

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лекция 1. Некоторые проблемы развития энергетики	5
1. Прогнозируемые потребности в энергии	7
2. Ресурсы ископаемых источников энергии	8
3. Ресурсы возобновляемых источников энергии	9
4. Влияние на окружающую среду	11
5. Ресурсы и особенности термоядерной энергетики	13
Лекция 2. Физические основы УТС: Основные понятия. Необходимые условия реализации УТС.....	15
1. Ядерная энергия	17
2. Энергия связи ядер. Синтез и деление.....	17
3. Кулоновский барьер	18
4. Основные реакции синтеза.....	19
5. Процессы синтеза в звездах и на Земле.....	19
6. Сечения реакций синтеза.....	20
7. Ускоритель + твёрдая мишень?	21
8. Баланс энергии в плазме. Критерий Лоусона.....	22
Лекция 3. Физические основы УТС: Движение частиц в электрических и магнитных полях. Удержание плазмы. Неустойчивости плазмы	27
1. Плазма: квазинейтральность	29
2. Виды плазмы	30
3. Как удержать высокотемпературную плазму?.....	31
4. Параметр β . Оценка величины магнитного поля, требующегося для реактора	33
5. Удержание магнитным полем в пробочной ловушке. Продольный адиабатический инвариант	35
6. Удержание магнитным полем в тороидальной ловушке. Основные виды дрейфа частиц, связанного с неоднородностью магнитного поля.....	36

7. Соударения частиц. Процессы переноса в магнитном поле.....	38
8. Понятие об основных неустойчивостях плазмы.....	39

Лекция 4. Установки с магнитным удержанием плазмы типа Токамак.....41

1. Краткая история развития токамаков	43
2. Основные подсистемы токамака.....	47

Лекция 5. Установки типа Токамак. Сценарий разряда плазмы.....49

1. Базовый сценарий разряда плазмы, его основные стадии.....	51
2. Основные барьеры на пути достижения термоядерных параметров плазмы в токамаке	54

Лекция 6. Установки типа Токамак. Область рабочих параметров плазмы55

1. Ограничения на запас устойчивости q_{95}	58
2. Ограничения на плотность плазмы n_e	59
3. Ограничения на полоидальную бэ́та плазмы β_p	61
4. Ограничения на нормализованную бэ́та плазмы β_N	62
5. Ограничения на вытянутость сечения плазмы k	64

Лекция 7. Установки типа Токамак. Равновесие плазмы65

1. Математические модели описания поведения плазмы в токамаке.....	67
2. Исходные уравнения равновесия плазмы, характер приближений	69
3. Уравнение Грэ́да-Шафранова	70
4. Прямая и обратная задача равновесия плазмы в токамаке.....	70

Лекция 8. Установки типа Токамак. Нагрев плазмы73

1. Омический нагрев плазмы.....	75
2. Нагрев плазмы нарастающим магнитным полем.....	76
3. Инжекция нейтралов	77
4. ВЧ методы нагрева	79

Дополнение 1. Термоядерный и ускорительный режимы в плазме токамака	80
--	----

Лекция 9. Установки типа Токамак.	
Время удержания плазмы в токамаке τ_E.....	85

1. "Ножницы" удержания плазмы в токамаке (оценки $\max$ и $\min \tau_E$).....	87
1.1. Оценки <i>снизу</i> для τ_E при наличии грубых дефектов в токамаке	88
1.2. Ограничение <i>сверху</i> на время удержания	92

Лекция 10. Установки типа Токамак.	
Время удержания плазмы в токамаке τ_E (продолжение)	93

2. "Неоклассическая" теория процессов переноса	95
3. Эмпирические скейлинги энергетического времени жизни плазмы	97
3.1. Выбор основных параметров, от которых зависит τ_E	98
3.2. Омические скейлинги	98
3.3. Скейлинги L-моды удержания при дополнительном нагреве плазмы.....	99
3.4. Пороговая мощность перехода в режим улучшенного удержания.....	99
3.5. Скейлинги H-моды удержания при дополнительном нагреве плазмы.....	100
4. Время удержания частиц плазмы.....	103

