

**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: Прикладная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Рабочая программа дисциплины**  
**ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

<b>Блок:</b>	Блок 1 «Дисциплины (модули)»
<b>Часть образовательной программы:</b>	Часть, формируемая участниками образовательных отношений
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	Б1.Ч.11.01.01
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	3 семестр - 4;
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	144 часа
<b>Лекции</b>	3 семестр - 32 часа;
<b>Практические занятия</b>	3 семестр - 16 часов;
<b>Лабораторные работы</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Консультации</b>	3 семестр - 2 часа;
<b>Самостоятельная работа</b>	3 семестр - 93,5 часа;
<b>в том числе на КП/КР</b>	не предусмотрено учебным планом
<b>Иная контактная работа</b>	проводится в рамках часов аудиторных занятий
<b>включая:</b>	
<b>Проверочная работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	3 семестр - 0,5 часа;

**Москва 2023**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**

**Преподаватель**

(должность)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	<b>Сведения о владельце ЦЭП МЭИ</b>	
	Владелец	Лукашевский М.В.
	Идентификатор	Re4b7e3cb-LukashevskyMV-6844ab

(подпись)

**М.В.**

**Лукашевский**

(расшифровка подписи)

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель  
образовательной  
программы**

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	<b>Сведения о владельце ЦЭП МЭИ</b>	
	Владелец	Лукашевский М.В.
	Идентификатор	Re4b7e3cb-LukashevskyMV-6844ab

(подпись)

**М.В.**

**Лукашевский**

(расшифровка подписи)

**Заведующий выпускающей  
кафедрой**

(должность, ученая степень, ученое  
звание)

	<b>Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»</b>	
	<b>Сведения о владельце ЦЭП МЭИ</b>	
	Владелец	Дедов А.В.
	Идентификатор	R72c90f41-DedovAV-d71cc7f4

(подпись)

**А.В. Дедов**

(расшифровка подписи)

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** изучение физико-технических процессов, протекающих в системах термоядерного реактора, обеспечивающих многократную циркуляцию топлива, поддержание параметров плазмы и безопасную эксплуатацию установки

### Задачи дисциплины

- изучение факторов, определяющих состав топливного цикла и требования к системам;
- изучение физики процессов в технологических системах топливного цикла термоядерного реактора;
- приобретение навыков принятия и обоснования конкретных технических решений при последующем конструировании элементов плазменных и теплофизических установок.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-2 Способен применять расчетно-теоретические методы и экспериментальные навыки исследования процессов, используемых в атомной энергетике, термоядерных исследованиях, плазменных установках	ИД-5ПК-2 Знаком с технологическими процессами, протекающими в плазменных установках различных типов	знать: - основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора; - процессы в вакуумной камере термоядерного реактора.  уметь: - определять архитектуру систем топливного цикла термоядерного реактора и требования к ним; - планировать и проводить численные и экспериментальные исследования потоков изотопов водорода в технологических системах.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Прикладная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез (далее – ОПОП), направления подготовки 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - магистратура.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать дисциплины: «Иностранный язык», «Компьютерные технологии в ядерной энергетике и теплофизике», «Приборы и техника эксперимента», «Термоядерные экспериментальные реакторы», «Взаимодействие частиц и излучений с конструкционными материалами», «Теплообмен и гидродинамика в термоядерных установках»

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часа.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа							СР				
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора	12	3	6	-	-	-	-	-	-	-	6	-	<p><b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора"</p> <p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], Глава 1 [2], Главы 1, 13, 15, 16 [3], Часть 1</p>	
1.1	Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора	12		6	-	-	-	-	-	-	-	6	-		
2	Процессы в вакуумной камере термоядерного реактора	22		8	-	2	-	-	-	-	-	-	12		-
2.1	Процессы в вакуумной камере термоядерного реактора	22		8	-	2	-	-	-	-	-	-	12		-

