряжений. Примеры применения.

### Материалы для проверки остаточных знаний

1. Что лежит в основе МКО?

Ответы:

Интегральные балансы импульса и массы, записанные для каждого контрольного объема  
 Аппроксимация частных производных в уравнениях баланса с помощью рядов Тейлора  
 Вариационный подход, основанный на минимизации соответствующей величины - функционала

Верный ответ: Интегральные балансы импульса и массы, записанные для каждого контрольного объема

2. В чем заключается главное отличие структурированных и неструктурированных сеток?

Ответы:

В структурированных сетках КО можно однозначно пронумеровать с помощью трех одномерных индексов

КО структурированных сеток всегда имеют форму параллелепипеда

Расчетная область при использовании структурированных сеток всегда имеет форму параллелепипеда

Верный ответ: В структурированных сетках КО можно однозначно пронумеровать с помощью трех одномерных индексов

3. Что обозначают первые два символа в названии алгоритма SIMPLE?

Ответы:

Semi-Implicit (Полунеявный)

Simple Integration (Простое интегрирование)

Staggered Interpolation (Сдвинутая интерполяция)

Верный ответ: Semi-Implicit (Полунеявный)

4. Что такое шахматные сетки?

Ответы:

Это структурированные сетки, в которых компоненты вектора скорости определены на гранях КО

Это неструктурированные сетки, в которых форма КО чередуется в направлении осей координат

Это структурированные сетки, в которых ширина КО периодически меняется в направлении осей координат

Верный ответ: Это структурированные сетки, в которых компоненты вектора скорости определены на гранях КО

5. Какие условия накладываются на коэффициенты нижней релаксации для скоростей при использовании метода SIMPLE на шахматных структурированных сетках?

Ответы:

$Relax(U) \leq 0.5$

$Relax(U) = 0.9$

$Relax(U) \geq 0.5$

Верный ответ:  $Relax(U) \leq 0.5$

6. Основные особенности системы дискретных уравнений Навье-Стокса в методе МКО?

Ответы:

Это нелинейная система алгебраических уравнений (коэффициенты уравнений зависят от зависимых переменных) и матрица этой системы сильно разреженная

Матрица этой системы имеет трехдиагональную структуру

Коэффициенты дискретных уравнений могут иметь разные знаки

Верный ответ: Это нелинейная система алгебраических уравнений (коэффициенты уравнений зависят от зависимых переменных) и матрица этой системы сильно разреженная

7. Какие операторы в файле проекта кода ANES используются для описания формы и границ расчетной области?

Ответы:

Операторы зон для построения сеток КО по осям координат

Операторы описания патчей

Операторы описания свойств теплоносителя

Верный ответ: Операторы описания патчей

8. Какой критерий используется в коде ANES (и других CFD) кодах для получения решения итерационным методом?

Ответы:

Достигнуто заданное число итераций

Безразмерная невязка дискретных уравнений  $< 1.e-4 .. 1.e-5$

Достигнуто заданное время расчета

Верный ответ: Безразмерная невязка дискретных уравнений  $< 1.e-4 .. 1.e-5$

9. Какой алгоритм распараллеливания расчетов CFD задач используется при работе с подсистемой MPI (Интерфейс Передачи Сообщений)?

Ответы:

Разбиение расчетной области на подобласти, число которых равно числу используемых ядер кластера

Распараллеливание циклов внутри программного кода

Верный ответ: Разбиение расчетной области на подобласти, число которых равно числу используемых ядер кластера

10. Что такое сеточная сходимость?

Ответы:

Выбор базовой сетки КО для расчетов на основе сравнения результатов на серии все более мелких детальными сетками

Выбор сетки на основе минимального числа итераций, необходимых для сходимости итерационного процесса

Верный ответ: Выбор базовой сетки КО для расчетов на основе сравнения результатов на серии все более мелких детальными сетками

11. Как в коде ANES описываются граничные условия?

Ответы:

\* Как линеаризованные поверхностные источники, привязанные к граням границы расчетной области

Как выражения для граничного значения  $\Phi$ -переменной, заданные в специальных нулевых КО на границе

Верный ответ: Как линеаризованные поверхностные источники, привязанные к граням границы расчетной области

12. Какая модель турбулентности не требует привлечения дополнительной эмпирической информации для замыкания математической постановки?

Ответы:

DNS модель

Алгебраическая модель Прандтля

Двухпараметрическая k-eps модель

Верный ответ: DNS модель

13. При использовании двухпараметрических моделей турбулентности с *пристенными функциями* необходимо, чтобы безразмерное расстояние от центра пристенного контрольного объема до стенки ( $Y^+$ ) удовлетворяло условию:

Ответы:

$$Y^+ < 1$$

$$Y^+ > 30-40$$

$$Y^+ = 10$$

Верный ответ:  $Y^+ > 30-40$

14. При использовании двухпараметрических моделей турбулентности для низких турбулентных чисел Рейнольдса необходимо, чтобы безразмерное расстояние от центра пристенного контрольного объема до стенки ( $Y^+$ ) удовлетворяло условию:

Ответы:

$$Y^+ < 1$$

$$Y^+ > 30-40$$

$$Y^+ = 20$$

Верный ответ:  $Y^+ < 1$

15. В двухпараметрической  $k$ - $\epsilon$ s модели турбулентности первая  $\Phi$ -переменная –  $k$  – это энергия турбулентных пульсаций, какой физический смысл имеет вторая  $\Phi$ -переменная  $\epsilon$ s?

Ответы:

Это характерное время жизни турбулентных вихрей

Это скорость диссипации турбулентной энергии

Это характерное масштаб турбулентных вихрей

Верный ответ: Это скорость диссипации турбулентной энергии

## ***II. Описание шкалы оценивания***

*Оценка: 5*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 90*

*Описание характеристики выполнения знания: Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений*

*Оценка: 4*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 80*

*Описание характеристики выполнения знания: Большинство ответов даны верно. Не на все дополнительные ответы даны правильные ответы*

*Оценка: 3*

*Нижний порог выполнения задания в процентах: 70*

*Описание характеристики выполнения знания: Ответы на вопросы очень поверхностные. На некоторые дополнительные вопросы ответы были неправильные*

## ***III. Правила выставления итоговой оценки по курсу***

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ "МЭИ" на основании семестровой и аттестационной составляющих.