Лекция 11. Электромагнитная система токамака	105
---	------------

1. Тороидальная магнитная система.....	107
1.1. Магнитное поле тороидального соленоида.....	107
1.2. Магнитные поля рассеяния от переходных участков и токоподводов тороидального соленоида.....	109
1.3. Величина энергии, запасённой в тороидальном магнитном поле.....	111
1.4. Силы, действующие на тороидальную обмотку	112
1.5. Геометрия и электротехнические параметры тороидальной обмотки.....	113
2. Полоидальная магнитная система.....	115
2.1. Магнитное поле центрального соленоида.....	115
2.2. Запас магнитного потока и энергии в центральном соленоиде	117
2.3. Обмотки равновесия	118
2.4. Баланс полоидального потока в ходе разряда плазмы в токамаке.....	119
3. Инженерные вопросы создания обмоток магнитного поля токамака	124
3.1. Форма обмоток.....	124
3.2. Медные сплавы в качестве материала проводника обмоток.....	124
3.3. Сверхпроводящие магнитные системы	125
3.4. Криорезистивные (гиперпроводящие) магнитные системы.....	125
3.5. Перспективы использования высокотемпературной сверхпроводимости.....	125

Лекция 12. Оценка параметров токамака.....127

1. Оценка параметров реактора на основе токамака.....129
 - 1.1. "Большой" ИТЭР: оценка параметров132
 - 1.2. Оценка параметров ITER-FEAT.....138
- Дополнение 2. Оценка параметров исследовательского токамака (на примере KTM).....140*

Лекция 13. Варианты использования реакций синтеза147

1. Термоядерный энергетический реактор на основе токамака149
2. Системы синтез-деление151
3. Установки для выжигания радиоактивных отходов на основе систем синтез-деление с $M_E \approx 50 - 100$ 151
4. Использование других видов топлива151
5. Сферические токамаки152
- Дополнение 3. Мюонный катализ154*
- Дополнение 4. О возможности полётов к звёздам при использовании двигателей на основе реакций синтеза155*

**Лекция 14 Установки типа Токамак.
Неомические методы поддержания тока в плазме157**

1. Бутстреп-ток.....159
2. Основные параметрические зависимости для генерации токов увлечения160
3. Эффективность различных методов генерации токов увлечения162

Лекция 15 Статус экспериментальных исследований на токамаках167

1. Основные параметры современных токамаков.....169
2. Статус экспериментальных исследований на токамаках170

**Лекция 16 Физико-технические данные проекта
международного токамака – реактора ИТЭР177**

1. Цели, задачи, базовые параметры и история развития
проекта ИТЭР179
2. Данные по физике плазмы ИТЭР181
3. Параметры основных подсистем ITER-FEAT182
4. Диапазон изменения некоторых параметров в токамаке ITER183
5. Макетирование ключевых узлов ITER184
6. Организация и основные этапы программы работ на токамаке ИТЭР184

**Лекция 17 Альтернативные системы
магнитного удержания плазмы187**

1. Стелларатор189
 - 1.1. Основные виды стеллараторных винтовых обмоток190
 - 1.2. Основные отличия токамака и стелларатора190
 - 1.3. Форма магнитных поверхностей191
 - 1.4. Краткая история развития термоядерных исследований
на токамаках и стеллараторах192
 - 1.5. Некоторые экспериментальные результаты на стеллараторах193
2. Открытые ловушки198
 - 2.1. Время продольного удержания частиц198
 - 2.2. Принцип минимума В199
 - 2.3. Амбиполярные (тандемные) ловушки199
 - 2.4. Газодинамические ловушки200
 - 2.5. Пример современной открытой ловушки
для исследования удержания плазмы201
3. Пинчи (самосжимающиеся разряды)202
4. Сферомаки, компактные торы203

**Лекция 18 Инженерные системы токамака: вакуумная камера
и внутрикамерные элементы205**

1. Основные функции вакуумной камеры207
2. Критерии выбора материала первой стенки вакуумной камеры208
3. Некоторые решения по конструкции первой стенки токамаков209
4. О материалах вакуумной камеры ITER и малорадиоактивного
термоядерного реактора210

Лекция 19 Инженерные системы токамака: вакуумная система, система подачи топлива, тритиевый комплекс211

1. Состав вакуумно-тритиевого комплекса реактора-токамака	213
2. Основные понятия вакуумной техники	213
3. Требования к системам откачки.....	216
4. Основные типы вакуумных насосов	216
<i>Дополнение 5. Некоторые данные о системе откачки продуктов реакций синтеза в ИТЭР</i>	<i>218</i>
5. Подпитка топливом в ходе рабочего цикла (газонапуск, пеллет-инжекция)	220
6. Общие сведения о тритиевом цикле	221