														<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], Глава 2 [2], Главы 10, 11, 12 [3], Часть 1
3	Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора	22	8	-	2	-	-	-	-	-	-	12	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора" <b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b>
3.1	Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора	22	8	-	2	-	-	-	-	-	-	12	-	Изучение материала по разделу "Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], Глава 1 [3], Часть 1
4	Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них	52	10	-	12	-	-	-	-	-	-	30	-	<b><u>Подготовка к текущему контролю:</u></b> Повторение материала по разделу "Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них" <b><u>Подготовка к практическим занятиям:</u></b>
4.1	Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них	52	10	-	12	-	-	-	-	-	-	30	-	Изучение материала по разделу "Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них" подготовка к выполнению заданий на практических занятиях <b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение

													дополнительного материала по разделу "Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], глава 3 [3], Часть 2
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	Всего за семестр	144.0	32	-	16	-	2	-	-	0.5	60	33.5	
	Итого за семестр	144.0	32	-	16		2		-	0.5		93.5	

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПП – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

### **3.2 Краткое содержание разделов**

#### 1. Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора

##### 1.1. Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора

Общая характеристика предмета. Основные проблемы и подходы к их решению. Фундаментальные и прикладные аспекты. Безопасность термоядерного реактора. Элементы систем топливного цикла, физические процессы. Балансовые уравнения. Методы моделирования.

#### 2. Процессы в вакуумной камере термоядерного реактора

##### 2.1. Процессы в вакуумной камере термоядерного реактора

Динамика частиц топлива в плазме термоядерного реактора. Взаимодействие изотопов водорода с поверхностью твердых тел. Методы моделирования.

#### 3. Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора

##### 3.1. Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора

Технологии обращения с изотопами водорода. Кандидатные технологии для систем топливного цикла термоядерного реактора. Методика определения уровня технологической зрелости. Формирование замкнутого газового контура из систем, их интеграция.

#### 4. Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них

##### 4.1. Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них

Основные теоретические модели и подходы, используемые в численном моделировании экспериментов. Концепция комплексного расчетно-теоретического и экспериментального исследования многофакторных и многомасштабных явлений и процессов.

### **3.3. Темы практических занятий**

1. . Определение диапазона потоков компонентов топлива термоядерного реактора для обеспечения параметров плазмы;
2. Расчет источников топливных частиц в плазме и в инжекционных системах;
3. Концептуальное проектирование установок для отработки основных физических механизмов в системах топливного цикла.

### **3.4. Темы лабораторных работ**

не предусмотрено

### **3.5 Консультации**

#### Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Процессы в вакуумной камере термоядерного реактора"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора"

4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них"

### **3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ**

Курсовой проект/ работа не предусмотрены

### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)				Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	
<b>Знать:</b>						
процессы в вакуумной камере термоядерного реактора	ИД-5ПК-2		+			Проверочная работа/Потоки частиц в вакуумной камере
основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора	ИД-5ПК-2	+				Проверочная работа/Принципы организации топливного цикла термоядерного реактора и специальные вопросы физических процессов в нем
<b>Уметь:</b>						
планировать и проводить численные и экспериментальные исследования потоков изотопов водорода в технологических системах	ИД-5ПК-2				+	Проверочная работа/Расчет источников топливных частиц в плазме и в инжекционных системах, диапазона потоков компонентов топлива термоядерного реактора для обеспечения параметров плазмы
определять архитектуру систем топливного цикла термоядерного реактора и требования к ним	ИД-5ПК-2			+		Проверочная работа/Концептуальное проектирование стендов/установок для отработки основных физических механизмов в системах топливного цикла

## **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**3 семестр**

Форма реализации: Устная форма

1. Концептуальное проектирование стендов/установок для отработки основных физических механизмов в системах топливного цикла (Проверочная работа)
2. Потoki частиц в вакуумной камере (Проверочная работа)
3. Принципы организации топливного цикла термоядерного реактора и специальные вопросы физических процессов в нем (Проверочная работа)
4. Расчет источников топливных частиц в плазме и в инжекционных системах, диапазона потоков компонентов топлива термоядерного реактора для обеспечения параметров плазмы (Проверочная работа)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

Экзамен (Семестр №3)

В диплом выставляется оценка за 3 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Мирнов, С. В. Физические процессы в плазме токамака / С. В. Мирнов . – М. : Энергоатомиздат, 1983 . – 185 с.;
2. Роуз, Д. Дж. Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции / Д. Дж. Роуз, М. Кларк . – М. : Госатомиздат, 1963 . – 487 с.;
3. Tanabe T.- "Interactions of hydrogen with fusion reactor materials", Издательство: "НИЯУ МИФИ", Москва, 2019 - (152 с.)  
<https://e.lanbook.com/book/175433>.

### **5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:**

1. СДО "Прометей";
2. Office / Российский пакет офисных программ;
3. Windows / Операционная система семейства Linux;
4. Майнд Видеоконференции.

### **5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:**

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. ЭБС "Университетская библиотека онлайн" - [http://biblioclub.ru/index.php?page=main\\_ub\\_red](http://biblioclub.ru/index.php?page=main_ub_red)

3. База данных журналов издательства Elsevier - <https://www.sciencedirect.com/>
4. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
5. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
6. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
7. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
8. Журналы American Physical Society - <https://journals.aps.org/about>
9. Журналы Institute of Physics (IOP), Великобритания - <https://iopscience.iop.org/>
10. Журналы издательства Oxford University Press - <https://academic.oup.com/journals/>
11. База данных диссертаций ProQuest Dissertations and Theses Global - <https://search.proquest.com/pqdtglobal/index>
12. Журнал Science - <https://www.sciencemag.org/>
13. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
14. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>
15. АНО «Россия – страна возможностей» - <https://rsv.ru/education/>

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	А-110, Вычислительная лаборатория	стол преподавателя, стол компьютерный, стул, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, указка лазерная, многофункциональный центр, сервер, компьютер персональный, принтер, наборы демонстрационного оборудования
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	А-110, Вычислительная лаборатория	стол преподавателя, стол компьютерный, стул, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, указка лазерная, многофункциональный центр, сервер, компьютер персональный, принтер, наборы демонстрационного оборудования
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	А-110, Вычислительная лаборатория	стол преподавателя, стол компьютерный, стул, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, указка лазерная, многофункциональный центр, сервер, компьютер персональный, принтер, наборы демонстрационного оборудования
Помещения для самостоятельной работы	А-110, Вычислительная лаборатория	стол преподавателя, стол компьютерный, стул, доска интерактивная, компьютерная сеть с выходом в Интернет, мультимедийный проектор, указка лазерная, многофункциональный центр, сервер, компьютер персональный, принтер, наборы демонстрационного оборудования
Помещения для консультирования	А-208, Преподавательская	кресло рабочее, рабочее место сотрудника, стол, шкаф для документов, компьютерная сеть с выходом в Интернет, колонки, компьютер персональный, принтер
Помещения для	А-025, Кладовка	стеллаж, оборудование специализированное

хранения оборудования и учебного инвентаря	лабораторного оборудования	
--	-------------------------------	--

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

### Топливный цикл термоядерного реактора

(название дисциплины)

#### 3 семестр

#### Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Принципы организации топливного цикла термоядерного реактора и специальные вопросы физических процессов в нем (Проверочная работа)
- КМ-2 Потоки частиц в вакуумной камере (Проверочная работа)
- КМ-3 Концептуальное проектирование стендов/установок для отработки основных физических механизмов в системах топливного цикла (Проверочная работа)
- КМ-4 Расчет источников топливных частиц в плазме и в инжекционных системах, диапазона потоков компонентов топлива термоядерного реактора для обеспечения параметров плазмы (Проверочная работа)

#### Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	12	16
1	Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора					
1.1	Основы архитектуры систем топливного цикла термоядерного реактора		+			
2	Процессы в вакуумной камере термоядерного реактора					
2.1	Процессы в вакуумной камере термоядерного реактора			+		
3	Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора					
3.1	Технологические решения для систем топливного цикла термоядерного реактора				+	
4	Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них					
4.1	Численное моделирование элементов систем топливного цикла и экспериментальные методы исследования процессов в них					+
Вес КМ, %:			16	16	28	40