Лекция 20 Инженерные системы токамака: бланкет и защита.....223

1. Функции бланкета и защиты.....	225
2. Простейшие сведения о процессах, сопровождающих прохождение ионизирующего излучения через вещество	226
3. Требования к параметрам защиты	228
4. Об идеологии выбора материалов защиты.....	229
5. Воспроизводство трития в бланкете	231
6. Некоторые варианты бланкетов термоядерных реакторов	232

Лекция 21 Вопросы прочности и устойчивости при конструировании электромагнитной системы и вакуумной камеры токамака.....235

1. Деформации, напряжения и условия механической прочности	237
2. Статические и циклические нагрузки.....	238
3. Оценка электромагнитных сил на обмотки токамака.....	240
4. Силы, действующие на вакуумную камеру токамака.....	241
5. Подходы к обеспечению прочности в элементах конструкции ЭМС	243
6. Прочность и устойчивость вакуумной камеры	244
7. Отклик при сейсмических нагрузках в ИТЭР – пример динамической задачи.....	245

Лекция 22 Система управления положением и формой плазмы в токамаках. Система управления установкой.....249

1. Несколько примеров стабилизации неустойчивых объектов.....251
2. Некоторые характеристики системы управления положением и формой плазмы в токамаках.....255

Лекция 23 Некоторые вопросы безопасности термоядерных реакторов (на примере ИТЭР)259

1. Преимущества термоядерных реакторов перед атомными.....261
2. Основные неблагоприятные факторы, связанные с работой ИТЭР.....261
3. Виды состояния установки (согласно российским документам).....263
4. Основные принципы и требования обеспечения безопасности.....263
5. Функции обеспечения безопасности (ФБ) и их исполнение265
6. Анализ безопасности ИТЭР266

Лекция 24 Инерциальный термоядерный синтез, основные принципы. Условие зажигания реакции. Требуемое значение коэффициента усиления энергии269

1. Исходные понятия и особенности инерциального УТС.....271
2. Анализ возможностей минимизации энергии драйвера274
 - 2.1. Параметры мишени и драйвера при нагреве твёрдого d-t топлива.....274
 - 2.2. Влияние плотности топлива.....275
 - 2.3. Использование драйвера как для нагрева, так и для сжатия мишени. Коэффициент сжатия275
 - 2.4. Изэнтропийное сжатие и форма импульса драйвера276
 - 2.5. Термоядерная вспышка276
 - 2.6. Основные стадии сжатия мишени на примере лазерного нагрева.....277
3. Максимально возможное значение коэффициента усиления Q. Требуемое значение Q278

Лекция 25 Инерциальный термоядерный синтез: драйверы.....281

1. Требуемые параметры драйвера	283
2. Основные типы драйверов для инерциального термоядерного синтеза и их особенности	284
2.1. Лазерный драйвер	284
2.2. Драйвер на основе пучков электронов и лёгких ионов	292
2.3. Драйвер на основе пучков тяжёлых ионов	295

Лекция 26 Мишени для инерциального термоядерного синтеза.....297

1. Исходные данные для выбора конструкции мишени	299
2. Основные ограничения при конструировании мишеней.....	301
3. Особенности конструкции различных видов мишеней.....	302
3.1. Мишени прямого облучения	302
3.2. Мишени непрямого облучения	305
4. Диагностика основных параметров мишеней	306

Лекция 27 Реакторные аспекты инерциального термоядерного синтеза (ИТС)309

1. Особенности энергетического реактора ИТС	311
1.1. Технические и технологические требования к элементам реактора ИТС	311
1.2. Энергетический цикл реактора	311
1.3. Камера	313
1.4. Бланкет	318
1.5. Изготовление и инжекция мишеней	318
1.6. Развитие драйверов.....	318

2. Некоторые оценки параметров реактора ИТС.....	319
2.1 Камера без защиты	320
2.2 Камера с жидкометаллической защитой стенок	321
2.3 Частота осуществления микровзрывов.....	322
3. Параметры некоторых проектов инерциальных термоядерных реакторов.....	322

Лекция 28 Системы питания установок управляемого термоядерного синтеза325

1. Накопители энергии	327
1.1. Емкостные накопители.....	328
1.2. Индуктивные накопители.....	328
1.3. Электромашинные накопители.....	329
1.4. Магнитокумулятивные генераторы	329
1.5. Импульсные МГД-генераторы.....	329
1.6. Химические источники питания	329
2. Ограничения на отбор мощности от энергосети.....	330
3. Системы электропитания токамаков	330
4. Особенности систем питания установок инерциального синтеза.....	337